

MARCO AURÉLIO MORAES DE MENDONÇA

**INVESTIGAÇÃO DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NO
BRASIL E SEUS EFEITOS NO POSICIONAMENTO POR
GNSS**

DISSERTAÇÃO

Presidente Prudente
2013

MARCO AURÉLIO MORAES DE MENDONÇA

**INVESTIGAÇÃO DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NO
BRASIL E SEUS EFEITOS NO POSICIONAMENTO POR
GNSS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Presidente Prudente, para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico.

FICHA CATALOGRÁFICA

M496i Mendonça, Marco Aurelio Moraes de.
Investigação da cintilação ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS / Marco Aurelio Moraes de Mendonça. - Presidente Prudente : [s.n], 2013
144 f.

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

1. Posicionamento por GNSS. 2. Clima Espacial. 3. Ionosfera. 4. Cintilação Ionosférica. 5. Análise Estatística I. Monico, João Francisco Galera. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARCO AURÉLIO MORAES DE MENDONÇA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, DO(A) FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE.

Aos 18 dias do mês de outubro do ano de 2013, às 14:00 horas, no(a) Sala de Apresentação de Projetos, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO do(a) Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, Prof. Dr. MARCELO TOMIO MATSUOKA do(a) Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES do(a) Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARCO AURÉLIO MORAES DE MENDONÇA, intitulado "INVESTIGAÇÃO DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NO BRASIL E SEUS EFEITOS NO POSICIONAMENTO POR GNSS". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO - Presidente da Banca


Prof. Dr. MARCELO TOMIO MATSUOKA


Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES

DADOS CURRICULARES

Marco Aurelio Moraes de Mendonça

NASCIMENTO: 22/06/1988 – São Paulo – SP

- | | |
|-----------|---|
| 2004-2005 | Curso Técnico
Técnico em elétrica e eletrônica
SENAI – Santo Paschoal Crepaldi |
| 2006-2010 | Graduação
Bacharelado em Engenharia Cartográfica
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP |
| 2011-2013 | Pós-Graduação
Mestrado em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP |

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Professor Dr. Galera e ao Grupo de Estudos em Geodésia Espacial. Sem a infraestrutura proporcionada por estes, tanto física quanto de conhecimento, tal pesquisa jamais deixaria de ser uma ideia para se tornar realidade.

À minha família que, não importa a dimensão do problema ou alegria, sempre se recusa a arredar pé do meu lado.

À Tânia, cujo agradecimento que gostaria de dar não cabe em poucas linhas, tampouco em uma Dissertação.

Aos amigos e companheiros de Graduação (Carto XXX) e Pós-Graduação, em especial aos que mais convivi durante esse terço da minha vida: Vinícius (Troposfatto), Henrique e George.

Ao Dr. Eurico de Paula, do INPE, por gentil e prontamente tirar as dúvidas que me surgiam e lhe eram solicitadas.

Ao Mestre Poleszuk pelas valiosas informações e correções nas análises das séries temporais.

Aos participantes do projeto CIGALA/CALIBRA, em especial ao Dr. Marcio Aquino, Dr. Luca Spogli e Dr. Bruno Bougard cujo conhecimento, desejo de inovar e de aprender jamais se esgotam.

Ao Eng. Gilberto Makoto da Consultgel pelo apoio nos trabalhos de campo.

Aos funcionários da Usina Guarani, em especial ao Eng. Marcel Chiovato pela disponibilização de equipamento e pelo inestimável suporte para a realização do experimento nas dependências da usina.

Aos alunos e professores da ESALQ – USP, em especial ao Prof. Dr. José Paulo Molin e ao Eng. Fernando Espolador pelo auxílio na realização do experimento conjunto.

Ao CNPQ e ao PPGCC pelo apoio logístico e financeiro para a realização dessa pesquisa.

*“The sun, with all those planets revolving around it
and dependent on it, can still ripen a bunch of
grapes as if it had nothing else in the universe to
do”*

Galileo Galilei

RESUMO

Inúmeros sistemas de navegação e comunicação dependem de ondas eletromagnéticas que propagam pela ionosfera em algum momento de seu processo de funcionamento. Sabe-se que a ionosfera terrestre é um meio dispersivo e altamente dinâmico, com características sazonais em escalas de tempo que variam de milissegundos a dezenas de anos. Outra característica é a variabilidade espacial da ionosfera, o que confere a esse tópico de estudo diferentes oportunidades de abordagem. Dentre os fenômenos que se passam na ionosfera, destaca-se a cintilação ionosférica. A cintilação é um dos efeitos presentes na ionosfera que mais afeta as atividades espaciais, em especial as de posicionamento e navegação por GNSS. Tendo em vista que essas atividades são, muitas vezes, essenciais a alguns setores da sociedade, ocorrências de cintilação podem se tornar um problema não só de âmbito acadêmico, mas também financeiro, e até de segurança. Atualmente, há um grande interesse da indústria, e uma grande aceitação em congressos de âmbito nacional e internacional por esse assunto, sendo assim, um campo aberto para pesquisas e novas ideias. Nessa Dissertação de Mestrado, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os efeitos que desencadeiam a cintilação ionosférica desde suas origens: o Sol e o interior da Terra. É tratada aqui uma abordagem de interpretação e correlação de índices de distúrbios magnéticos com seus efeitos observados nos receptores GNSS, quer seja em termos de qualidade do sinal, quer seja no resultado do posicionamento, sempre recorrendo aos fundamentos físicos envolvidos na aquisição de sinais advindos de satélites. Os resultados obtidos nessa pesquisa mostram que os sistemas comerciais de RTK constantemente fornecem ao usuário falsos negativos quando na presença de cintilação, informando uma posição dita fixa, porém com erros entre 40 cm e 1 metro, ao contrário dos 2,5 cm especificados pelo fabricante. No posicionamento PPP/DGNSS na presença de cintilação, notou-se que durante alguns minutos não há correções disponíveis, e, quando há, estes estão entre 3 e 4 vezes acima do valor máximo especificado de acurácia para a aplicação. Já no contexto do posicionamento geodésico, viu-se que os efeitos da parcela ionizada da atmosfera podem contaminar de diferentes maneiras o mesmo conjunto de dados dependendo do tipo do processamento. Logo, o usuário deve estar sempre atento à ocorrência do fenômeno da cintilação ionosférica, pois existe alta probabilidade de se obter resultados muito inferiores aos que são possíveis em tempos sem a interferência desse fenômeno.

Palavras-Chave: Posicionamento por GNSS, Clima Espacial, Ionosfera, Cintilação Ionosférica, Análise Estatística.

ABSTRACT

Several navigation and communication systems rely on electromagnetic waves that pass through the ionosphere at some moment of its working process. It's known that the Earth's ionosphere is a dispersive medium and highly dynamic, with seasonal characteristics that last from milliseconds to tens of years. Another important characteristic is the spatial variability of the ionosphere, which gives to this matter different approach opportunities. Among the phenomena that happen in the ionosphere, one of the most important is the ionospheric scintillation. The scintillation is an effect of the ionosphere that most affect spatial activities, specially the GNSS positioning and navigation activities. Knowing that those activities are, sometimes, essential to parts of society, scintillation occurrences may become an issue not only in the academic field, but also monetary and even a security problem. Nowadays, there is an expressive interest of industry and a good acceptance, nationally and internationally, on this subject, making this an open field of research and brainstorming. In this Master Degree thesis, there is a theoretical revision about the effects that triggers the ionospheric scintillation since its origins: the Sun and the Earth's inner layers. Therefore, it is described here an approach of interpretation and correlation of these indexes with the observed effects in GNSS receivers, either regarding the signal quality or the positioning result, always relying on the theoretical physics on signal acquisition from satellites. The results obtained in this research shows that the commercial RTK systems constantly gives to the user false negatives when in the presence of scintillation, informing a fixed position, but with errors between 40 cm and 1 meter, different from the 2.5 cm specified by the manufacturer. In the PPP/DGNSS positioning, under effect of scintillation, during a few minutes there were no corrections available and, when they were available, they are between 3 and 4 times over the maximum value of accuracy specified to this application. About the geodetic positioning context, the effects of the ionized layer of the atmosphere can contaminate in different ways the same data depending just on the type of processing applied. Hence, the user should be aware to the occurrence of the ionospheric scintillation phenomena, because there is a high probability that one may obtain considerably inferior results comparing with result of a time free from the interference of this phenomenon.

Key Words: GNSS positioning, Space Weather, Ionosphere, Ionospheric Scintillation, Statistical analysis.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO	15
2	CLIMA ESPACIAL	17
2.1	SOL	17
2.1.1	Núcleo	18
2.1.2	Zonas de Convecção e Radiação	19
2.1.3	Fotosfera	20
2.1.4	Cromosfera, Zona de Transição e Corona	23
2.1.5	Eventos Solares	24
2.1.5.1	Ejeção Coronal de Massa (ECM)	25
2.1.5.2	Solar Flares	27
2.1.5.3	Vento Solar	28
2.1.6	Monitoramento das atividades solares por satélites	31
2.2	ATMOSFERA TERRESTRE	33
2.2.1	Magnetosfera	33
2.2.2	Ionosfera Terrestre	38
2.2.2.1	Anomalia Magnética do Atlântico Sul	43
2.2.2.2	Anomalia de Ionização Equatorial	44
3	INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NO POSICIONAMENTO POR GNSS	50
3.1	REFRAÇÃO IONOSFÉRICA	50
3.2	CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA	54
3.2.1	Cintilação em amplitude	56
3.2.2	Cintilação em fase	61
3.2.3	Cintilação na região equatorial	63
3.3	MONITORAMENTO DO CLIMA ESPACIAL DA SUPERFÍCIE TERRESTRE	64
4	ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS	69
4.1	ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS POR WAVELETS	70
4.2	MODELAGEM ESTATÍSTICA DOS DADOS	72
4.2.1	Distribuições Weibull e Exponencial	72
4.2.2	Testes de aderência	74
4.3	INTERPOLAÇÃO DE DADOS PELO POLINÔMIO DE CHEBYSHEV	76
5	MATERIAIS E METODOLOGIA	78
5.2.1	Análise estatística espacial dos eventos de cintilação ionosférica no Brasil	80
5.2.2	Experimentos RTK no contexto da agricultura de precisão	83

5.2.2.1	Experimento RTK – Fazenda Guarani.....	84
5.2.2.2	Experimento RTK – ESALQ/USP	85
5.2.3	Experimento PPP/DGNSS no contexto do posicionamento offshore	86
5.2.4	Experimentos Relativo e PPP no contexto do posicionamento geodésico.....	87
6	RESULTADOS E ANÁLISES DOS EXPERIMENTOS.....	90
6.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA ESPACIAL DOS EVENTOS DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NO BRASIL	90
6.1.1	Filtragem, preparação e caracterização dos dados.....	90
6.1.2	Ajuste dos dados à distribuição Weibull e análise de qualidade.....	96
6.1.3	Análise probabilística dos resultados.....	99
6.1.4	Interpolação dos parâmetros pelo polinômio de Chebyshev	102
6.2	EXPERIMENTOS RTK NO CONTEXTO DA AGRICULTURA DE PRECISÃO	105
6.2.1	Experimento RTK Fazenda Guarani.....	105
6.2.2	Experimento RTK ESALQ/USP	112
6.3	EXPERIMENTO DGNSS/PPP NO CONTEXTO DO POSICIONAMENTO OFFSHORE	119
6.4	EXPERIMENTOS DE POSICIONAMENTO GEODÉSICO NOS PPP E RELATIVO	127
6.5.3	Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)	130
6.4.1	Posicionamento Relativo	132
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	137
	REFERÊNCIAS	141

1 INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) consiste num conjunto de satélites que enviam ondas eletromagnéticas com informações moduladas sobre os mesmos em direção a Terra visando proporcionar condições para o posicionamento no entorno da superfície terrestre. Esses sinais, enviados pelo GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) e outros sistemas futuros, sofrem interferências ao propagarem através da atmosfera terrestre, pois esta é composta de diferentes elementos com diferentes densidades e que apresentam influências distintas na onda, causando assim, certa contribuição a algumas alterações que ocorrem na propagação da onda eletromagnética que chega à antena do receptor (MONICO, 2008; CONKER *et al.*, 2002; McNAMARA, 1991).

Por todo o caminho que a onda percorre entre o satélite e a antena do receptor, há uma série de efeitos que acabam por interferir no sinal. No contexto da propagação de sinais, esses efeitos vão desde a atenuação da potência até alterações na direção de propagação e velocidade da onda. No campo da Geodésia Espacial, a atenção a tais efeitos é relativamente recente, e conforme a necessidade de maior acurácia no posicionamento aumenta, há também maior necessidade de melhor conhecimento e da consideração de tais interferências. Um dos fatores que mais interfere no sinal e que está frequentemente presente nos levantamentos é a cintilação ionosférica (McNAMARA, 1991; MONICO, 2008).

A cintilação ionosférica é um dos efeitos que ocorre na atmosfera terrestre e que acaba por degradar o sinal eletromagnético que por ela refrata devido às variações na quantidade de elétrons livres e, conseqüentemente, na formação do campo magnético nos pontos por onde os sinais se propagam (KELLEY, 2009). Quando o campo magnético é, portanto, alterado durante a passagem do sinal, este pode sofrer variações diretamente proporcionais à intensidade dessas mudanças (McNAMARA, 1991).

A investigação dos efeitos e das causas da cintilação tem sido um assunto muito abordado no campo da Geodésia e Aeronáutica, visto que seu comportamento varia significativamente, dependendo da região da Terra que se observa. De uma forma geral, estudos apontam algumas formas de se realizar a mitigação dos efeitos da cintilação. Entre as estratégias mais utilizadas, destacam-se a modelagem estatística dos dados (CONKER *et al.*, 2002) e também melhorias no hardware dos receptores (VAN DIERENDONCK, 1999). No entanto, nenhuma dessas técnicas mostrou-se totalmente eficaz contra os efeitos da cintilação ionosférica e muita pesquisa ainda se encontra aberta neste campo.

Atualmente, no Brasil, o monitoramento dos eventos de cintilação ionosférica com dados GNSS é feito por quatro principais projetos: Projeto LISN (*Low-latitude Ionosphere Sensor Network*), coordenado pelo Instituto Geofísico do Peru, Projeto Scintec, gerenciado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), Projeto CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) e Projeto CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in Brazil*), gerenciados por um projeto de cooperação internacional entre diversas entidades de pesquisa e desenvolvimento, estando entre elas a FCT/UNESP.

Há alguns anos, os projetos Scintec e LISN foram integrados, gerando uma única rede de receptores GPS modelo *GEC-Plessey*, e com dados disponíveis em tempo real e gratuitamente pela internet¹. As rede Scintec e LISN disponibilizam em sua página dados em tempo real e históricos de cintilação ionosférica, bem como de Conteúdo Total de Elétrons na atmosfera.

Além dos projetos em andamento que visam o estudo da ionosfera na região latino-americana, no ano de 2011 foi implantado no INPE o EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial). O EMBRACE, que trabalha lado a lado com o DAE (Divisão de Aeronomia) visa, como o nome sugere, o estudo e monitoramento do clima espacial feito no Brasil. Essa é uma iniciativa pioneira na região latino-americana que já apresenta resultados disponíveis ao público². É algo inovador, tendo em vista que esse é um tópico moderno, e com um amplo campo de pesquisa ainda em aberto que vem ganhando interesse da mídia e da sociedade em geral.

No que diz respeito ao estado da arte no escopo GNSS e cintilação ionosférica, alguns trabalhos apresentaram importantes avanços recentemente na mitigação desse efeito no posicionamento, bem como no entendimento dos processos que desencadeiam a cintilação, os quais serão relatados na sequência.

Nas últimas quatro décadas a cintilação ionosférica se tornou alvo frequente de estudos (AARONS, 1980, 1985; YEH; LIU, 1982; BASU AND BASU, 1985; 1993; BASU *et al.*, 2002; BHATTACHARYYA *et al.*, 1992). Porém, desde o pioneiro artigo de Van Dierendonck (1999) sobre os efeitos da cintilação ionosférica nos sinais GPS, onde era proposta uma forma de monitorar a cintilação utilizando receptores GPS relativamente simples, pouca coisa mudou na abordagem apresentada, porém, significativos avanços foram

¹ Cf. SCINTEC, 2013 - <http://www.inpe.br/scintec/pt/>

² Cf. EMBRACE, 2013 - <http://www.inpe.br/climaespacial/>

feitos na forma de análise. Van Dierendonck (1999) aborda os efeitos da cintilação em “Cintilação da Fase” e “Cintilação da Amplitude”, parâmetros que continuam sendo utilizados no monitoramento desses eventos. Com a possibilidade da parametrização da cintilação, foi possível, após coletas de dados mais robustos, uma melhor caracterização dessa parcela da atmosfera. Em Wernik *et al.* (2004) é realizada, utilizando as mesmas técnicas de Van Dierendonck, uma análise mais detalhada, bem como uma modelagem dos efeitos de cintilação ionosférica em uma porção da atmosfera terrestre. Na Figura 1 é mostrado um exemplo das regiões onde mais ocorrem as distorções de sinal na banda L, exatamente na faixa onde os sinais dos sistemas GNSS se encontram. É representado na figura um período de máximo e de mínimo de atividade solar. Características adicionais serão discutidas na seção referente à Anomalia Equatorial de Ionização e ao Clima Espacial (Capítulo 2).

Já a Figura 2 mostra o resultado da modelagem dos índices de cintilação em amplitude e em fase na região equatorial, tendo como eixo das abcissas o azimuth, e nas ordenadas o ângulo zenital considerado. O estudo e a modelagem desse comportamento proporcionou uma nova visão da influência dessa camada da atmosfera nos sistemas de navegação.

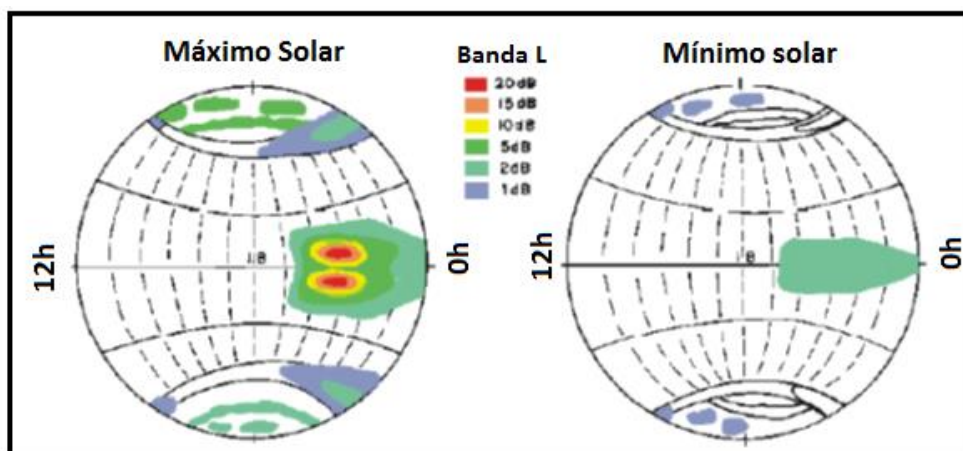


Figura 1 - Grau de distorção no sinal na banda L (Fonte: Adaptado de Basu *et al.* 2002 apud Wernik *et al.* 2004).

Recentemente, esforços vêm sendo concentrados na melhor aquisição dos parâmetros de cintilação com o uso de novas técnicas, como, por exemplo, o uso de *wavelets* (MUSHINI *et al.* 2011). Análises estatísticas da ocorrência desses eventos também vêm sendo abordadas de maneira sistemática (LI *et al.* 2010; ANDERSON, 2004). No Brasil, recentes estudos envolvendo a temática ionosfera-GNSS seguem a tendência internacional e abordam principalmente os efeitos na região equatorial (RODRIGUES, 2003; MATSUOKA,

CAMARGO, 2009; SALOMONI, 2009), técnicas de predição (REZENDE *et al.*, 2010) e estudo de irregularidades equatoriais (de PAULA, 2004).

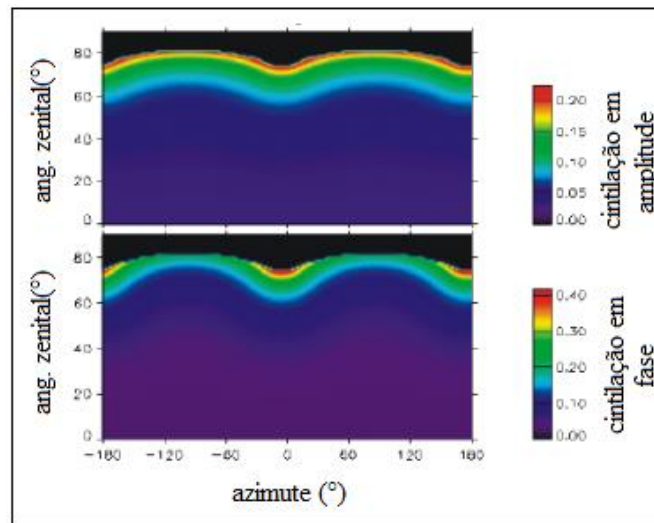


Figura 2 - Resultado da modelagem da distribuição dos índices de cintilação em amplitude e em fase na região equatorial (Fonte: Wernik *et al.*, 2004).

Tendo em vista o contexto apresentado e usando como base os conceitos dos estudos citados, foram exploradas no presente trabalho diferentes situações onde o efeito da cintilação ionosférica no posicionamento por GNSS se faz presente. Foram realizados também testes envolvendo dados afetados por eventos de cintilação ionosférica com o intuito de se analisar estatisticamente as séries temporais desse efeito, valendo-se, para isso, tanto de dados de diversos institutos de pesquisa na área, quanto do projeto CIGALA/CALIBRA, cujas estações serão detalhadas no Capítulo 6, em um período onde o número de manchas solares encontra-se no auge do ciclo 24 de atividade solar, com seu pico em meados de 2013 (NASA/GSFC, 2012).

1.1 Objetivos

Esta pesquisa tem como finalidade analisar e identificar os efeitos da cintilação ionosférica em diversas atividades de posicionamento no Brasil, bem como propor formas de avaliar esses efeitos por intermédio dos índices de cintilação e dados de análise estatística. Como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão das causas do efeito de cintilação ionosférica e do clima espacial, bem como da influência desses aspectos sobre o GNSS;

- Analisar séries temporais de parâmetros relativos à cintilação ionosférica com o intuito de descrever, parametrizar e modelar esse efeito nos sinais do GNSS;
- Realizar, descrever e analisar experimentos de campo relativos ao posicionamento por GNSS na presença de cintilação ionosférica;

1.2 Justificativa

A cintilação ionosférica é um efeito recorrente que acaba por inviabilizar soluções de posicionamento e navegação em algumas situações específicas, gerando prejuízos em serviços que dependem do posicionamento por satélites. Em diversos trabalhos acadêmicos esse problema foi constatado (CONKER *et al.*, 2002, AQUINO *et al.* 2007, STRANGWAYS, 2008), sendo ainda uma situação recorrente e sem solução definitiva, havendo assim, portanto, espaço para pesquisa, principalmente numa região que carece de estudos desse tipo, como é a América Latina e mais especificamente, o Brasil.

A condução dessa pesquisa na FCT/UNESP, mais especificamente no PPGCC (Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas), faz-se valer da estrutura disponível no Laboratório de Geodésia Espacial, do Grupo de Estudos em Geodésia Espacial e ainda do contexto dos projetos CIGALA/CALIBRA, o qual a UNESP é uma das participantes. Nesse escopo pode-se fazer uso da infraestrutura que viabiliza análises de interesse científico nessa área. Há a possibilidade do uso de receptores GNSS especializados para o rastreo e cálculo de parâmetros de distúrbios da ionosfera, trabalho em conjunto com entidades de pesquisa de renome internacional como a Universidade de Nottingham, no Reino Unido, e o INGV (*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*), além de haver um histórico de pesquisas nesse sentido no próprio programa de pós-graduação.

Vale também ressaltar, que a região latino-americana vem se desenvolvendo e demandando cada vez mais por coordenadas precisas em ambientes de levantamento em obras, exploração de petróleo, agricultura e etc. Nessa região, encontra-se um mercado em franca expansão desses produtos, por isso a relevância do tema e sua expressiva presença e aceitação em congressos nacionais e internacionais.

1.3 Conteúdo da Dissertação

Essa pesquisa inicia-se com uma introdução sobre o assunto abordado. Segue então, nos Capítulos 2, 3 e 4, com uma fundamentação sobre a ionosfera terrestre, e sobre os conceitos do clima espacial voltado para a correlação entre as atividades na superfície do Sol, magnetosfera e atmosfera terrestre e a refração de sinais. No

desenvolvimento apresentado nos Capítulos 5 e 6, são mostrados experimentos realizados com o intuito de provar a relação entre índices de distúrbios atmosféricos e erros no posicionamento por GNSS, bem como explicitar o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na compreensão e predição desses fenômenos. Por fim, no Capítulo 7, conclusões e recomendações relacionadas ao assunto tratado no decorrer da dissertação.

2 CLIMA ESPACIAL

Segundo Moldwin (2008), o clima espacial, ou *Space Weather*, refere-se às condições do Sol e do vento solar, da magnetosfera e ionosfera que possam vir a influenciar na confiabilidade de sistemas de tecnologias orbitais ou terrestres e que, também, possam vir a interferir na vida humana dependendo de sua intensidade. Condições adversas do clima espacial podem causar interrupção da operação de satélites, comunicações, navegação e redes de distribuição de energia, gerando uma série de prejuízos socioeconômicos.

Nesse contexto, serão descritos a seguir os aspectos do clima espacial que podem influenciar de alguma forma nos sistemas GNSS, seguindo a ordem de acontecimento dos eventos: primeiramente no Sol, a interface de ligação entre o Sol e a Terra (Magnetosfera), e finalmente a influência na atmosfera terrestre.

2.1 Sol

Com o advento das tecnologias espaciais e sistemas eletrônicos cada vez mais sensíveis, a sociedade tornou-se vulnerável aos distúrbios magnéticos originados fora da Terra, em particular, aqueles originados por eventos de origem solar.

O Sol é uma estrela localizada a cerca de 150 milhões de quilômetros da Terra, tendo uma superfície extremamente volátil e inconstante. Essa estrela contém cerca de $1,9 \times 10^{30}$ kg de massa, o que representa aproximadamente 99% de toda a massa do sistema solar.

Por intermédio da análise dos espectros de luz emitidos pelo Sol, é possível traçar com grande precisão sua composição. A Tabela 1 mostra essa composição em relação aos elementos presentes.

Tabela 1 - Elementos mais comuns presentes no Sol.

Elemento	Símbolo	Quantidade Relativa
Hidrogênio	H	92,1%
Hélio	He	7,8%
Oxigênio	O	0,061%
Carbono	C	0,030%
Nitrogênio	N	0,0084%

Fonte: Adaptado de MOLDWIN (2008).

Já a Figura 3 mostra o chamado “Modelo Padrão Solar”, onde são definidas as diferentes camadas da estrela.

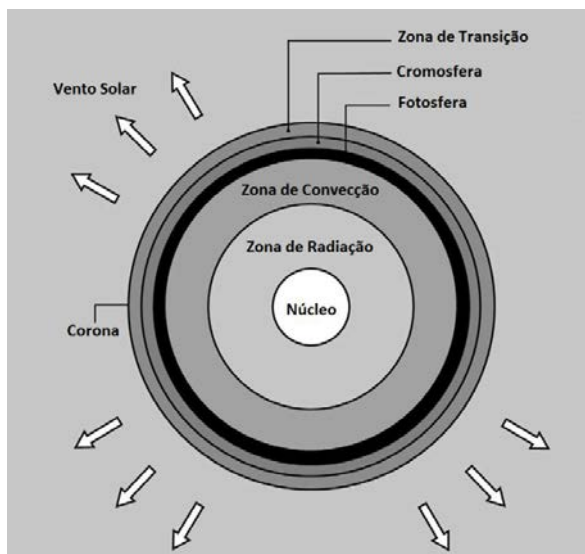


Figura 3 - Principais regiões do Sol (Fonte: Adaptado de Moldwin, 2008).

São descritas nesse capítulo cada uma das camadas mostradas na Figura 3, bem como os principais eventos solares com probabilidade de intervir na atmosfera terrestre.

2.1.1 Núcleo

No núcleo solar ocorre o fenômeno da fusão nuclear, onde os átomos de Hidrogênio são comprimidos pela gravidade solar e então fundidos se tornando elementos mais pesados, como Hélio ou o próprio Oxigênio. Essa reação nuclear é o “motor” do Sol, e reflete em sua superfície em forma de calor e emissão de partículas.

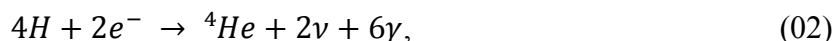
Em média, o Sol atinge a Terra com cerca de 1400 W de energia por metro quadrado. Toda essa energia advém da fusão nuclear, como dito anteriormente, que transforma massa em energia de acordo com a relação mostrada na Equação 1, proposta pelo físico alemão Albert Einstein,

$$E = mc^2, \quad (01)$$

onde E é a quantidade de energia em Joules, m é a massa em quilos e c a velocidade da luz no vácuo em metros por segundo.

Como mostra a Tabela 1, o Hidrogênio é o elemento mais comum na composição do Sol. Usando esse elemento como exemplo da transformação de massa em energia, pode-se ilustrar a reação que ocorre no núcleo solar: devido às altas temperaturas e à força da gravidade, os elétrons são separados dos núcleos de Hidrogênio que, sabe-se, é um elemento composto por um próton e um elétron apenas. Dessa forma, prótons que se

encontram sozinhos colidem e unem-se entre si formando um novo núcleo, agora composto por dois prótons e dois nêutrons, sendo assim, um núcleo de Hélio. A Equação 2 mostra de forma simplificada como se dá essa interação:



onde e^{-} é um elétron, ν uma partícula de tamanho infinitesimal chamada neutrino, e γ representando uma emissão de energia na frequência de raios gama.

Experimentalmente, sabe-se que a massa somada do lado esquerdo da reação da Equação 2 é um pouco menor que a massa somada das partículas resultantes. A diferença é de cerca de $0,0477 \times 10^{-27}$ kg, o que a primeira vista não parece significativo. No entanto, quando aplicada à Equação 01 verifica-se que é gerada uma energia equivalente a $6,4 \times 10^{14}$ J. Segundo Lewis (2004), a cada segundo no Sol são convertidos 600 milhões de toneladas de Hidrogênio em Hélio, representando assim cerca de 1×10^{29} milhões de anos de geração de energia da usina de Itaipu³.

Toda essa energia liberada é captada na Terra em sua maioria na forma de luz e calor, mas também em forma de partículas subatômicas, sendo algumas com menor quantidade de energia, mas que podem ser detectadas por instrumentos específicos que medem os fluxos dessas partículas ao atravessarem o planeta. É o caso do neutrino, mostrado na Equação 2 e que se move na velocidade da luz, atravessando a Terra sem praticamente nenhuma interação perceptível. Outras partículas consideravelmente mais energizadas também atingem a Terra, resultando em efeitos de maior complexidade, que serão discutidos no decorrer desse capítulo.

2.1.2 Zonas de Convecção e Radiação

As zonas de convecção e radiação tem, basicamente, a mesma composição. A diferença básica é que, a certa distância do núcleo solar, o fluxo de radiação é tão grande que a energia emitida pela fusão não consegue atravessá-la com facilidade e, por isso, são gerados processos físicos onde a energia é transportada da maneira conhecida como convecção. Nesse processo, a matéria que se encontra mais próxima ao núcleo é aquecida e se expande, adquirindo assim menor densidade (mesma massa, espaço maior) e sobe para mais próximo à superfície. Ao se afastar do núcleo, perde calor para a superfície solar (calor esse que chega a Terra) e se comprime, aumentando sua densidade, sendo então puxada para baixo pela força da gravidade, gerando assim um ciclo de transporte de energia. Esse processo é o

³ Dados da usina de Itaipu disponíveis no endereço <http://www.itaipu.gov.br/energia/comparacoes>

mesmo de uma panela fervendo, ou mesmo o que ocorre na Troposfera terrestre, porém com uma quantidade infinitamente maior de energia envolvida.

2.1.3 Fotosfera

Segundo Lewis (2004), a fotosfera é a região de um corpo estelar onde a superfície se torna opaca à luz, ou seja, visível a um observador externo. Mesmo que se use o termo “superfície”, deve-se frisar que o sol é um corpo gasoso não tendo, portanto, uma superfície sólida.

As primeiras observações da fotosfera solar datam de 325 a.C. quando o filósofo Theophrastus na antiga Grécia observou manchas escuras na superfície do Sol e as documentou. Existem também registros mais modernos datando dos séculos XV e XVI, incluindo manuscritos do físico Galileo Galilei (1564 - 1642) sobre a observação de irregularidades na superfície solar. Essas regiões irregulares conhecidas como Manchas Solares (ou *Sunspots*, em inglês) são instabilidades na fotosfera, onde uma região em específico se torna significativamente mais fria que o seu entorno – em média 1500°C menos quentes que os cerca de 5000 °C da superfície não irregular à sua volta. Isso se deve ao fato da superfície solar ser altamente instável e sujeita a processos convectivos, como citado anteriormente. Quanto maior o movimento de gases no Sol, maior a probabilidade de formação de regiões contrastantes.

A Figura 4 mostra uma imagem de alta resolução da superfície solar, onde é possível observar, no detalhe, uma mancha solar na cor mais escura, e seu entorno com diversos grânulos resultantes dos processos convectivos da zona de convecção. Para que se tenha uma ideia das dimensões, cada um dos grânulos da imagem à direita tem cerca de 1000 km de extensão, e duram aproximadamente de 5 a 10 minutos, antes que os processos convectivos os façam “afundar” novamente, dando lugar a novos grânulos.

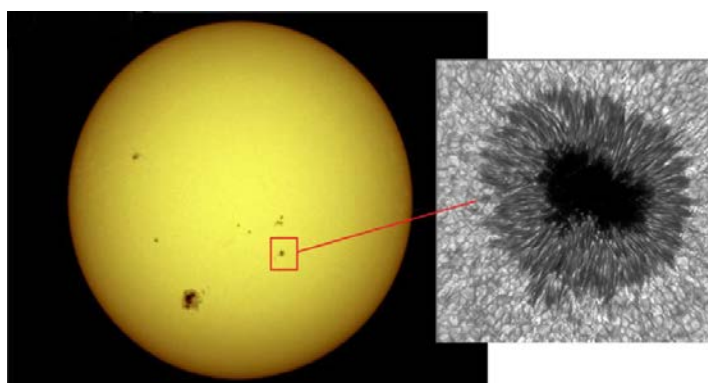


Figura 4 - Amostra da superfície solar em imagem de alta resolução (Fonte: Adaptado de NASA/GSFC, 2012).

Nas regiões de manchas solares a atividade magnética é bastante elevada, podendo desencadear eventos que afetam a Terra de diversas formas. Em 1º de Setembro de 1859, o astrônomo Richard Carrington se tornou um dos primeiros a observar e relatar os efeitos na Terra das manchas solares em seu observatório particular, localizado em Londres, Inglaterra. Nessa data, o astrônomo observou na superfície solar regiões bem definidas de luminosidade distinta das demais e as desenhou em uma folha. Uma reprodução desse desenho é mostrada na Figura 5, onde se pode observar nas regiões marcadas como A e B duas “bolhas” distintas de seu entorno. Nessa ocasião, alguns sistemas elétricos que já existiam entraram em pane, muito provavelmente devido a uma forte atividade solar que acabou por influenciar na superfície terrestre.

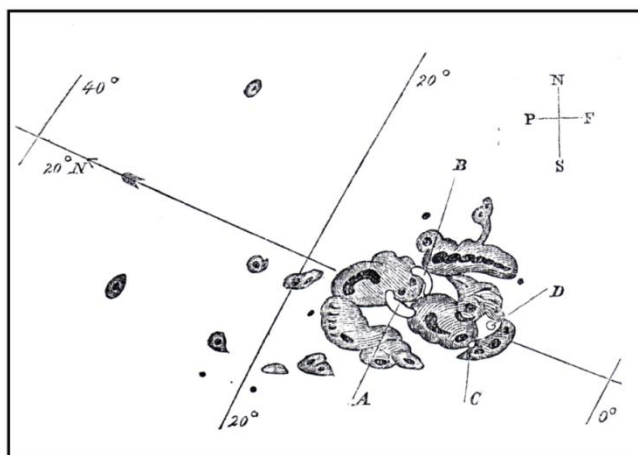


Figura 5 - Manchas solares desenhadas por Richard Carrington em 1859. (Fonte: *National Geographic*, 2012).

Naquela data, o astrônomo enviou uma carta a *British Royal Society* sugerindo uma possível relação entre as manchas solares, e o comportamento anormal dos equipamentos elétricos da época. Desde então, o número e tamanho das manchas solares que já vinham sendo mapeados, são também correlacionados com outros eventos na atmosfera terrestre, como bem sugeriu Carrington.

A contagem do número de manchas solares (ou *sunspot number*, em inglês) presentes no Sol em um determinado momento é dada por uma soma ponderada, de acordo com a Equação 3:

$$\text{Número de Manchas} = 10 \times \text{Grupos} + \text{Manchas Sozinhas} . \quad (03)$$

Essa soma ponderada vem de uma relação empírica, onde após análises temporais, constatou-se que os grupos de manchas eram aproximadamente 10 vezes mais

influentes nos gradientes magnéticos que as manchas separadas dos grupos (McNAMARA, 1991). Como exemplo, se não houver nenhuma mancha visível, esse número é 0. Caso haja apenas uma mancha, o resultado é 11, pois, por convenção, uma mancha também vale como um grupo. Na Figura 4, o número de manchas solares equivale a 74 (7 grupos distintos, sendo 4 sozinhas).

A Figura 6 mostra a média do número de manchas solares para cada mês, de Janeiro de 2000 até Dezembro de 2012.

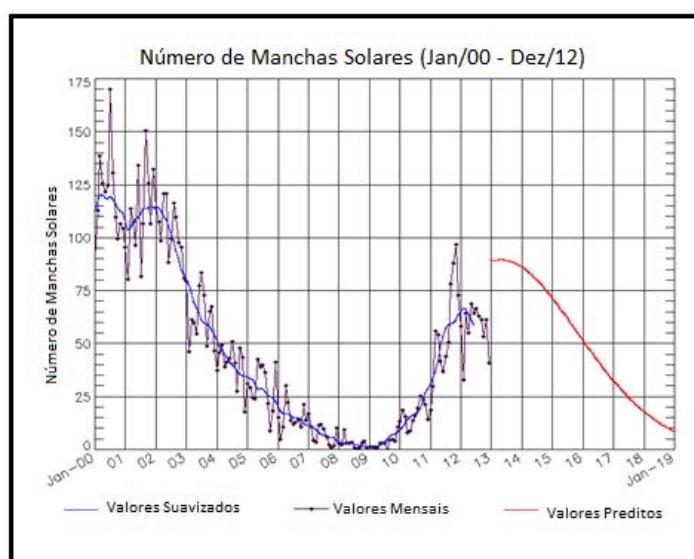


Figura 6 – Número de manchas solares observadas mês a mês (Fonte: Adaptado de NOAA/SWPC, 2012).

Vale ressaltar, que a previsão para o ciclo solar 24, o último mostrado na Figura 6, foi diversas vezes revisto pelo NOAA e pela NASA. Inicialmente, a previsão mostrava que esse ciclo seria um dos mais fortes da história, como mostra a Figura 7.

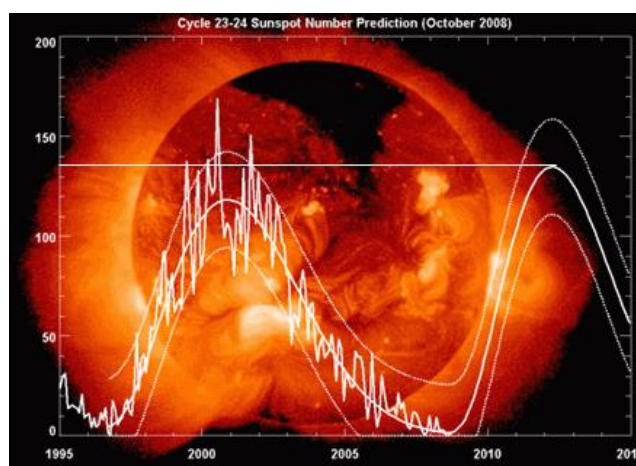


Figura 7 - Previsão equivocada do ciclo solar 24 (Fonte: NASA/GSFC, 2008).

2.1.4 Cromosfera, Zona de Transição e Corona

A cromosfera é uma camada da superfície solar com cerca de 1500 km de extensão, e se localiza logo acima da fotosfera. É uma região com uma densidade menor de matéria em relação ao restante da estrela, porém sua principal característica é ser significativamente mais quente que a superfície solar: aproximadamente 4000 °C a mais. Segundo Moldwin (2008), foi o primeiro lugar onde se observou a presença do elemento Hélio em sua forma natural, antes mesmo que esse fosse identificado na Terra.

Essa região, composta por um plasma menos denso termina com a chamada zona de transição, onde a densidade é significativamente menor, e a temperatura muitas vezes maior. Como essa região é menos densa, acaba não sendo visível no espectro de luz que pode ser percebida a olho nu, porém, emite uma frequência na banda conhecida como H α (Hidrogênio Alfa) na precisa frequência de 457121,4 GHz (LEWIS, 2004). Alguns equipamentos são capazes de captar esses sinais na Terra, mostrando uma imagem da cromosfera e da zona de transição, como aparece na Figura 8.

A cromosfera e a zona de transição são ainda mais dinâmicas que a fotosfera solar, emitindo quase que a todo tempo jatos de gases ionizados que se estendem por milhares de quilômetros e têm velocidades entre 10 e 150 m/s dependendo da intensidade (LEWIS, 2004). Na Figura 8 as regiões mais claras (chamadas de *plages*) mostram essas ejeções de partículas, comumente localizadas próximas às Manchas Solares, e os pontos mais escuros (chamados de Filamentos) mostram regiões mais frias da cromosfera onde material da Fotosfera é suspenso pela atividade magnética intensa em certos locais.

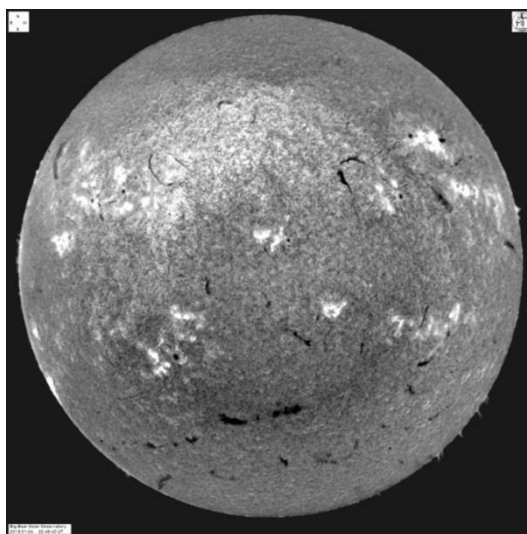


Figura 8- Imagem H α da cromosfera solar (Fonte BBSO, 2012).

Ainda mais afastada da superfície solar, encontra-se a Corona solar (ou Coroa solar), região ainda mais quente e que se estende por milhões de quilômetros. Nessa última região da atmosfera solar podem ser observadas as partículas lançadas pelo Sol em direção ao espaço. Partículas essas, que eventualmente atingem a Terra causando diversos efeitos que serão abordados. Essa região emite frequências em diversos espectros diferentes, porém um equipamento chamado Coronógrafo (inventado na década de 1930) é capaz de absorver tais frequências e gerar uma imagem dessa última camada do sol. A luz emitida pela fotosfera é fisicamente bloqueada por um disco, fazendo assim com que sobre apenas a luz da corona solar. A olho nu, a corona solar pode ser observada durante um evento de eclipse total do Sol.

Sabe-se que a corona não é simétrica ou homogênea em relação à quantidade de energia emitida. Para que essa simetria seja quebrada e uma partícula possa “fugir” do campo gravitacional do Sol e atravessar a última camada da atmosfera solar, é necessária uma velocidade de escape de 620 km/s. Alguns eventos no Sol podem proporcionar tal condição. Esses eventos serão discutidos na seção 2.1.5 – Eventos Solares.

2.1.5 Eventos Solares

Segundo Alexander *et al.* (2006), a chave para o entendimento dos eventos solares reside no estudo do campo magnético inconstante da estrela. Em 1889, o meteorologista norte-americano Frank Bigelow notou, durante um eclipse total do Sol, que havia uma grande semelhança entre o formato da Corona solar e linhas de campo magnético, propondo então que o Sol funcionasse como um gigantesco ímã (BIGELOW, 1890 apud ALEXANDER, 2006). Na época, não havia ideia de que o Sol também tinha um campo magnético, e tampouco se sabia que este era a razão da maioria das intempéries observadas na estrela. Somente em 1896 foi possível confirmar essa teoria através do chamado efeito *Zeeman*. Nesse ano, o físico holandês Pieter Zeeman e seu professor Hendrik Lorentz descobriram que, sob a ação de um forte campo magnético, a linha espectral de um gás é dividida em duas ou mais partes, dependendo da intensidade do magnetismo. Utilizando essa teoria (que lhes renderia o prêmio Nobel de Física em 1902) e através de observações espectrais do Sol, foi possível determinar com precisão a intensidade de seu campo magnético em toda sua extensão. Nesse experimento, notou-se que o campo magnético dentro de uma Mancha Solar é cerca de 1000 vezes mais forte do que em seu entorno (MOLDWIN, 2008).

O campo magnético solar, como hoje já é de comum conhecimento, tem um comportamento extremamente inconstante, o que proporciona uma série de eventos com

repercussão na Terra. Utilizando como exemplo o tópico anterior, pode-se frisar novamente que as partículas que escapam da força gravitacional solar e atravessam a corona necessitam de velocidades acima de 620 km/s. Embora essa seja uma velocidade muito grande, ela é atingida corriqueiramente graças a grande quantidade de energia que as partículas ganham no Sol devido a eventos ligados de alguma forma com a atividade magnética na estrela. Nesse tópico, os principais eventos de origem magnética solar que podem afetar a Terra são abordados: As Ejeções Coronais de Massa, os *Solar Flares*, e o Vento Solar.

2.1.5.1 Ejeção Coronal de Massa (ECM)

Como mencionado, o Sol é um ambiente extremamente volátil e inconstante. Devido ao fato de que sua superfície sofre alterações de temperatura, densidade e locação de matéria com bastante frequência e intensidade, o campo magnético do Sol também se torna sensível a tais inconstâncias, fazendo com que sua última camada atmosférica, a corona solar, sofra mudanças abruptas. Segundo Moldwin (2008), ocasionalmente, reconfigurações repentinas no campo magnético solar fazem com que uma grande quantidade de matéria presente na corona seja lançada para longe.

As ECM, ou Ejeções Coronais de Massa (*Coronal Mass Ejections*, em inglês) foram descobertas nos anos 1980, com os primeiros Coronógrafos embarcados em satélites, e podem ser definidas como sendo grandes estruturas magnéticas contendo trilhões de quilos de materiais outrora presentes na Corona solar. Segundo Hunsen *et al.* (1984) apud Schwenn (2006), a definição de ECM é:

Define-se uma Ejeção Coronal de Massa (ECM) como sendo uma mudança observável na estrutura Coronal que 1) ocorre numa escala de tempo entre alguns minutos e algumas horas e 2) tem aparência de um corpo novo, em movimento e bem definido, brilhante e emite luz branca no campo de visão do Coronógrafo (HUNSEN et al. ,1984 apud SCHWENN, 2006).

Pela Figura 9 observa-se que a nuvem de partículas lançadas tem uma área maior que a do próprio Sol. Desde o princípio do evento até o momento em que o material é lançado ao espaço, podem se passar diversas horas, momento no qual grande quantidade de matéria é lançada, movendo-se ainda mais rápido que a velocidade necessária para escapar da órbita solar, chegando a 3000 km/s ou mais dependendo da intensidade. As ECM, normalmente, chegam a Terra entre 3 e 5 dias depois de se desconectarem do Sol, podendo demorar até menos de um dia em eventos extremos. Ao atingirem qualquer tipo de veículo

espacial desprotegido, pode causar danos em seus componentes ou até inutilizá-los. Apesar de ainda não haver um consenso científico geral, a causa mais aceita para a ocorrência desse fenômeno são os eventos de Reconexão Magnética na atmosfera solar (ALEXANDER *et al.*, 2006, KUNOW, 2006, SCHWENN 2006, MOLDWIN, 2008).

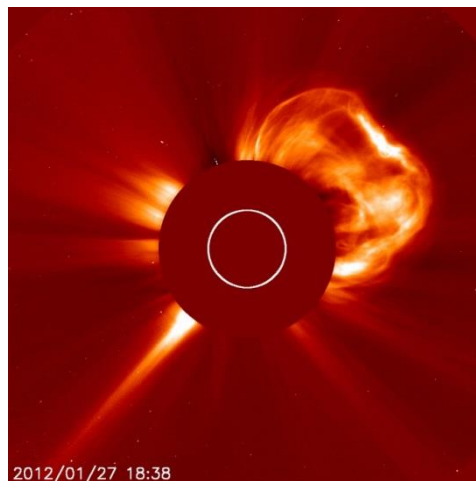


Figura 9 – ECM capturada por imagem do Coronógrafo LASCO/SoHO (Fonte: NASA/SoHO, 2012).

Além disso, as ECM são conhecidas por ser a principal causa de distúrbios geomagnéticos na Terra, como as Auroras Boreais sendo, portanto, o fenômeno solar mais importante a ser monitorado no contexto do clima espacial e sistemas de posicionamento por satélites (ALEXANDER *et al.*, 2006, MOLDWIN, 2008, LEWIS, 2004). Segundo um levantamento feito por Alexander *et al.* (2006) em períodos de mínima atividade solar, ocorre entre uma e duas ejeções por mês, podendo atingir até cerca de 100 eventos desse tipo em períodos de máxima atividade.

Assim que esses eventos são identificados, são também caracterizados por três principais aspectos (SCHWENN, 2006):

- Velocidade: variando de alguns poucos quilômetros por segundo, até cerca de 3000 km/s, como já citado.
- Comprimento Angular: podendo variar de alguns poucos minutos até mais de 120° em casos extremos, tendo uma média histórica de cerca de 50°.
- Posição angular de seu centro no plano eclíptico: dependendo de onde o fenômeno se origina no Sol, se dá o ângulo de lançamento da nuvem de partículas.

Atualmente, o equipamento mais utilizado para a visualização e estudo das ECMs é o sensor LASCO (*Large Angle and Spectrometric Coronagraph*) da missão espacial SoHO (*Solar and Heliospheric Observatory*). As imagens desse Coronógrafo são disponíveis gratuitamente na página da missão na internet⁴.

De acordo com Schwenn (2006), a grande maioria das ECM ocorre logo em seguida de outro fenômeno de grande relevância chamado *Solar Flare*.

2.1.5.2 *Solar Flares*

Outro evento de interesse para o posicionamento por satélites que acontece na atmosfera solar são os chamados *Solar Flares*. Os *Flares* são eventos parecidos com as ECM, tendo como principal diferença suas dimensões: Um evento dessa categoria acontece em uma escala cerca de 10 a 100 vezes menor que as ECM e envolvem uma quantidade menor de material, porém, proporcionalmente são mais intensas (LEWIS, 2004, MOLDWIN, 2008). Em alguns segundos ou minutos podem aquecer o material envolvido na região do *flare* a alguns milhões de graus, e ocorrem em regiões mais baixas do sol. Enquanto as ECM ejetam matéria das camadas mais altas da atmosfera, mais precisamente na Corona, os *flares* acontecem na Fotosfera e próximo às manchas solares, onde a atividade magnética, como já dito, é mais intensa.

De acordo com Kunow *et al.* (2007), os *flares* emitem radiação em diversos espectros eletromagnéticos, dentre eles todo o espectro da luz visível, ultravioleta, Raios-X e raios Gama, podendo ser observados tanto de plataformas orbitais, quanto de observatórios na superfície terrestre. Esses eventos podem ocorrer liberando curtos “pulsos” de energia que em poucos minutos se dissipam, ou então criando clarões luminosos que se estendem por horas e às vezes dias. A descarga energética faz com que uma determinada quantidade de energia seja lançada do Sol, muitas vezes atingindo a Terra dependendo de sua direção e intensidade. Ainda segundo Kunow *et al.* (2007), os *flares* que têm maior duração, normalmente, são acompanhados por ECM na mesma área.

Uma vez lançados da superfície solar, é possível medir a emissão de Raios-X, e então caracterizar os *flares* de acordo com sua intensidade. As letras A, B, C, M e X são utilizadas para tal, representando cada uma um fator a ser multiplicado, como mostra a Tabela 2.

⁴ Cf.: SoHO/NASA, 2012. <http://sohowww.nascom.nasa.gov/> (Acesso em Dezembro 2012).

Tabela 2 - Fatores de Multiplicação dos *Flares* Solares.

Letra	Fator de Multiplicação (Watts / m ²)
A	10 ⁻⁸
B	10 ⁻⁷
C	10 ⁻⁶
M	10 ⁻⁵
X	10 ⁻⁴

Fonte: Adaptado de Kunow *et al.* (2007).

Além das letras, segue um número que torna possível especificar a intensidade utilizando a notação científica. Como exemplo, para que se descubra a intensidade de um *flare* de classe M2.5, deve-se multiplicar o fator M por 2,5, resultando em uma intensidade de $2,5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$.

A Figura 10 mostra um exemplo de um *flare* sendo emitido da superfície solar.

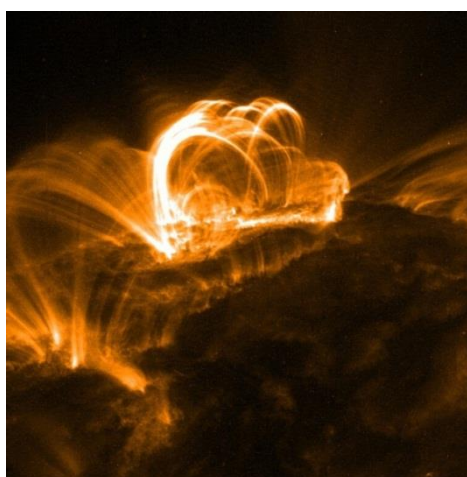


Figura 10 – *Solar flare* ocorrido em Dezembro de 2006 captado pelo sensor da missão TRACE (Fonte: NASA/GSFC, 2012).

2.1.5.3 Vento Solar

Segundo Davies (1990), ao observar-se a coroa solar de maneira simplificada, pode-se dividi-la em dois tipos de regiões: aquelas com as linhas de campo magnético fechadas, onde o plasma é confinado, e aquelas com as linhas de campo abertas, onde o plasma da atmosfera solar se expande em direção ao espaço, formando aquilo que se conhece por Vento Solar (ou *Solar Wind*, em inglês).

Assim como na Terra há a chamada termosfera⁵, no Sol, suas camadas atmosféricas mais altas também são caracterizadas por altíssimas temperaturas, ainda maiores do que em sua superfície. Nessa camada, a temperatura elevada fornece energia a átomos de Hidrogênio e Hélio, que podem, então, escapar da força gravitacional da estrela, e formar nuvens de partículas altamente energizadas e velozes. Esse fluxo de partículas em situações calmas tem velocidade de cerca de 400 km/s, podendo chegar a 1000 km/s ou mais em situações extremas, e são chamadas no contexto do clima espacial de vento solar (KELLEY, 2009; MOLDWIN, 2008).

Por consequência da constante iluminação direta do Sol e das altas temperaturas, o vento solar é composto totalmente por plasma ionizado, diferentemente da ionosfera terrestre, que contém também elementos neutros. Uma característica dessa massa de partículas é a sua velocidade supersônica⁶, causada pela combinação de altas temperaturas e pela energia ganha ao escapar do campo gravitacional solar, onde eram comprimidas. Isso faz com que, constantemente, a Terra seja “bombardeada” por plasma quente, magnetizado, supersônico, com considerável quantidade de energia cinética e elétrica e capaz de conduzir corrente. O efeito causado por esse bombardeio é a alteração das características do campo magnético normal. (McNAMARA, 1991; KELLEY, 2009)

Ao combinar a emissão do plasma com o movimento de rotação do Sol, são criadas as maiores estruturas presentes no sistema solar que, quando lançadas radialmente, para um observador situado no polo solar, seguirão um caminho em espiral se afastando do Sol, como mostra a Figura 11, representando o Sol ao centro, a Terra no ponto verde, e a localização dos satélites STEREO.

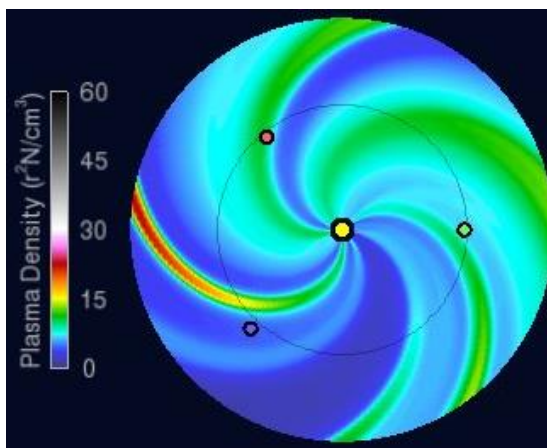


Figura 11 - Representação da densidade do Vento Solar mostrando sua emissão em forma de espiral (Fonte: Adaptado de NOAA/SWPC, 2013).

⁵ Camada da atmosfera terrestre caracterizada pelas altas temperaturas (MOLDWIN, 2008)

⁶ A velocidade do som, no meio interplanetário, é de cerca de 200 Km/s.

A velocidade do vento solar é pequena nas proximidades do Sol, aumentando de acordo com a distância radial do ponto de emissão, até que em determinado momento se torna supersônica. O ponto onde essa transição ocorre varia, estando normalmente próximo de 25% do caminho do Sol até a Terra (DAVIES, 1990). Em média, sabe-se que essa nuvem de plasma magnetizado demora em torno de 4,5 dias para atingir a Terra. Nesse intervalo, o Sol rotaciona cerca de 60° , gerando então a configuração regular mostrada na Figura 11.

2.1.5.4 Ciclo Solar

Ao se observar o Sol com regularidade e, como principal indicativo de atividade solar, as manchas solares, pode-se perceber uma sazonalidade entre eventos esparsos e eventos quase que seguidos na superfície solar. A cada 11 anos, em média, o número de manchas solares vai de aproximadamente zero para mais de cem, numa mecânica chamada de ciclo solar.

Em meados do século XVII, o astrônomo Galileu Galilei começou a contar e documentar sistematicamente o número de manchas, algo que antes era somente observado. Desde então, com algumas exceções, observou-se o ciclo de 11 anos entre alta e baixa atividade solar. A Figura 12 mostra a contagem de ciclos mês a mês de Janeiro de 1750 até Dezembro de 2012.

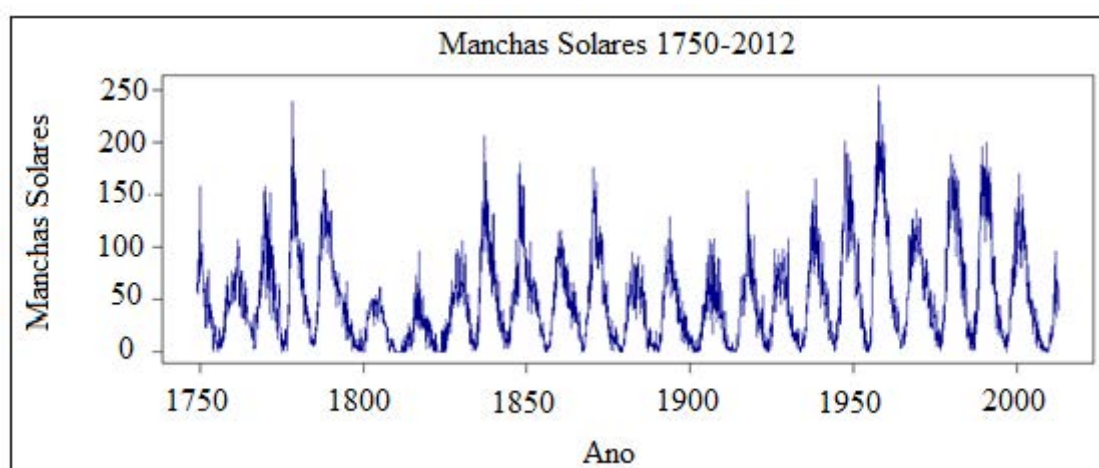


Figura 12 - Manchas Solares contadas mês a mês de Janeiro de 1750 a Dezembro de 2012.

Nota-se que os valores observados para o último ciclo estão consideravelmente abaixo dos valores preditos. Uma possível causa para tal anomalia nas

predições é uma componente de baixa frequência no ciclo solar, conhecida como ciclo de Wolf-Gleißberg (YOUSEF, 2000; McNAMARA, 1991). Na década de 1890, o astrônomo Walter Maunder observou uma irregularidade nos períodos de 11 anos, conhecida posteriormente como o Mínimo de Maunder. Essa irregularidade aconteceu entre 1645 e 1715, onde pouquíssimas manchas solares foram observadas. A Figura 13 mostra a atípica contagem para o período.

Caso o ciclo de Wolf-Gleißberg seja um fato, os períodos do mínimo de Maunder, o período observado entre 1790 e 1830 (conhecido como mínimo de Dalton), bem como o período iniciado após o pico de atividade solar de 2003 estariam correlacionados e fazem parte desse ciclo que dura entre 80 e 100 anos. No momento, poucas pesquisas trabalham com essa hipótese, que explicaria a discrepância entre as predições e os números verdadeiros, como se observa na Figura 6.

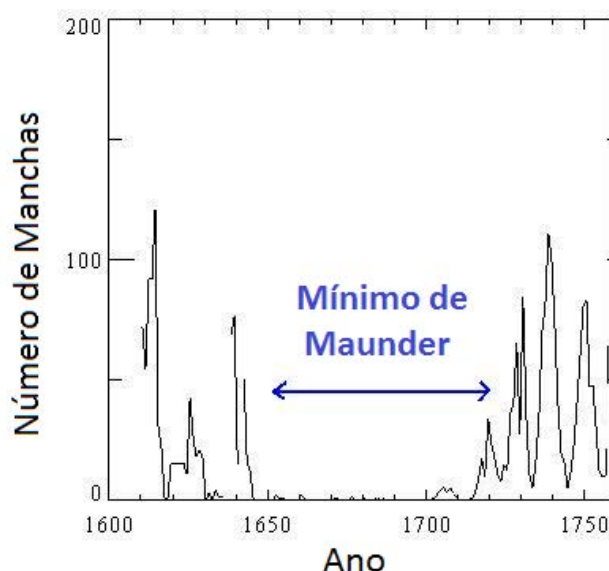


Figura 13 - Representação do número de Manchas Solares mês a mês entre 1610 e 1750.

Pelos eventos descritos nesse capítulo, torna-se claro que a influência solar na Terra se dá de diversas formas e com diversas magnitudes. São descritas na seção 2.2 as características do campo magnético e da atmosfera terrestre, bem como suas relações com a atmosfera solar.

2.1.6 Monitoramento das atividades solares por satélites

Dentre as principais missões fornecedoras de dados de interesse para o contexto do clima espacial, encontram-se as missões STEREO (*Solar TERrestrial RElations*

Observatory) e SDO (*Solar Dynamics Observatory*) comandadas pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a missão SoHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) comandada por um acordo entre a NASA e a ESA (*European Space Agency*).

A missão STEREO consiste na utilização de dois satélites (STEREO A e STEREO B) praticamente idênticos orbitando o Sol, sendo um deles numa órbita menor e o outro numa órbita maior que a da Terra. Essa missão pioneira tem como principal objetivo fornecer imagens estereoscópicas (daí o acrônimo) da atividade solar com o intuito de estudar as causas e mecanismos das ECM, bem como sua propagação pelo meio interplanetário (NASA/GSFC, 2013). A Figura 14 mostra um exemplo de imagem composta pelos dados dos satélites STEREO que cobre toda a superfície solar. Nessa imagem, a latitude 0° mostra a linha “equatorial” do Sol, e a longitude 0° representa o vetor Sol-Terra. Observam-se alguns pontos mais claros da imagem, onde a atividade solar é mais intensa.

Por sua vez, a missão SDO tem como principal objetivo o estudo da dinâmica solar e seus impactos na Terra. Para isso, são utilizados sensores de grande resolução espacial (em comparação com as demais missões similares) e são captadas informações em diversos pontos do espectro eletromagnético. Deseja-se atingir esse objetivo estudando principalmente as intempéries do campo magnético solar e como essa energia é lançada em direção ao meio interplanetário. A Figura 15 mostra um exemplo de uma imagem da superfície solar com uma ênfase na região de um *solar flare* ocorrido em 31 de Dezembro de 2012.

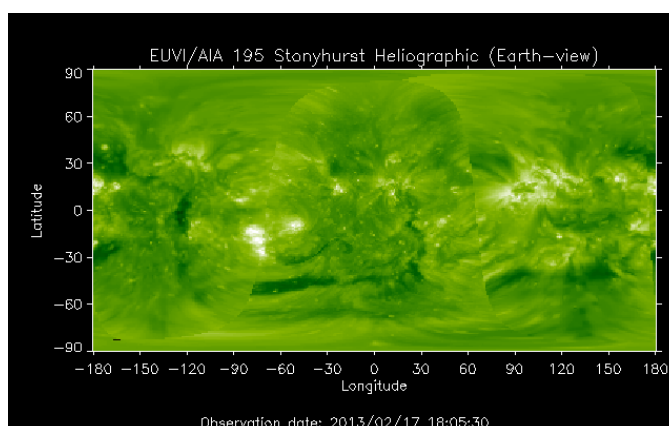


Figura 14 - Exemplo de imagem composta pelos dados dos satélites STEREO (Fonte: NASA/GSFC, 2013).

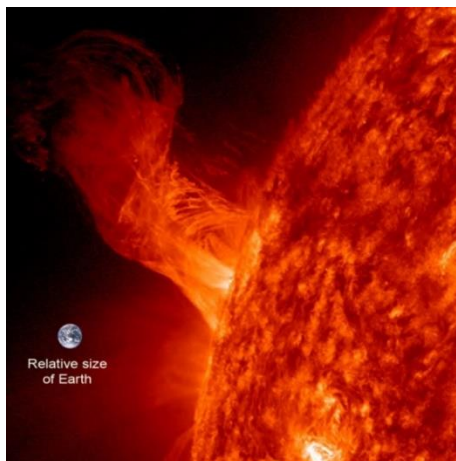


Figura 15 - Exemplo de imagem obtida pela missão SDO (Fonte: NASA/GSFC, 2013).

Já a missão SoHO, de responsabilidade da NASA e da ESA, contém 12 instrumentos de teledetecção de atividades solares. Dentre os principais objetivos da missão estão o entendimento da atividade na coroa solar, bem como as origens do vento solar na complexa dinâmica da heliosfera. Esse satélite encontra-se em órbita entre a Terra e o Sol, e lá se mantém pela força conjunta da força gravitacional de ambos os corpos.

2.2 Atmosfera Terrestre

Nesse tópico serão apontados os principais aspectos que definem a interação entre o clima espacial e a atmosfera terrestre. Serão descritas as camadas da atmosfera denominadas Magnetosfera e Ionosfera, bem como suas características e relações com os eventos de origem solar.

2.2.1 Magnetosfera

Sabe-se que a Terra é um planeta geologicamente ativo, ou seja, apresenta atividade dinâmica em seu interior. Assim como na dinâmica das convecções solares, guardadas as devidas proporções, os movimentos convectivos no interior da Terra também produzem um campo magnético dipolar que se faz perceber em seu entorno.

Sabendo, portanto, que a Terra encontra-se imersa em uma zona de influência solar e sabendo também que a influência do Sol é forte o suficiente para alcançar e interagir com os planetas e seus campos magnéticos próprios, tem-se como resultado dessa interação a Magnetosfera. Na Terra, essa região é o local onde predomina o campo magnético terrestre sob a influência do Sol (NASA/GSFC, 2012).

O formato da magnetosfera terrestre, que é o resultado direto da interação com o Sol, é moldado de acordo com a intensidade da atividade solar. A magnetosfera pode ser comprimida do lado que está virado para o Sol, em uma distância que varia de 6 a 10 vezes o raio da Terra, criando assim uma forma peculiar de campo, que será abordada no decorrer da pesquisa. Essa parte comprimida é a que recebe o impacto direto das partículas energizadas vindas do sol, criando uma primeira camada que desvia as partículas da superfície terrestre, formando assim um envoltório protetor chamada de envoltória magnética ou, onda de choque em arco, onde a grande maioria das partículas é aquecida e tem sua velocidade reduzida enquanto são lançadas ao redor da Terra de volta para o espaço (NASA/GSFC, 2012).

Para entender melhor o campo magnético terrestre, primeiramente, deve-se imaginá-lo como um sistema dipolar (Figura 16), com o eixo de rotação inclinado em relação ao eixo magnético em aproximadamente 11° . Essa inclinação se dá no sentido da América do Norte, e é um aspecto comum em diversos outros planetas. Outra característica importante é o fato do campo magnético apontar para a direção nadiral no hemisfério norte, e para a direção zenital no extremo sul, tendo variações seculares em sua posição e até mesmo em sentido (KELLEY, 2009).

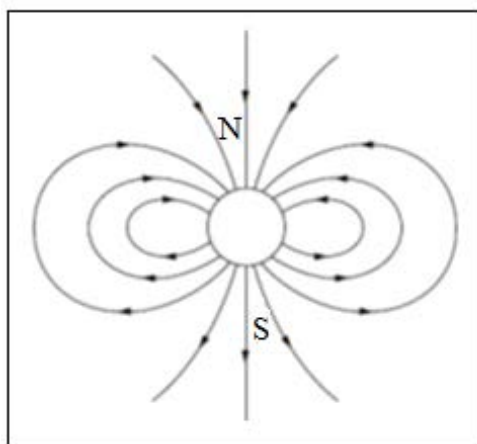


Figura 16- Diagrama de um sistema magnético dipolar no vácuo (Fonte: KELLEY, 2009).

Esse campo magnético, que é criado devido aos movimentos convectivos no manto terrestre, varia de intensidade de acordo com sua localização na superfície. Próximo ao equador magnético, esse valor chega a $0,25 \times 10^{-4}$ tesla (0,25 gauss), enquanto próximo aos polos, a intensidade chega a $0,6 \times 10^{-4}$ tesla (0,6 gauss) (KELLEY, 2009).

O campo magnético regular representado pela Figura 16 pode ser descrito por:

$$r = L \cos^2 \theta, \quad (04)$$

sendo r , o raio médio da Terra em unidades ($1 r \sim 6371 \text{ Km}$), θ a latitude magnética, e L o raio do ponto considerado no campo magnético quando cruza o equador, também em unidades de raio da Terra. Esse sistema, mostra com simplicidade como se comportaria o campo magnético da terra caso ela fosse homogênea, e caso não houvesse outros planetas, ou o Sol por perto, gerando as linhas de campo vistas na Figura 16. No entanto, sabe-se que essa não é a realidade.

Deixando de lado por um momento o fato de o plasma adquirir velocidade supersônica, sabe-se então que uma pequena parte do vento solar expelido pelo Sol acaba atingindo a Terra, chegando às camadas mais altas de nossa atmosfera. Para exemplificar como ocorre essa interação entre o vento solar e a magnetosfera, deve-se levar em conta a equação clássica da física de partículas, que mostra a relação entre uma partícula de carga q , movendo-se a uma velocidade V sob a ação de um campo magnético B , gerando assim uma força atuante F (Equação 5) (HALLIDAY; RESNICK, 1992).

$$F = qV \times B \sin \theta \quad (05)$$

É de comum conhecimento que elétrons têm carga negativa, e íons que perderam esses elétrons, carga positiva. Pode-se observar então, pela Equação 5, que essas partículas ao serem impostas num mesmo campo magnético e com a mesma velocidade, terão forças atuantes em sentidos diferentes devido ao sinal positivo ou negativo da carga q . A Figura 17 mostra de forma simplificada como ocorre a dispersão das partículas com cargas diferentes em sentidos diferentes.

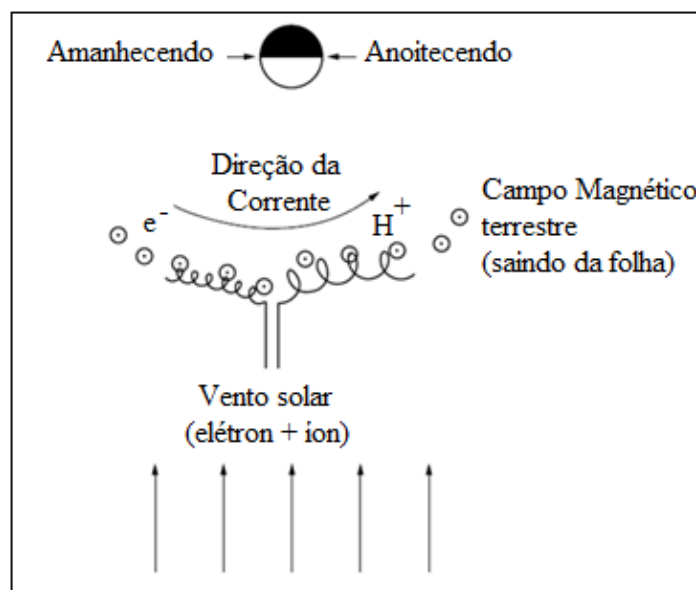


Figura 17 - Diagrama mostrando a dispersão das partículas do vento solar pelo campo magnético terrestre no plano eclíptico (Fonte: Adaptado de Kelley, 2009).

Uma vez desviadas, essas partículas viajam numa trajetória em forma de espiral no entorno do campo magnético terrestre. Como o campo se torna mais forte conforme se aproxima da superfície terrestre, a certa distância o plasma não tem energia suficiente para continuar penetrando na atmosfera, e então é levado no entorno do campo, até ser lançado novamente ao espaço pelo lado oposto de onde entrou. Esse local, onde a força de repulsão do campo magnético terrestre e a energia inerente da partícula do vento solar se igualam, é chamada de magnetopausa (KELLEY, 2009; MOLDWIN, 2008, McNAMARA, 1991). A Figura 18 mostra um diagrama dos conceitos abordados até então de forma simplificada.

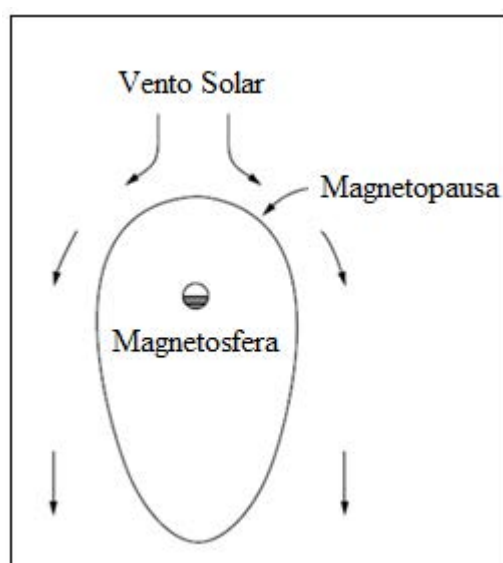


Figura 18 - Diagrama da magnetosfera terrestre simplificada. (Fonte: Adaptado de Kelley, 2009).

Abordando a magnetosfera de maneira mais completa, e levando em conta a característica supersônica do plasma advindo do vento solar, surgem algumas peculiaridades. Como dito anteriormente, quando o plasma se aproxima da atmosfera terrestre, e entra em contato com o campo magnético formado pela Terra, o material que compõe o vento solar diminui bruscamente de velocidade e esfria repentinamente, formando assim uma onda de choque, exatamente onde esse grupo de partículas dissipa sua energia cinética e se dispersa. Esse local é chamado no contexto do clima espacial de onda de choque em arco. É onde o plasma ganha novas características, e passa a interagir de forma mais complexa com o campo magnético da Terra (KELLEY, 2009; McNAMARA, 1991).

Com o fluido subsônico (vento solar depois da interação com a onda de choque em arco) em contato com a atmosfera terrestre, a magnetosfera deixa de ser estática

como a Figura 18, e passa a ser dinâmica, como mostra a Figura 19. Nesse caso, uma interação viscosa entre fluidos ocorre, onde o plasma de fora da magnetosfera acaba por arrastar partículas da atmosfera terrestre para o lado oposto do sol através do atrito entre elas, e, por consequência, para que se mantenha o equilíbrio, esse plasma acaba voltando para a parte iluminada da Terra, criando uma espécie de ciclo dentro dos limites da magnetosfera (AXFORD; HINES, 1961). Esse ciclo acaba por afetar até as camadas mais baixas da atmosfera terrestre, e causar uma série de distúrbios na região ionosférica.

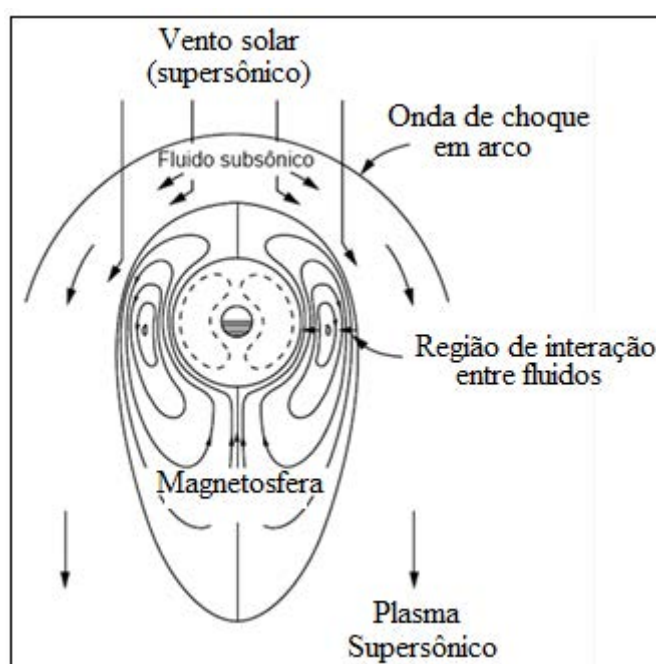


Figura 19 - Diagrama completo da magnetosfera e sua interação com o vento solar (Fonte: Adaptado de Kelley, 2009).

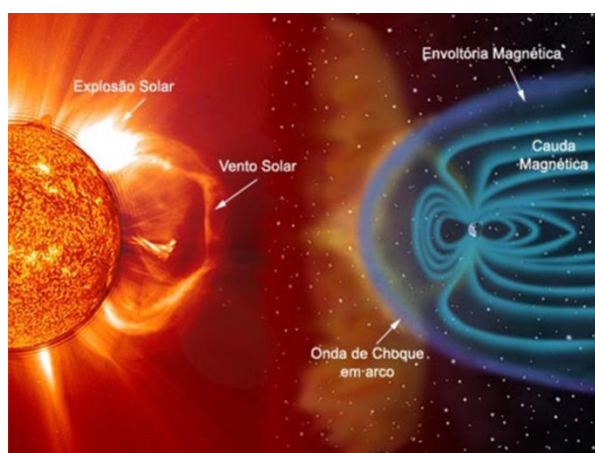


Figura 20 - Representação artística da interação Sol/Terra através da Magnetosfera (em azul) (Fonte: Adaptada de NASA/GSFC, 2012).

Outro aspecto interessante dessa interação da magnetosfera é o formato que o campo magnético ganha por conta das forças envolvidas. Enquanto o lado iluminado é comprimido e empurrado, na outra ponta, onde é noite, a magnetosfera tem um formato de cauda (cauda magnética), que pode chegar a cerca de 1000 vezes o raio da Terra (NASA/GSFC, 2012). A Figura 20 mostra uma representação artística dos conceitos envolvidos até então.

Como já explicitado, todas as interações entre as atividades solares e o campo magnético terrestre mostram-se complexas. Como há instabilidades na velocidade, temperatura e densidade do vento solar, essa falta de homogeneidade acaba se transferindo também para a magnetosfera terrestre, e, por consequência, para a ionosfera.

2.2.2 Ionosfera Terrestre

Do ponto de vista do comportamento das ondas eletromagnéticas que propagam sobre determinado meio nas frequências próximas do GNSS, podemos dividir a atmosfera terrestre em dois setores:

TROPOSFERA: Meio eletricamente neutro e, portanto, não dispersivo;

IONOSFERA: Meio ionizado e dispersivo.

A camada troposférica, ou neutrosférica, estende-se da superfície terrestre até cerca de 50 km de altitude, variando, principalmente, em relação à latitude. Já a camada ionosférica, alvo desse estudo, estende-se desses aproximadamente 50 km e não tem seu fim bem definido, se alterando de acordo com a posição, época do ano, ciclo solar e diversas outras variáveis. É definida por Davies (1990) como sendo a camada atmosférica afetada pela ionização, e que seja eletricamente não neutra o suficiente para afetar as ondas de rádio que por ela propaguem.

De acordo com McNamara (1991), a ionosfera é formada quando luz no espectro do ultravioleta extremo (EUV) separa os elétrons dos átomos neutros na atmosfera terrestre. A luz EUV tem uma alta quantidade de energia quando comparada ao espectro visível, proporcionando assim que uma quantidade condensada dessa energia (chamada de fóton) seja transferida aos elétrons, dando-lhes condições de se desvencilharem dos átomos a que pertenciam anteriormente. Nesse instante, o átomo se torna uma partícula positiva chamada cátion, ou, íon positivo. Segundo Halliday e Resnick (1992), um íon nada mais é do que uma partícula que perdeu ou ganhou elétrons, e, portanto, não tem carga neutra.

O processo onde um fóton separa o elétron de um átomo neutro é conhecido como fotoionização. A Figura 21 ilustra o processo dado pela Equação 6,



onde A representa um átomo qualquer, a seta o processo de fotoionização, e e^{-} o elétron livre, resultante na reação.

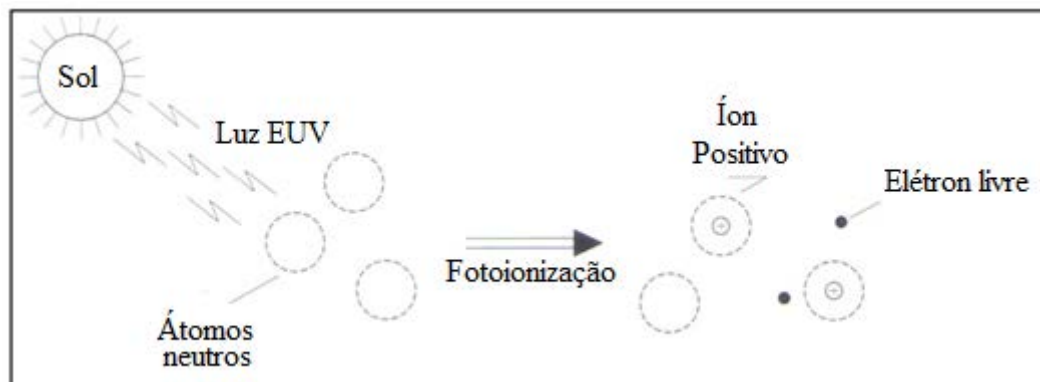


Figura 21- Processo de fotoionização (Fonte: Adaptado de McNamara, 1991).

O contrário do processo de fotoionização também ocorre na atmosfera e se chama recombinação. Nesse processo, elétrons de carga negativa e íons de carga positiva se juntam para formarem, novamente, átomos de carga neutra, sendo esse o principal processo pelo qual elétrons são “perdidos” na parte mais alta da ionosfera. Já nas partes mais baixas, o processo predominante é o processo de junção eletrônica dos átomos. Nesse processo, os elétrons se juntam a átomos neutros, formando assim íons de carga negativa (ânions). Sabe-se que para que uma partícula de carga não neutra interaja, ou interfira, em uma onda eletromagnética, sua massa deve ser subatômica. Nesse caso, íons, sejam positivos ou negativos, não apresentam papel importante na propagação de sinais de rádio (McNAMARA, 1991).

Portanto, a configuração atmosférica resultante do constante processo de fotoionização e recombinação é mostrada na Figura 22, onde há um perfil do comportamento da atmosfera terrestre em relação à concentração de elementos neutros (como o oxigênio, por exemplo), íons e elétrons. Chama-se atenção para a linha mais destacada que mostra a densidade de elétrons livres presentes na atmosfera.

De acordo com a concentração de elétrons livres, costuma-se dividir a camada ionosférica em três regiões: D, E e F.

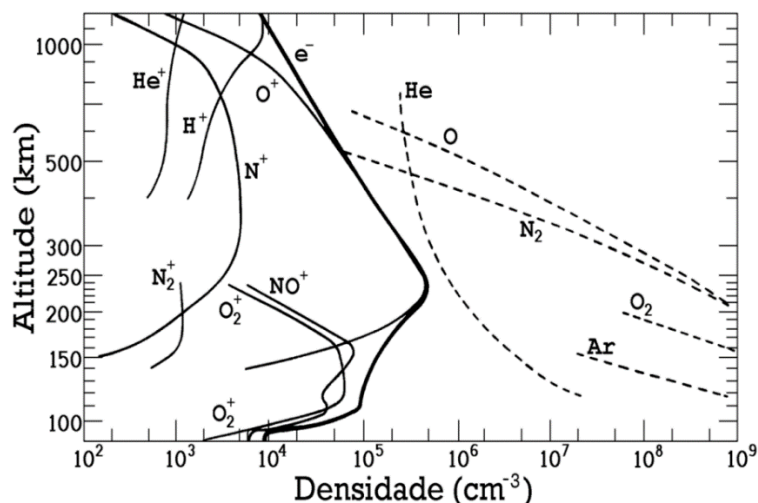


Figura 22 - Perfil da atmosfera terrestre levando em conta a densidade de diferentes elementos (Fonte: INPE/DAE, 2012).

A região D estende-se do princípio da ionosfera (cerca de 50 km), até aproximadamente 85 km, e encontra-se apenas na região da Terra que está sendo iluminada diretamente pelo Sol. Essa camada é de extrema importância nas telecomunicações, pois reflete ondas de rádio de baixa e muito baixa frequência entre 3 e 30 KHz (LF e VLF), permitindo assim comunicação de rádio entre dois pontos que não tenham intervisibilidade (DAVIES, 1990). Sua densidade eletrônica é de cerca de 10^3 elétrons/cm³ (el/cm³).

Por sua vez, a região E encontra-se no fim da região D até cerca de 140 km, e depende do grau de atividade solar, bem como do ângulo que o Sol está incidindo sobre a Terra, variando, portanto, de acordo com a hora do dia e período no ciclo solar. Uma peculiaridade dessa camada é que entre as alturas 90 e 130 km, dependendo das condições supracitadas, surge uma nova camada, denominada *Sporadic-E* (DAVIES, 1990). Enquanto a região E tem uma densidade eletrônica média de 10^5 el/cm³, na camada *Sporadic-E*, essa densidade pode dobrar ou até triplicar refletindo frequências de até 100 MHz.

Já a região F, em períodos de alta atividade costuma ser dividida em duas partes: regiões F1 e F2. A região F1 estende-se de uma altitude de cerca de 140 km até 200 km, tendo sua concentração de elétrons diretamente proporcional à atividade solar e somente é percebida durante o dia. Sua concentração de elétrons varia de 2×10^5 el/cm³ a 4×10^5 el/cm³ dependendo da quantidade de radiação recebida do Sol. E por fim, a região F2, estendendo-se de 200 km, até aproximadamente 1500 km, dependendo do fluxo de atividades solar. Segundo Davies (1990), essa região é a mais importante do ponto de vista da comunicação em HF (entre 3 e 30 MHz), abrangendo no espectro de frequências refletidas o intervalo utilizado

para comunicação marítima. Nessa subcamada, a densidade eletrônica tem picos de até 5×10^5 el/cm³, porém é consideravelmente variável.

A grande maioria das irregularidades que afetam os sinais de rádio acontece na camada F (McNAMARA, 1991; KELLEY, 2009). De acordo com Abdu (2001), as irregularidades no plasma tem origem na base da camada F e são geradas pelo mecanismo da instabilidade de *Rayleigh-Taylor*, começando em tamanhos reduzidos e ganhando proporções maiores caso as condições sejam favoráveis. A instabilidade de *Rayleigh-Taylor* rege a maneira como dois fluidos de densidades diferentes interagem entre si para se misturarem. No caso da ionosfera, quando ocorre o fenômeno da recombinação em uma camada da região F, é proporcionado um ambiente onde há dois tipos de materiais com densidades diferentes, porém em posição contrária, isto é, o plasma mais denso na parte de cima, e o menos denso embaixo. Dessa forma são geradas estruturas em forma de bolhas, onde o plasma menos denso sobe acompanhando as linhas de campo magnético. Caso haja condições favoráveis, aplica-se a formulação de *Rayleigh-Taylor* regendo então o crescimento (*growth-rate*) dessas bolhas de menor densidade de plasma que, por fim, podem alcançar dimensões continentais no sentido Norte-Sul, e podem chegar a mais de 1000 km de altura. A Figura 23 mostra um diagrama da ação da instabilidade em fluidos de densidade diferente. Sabe-se que nas “paredes” dessas bolhas, há uma mistura em menor escala entre os plasmas mais e menos densos, gerando assim as maiores interferências no sinal que por ali se propaga. Entende-se que essas irregularidades em pequena escala, são as principais responsáveis pelos eventos de cintilação em amplitude e em fase devido à sua natureza difrativa (KINTNER *et al*, 2007). Quando o sinal atravessa essas pequenas irregularidades, o fenômeno da difração acaba por deformar o sinal de diversas maneiras. Demais detalhes sobre a interferência desse efeito difrativo nos sinais GNSS são discutidas na seção 3.2 – Cintilação Ionosférica.

Algumas características importantes das bolhas ionosféricas sobre o território brasileiro são apontadas por Paulino *et al.* (2011). Em um experimento realizado na região nordeste do Brasil, constatou-se que as bolhas geradas ganhavam velocidade no sentido oeste-leste entre as 18:00 e 22:00, hora local. Após esse período, as estruturas desaceleravam até o fim da noite, quando se dissipavam. Constatou-se também que durante períodos de alta atividade solar, bem como no verão, as bolhas eram mais rápidas, estando sua velocidade entre 15 e 60 m/s.

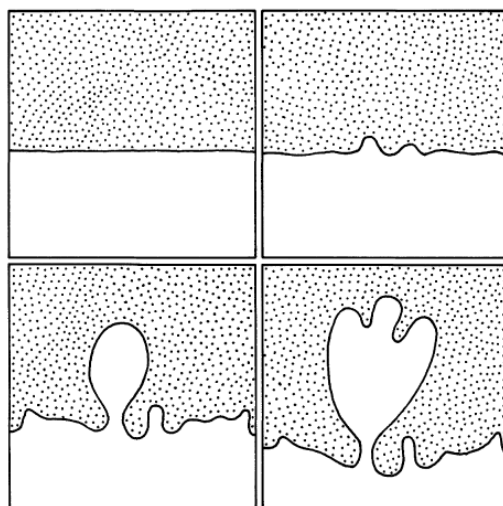


Figura 23 - Esquema sequencial da ação da instabilidade de *Rayleigh-Taylor*. Acima o fluido de maior densidade (Fonte: Adaptado de Kelley, 2009).

Na região F, quando esse tipo de irregularidade ocorre, costuma-se utilizar o termo genérico *Spread F* para designar irregularidades nessa camada que possam ser observadas em diferentes frequências (McNAMARA, 1991, DAVIES, 1990, ABDU, 2001).

Pela Figura 24 pode-se observar resumidamente a posição de cada camada citada, bem como as densidades a elas relacionadas e uma comparação com perfis de temperatura da atmosfera neutra.

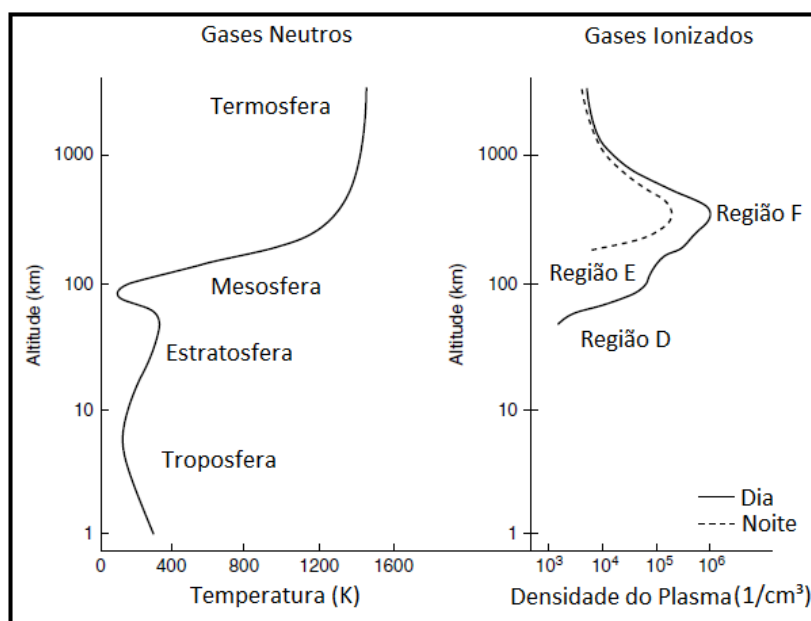


Figura 24 - Perfil atmosférico em relação à Temperatura (esquerda) e em relação à Ionização (Fonte: Adaptado de Kelley, 2009).

Além do perfil vertical da ionosfera, também comparece uma divisão latitudinal dos efeitos dessa camada. A Figura 25 mostra essa divisão empírica, baseada nos efeitos em comum, como auroras, anomalias, variação na concentração eletrônica e etc. (FONSECA JÚNIOR, 2002).

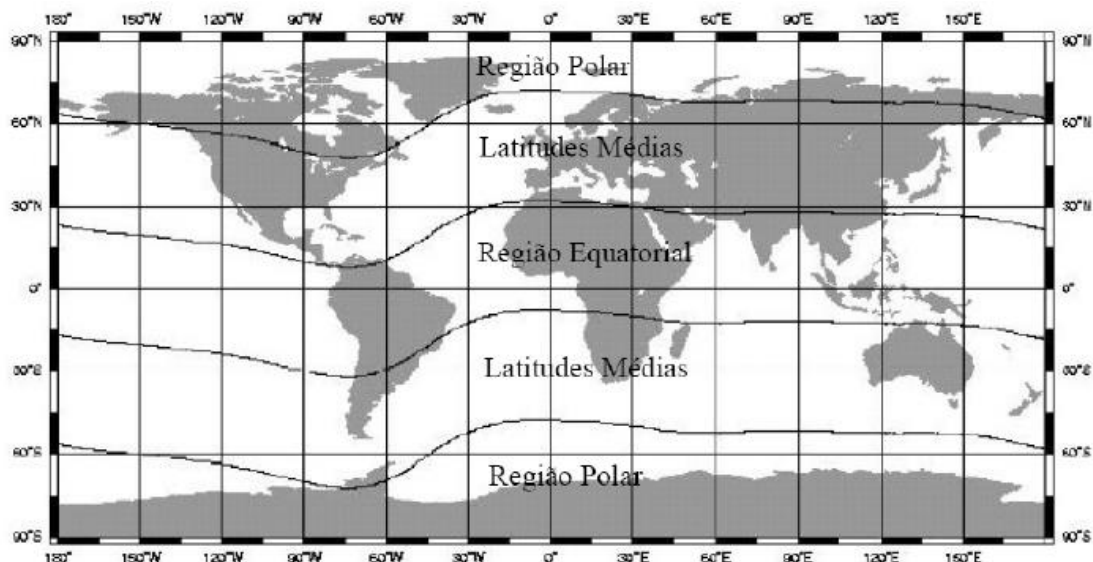


Figura 25 - Regiões geográficas da ionosfera terrestre (Fonte: Fonseca Júnior, 2002).

A região equatorial contém os maiores valores de concentração de elétrons, principalmente no início da tarde, sendo que no equador geomagnético os valores são mais baixos do que nas latitudes entre 15° e 20°, onde se concentram os valores mais altos da região. Tal fenômeno é denominado anomalia equatorial. As mais fortes instabilidades do plasma ionosférico ocorrem na camada F, na região equatorial, e normalmente após o por do sol. Nas regiões de altas latitudes o pico de densidade de elétrons é pequeno, porém há uma grande instabilidade de plasma. Nas regiões polares e de latitudes médias é detectável a variação diurna, o que mostra que a incidência solar é um fator considerável na variação da densidade de elétrons na ionosfera (FONSECA JÚNIOR, 2002).

Além dessas características regionais, outros fatores podem influenciar na concentração de elétrons. São as chamadas anomalias, e serão descritas nas seções 3.2.2.1 e 3.2.2.2..

2.2.2.1 Anomalia Magnética do Atlântico Sul

Na região da América Latina existe uma peculiaridade que altera o comportamento da ionosfera, causada pela chamada AMAS – Anomalia Magnética do

Atlântico Sul. A AMAS é uma pequena porção do planeta que apresenta a menor intensidade magnética de todo o globo terrestre. Nessa camada, os íons passam a ser afetados a cerca de 100 Km de altitude, enquanto que em regiões no hemisfério norte, essa altitude chega a 600 Km. Essa anomalia encontra-se sob a América do Sul, mas se move lentamente para o oeste. Sua localização é mostrada na Figura 26, onde, em vermelho, encontra-se a parte mais fraca do campo magnético (JASKULSKI *et al.* 2006).

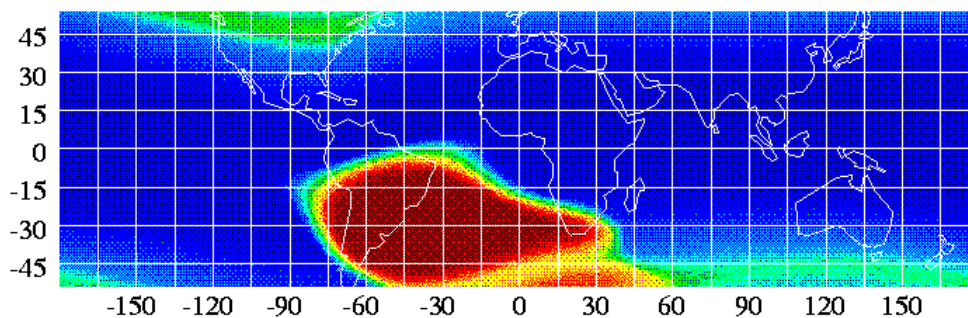


Figura 26 - Localização da AMAS, em vermelho (Fonte NASA/GSFC Divulgação).

Apesar da razão dessa fraqueza do campo magnético não ser totalmente conhecida, sabe-se que essa diferença vem aumentando a cada dia desde que começaram as observações. Em 450 anos, houve uma diminuição de cerca de 8500 nT (HARTMANN; PACCA, 2009).

Em virtude do campo magnético nesta região ter uma intensidade menor que em seu entorno, as partículas energizadas que normalmente se encontrariam na camada F, descem para a camada D da ionosfera, causando o efeito de ionização em uma quantidade ainda maior de partículas neutras, aumentando os valores de concentração de elétrons livres da região (JASKULSKI *et al.*, 2006).

Como o foco dessa dissertação está na cintilação ionosférica, vale ressaltar que, apesar de serem resultados preliminares, estudos mostram que a AMAS apresenta importante influência nas condições para que existam irregularidades nas camadas E e F da ionosfera, contribuindo para o efeito *Spread F* (ABDU, 2001, PAULINO *et al.*, 2011).

2.2.2.2 Anomalia de Ionização Equatorial

Outra circunstância sob a qual boa parte da América Latina se encontra sob efeito, é a chamada Anomalia de Ionização Equatorial ou Anomalia de *Appleton*. Como a ionização das camadas mais altas da ionosfera terrestre é feita por influência do Sol, esperava-se que na região equatorial houvesse uma taxa maior de íons, pois recebe mais radiação,

porém, não é o que acontece. Segundo Kelley (2009), as linhas do campo magnético terrestre, na região equatorial, encontram-se praticamente paralelas à superfície, e, por consequência ao campo elétrico da Terra, resultando aos íons uma velocidade perpendicular aos campos dado por:

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}, \quad (07)$$

sendo $\mathbf{B}$ o vetor do campo magnético, e $\mathbf{E}$ o campo elétrico gerado pelo movimento das partículas não-neutras.

No caso da Terra, essa velocidade resultante, e a força adquirida como mostra a Equação 7, fazem com que esses íons sejam lançados para cima, e, mais tarde, devido à força da gravidade e à mudança na força resultante, são puxados de volta para próximo à superfície terrestre, formando o chamado “efeito fonte”, onde uma onda de íons cai de volta sob a superfície, aproximadamente a 15° de latitude magnética, sendo esse local denominado “crista” da Anomalia Equatorial. Esse efeito causa intensas mudanças na densidade eletrônica da ionosfera. (KELLEY, 2009). A Figura 27 mostra um diagrama com o vetor de força resultante nos elétrons na região equatorial.

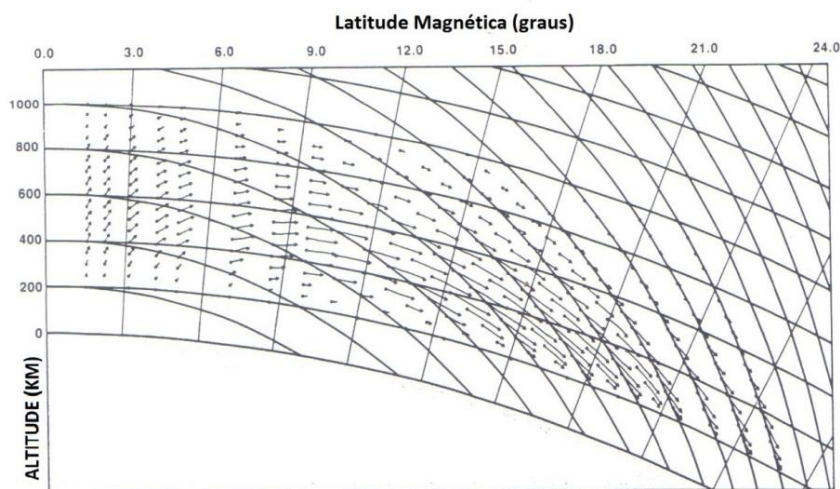


Figura 27 - Diagrama da força resultante nos elétrons livres na região equatorial (Fonte: Adaptado de McNamara, 1991).

Já a Figura 28 mostra um mapa global da densidade eletrônica, onde é possível observar duas regiões distintas de alta concentração de elétrons provenientes dos efeitos da Anomalia de *Appleton* sendo então o resultado da interação mostrada na Figura 27.

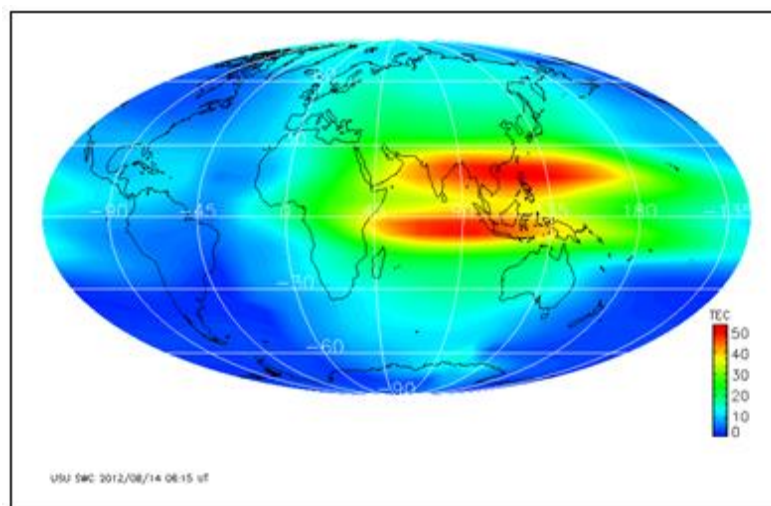


Figura 28 - Mapa global de densidade eletrônica (Fonte: NASA/GSFC, 2012).

Devido aos efeitos citados, quando a atividade magnética na onda de choque em arco, na envoltória e na cauda magnética é irregular, começam a ocorrer irregularidades também na densidade eletrônica. Como na América do Sul há ainda o fator da AMAS e da anomalia equatorial, a ionosfera acaba tendo um comportamento diferente das demais regiões do planeta, tendo como agravante o surgimento das bolhas de irregularidades, evento esse, que também proporciona no sinal o efeito de cintilação.

Na seção 2.3 são descritas as principais características dos distúrbios magnéticos de origem solar que acabam por interferir na mecânica regulatória do comportamento da ionosfera.

2.3 Distúrbios Magnéticos

Tempestades magnéticas são distúrbios no campo magnético causados por fontes externas que duram desde algumas horas até vários dias, tempo no qual, vários componentes do campo magnético terrestre sofrem flutuações em escalas grandes quando comparadas a períodos sem distúrbios. A maioria dos eventos de tempestades magnéticas se inicia com o evento chamado “Início Abrupto”, do inglês *Sudden Commencement* (SC) (DAVIES, 1990; McNAMARA, 1991; KELLEY, 2004).

Durante eventos de distúrbios magnéticos na atmosfera terrestre, a atividade elétrica na ionosfera aumenta. De acordo com Davies (1990), o efeito desses distúrbios é

maior nas regiões da alta latitude, podendo gerar correntes de até 1 milhão de amperes⁷, e se forem fortes o suficiente, movem-se em direção ao equador magnético. Com essas alterações, o campo magnético sofre variações de intensidade, passando por três fases: início abrupto, fase inicial, fase principal e recuperação. A Figura 29 mostra um modelo dessa variação de forma gráfica na escala γ ⁸.

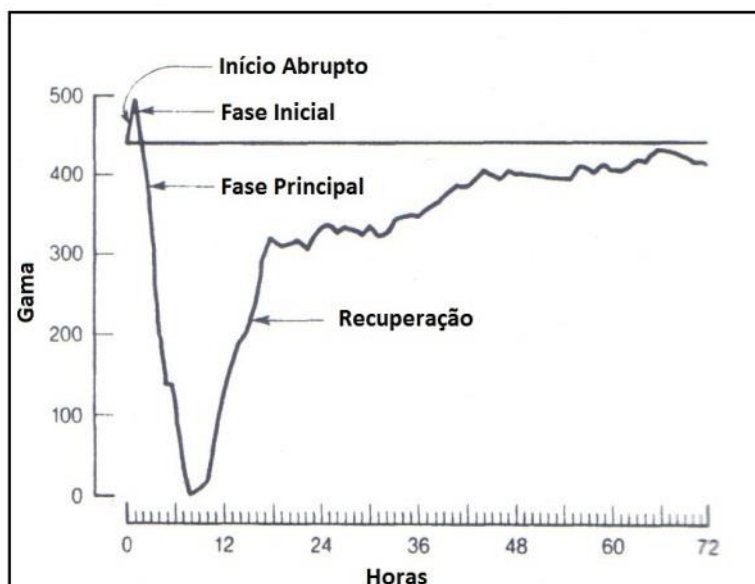


Figura 29 - Tempestade Magnética consistindo de um Início Abrupto, a Fase Inicial (positiva), a Fase Principal (negativa) e a Recuperação do campo (Fonte: Adaptado de Davies, 1990).

Nesse contexto, a intensidade da variação do campo magnético nas tempestades pode ser medida por diversos índices, dentre eles o índice global K_p , o equatorial D_{ST} e o índice “auroral” AE.

Em baixas latitudes, a maior parte do distúrbio magnético é percebida na linha de campo elétrico que passa pelo equador magnético que, por sua vez, é representada pelo índice D_{ST} (*Disturbance Storm-Time*). Esse índice, proposto por Sugiura (1964), é calculado com estações de monitoramento próximas ao equador. Esse índice mostra o quanto a componente horizontal do campo magnético na região equatorial terrestre variou em relação a uma média histórica. Quanto menor esse índice, maior a quantidade de partículas energizadas que estão entrando na Terra e influenciando o chamado anel magnético equatorial no sentido contrário, diminuindo sua intensidade.

⁷ Apenas para efeito de comparação, uma bateria de carro de alta amperagem proporciona cerca de 80 Amperes de corrente.

⁸ 1 γ (gama) = 1 nT (nanotesla) de variação de intensidade no campo magnético.

De acordo com Kelley (2004), o índice K_p representa o efeito magnético das correntes em latitudes médias. O índice K_p foi inicialmente proposto por Bartels *et al.* (1939), e é obtido da integração dos resultados de algumas estações de monitoramento do campo magnético espalhadas por regiões de latitudes que variam entre 48° e 63° tanto no hemisfério Norte quanto no Sul. Esse índice remapeia os distúrbios para uma escala adimensional entre 0 e 9, e, na maioria dos centros é disponibilizado a cada três horas, oito vezes ao dia. Inicialmente, é realizada uma medição da variação da amplitude (valor máximo menos valor mínimo) da intensidade do campo elétrico, variação essa chamada de R . A Tabela 3 mostra a relação entre o valor K_p e o valor R para uma estação com valores típicos de latitudes médias.

Tabela 3 - Relação entre o índice K_p e a variação R (nT).

K_p	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.

Um dos centros que fornece dados relativos a esse índice é o NOAA, que além de fornecer o índice observado, fornece as previsões para 1, 4 e 7 horas, obtidas através do modelo *Wing K_p* ⁹ (NOAA, 2012). Além desse índice, o NOAA também fornece o índice A_p , referente à uma média diária ou mensal do índice K_p , variando de 0 a 400 em uma escala logarítmica.

Por sua vez, o índice AE (*Auroral Electrojet index*) é obtido por uma série de estações espalhadas em altas latitudes próximas à região auroral (extremo norte) com o mesmo papel do índice K_p , mas em uma região diferente, conhecida como a “porta de entrada” das partículas energizadas vindas do sol (DAVIS, SUGIURA, 1966). Seu cálculo é relativamente simples, partindo das medidas do campo magnético de diversas estações, o índice AE é a amplitude (valor máximo AU - menos mínimo AL) de todas as medidas. Por questão de conveniência, fornece-se também a média entre os valores máximos de mínimos, chamada de índice AO. De acordo com McNamara (1991), AE é o índice mais utilizado para caracterizar as tempestades solares, e está altamente correlacionado com as interferências de origem interplanetária nas comunicações por satélites.

A Figura 30 mostra a distribuição das estações de monitoramento pelo mundo, enquanto a Tabela 4 mostra maiores detalhes desses locais bem como para qual índice fornecem os dados.

⁹ Disponível em <http://www.swpc.noaa.gov/wingkp/> (Acesso em Jan. 2013).

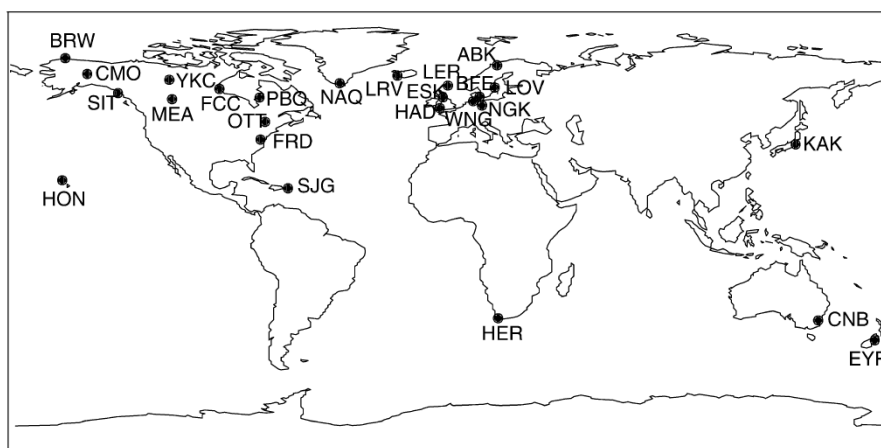


Figura 30 - Mapa das estações de monitoramento dos índices de distúrbios magnéticos (Fonte: GFZ-POTSDAM, 2013).

Tabela 4 - Estações de monitoramento dos índices de distúrbios magnéticos.

Agência Observadora	País	Observatório	Sigla	Índice
<i>Geoscience Australia</i>	Austrália	Canberra	CNB	K _p
<i>Geological Survey of Canada</i>	Canadá	Fort Churchill	FCC	AE
<i>Geological Survey of Canada</i>	Canadá	Meanook	MEA	K _p
<i>Geological Survey of Canada</i>	Canadá	Ottawa	OTT	K _p
<i>Geological Survey of Canada</i>	Canadá	P.-la-Baleine	PBQ	AE
<i>Geological Survey of Canada</i>	Canadá	Yellowknife	YKC	AE
<i>Danish Meteorological Inst.</i>	Dinamarca	Brorfelde	BFE	K _p
<i>Danish Meteorological Inst.</i>	Dinamarca	Narsarsuaq	NAQ	AE
<i>GeoForschungsZentrum Postdam</i>	Alemanha	Niemegk	NGK	K _p
<i>GeoForschungsZentrum Postdam</i>	Alemanha	Wingst	WNG	K _p
<i>University of Iceland</i>	Islândia	Leirvogur	LRV	AE
<i>Japan Meteorological Agency</i>	Japão	Kakioka	KAK	D _{ST}
<i>Geological and Nuclear Science</i>	N. Zelândia	Eyerewell	EYR	K _p
<i>National Research Foundation</i>	África do Sul	Hermanus	HER	D _{ST}
<i>Swedish Geological Survey</i>	Suécia	Abisko	ABK	AE
<i>Swedish Geological Survey</i>	Suécia	Lovoe	LOV	K _p
<i>British Geological Survey</i>	Reino Unido	Eskdalemuir	ESK	K _p
<i>British Geological Survey</i>	Reino Unido	Hartland	HAD	K _p
<i>British Geological Survey</i>	Reino Unido	Lerwick	LER	K _p
<i>US Geological Survey</i>	EUA	Barrow	BRW	AE
<i>US Geological Survey</i>	EUA	College	CMO	AE
<i>US Geological Survey</i>	EUA	Fredericksburg	FRD	K _p
<i>US Geological Survey</i>	EUA	Honolulu	HON	D _{ST}
<i>US Geological Survey</i>	EUA	San Juan	SJG	D _{ST}
<i>US Geological Survey</i>	EUA	Sitka	SIT	K _p

3 INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NO POSICIONAMENTO POR GNSS

Desde o desligamento da SA (*Selective Availability*), a ionosfera se tornou a maior fonte de erros no posicionamento absoluto por GNSS (CAMARGO, 1999).

Tendo em vista essa importante influência da atmosfera terrestre na propagação dos sinais GNSS, os tópicos desse capítulo abordarão os efeitos dessa atmosfera nos sinais, as características das ondas que por ela propagam, e as principais consequências dessa influência.

3.1 Refração Ionosférica

Um meio onde a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende da frequência de emissão é chamado meio dispersivo. Segundo Seeber (2003), a influência da ionosfera na propagação de sinais é caracterizada principalmente pela interação eletromagnética entre o campo magnético eletricamente ativo da atmosfera e o campo gerado pela onda que propaga por esse meio. Quando a frequência de vibração das partículas do meio e a frequência da onda são próximas, ocorre uma espécie de ressonância, gerando então o efeito dependente da frequência (DAVIES, 1990).

Sabe-se que em um meio dispersivo, a velocidade de grupo (onda modulada) é diferente da velocidade da fase (onda portadora), sendo essa diferença descrita pela relação:

$$v_g = v_p - \lambda \frac{dv_p}{d\lambda}, \quad (08)$$

onde v_g é a velocidade do grupo, v_p é a velocidade da fase, λ o comprimento de onda em questão e $\frac{dv_p}{d\lambda}$ a derivada da velocidade da fase em relação ao comprimento de onda. Dessa forma, em um meio dispersivo a velocidade de grupo sempre será menor em relação à velocidade de fase.

Pode-se também obter a mesma relação para o índice de refração de um determinado meio:

$$n_g = n_p - f \frac{dn}{df}, \quad (09)$$

sendo n_g e n_p os índices de refração para grupo e fase, respectivamente, f a frequência em questão e o termo $\frac{dn}{df}$ a derivada do índice de refração em relação a frequência, ou, em outras palavras, como o índice de refração varia de acordo com mudanças na frequência, sendo essa a componente de dispersividade.

O coeficiente de refração do meio dispersivo pode ser escrito na forma de série de potências:

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (10)$$

Os coeficientes c_i são independentes do valor da frequência f , no entanto, dependem da densidade de elétrons no local entre outros fatores. Utilizando somente o primeiro e o segundo termos da Equação 10, tem-se:

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2}, \quad (11)$$

que é chamado de “efeito de primeira ordem” da refração ionosférica.

De acordo com Seeber (2003), o coeficiente c_2 é uma junção de diversas constantes dependentes, como dito anteriormente, apenas da densidade eletrônica no local e equivalente a $-40,3.n_e$. Portanto, substituindo o valor da constante em 11, tem-se:

$$n_p = 1 - \frac{40,3.n_e}{f^2}. \quad (12)$$

Já para o grupo, pode-se derivar a Equação 12 em busca do termo $\frac{dn}{df}$. Tem-se então:

$$\frac{dn}{df} = -\frac{2c_2}{f^3} - \frac{3c_3}{f^4} - \frac{4c_4}{f^5} - \frac{5c_5}{f^6} \dots \quad (13)$$

Aplicando 13 em 10, tem-se:

$$n_g = n_p - f \left(\frac{2c_2}{f^3} + \frac{3c_3}{f^4} + \frac{4c_4}{f^5} + \frac{5c_5}{f^6} \dots \right). \quad (14)$$

E, portanto:

$$n_g = n_p - \frac{2c_2}{f^2} - \frac{3c_3}{f^3} - \frac{4c_4}{f^4} - \frac{5c_5}{f^5} \dots \quad (15)$$

Por fim, substituindo 10 em 15, obtém-se:

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} - \frac{2c_3}{f^3} - \frac{3c_4}{f^4} - \frac{4c_5}{f^5} \dots \quad (16)$$

Assim como em 11, pode-se truncar a relação para que se obtenha o efeito de primeira ordem, resultando em:

$$n_g = 1 + \frac{40,3.n_e}{f^2}. \quad (17)$$

Ao se comparar as Equações 17 e 12, fica claro o efeito mostrado na Equação 08 onde há uma diferença de sinal na influência da ionosfera nas velocidades de propagação. Sabendo que

$$n = \frac{c}{v}, \quad (18)$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo, pode-se substituir 18 e 12 em 8, encontrando assim a velocidade de fase e de grupo dependendo da concentração de elétrons no meio de propagação:

$$v_p = \frac{c}{1 - \frac{40.3 n_e}{f^2}} \quad e \quad v_g = \frac{c}{1 + \frac{40.3 n_e}{f^2}} . \quad (19)$$

Desse modo, com o conhecimento da densidade eletrônica n_e , é possível calcular uma correção aproximada, ou correção de primeira ordem, ao sinal recebido pela antena do receptor. Nos satélites GPS, coeficientes do modelo de Klobuchar são transmitidos junto às efemérides, proporcionando uma correção de até 50% dos efeitos do atraso em escala global (SEEBER, 2003). Já nos satélites Galileo, os coeficientes transmitidos são referentes ao modelo NeQuick (DiGIOVANNI; RADICELLA, 1990). Tendo em mãos mais de um modelo disponível sendo transmitido, o usuário GNSS pode optar por qualquer um deles, bastando que se adeque as medidas à frequência f determinada na Equação 19.

De acordo com Seeber (2003), os efeitos de segunda e terceira ordem, para usuários de posicionamento por satélites, são cerca de mil vezes menores que os de primeira, no entanto, também podem ser modelados para atividades de altíssima precisão. Há, no contexto acadêmico, soluções disponíveis para correções desses efeitos de menor magnitude (MARQUES *et al.*, 2011).

Tendo então as velocidades de grupo e fase estimadas, bem como os coeficientes de refração para o conjunto frequência emitida/densidade eletrônica, de acordo com Hoffman-Wellenhof *et al.* (2001), pode-se estimar também o valor do atraso no sinal usando a integração ao longo do caminho percorrido, como mostra a Equação 20:

$$S = \int_{Satélite}^{Receptor} n \, ds, \quad (20)$$

sendo S o caminho percorrido pelo sinal nas condições reais.

Supondo que o caminho fosse inteiramente sem interferências (no vácuo, onde $n = 1$), a relação seria igual a:

$$\rho = \int_S^R ds_0, \quad (21)$$

sendo ρ a distância geométrica entre satélite e receptor. Logo, a diferença entre o caminho percorrido pelo sinal com refração ionosférica, e o mesmo sinal no vácuo, é expressa por:

$$\Delta S_{ION} = S - \rho = \int_S^R n \, ds - \int_S^R ds_0 . \quad (22)$$

Usando as Equações 22 e 19, tem-se para o atraso da fase a Equação 23:

$$\Delta S_{ION, P} = \int_S^R \left(1 - \frac{40,3 \cdot n_e}{f^2}\right) ds - \int_S^R ds_0. \quad (23)$$

E para o grupo, a Equação 24:

$$\Delta S_{ION, G} = \int_S^R \left(1 + \frac{40,3 \cdot n_e}{f^2}\right) ds - \int_S^R ds_0. \quad (24)$$

Justificando assim a diferença de sinais entre os termos I_r^s das equações de fase e pseudodistância das observáveis GNSS. Na fase há um avanço aparente, e no grupo um atraso.

Para facilitar o entendimento, pode-se desenvolver ainda mais as Equações 23 e 24:

$$\Delta S_{ION, P} = \int_S^R ds - \int_S^R \frac{40,3 \cdot n_e}{f^2} ds - \int_S^R ds_0. \quad (25)$$

De acordo com Seeber (2003), o primeiro e o terceiro termo são praticamente equivalentes, pois o desvio sofrido pelo sinal é significativamente menor que o atraso sofrido pelo sinal imposto pela Equação 17. Dessa forma, pode-se integrar o primeiro termo em relação ao caminho “ideal” ds_0 e isolar as constantes da função. Restando então a Equação 26:

$$\Delta S_{ION, P} = -\frac{40,3}{f^2} \int_S^R n_e ds_0. \quad (26)$$

Nesse momento do desenvolvimento, é interessante que se defina a quantidade de elétrons no caminho percorrido pela onda por intermédio da integração desse caminho em relação à densidade eletrônica. Define-se então o TEC (*Total Electron Content* ou Conteúdo Eletrônico Total) como sendo a quantidade de elétrons numa coluna de um metro quadrado de seção transversal, que se estende do satélite até a antena do receptor. Representa-se o TEC pela Equação 27:

$$TEC = \int_S^R n_e ds_0. \quad (27)$$

Substituindo então o valor da densidade eletrônica n_e ao longo do caminho pelo TEC, que se deseja encontrar, e considerando que ambas as frequências emitidas percorreram o mesmo caminho, tem-se para a fase e grupo:

$$\Delta S_{ION, P} = -\frac{40,3 \text{ TEC}}{f^2} \quad e \quad \Delta S_{ION, g} = \frac{40,3 \text{ TEC}}{f^2}. \quad (28)$$

S

sabendo então que o efeito da ionosfera é dependente da frequência utilizada, podem-se usar os valores de pseudodistância (também afetados de maneira dispersiva) para se estimar os valores de TEC, desde que haja duas frequências disponíveis que propaguem pela mesma densidade eletrônica. A Equação 29 mostra essa relação:

$$\text{TEC} = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3 (f_1^2 - f_2^2)} [PD_{1r}^s - PD_{2r}^s - \varepsilon]. \quad (29)$$

Nessa Equação, podem-se utilizar os valores lidos de pseudodistância, considerados ruidosos, ou os valores de pseudodistância suavizada pela fase da onda portadora. A Figura 31 mostra ambos os métodos aplicados ao mesmo conjunto de dados.

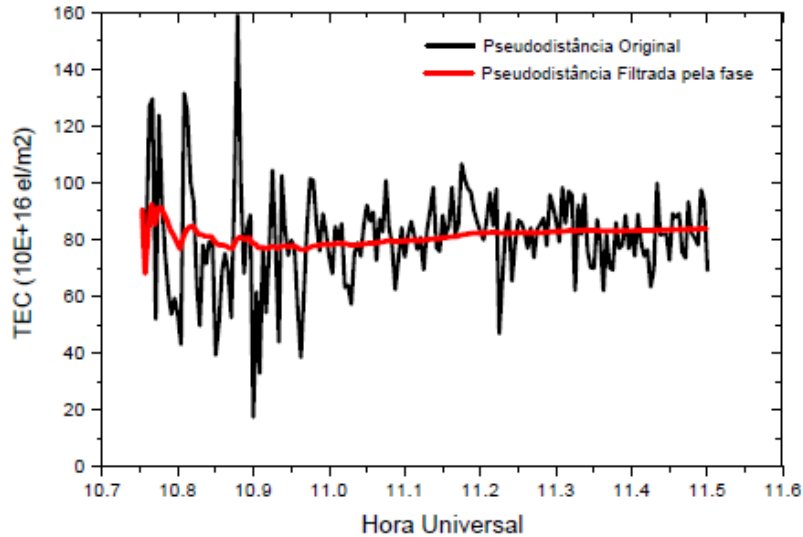


Figura 31- Cálculo do TEC utilizando as medidas de pseudodistância e pseudodistância filtrada pela fase (Fonte: CAMARGO; MATSUOKA, 2006).

3.2 Cintilação Ionosférica

A refração de ondas eletromagnéticas através da ionosfera é alvo de diversos estudos e causa impactos significativos nas mais diversas áreas das telecomunicações (CONKER *et al.*, 2003, AQUINO *et al.* 2007, STRANGWAYS, 2008; RODRIGUES, 2003;

MATSUOKA, 2003). Conforme apresentado, sabe-se que a ionosfera é uma camada da atmosfera terrestre que se torna altamente instável devido a efeitos magnéticos aleatórios tanto internos como externos a Terra (McNAMARA, 1991).

Segundo Conker *et al.* (2002), 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. A consequência dessa rápida variação no sinal é uma degradação na acurácia das medidas de fase e pseudodistância nos receptores GNSS, sendo diretamente refletidas nas coordenadas estimadas, e na capacidade do receptor de coletar os dados corretamente e manter a sintonia (*track*) dos satélites observados.

De acordo com Davies (1990), um sinal de rádio que atravessa a ionosfera será modificado por irregularidades do tamanho de poucos metros até quilômetros, podendo se tornar um problema severo ao ponto de inviabilizar o rastreamento do sinal. Já foram observados efeitos de cintilação em sinais que variam de 20 MHz até 10 GHz, abrangendo praticamente todo o espectro de frequências utilizadas nas telecomunicações, sendo mais comum em sinais de até 3 GHz.

Por ser um meio dispersivo, quanto maior a frequência, menor a influência da ionosfera no que diz respeito à refração dos sinais. No entanto, mesmo na maior frequência utilizada pelos sistemas de posicionamento por satélites, as variações de fase e amplitude são significativas no cálculo de coordenadas, podendo causar perdas de ciclo nas frequências em curtos intervalos de tempo. E sabe-se que, ao contrário do atraso no código e avanço na fase, a cintilação não pode ser corrigida diretamente pela combinação entre duas frequências, devido à sua característica de ser um evento quase aleatório e não correlacionado com características dos sinais (STRANGWAYS, 2008; 2009).

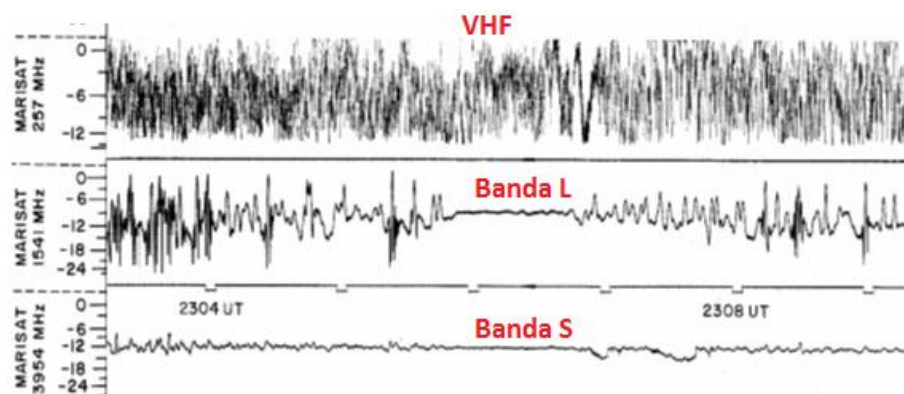


Figura 32 - Efeitos de cintilação em diversas bandas de frequência (Fonte: Adaptado de Groves , 2004).

A Figura 32 mostra, durante um evento de cintilação, o comportamento da intensidade do sinal em três diferentes bandas¹⁰ (em ordem crescente de frequência), mostrando o efeito dispersivo também presente nesses eventos. A banda VHF do exemplo encontra-se na frequência de 257 MHz, a banda L na frequência de 1541 MHz, e a Banda S em 3954 MHz.

Nos tópicos seguintes, são evidenciadas as principais características dos eventos de cintilação nos sinais GNSS, como a cintilação na amplitude e na fase, bem como os principais aspectos presentes nas cintilações de região equatorial.

3.2.1 Cintilação em amplitude

Uma característica importante dos sinais dos satélites de posicionamento que acabam por não comparecer nas equações das observáveis GNSS é a amplitude da onda, ou, potência do sinal. Apesar das diversas definições existentes para amplitude de uma onda, sempre estão presentes os elementos “potência máxima” ($P_{\max}$) e “potência mínima” ($P_{\min}$) de um sinal em um determinado intervalo de tempo. A Figura 33 mostra um exemplo onde o sinal representado em azul tem o dobro da potência do sinal representado em vermelho.

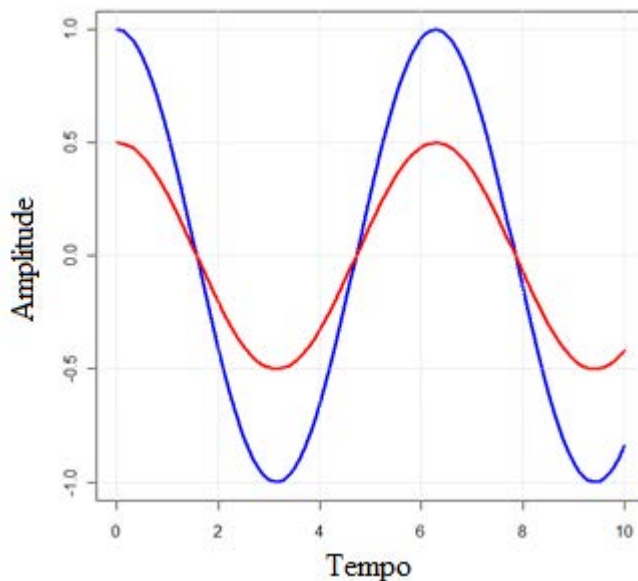


Figura 33 - Exemplo de sinais com mesma frequência e potências diferentes.

De acordo com McNamara (1991), a potência de um sinal nada mais é do que uma padronização de quanta energia é recebida em determinada área, sendo a unidade de medida mais comum para o caso dos sinais de rádio o W/m^2 . Por questão de padronização,

¹⁰ Os sinais GNSS encontram-se alocados na Banda L.

pode-se definir também a intensidade do sinal como sendo função da potência. Essa função é representada na Equação 30:

$$I = 10 \log P, \quad (30)$$

sendo P a potência do sinal em determinado momento. A unidade de medida dessa escala logarítmica é o decibel (dB).

A Figura 34 mostra um exemplo de cintilação onde a potência do sinal é afetada. No gráfico “a”, a intensidade do sinal é representada, mostrando a variabilidade da potência em função do tempo. Já no gráfico “b”, é mostrada a variabilidade do TEC, também em função do tempo. Observa-se nesse caso a alta correlação entre os gradientes de densidade eletrônica e variações na potência do sinal emitido pelo satélite GPS.

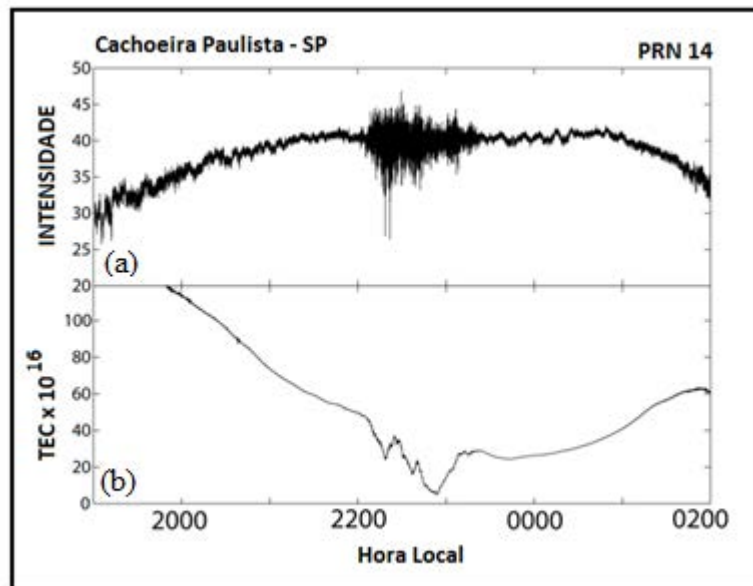


Figura 34 - Exemplo de cintilação na amplitude de um satélite GPS (PRN 14) (Fonte: Adaptado de KINTNER, 2007).

Utilizando esses conceitos, um índice muito apropriado para caracterizar a variação da potência de um sinal ao longo do tempo são os índices S. É possível que se divida a amplitude de uma onda em harmônicos, sendo o índice S₄ (quarto harmônico) o mais utilizado entre todos (BRIGGS; PARKIN, 1963 apud DAVIES, 1990; STREETS, 1969). O índice é dado pela dispersão da intensidade do sinal ao longo do tempo dividido pela média dessa intensidade, como mostrado na Equação 31:

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}}, \quad (31)$$

sendo I um vetor contendo a intensidade do sinal em um determinado intervalo de tempo, e $\langle \rangle$ um operador de média. Os demais índices S correspondem ao S_4 de maneira aproximada por (STREETS, 1969):

$$\blacksquare S_3 \approx 0,73 S_4$$

$$\blacksquare S_2 \approx 0,52 S_4$$

$$\blacksquare S_1 \approx 0,42 S_4$$

Usualmente, nas análises feitas pelo GNSS, o vetor I contém 3000 medidas tomadas em um minuto, ou seja, com uma taxa de coleta de 50 Hz para que se contemplem as rápidas variações na amplitude da onda (REZENDE, 2010). A Figura 35 mostra um exemplo desse índice para um período de cintilação onde um dos satélites é afetado.

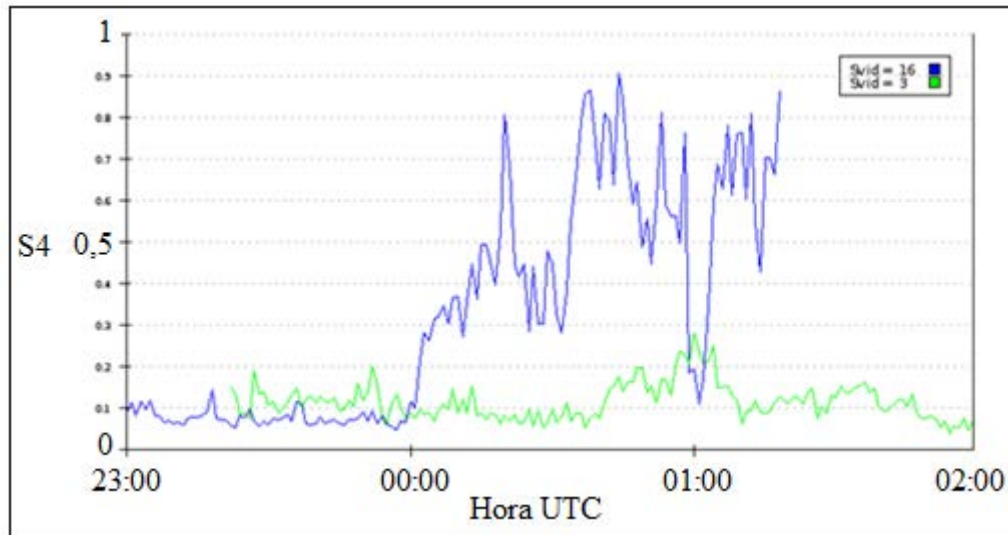


Figura 35 - Índice S_4 para dois satélites GPS em momento de cintilação (máscara de elevação de 20°).

A correlação entre a intensidade do sinal e o índice S_4 depende da distribuição estatística da intensidade. De acordo com o manual de operações da *International Telecommunication Union* (ITU) a distribuição que melhor se ajusta à intensidade do sinal é a distribuição de Nakagami (ITU, 2012).

A Tabela 5 relaciona de maneira empírica o índice S_4 e valores de variação de amplitude do sinal, chamada de flutuação pico-a-pico (P_{fluc}). Esse resultado apresenta uma relação entre dados tomados em diversas condições de intensidade, duração e locais onde a cintilação ionosférica se faz presente. Utilizando também os mesmos dados, Ippolito (2008) relaciona a variação de amplitude e o índice S_4 por:

$$P_{fluc} \approx 27,5 (S_4)^{1,26}. \quad (32)$$

Tabela 5 - Relação empírica entre o índice S4 e a variação pico-a-pico do sinal que propaga pela ionosfera.

S ₄	P _{fluc} (dB)
0,1	1,5
0,2	3,5
0,3	6
0,4	8,5
0,5	11
0,6	14
0,7	17
0,8	20
0,9	24
1,0	27,5

Fonte: ITU, 2012.

Diversos autores versam também sobre possíveis limiares que definem os índices S₄ e os relacionam a eventos de cintilação ionosférica fracos, médios e fortes. A convenção mais adotada relaciona os índices S₄ menores que 0,3 como eventos de muito fraca ou nenhuma intensidade, entre 0,3 e 0,5 de intensidade fraca, entre 0,5 e 0,7 de intensidade moderada e maiores que 0,7 de forte intensidade. Ocasionalmente, esse índice pode ultrapassar o valor unitário, chegando a valores próximos a duas unidades. Sabe-se, no entanto, que a rastreabilidade do sinal do sistema GPS torna-se inviável quando há uma perda de mais de 20 dB no sinal recebido pela antena dos receptores (GPS-SPS, 2008). Dessa maneira, de acordo com a Tabela 5, pode-se também estabelecer o valor de 0,8 como índice crítico para os valores de S₄.

Além do índice S₄, existe outro índice padronizado entre zero e um que reflete basicamente o mesmo conceito de variação da intensidade do sinal, conhecido como *Scintillation Index* ou SI, é definido como:

$$SI = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (33)$$

onde o vetor *I* apresentado, é o mesmo da Equação 31, com a única diferença de se utilizar apenas seus valores máximos e mínimos, e não mais a variabilidade das leituras. A Figura 36 mostra esse índice para o mesmo momento da Figura 35.

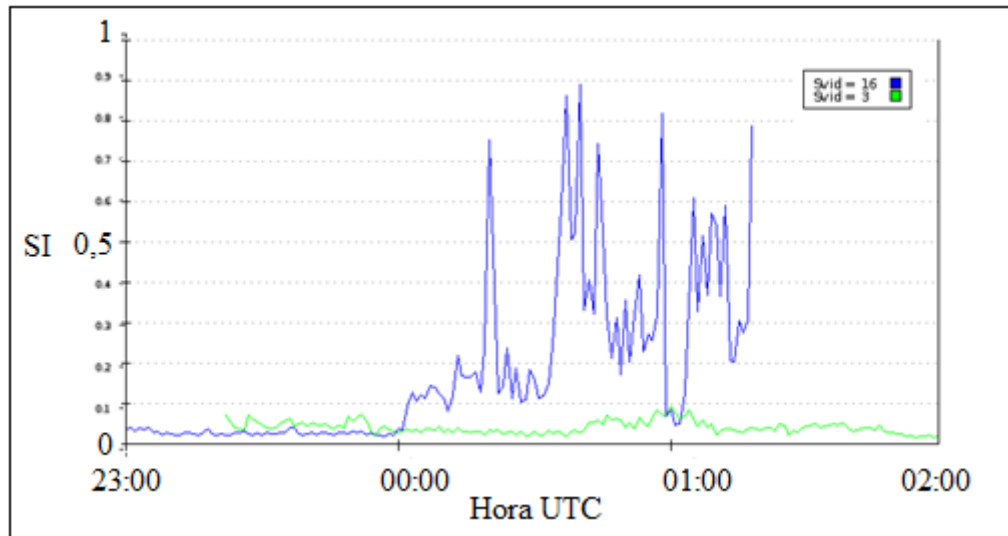


Figura 36 - Índice SI para dois satélites GPS em momento de cintilação (máscara de elevação de 20°).

Outro parâmetro largamente utilizado pela indústria, e que também reflete a potência ou amplitude do sinal é o índice *Carrier-to-Noise Density*, ou C/N_0 . Esse índice é definido como sendo a potência do sinal da onda portadora dividido pela potência do ruído embutido. Em outras palavras, esse índice mostra o quão representativo está o ruído em relação ao sinal recebido. Como exemplo, a especificação dos sinais GPS¹¹ em situações normais, versa que o sinal da portadora chega à superfície da Terra com uma potência de -160 dBW ($\approx 10^{-16}$ W), ou mais. Utilizando esse valor, e um valor fictício de ruído advindo de um processo de filtragem no receptor, pode-se exemplificar o cálculo do C/N_0 :

$$\frac{C}{N_0} = \frac{-160 \text{ dBW}}{-200 \text{ dBW/Hz}} = 40 \text{ [dB - Hz]}, \quad (34)$$

onde dB-Hz representa a unidade de medida do *Carrier-to-Noise Density* em decibéis por unidade de banda. Segundo Joseph (2010), em situações típicas o C/N_0 em receptores GPS se encontra entre 37 e 45 dB-Hz. É importante ressaltar que esse índice, por tratar diretamente de características do sinal, não é influenciado por algoritmos internos do receptor, sendo puramente relacionado à qualidade do sinal recebido. A Figura 37 mostra um exemplo do efeito da cintilação sobre esse parâmetro pela comparação entre dois satélites.

¹¹ Disponível em <http://www.gps.gov/technical/ps/1995-SPS-signal-specification.pdf> (Acesso em Jan. 2013).

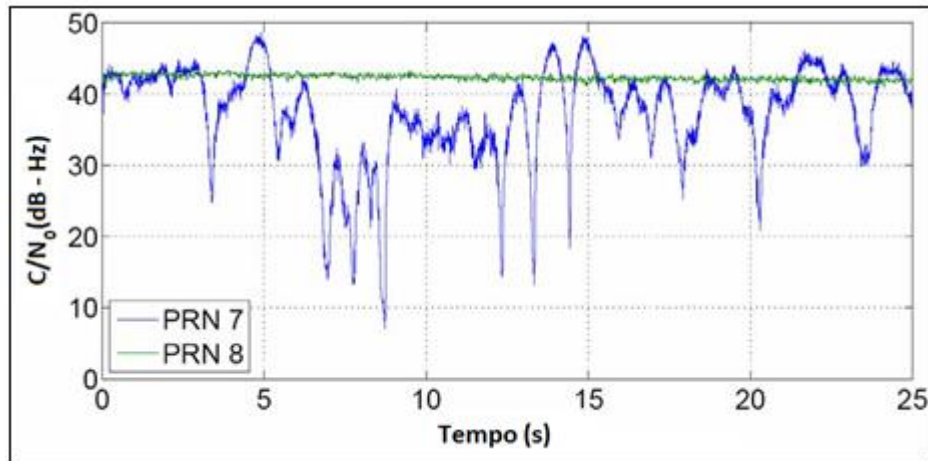


Figura 37 - Exemplo de cintilação ionosférica afetando o índice C/N_0 de dois satélites (Fonte: Adaptado de Kintner, 2007).

Uma padronização existente para esse índice é sua conversão para o chamado *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), onde é representada a medida da relação entre o sinal recebido e o ruído para uma dada largura de banda do receptor. Esse índice, diferentemente do C/N_0 , depende do modo como o receptor coleta os sinais advindos dos satélites, refletindo o desempenho do receptor ao adquirir os sinais (JOSEPH, 2010). Como exemplo nesse caso, para um receptor com largura de banda de 4 MHz tem-se:

$$SNR = \frac{-160 \text{ dBW}}{-200 \text{ dBW/Hz} \cdot 4 \text{ MHz}} = \frac{-160}{-200 \cdot 66} = 26 \text{ dB} \quad (35)$$

Nesse caso, o sinal encontra-se 26 dB abaixo do nível do ruído.

3.2.2 Cintilação em fase

A medida de fase da onda portadora é a medida mais precisa das observáveis GNSS (MONICO, 2008). Ao medir a fase da onda, é possível descobrir em que ponto do período o sinal se encontra, e a partir daí, iniciar a contagem de ciclos de acordo com o movimento do satélite emissor. A Figura 38 mostra um exemplo de dois sinais e a medida de fase entre eles. Nessa figura, pode-se considerar o sinal azul como sendo de referência (um sinal gerado dentro do receptor, por exemplo) e o sinal vermelho um sinal recebido com determinado atraso.

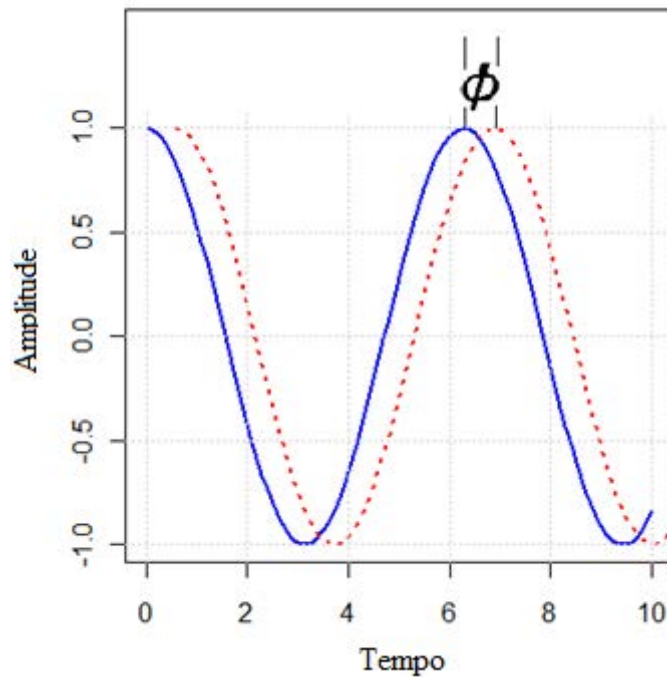


Figura 38 - Exemplo de dois sinais e a medida de fase entre eles.

De acordo com Davies (1990), para se medir a cintilação em fase pode-se utilizar, assim como na amplitude, o desvio-padrão da medida de fase em um determinado intervalo de tempo. Variando os intervalos de tempo, temos os índices Phi, sendo o mais usual deles, o índice Phi60, representando o desvio padrão das medidas de fase nos últimos sessenta segundos, como mostra a Equação 36:

$$\text{Phi60} = \sqrt{\langle \varphi^2 \rangle - \langle \varphi \rangle^2}, \quad (36)$$

sendo φ o vetor das fases medidas.

A Figura 39 mostra a variação do índice Phi60 acima, e abaixo o valor do gradiente do TEC para o mesmo período, evidenciando a relação variação de densidade/variação na medida de fase.

A variação de fase do sinal segue uma distribuição normal com média zero ao longo do tempo, sendo de interesse apenas o desvio padrão dessa variação. Nas regiões equatoriais, observações indicam que os índices S₄ e Phi60 são fortemente correlacionados, contando ainda com o fato de que durante eventos de cintilação ionosférica, os valores de ambos os parâmetros, sendo Phi60 expresso em radianos, são numericamente similares (ITU, 2012).

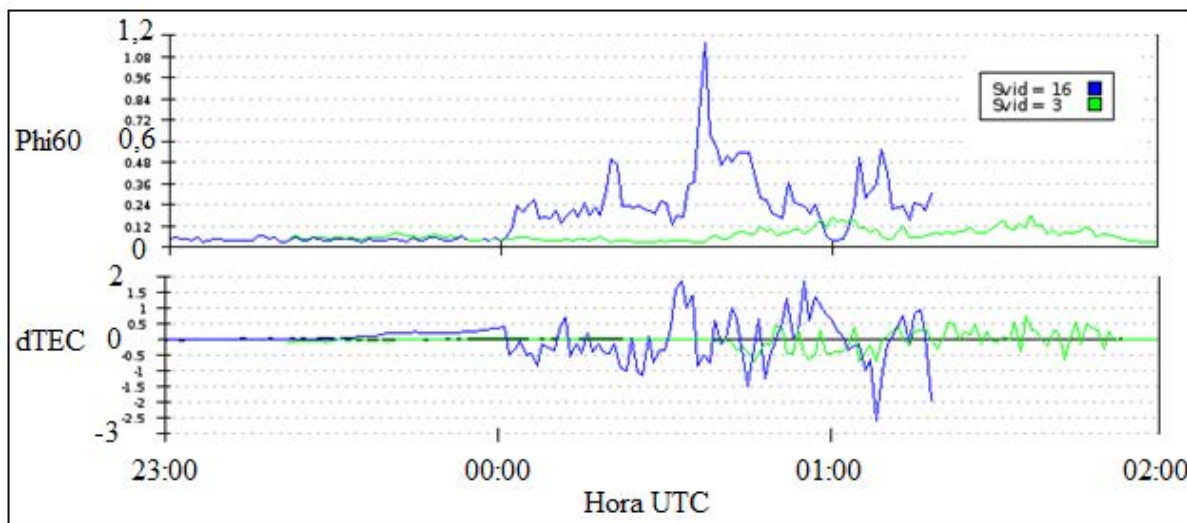


Figura 39 - Parâmetro Phi60 e gradiente do TEC para dois satélites em período de cintilação (máscara de elevação de 20°).

3.2.3 Cintilação na região equatorial

Segundo Davies (1990), a cintilação ionosférica na região equatorial é, de um modo geral, sempre mais severa que nas outras regiões do planeta, seguida pelas regiões de altas latitudes, e por fim, as médias.

De acordo com o mesmo autor, os eventos de cintilação na região equatorial se iniciam de maneira abrupta e alcançam atenuações no sinal de até 20 dB em situações críticas. No decorrer da noite, as pequenas irregularidades tendem a se juntar em blocos maiores, e, mais tarde se dissipar, criando no fim da noite atenuações na casa de 5 a 7 dB. Atenta-se também ao fenômeno das bolhas ionosféricas, já aqui explicitado, que ocorre com considerável frequência na região equatorial. Esse fenômeno gera interferências em sinais que variam da banda VHF (30 a 300 MHz) até as micro-ondas (3 a 30 GHz) (BASU; BASU, 1981), sendo o intervalo espacial mais danoso ao sinal aquele compreendido nas paredes das irregularidades, onde a interação entre os fluidos gera as mais significantes interferências nas ondas eletromagnéticas que por ali se propagam.

Na região equatorial a grande maioria dos eventos de cintilação ocorre durante a noite, mais especificamente na camada F, entre 200 e 600 km de altura. Eventos de cintilação durante o dia são raros, porém, quando ocorrem, normalmente são decorrentes de efeitos na camada *Sporadic E* (RASTOGI *et al.*, 1977 apud DAVIES, 1990).

Especificamente na região Latino Americana, a cintilação ionosférica, estimulada principalmente pela Anomalia Equatorial, tem sua concentração nos meses de Setembro a Abril, e entre as 20hs e 03hs locais (GROVES, 2004). A Figura 40 foi construída

com dados entre Setembro de 2011 e Abril de 2012 de uma estação de monitoramento instalada a cerca de 17°S de latitude magnética e corrobora as afirmações feitas por Grooves.

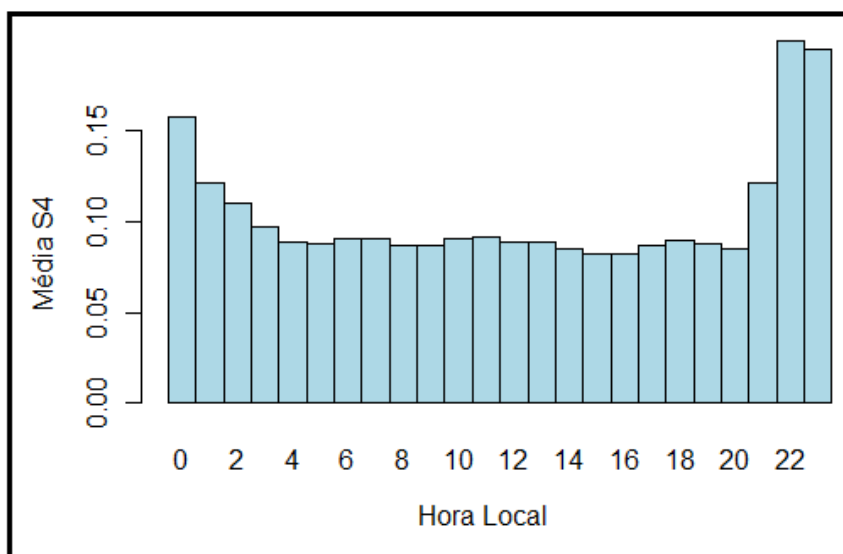


Figura 40 – Média horária do índice S4 meses agrupado por horas (Hora Local, GMT -3) de uma estação a cerca de 17°S de latitude magnética.

3.3 Monitoramento do Clima Espacial da Superfície Terrestre

De acordo com as referências abordadas previamente, a definição de clima espacial engloba eventos que acontecem desde o interior do Sol, até a alta atmosfera terrestre. Nesse contexto, existem diversos modos de se realizar o monitoramento do comportamento desses aspectos, entre eles, o monitoramento por satélites por intermédio de missões espaciais, o monitoramento por equipamentos sensores da ionosfera na superfície terrestre, e, por fim, receptores GNSS.

No que diz respeito à atividade solar, McNamara (1991) chama atenção para o estudo da atividade solar na frequência dos 2,8 GHz, ou, como é mais conhecido, no comprimento de onda dos 10,7 cm. O estudo do nível do ruído presente nessa frequência em específico é altamente correlacionado com o número de manchas solares, e, consequentemente, com o nível de atividade solar. O chamado *F10.7 index* é medido ao meio-dia, todos os dias, por uma unidade de rastreio em *British Columbia*, Canadá no observatório *Penticton*. A Figura 41 mostra a alta correlação entre o índice e o número de manchas solares.

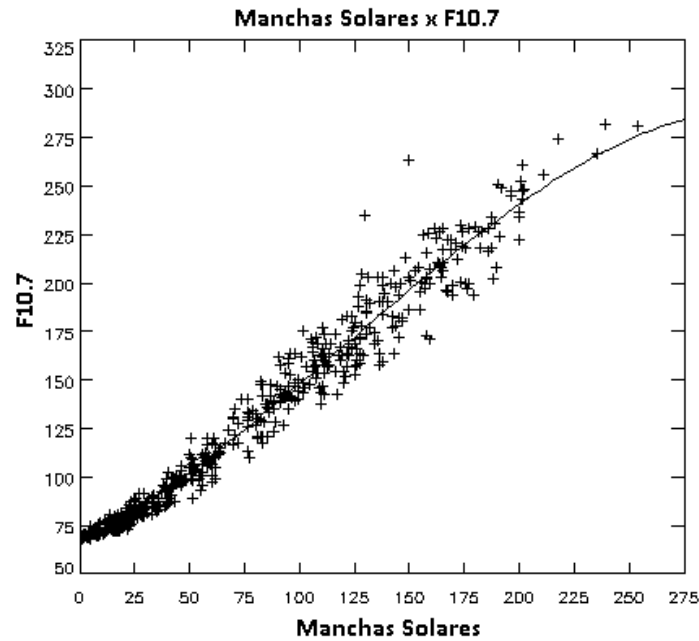


Figura 41 - Correlação entre o índice F10.7 e o número de manchas solares (Fonte: Adaptado de IPS, 2013).

Ajustando-se uma curva aos dados da Figura 41, tem-se as Equações 37 e 38, de terceiro grau, que relacionam o número de manchas solares (R) e o índice F10.7 (F) (IPS, 2013).

$$F = 67.0 + 0.572 R + (0.0575 R)^2 - (0.0209 R)^3, \quad (37)$$

$$R = 1.61 Fd - (0.0733 Fd)^2 + (0.0240 Fd)^3, \quad (38)$$

sendo $Fd = F - 67$, compensando assim um viés entre os dois parâmetros.

No que diz respeito à ionosfera terrestre, no mercado existem sensores específicos para o monitoramento dessa camada, como as ionossondas e digissondas¹², e sensores similares. Com estes equipamentos é possível que se obtenha o perfil vertical de densidade eletrônica referente ao local de instalação, a velocidade de deriva do plasma ionosférico, a polarização do sinal entre outras informações da ionosfera. Para isso, esse sensor utiliza as propriedades da reflexão de um pulso de onda de rádio na ionosfera, em função da frequência da onda (que varia entre 1 e 40MHz), fazendo-se valer a propriedade dispersiva dessa camada (ELY, 2010). Devido ao alto custo e necessidade de uma robusta

¹² Sensor ionosférico digital capaz de medir diversas características das ondas eletromagnéticas que são emitidas pelo sensor e, em seguida, refletidas pela ionosfera (DAVIES, 1990).

infraestrutura para sua implantação, esses sensores são utilizados somente por entidades de pesquisa específicas, como é o caso do INPE no Brasil. Atualmente, o INPE conta com sete estações de monitoramento desse tipo distribuídas pelo país (DAE/INPE, 2012).

Outra opção de sensor ionosférico, porém de natureza não específica como os anteriores, faz-se valer do fato que, para as frequências de rádio utilizadas no posicionamento por satélites, a ionosfera comporta-se como um meio de propagação dispersivo, isto é, com uma interferência de magnitude dependente da frequência que por ela refrata. Tendo em vista esse efeito, que a primeira vista foi tratado somente como uma limitação do sistema, observa-se hoje em dia que os receptores GNSS tornaram-se importantes ferramentas na densificação da malha de sensores da atmosfera terrestre, obtendo resultados compatíveis com sensores específicos, como, por exemplo, as digissondas (MATSUOKA *et al.*, 2009).

Para que seja realizado o monitoramento da ionosfera por estações GNSS, além da infraestrutura necessária já conhecida (antena, receptor, pilar e etc), é necessário que sejam calculados índices de relação entre o sinal GNSS e a interferência atmosférica. Esse tipo de monitoramento já é uma realidade e vem sendo utilizado em diversos trabalhos e centros de pesquisa (RODRIGUES, 2003; MATSUOKA, CAMARGO, 2009; SALOMONI, 2008; REZENDE *et al.*, 2010; PAULA, 2004).

Na América do Sul, as redes SCINTEC e LISN oferecem dados gratuitos e em tempo real referentes ao índice S_4 , bem como valores de TEC. Já a rede CIGALA/CALIBRA não tem seus dados abertos ao público em geral, e os índices calculados vão desde os já citados nesse trabalho, até índices mais específicos de processamento de sinais, como o índice *Spectral Slope*, Índice T , entre outros.

Na Figura 42 há um exemplo de monitoramento das atividades ionosféricas por intermédio de alguns índices de comportamento calculados pela rede Scintec. As duas primeiras linhas da figura mostram os valores de TEC. Observa-se que, quando há períodos de cintilação, o gradiente, ou seja, a variação do TEC ao longo do tempo é mais intensa. Isso pode ser observado no fim de cada dia. Nas três linhas seguintes, é mostrado o índice S_4 , de intensidade do sinal que chega aos receptores GPS. Pode-se, numa análise visual, inferir que o índice S_4 é altamente correlacionado com as variações bruscas nos valores de TEC, atingindo seus picos no mesmo instante. Já nas três linhas seguintes, temos os índices globais K_p , A_E e D_{ST} , mostrando também alguma variação nos períodos de maior gradiente dos valores de TEC. Também pela mesma figura pode-se mostrar que os valores obtidos pelos receptores de

posicionamento por satélite concordam com os valores dos índices globais, corroborando com a hipótese de seu uso para estudos atmosféricos.

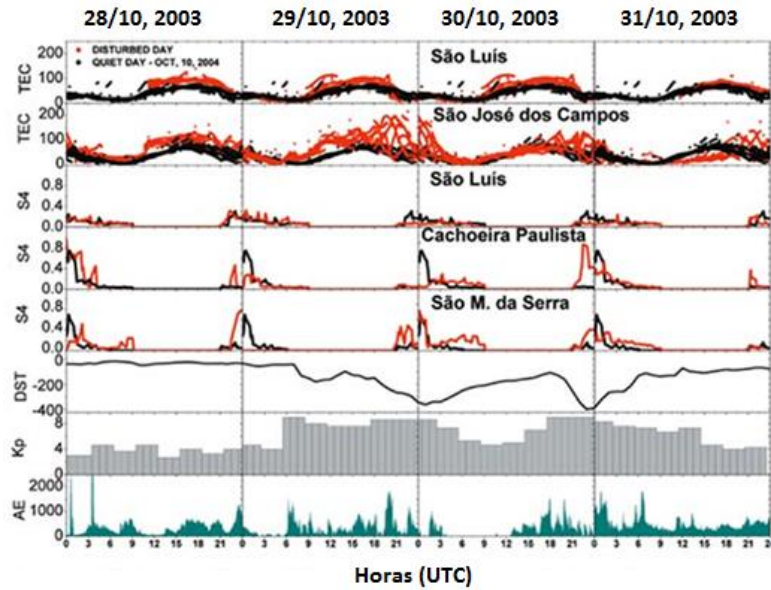


Figura 42 - Monitoramento da ionosfera em algumas estações no Brasil (Fonte: Rezende *et al.*, 2010).

Outra ferramenta passível de utilização no monitoramento da ionosfera e do clima espacial é a padronização dos índices calculados por intermédio da verticalização. Desse modo, para uma análise de abrangência local, é interessante que se calcule a influência dos parâmetros de cintilação, bem como do TEC e suas variações, para uma projeção zenital em relação ao ponto onde o sinal cruza uma camada de altitude arbitrária da ionosfera (normalmente 350 km), podendo assim aplicar um operador de média ou de dispersão dos parâmetros, uma vez que estão projetados à mesma direção. Para isso, Mannucci *et al.* (1993) apresenta um fator de obliquidade do sinal, sendo este uma função de mapeamento para observações da ionosfera realizadas no contexto do sistema GNSS:

$$F(\alpha_{elev}) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_T \cos \alpha_{elev}}{R_T + H_{IPP}}\right)^2}}, \quad (39)$$

sendo R_T o raio médio da Terra, H_{IPP} a altura do chamado *Ionospheric Piercing Point*, ou seja, do ponto em que se consideram os efeitos da ionosfera sobre o sinal e α_{elev} o ângulo de elevação do satélite observado. Assim, podem-se definir os índices de cintilação e TEC de modo vertical como:

$$PHI60^{VERT} = \frac{PHI60^{SLANT}}{(F(\alpha_{elev}))^{1/2}},$$

$$S_4^{VERT} = \frac{S_4^{SLANT}}{(F(\alpha_{elev}))^b}, \quad (40)$$

$$vTEC = \frac{sTEC}{F(\alpha_{elev})},$$

sendo b um expoente definido pela Equação 41:

$$b = \frac{p + 1}{4}, \quad (41)$$

em que p é o parâmetro *Spectral Slope*, que representa o coeficiente angular de uma regressão linear referente à tendência do sinal em perder energia conforme se aproxima de maiores frequências. O valor desse parâmetro pode ser estimado através de medidas, ou ainda adotado como um valor aproximado. Atualmente, para médias e altas latitudes, esse valor aproximado é de $p=2.6$, porém, para baixas latitudes e no contexto da anomalia equatorial, ainda não existe tal aproximação (SPOGLI *et al.*, 2009; ALFONSI *et al.*, 2011; WERNIK *et al.*, 2004).

Evidencia-se então o fato de que os receptores GNSS são uma importante ferramenta para o monitoramento da ionosfera e do clima espacial, ao mesmo tempo em que são altamente sensíveis aos efeitos gerados por distúrbios presentes nesse contexto, causando contratempos em algumas atividades de posicionamento.

Tendo como princípio os índices já especificados, o Capítulo 4 apresenta ferramentas matemáticas para a análise de conjuntos desses parâmetros, incluindo funções de densidade de probabilidade e um polinômio interpolador, adequado ao uso dos dados em questão.

4 ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS

Segundo Box *et al.* (1994) uma série temporal é um conjunto de observações tomadas sequencialmente ao longo do tempo. Normalmente, em séries temporais as observações adjacentes têm algum grau de dependência entre si, sendo o principal alvo do estudo e análise de séries temporais a caracterização e quantificação de tal dependência.

Além da caracterização da dependência entre medidas, de acordo com Conover (1999), há também a possibilidade de se realizar uma série de análises que visam extrair informações e padrões que a primeira vista não são percebidos. Essa análise estatística dos dados visa mostrar como os parâmetros se comportam em relação à sua dispersão podendo isso ser feito através de ajustamento dos dados a uma distribuição estatística, seguido de uma análise de seus quantis, análises de tendências, probabilidades condicionadas, entre outras.

O ajustamento dos dados a uma distribuição estatística se dá, normalmente, pelo método da máxima verossimilhança. Dentre os métodos estatísticos de inferência clássica esse método é preferível devido às suas melhores propriedades quando se trata de conjuntos com grande número de dados (MOOD *et al.*, 1974). No método de máxima verossimilhança, valores que maximizam a função de verossimilhança da distribuição são tomados como estimadores dos parâmetros. Segundo Meyer (1983), esse método de estimação é tendencioso para pequenas amostras, porém, assintoticamente não tendencioso para amostras grandes. Como no caso do montante de dados utilizado não há conjuntos pequenos, isso não será um empecilho para sua utilização.

Com esse entendimento, é possível explorar padrões das séries temporais que ajudem a visualizar melhor o panorama das cintilações ionosféricas na região de estudo, aproveitando assim, a grande quantidade de dados disponíveis para as inferências desse trabalho.

Numa análise preliminar das séries temporais obtidas pelos receptores do projeto CIGALA/CALIBRA, alguns aspectos destacam-se entre os demais. O primeiro deles é o fato da localização das estações oferecer condições específicas para cada antena de coleta de dados. Obstruções no entorno como árvores e construções são comuns tendo em vista que nem sempre é possível aliar uma localização ideal com a questão da infraestrutura disponível no local. Um segundo aspecto de interesse é o fato de cada estação apresentar um comportamento característico e dependente de sua localização em relação ao equador magnético, como já abordado nos Capítulos 3 e 4. Por isso, faz-se necessário que cada uma

delas seja analisada independentemente num primeiro momento. Um terceiro e último aspecto levado em consideração é a presença das anomalias de ionização presentes na região de estudo. Esse efeito deve ser levado em consideração para a correta análise e interpretação dos dados.

Portanto, inicialmente, será abordada uma técnica de filtragem das séries com o intuito de se minimizar o efeito do ambiente próximo nas observações, sendo seguida de uma análise estatística dos dados e seu ajustamento a uma determinada distribuição. Por fim, uma técnica de expansão dos resultados para toda a área de interesse com o uso de um polinômio interpolador.

4.1 Análise de séries temporais por *wavelets*

A análise de séries temporais com o uso de *wavelets* consiste basicamente na decomposição dessa série em pequenas componentes cujo domínio se restringe a um intervalo definido e normalmente pequeno, característica essa denominada “suporte compacto” (TORRENCE; COMPO, 1998; MORETTIN, 1999).

Na literatura atual comparecem diversos tipos de *wavelets*, inclusive no contexto das aplicações em geodésia (SOUZA, 2008; SATIRAPOD *et al.*, 2001; ROSA, 2008); porém, de acordo com Cristopoulou *et al.* (2002), a melhor *wavelet* a ser utilizada na decomposição de dados com variações naturais, como as abordadas nesse caso, é a *wavelet* de Morlet, dada pela Equação 42:

$$\psi_0(x) = \pi^{0,25} \exp \{i\omega_0 x\} \exp \left\{ \frac{-x^2}{2} \right\}, \quad (42)$$

sendo ψ_0 a *wavelet* em um determinado tempo x , ω_0 o número da onda, ou, frequência adimensional da onda e i uma unidade imaginária.

A Figura 43 mostra um exemplo de aplicação dessa *wavelet*. À esquerda é apresentada com amplitude e período arbitrários. Já à direita é representada pela linha azul pontilhada. Nessa segunda imagem, a *wavelet* resultante nada mais é do que a curva senoidal (em verde), multiplicada pela curva normal (em vermelho), formando assim uma onda de menor duração e que representa apenas uma pequena parte da onda original.

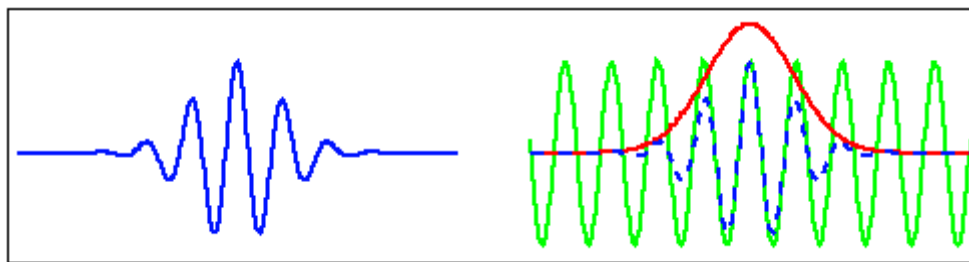


Figura 43 - Exemplo de forma da *wavelet* de Morlet (esquerda), e exemplo de decomposição de uma curva senoidal pela mesma *wavelet* (Fonte: TORRENCE; COMPO, 1998).

Da forma como foi descrita, é possível que se aumente ou diminua seu período e sua amplitude, pela variação dos parâmetros na Equação 42, de forma a se adaptar ao sinal que se deseja analisar em diferentes frequências. Rosa (2008) utilizou essa técnica com o intuito de avaliar a periodicidade na variação da componente vertical das coordenadas de uma estação da RBMC. A Figura 44 mostra, na parte superior, a componente *up* extraída do resultado do processamento PPP da estação NAUS da RBMC. Já na parte inferior, é representado o espectro das *wavelets* em diversos períodos e frequências, indicando assim com qual período a *wavelet* teve uma maior correlação com os dados analisados.

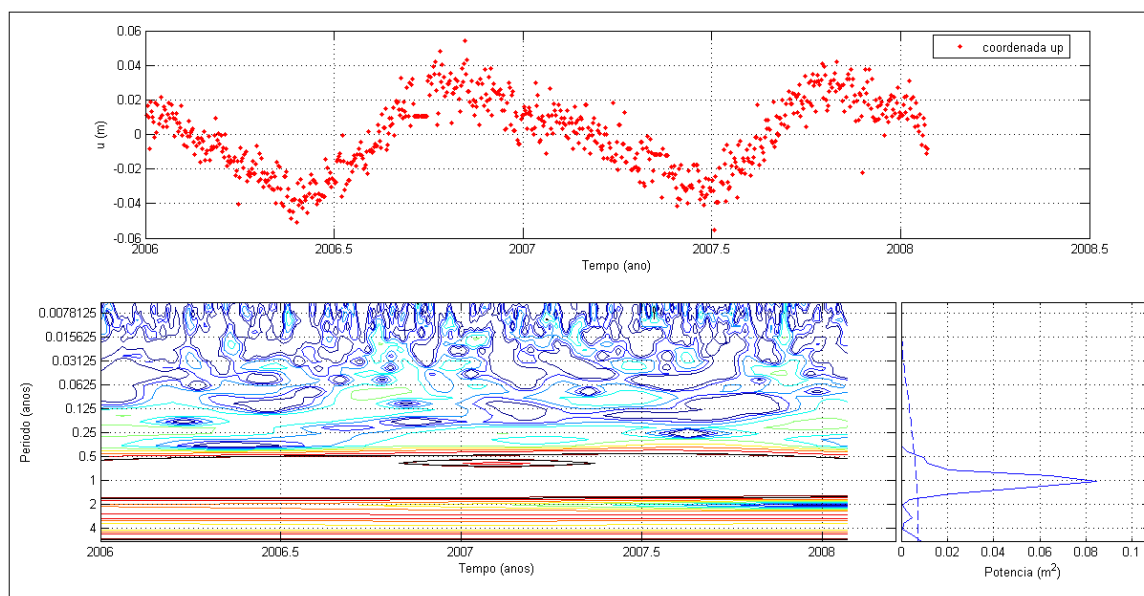


Figura 44 - Dados da componente vertical local da estação NAUS da RBMC e análise do espectro pela *wavelet* de Morlet (Fonte: Adaptado de Rosa, 2008).

Observa-se na figura que a maior correlação (expressa nessa análise pela potência da *wavelet*) encontra-se exatamente na *wavelet* cujo período se refere a 1 ano,

resultado esse esperado pelos efeitos de carga atmosférica, terrestre e atraso troposférico no sinal, como cita o autor e como se nota pela série temporal analisada

Portanto, tendo tal capacidade desse tipo de análise evidenciada, seu uso pode ser estendido para diversas aplicações que requeiram a análise e quantificação da influência de sazonalidades em séries temporais. Variando os parâmetros é possível que se evidencie pela análise espectral períodos anuais, diários, horários, ou qualquer outro que se deseje, tendo em vista a versatilidade desse tipo de análise (MORETTIN, 1999).

No contexto da Geodésia e do clima espacial, o uso de *wavelets* já foi empregado para a mitigação de multicaminhamento do sinal (SOUZA, 2008), análise de manchas solares (CRISTOPOULOU *et al.*, 2001), análise de séries temporais (ROSA, 2008) e melhoria na aquisição de parâmetros referentes à cintilação ionosférica (MUSHINI *et al.*, 2012). Apresenta, portanto, uma ferramenta importante e de ampla gama de aplicações.

4.2 Modelagem estatística dos dados

Na análise estatística de séries temporais, alguns aspectos devem ser levados em consideração, sendo o inicial e mais importante a definição da distribuição das observações (MOOD *et al.* 1974). No que diz respeito à cintilação ionosférica, a grande maioria dos parâmetros analisados pertence ao espaço dos números racionais positivos. Dessa forma, deve-se encontrar uma distribuição estatística que tenha a imagem de sua função de densidade no mesmo espaço dos dados estudados. Numa análise visual preliminar da densidade das ocorrências de cintilação, vê-se que os dados seguem aproximadamente um formato exponencial (fato confirmado no Capítulo 6, relativo aos experimentos e análises realizados). Nesse caso, apresentam-se as distribuições Weibull e, num caso especial, a distribuição exponencial.

4.2.1 Distribuições Weibull e Exponencial

Supondo que os dados positivos e diferentes de zero $x = (x_1, \dots, x_n)$ sejam independentes e advindos de uma distribuição Weibull onde ambos os parâmetros de forma α e de escala recíproca β são desconhecidos, a função de densidade é dada por:

$$f(x|\alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}\right\}, \forall x > 0, \alpha > 0, \beta > 0. \quad (43)$$

A média e variância da distribuição Weibull são dadas respectivamente por:

$$E(x) = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) e \text{ e } Var(x) = \beta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right], \quad (44)$$

onde $\Gamma(x)$ representa a função gama.

A Equação 45 representa a função de densidade acumulada da distribuição:

$$Fc(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right)^\alpha \quad (45)$$

Dessa forma é possível que se caracterize o comportamento da função e comprove a possibilidade de seu uso para os parâmetros estudados. A Figura 45 mostra exemplos da função de densidade de probabilidade e densidade acumulada da distribuição Weibull.

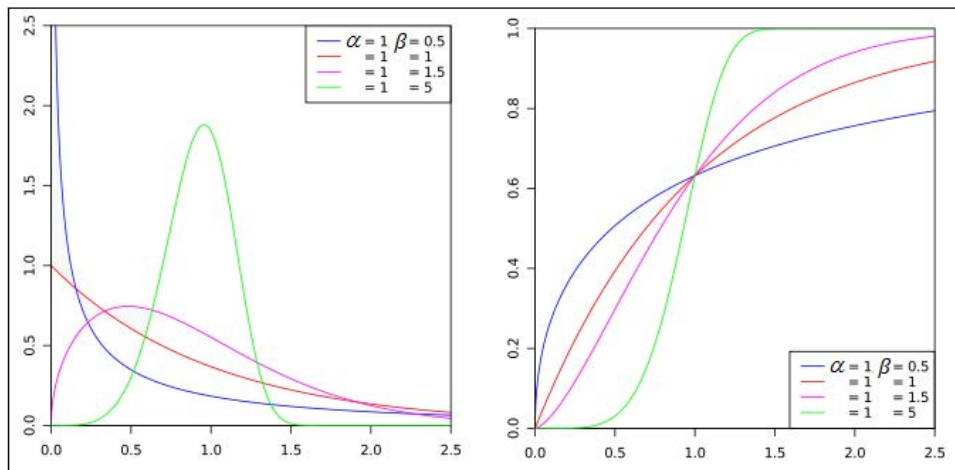


Figura 45 - Exemplos da aparência da função de densidade de probabilidade e densidade acumulada da distribuição Weibull.

Para a estimação dos parâmetros referentes a essa distribuição, pode-se utilizar diversos métodos. Dentre os métodos estatísticos de inferência clássica a máxima verossimilhança é preferível devido às suas melhores propriedades em conjuntos de dados grandes (MOOD *et al.*, 1974). No método de máxima verossimilhança, valores que maximizam a função de verossimilhança da distribuição são tomados como estimadores dos parâmetros. Assim, para a distribuição Weibull a função de verossimilhança é dada pela Equação 46:

$$L(\alpha, \beta | x) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^n \prod_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\alpha}\right)^\beta\right\}. \quad (46)$$

Maximizando essa função, encontram-se as estimativas para os parâmetros de forma e escala da distribuição.

Diante do apresentado pela Equação 41 e pela Figura 45, vê-se que a distribuição em questão tem uma flexibilidade de formas considerável, sendo essa característica importante para uma melhor modelagem de uma variedade de dados. Uma característica importante a ser ressaltada é o caso especial da distribuição Weibull quando o parâmetro de escala é igual a 1. Desenvolvendo a Equação 46 dessa maneira, resulta na Equação 47:

$$f(x|\alpha, \beta) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^0 \exp\left\{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^1\right\}, \forall x > 0, \alpha > 0, \beta = 1, \quad (47)$$

e por fim, na Equação 48:

$$f(x|\alpha) = \frac{1}{\alpha} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)\right\}, \forall x > 0, \alpha > 0, \quad (48)$$

que, por sua vez é conhecida como distribuição exponencial. Dessa maneira, ao se utilizar a distribuição Weibull, na verdade, os dados são testados quanto a duas distribuições distintas, sendo esse um aspecto importante e definitivo na escolha dessa distribuição.

4.2.2 Testes de aderência

Uma vez que há parâmetros de determinada distribuição ajustados a um conjunto de dados x , é possível que se realizem testes de aderência a distribuição com o objetivo de quantificar, seja de forma numérica ou visual, o quão boa se deu a modelagem.

Conover (1999) cita alguns testes que podem ser realizados e que se encaixam no contexto dessa pesquisa. Entre eles encontram-se o teste de *Kolmogorov-Smirnov* – Teste KS, e os testes de comparação de densidade acumulada e equiparação de densidade.

O teste KS consiste na comparação entre a densidade de uma distribuição teórica e contínua onde se conhecem apenas os parâmetros, e um conjunto de dados que se supõe advir dessa distribuição. Faz-se inicialmente uma determinação da maior distância entre a densidade teórica contínua e a observada discreta, representado pela Equação 49:

$$D = \max |F_{ni} - F_{xi}|, \quad (49)$$

sendo F_n a função de densidade contínua e F_x os dados discretos. Com essa estatística, se aceita ou rejeita a hipótese de os dados pertencerem a tal distribuição com um determinado nível de significância.

O resultado desse teste é um parâmetro chamado p-valor, que representa em que nível de significância o teste aceita a hipótese nula apresentada. No contexto dessa Dissertação, o nível de significância mínimo para aceitação da amostra adotado é de 5%, valor esse comum nas mais diversas análises (CONOVER, 1999; MOOD *et al.* 1974; MEYER, 1983)

Outro teste passível de utilização nesse contexto é a comparação das densidades teórica e observada. Esse tipo de teste, apesar de ser puramente visual e subjetivo, apresenta-se como uma complementação aos testes não paramétricos de valor numérico.

O teste de comparação de densidades baseia-se, em linhas gerais, numa avaliação de aproximação entre a densidade dos dados e da distribuição a qual se deseja adotar como representativa do conjunto testado. A Figura 46 mostra um exemplo com dados aleatórios e a distribuição Weibull onde é representado o histograma observado e a função de densidade ajustada. Observa-se que há uma concordância nos resultados, dando um indício de que a distribuição representa de maneira satisfatória os dados.

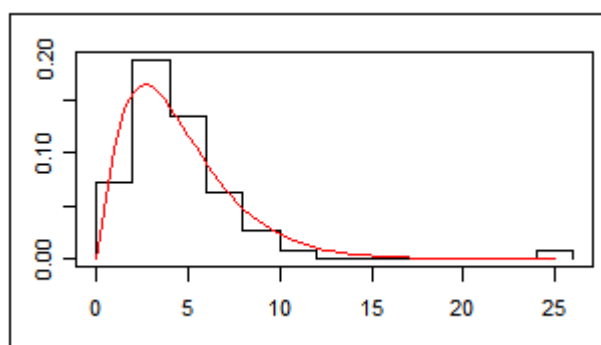


Figura 46 - Exemplo de comparação entre dados (histograma em preto) e distribuição ajustada (curva em vermelho).

Outro indicativo visual de qualidade de estimação se dá por meio da comparação entre as densidades acumuladas. Utilizando a função de densidade de probabilidade acumulada derivada da função de probabilidade, é possível que se represente a densidade juntamente com a densidade dos dados observados. No caso dessa pesquisa, como os dados são afetados por eventos de origem natural, espera-se uma variação no entrono da linha teórica, a exemplo do que se vê pela Figura 47, representado os mesmos dados

aleatórios do exemplo anterior. A título de curiosidade, o teste KS para a mostra em questão resultou num p-valor de 78,9%.

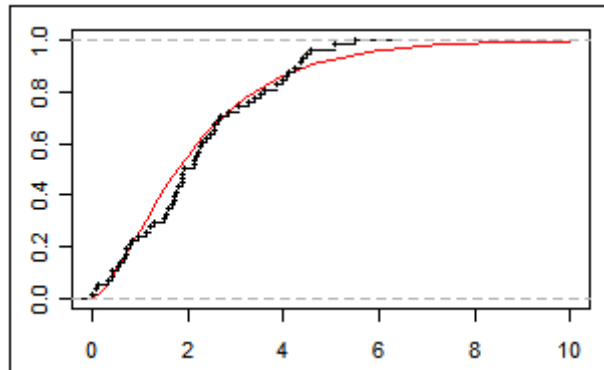


Figura 47 - Exemplo de comparação entre densidades acumuladas empíricas (em preto) e ajustadas (curva em vermelho).

Assim utilizando tais testes de maneira complementar, espera-se atingir uma estimativa adequada da qualidade da modelagem. Sem esse tipo de análise, o resultado perde o valor científico e há apenas suposições sem comprovação de que um conjunto de dados pertence a uma determinada distribuição.

4.3 Interpolação de Dados pelo Polinômio de Chebyshev

Desenvolvido inicialmente pelo matemático russo Pafnuti Lvovitch Chebyshev (1821- 1894), o polinômio de *Chebyshev* é uma sequência de polinômios ortogonais, obtidos de forma recursiva, e muito versáteis (SPIEGEL, 1992). Esse método é utilizado no ramo da Geodésia principalmente para que seja realizada a interpolação das órbitas dos satélites, as quais são fornecidas em intervalos de tempo acima dos adotados no posicionamento.

Esse polinômio representa as soluções da equação diferencial representada pela Equação 50:

$$(1 - x^2)y'' - xy' + n^2y = 0, \forall n = 0, 1, 2, \dots, \quad (50)$$

onde x é a variável independente e n é um número natural positivo. As variáveis y'' , y' e y são, respectivamente, as derivadas de segunda e primeira ordem e a imagem de $f(x)$ que é solução da equação. De uma forma geral, estes polinômios são obtidos através da seguinte solução:

$$T_n(x) = \cos(n \cdot \arccos(x)) = x^n - \binom{n}{2} \cdot x^{n-2} \cdot (1 - x^2) + \binom{n}{4} \cdot x^{n-4} \cdot (1 - x^2)^2 - \dots \quad (51)$$

Na Equação 52 são apresentados os primeiros termos e a fórmula geral de recorrência desse polinômio.

$$\begin{aligned}
 T_0 &= 1 \\
 T_1 &= r(t) \\
 T_2 &= 2r(t)T_1 - T_0 \\
 &\dots \\
 T_n &= 2r(t)T_{n-1} - T_{n-2}
 \end{aligned} \tag{52}$$

Nessa equação, n é o grau do polinômio, T o termo correspondente aquele grau, e $r(t)$ a função de remapeamento, pois, os polinômios são definidos apenas para o intervalo $[-1, 1]$, havendo a necessidade de se customizar o domínio através de uma função apropriada.

A primeira tarefa a ser realizada para a aplicação do polinômio de Chebyshev é o cálculo do melhor grau a ser aplicado para o conjunto de dados em questão. Sabe-se que quanto maior o grau, melhor o nível de detalhamento (ou resolução) do polinômio, sendo o grau mais adequado variável de acordo com a dispersão dos dados. De acordo com Spiegel (1992), há um limite em cada conjunto de dados, que, quando extrapolado pelo número excessivo de graus faz com que pequenas flutuações estatísticas, como erros aleatórios, por exemplo, passem a exercer uma influência muito maior que a desejada.

Tem-se então como formulação geral do problema a Equação 53:

$$\begin{bmatrix} x_s(t_1) \\ x_s(t_2) \\ \dots \\ x_s(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1(t_1) & T_2(t_1) & \dots & T_n(t_1) \\ T_1(t_2) & T_2(t_2) & \dots & T_n(t_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_1(t_n) & T_2(t_n) & \dots & T_n(t_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{x1} \\ C_{x2} \\ \dots \\ C_{xn} \end{bmatrix} \tag{53}$$

Na forma linear, tem-se:

$$X_t = T_x C_x \tag{54}$$

Aplicando o MMQ, obtêm:

$$C_x = (T_x^T T_x)^{-1} T_x^T X_t \tag{55}$$

Desta forma é possível que se calcule os n coeficientes C que melhor se ajustem à função $f(x)$, havendo também a possibilidade do cálculo dos resíduos do ajustamento pela Equação 56, podendo assim ser feita uma análise de qualidade da parametrização pela análise de tal parâmetro.

$$V = T_x C_x - X_t \tag{56}$$

5 MATERIAIS E METODOLOGIA

Nesse capítulo são descritos os materiais e dados utilizados para a realização da pesquisa, bem como a metodologia utilizada para tal abordagem.

5.1 Materiais

No contexto dessa pesquisa, foram utilizados como materiais:

- Banco de dados do projeto CIGALA/CALIBRA;
- Computadores com softwares de processamento de dados GNSS comerciais e científicos;
 - *Trimble Business Center* 2.91;
 - *NRCan PPP*;
 - *Septentrio PostNAV* 3.0;
 - *RTKLib* 2.4.2.
- Software livre R de processamento estatístico;
- Software *Matlab R2010b* de análises numéricas;
- Dados das estações pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo);
- Dados dos experimentos no contexto de Agricultura de Precisão realizados na Usina Guarani (Olimpia) e na ESALQ/USP;
- Interpretador *Python* 2.6;
- Receptores *PolaRxS* do projeto CIGALA/CALIBRA.

Durante os anos de 2011 e 2012 foram instaladas oito estações de monitoramento da ionosfera pertencentes ao projeto CIGALA. As estações encontram-se dispostas como mostra a Figura 48.

Cada uma dessas estações conta com um receptor *PolaRxS Pro*, da fabricante belga Septentrio, com capacidade de gravar dados com altas taxas de coleta. No decorrer do projeto, a taxa de coleta utilizada foi de 50 Hz, podendo chegar até 100Hz caso necessário. Nesse contexto, os dados coletados por esses receptores são utilizados para o cálculo de diversos parâmetros locais de cintilação ionosférica, como o S4, Phi60, TEC e seu gradiente, a diferença entre a medida de fase e pseudodistância, a relação sinal-ruído, entre outros já descritos.



Figura 48 - Disposição das estações de monitoramento da ionosfera do projeto CIGALA.

Localmente, essas estações contam também com antenas GNSS AERAT 1639 da fabricante AeroAntenna e computadores Intel i5, com 2 Gb de RAM, HD de 4 Tb e, quando é constatada necessidade, equipamentos *no-break* para o caso de queda constante de energia. Em cada computador, há conexão SSH (*Secure Shell*), ambientadas em servidores Linux Debian e um backup dos dados coletados. Esses dados são armazenados, posteriormente, em repositórios localizados nas dependências do Laboratório de Geodésia Espacial (LGE) da FCT/UNESP. Atualmente, o repositório conta com aproximadamente 20 Tb de espaço para armazenamento de dados.

Ainda, como o volume de dados é consideravelmente grande, foi desenvolvido um protótipo de banco de dados para a consulta de eventos de cintilação. Esse banco de dados, hospedado em um computador a parte do servidor conta com um sistema de código aberto *PostgreSQL* e também uma interface PHP¹³ para consulta, desenvolvida por alunos membros do GEGE (Grupo de Estudos de Geodésia Espacial).

5.2 Metodologia

Foram realizados experimentos envolvendo atividades de posicionamento pelo GNSS, bem como análises de séries temporais de dados relativos à cintilação ionosférica. Inicialmente, fez-se uma análise estatística de séries temporais do parâmetro S_4 e Φ_{60} com o intuito de analisar, parametrizar e modelar seu comportamento na região de estudos. Os

¹³ Disponível em <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br>

experimentos de campo, por sua vez, ocorreram em situações cotidianas de posicionamento envolvendo processamentos no modo RTK (*Real Time Kinematics*) no contexto da Agricultura de Precisão¹⁴, posicionamento PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) e DGNS (Differential GNSS) no contexto do posicionamento *offshore* e posicionamentos relativo e PPP no contexto da estimação de coordenadas no posicionamento geodésico.

A metodologia para a execução dos experimentos que são descritos no capítulo 7, consistiu na operação de trabalhos de campo realizados em diversas localidades onde há a suspeita de interferência da cintilação ionosférica, seguido de um pré-processamento para escolha e análise dos dados seguindo sempre a premissa de selecionar amostras de épocas supostamente afetadas, e outras comprovadamente não afetadas para que sirvam de controle. Estudos que incluem na área de testes receptores com a capacidade de cálculo de parâmetros de cintilação são inéditos no Brasil, apresentando assim um novo panorama nesse tipo de abordagem, e uma nova ferramenta capaz de proporcionar informações com alto grau de confiabilidade que pode, na maioria das situações, explicar fenômenos antes somente supostos ou inferidos, como é o caso da cintilação ionosférica. No que diz respeito à análise das séries temporais, foram filtrados dados de períodos de baixa e alta atividade da ionosfera, separados com base nos dados advindos dos receptores *PolaRxS*.

No decorrer dessa seção, será explicitada a metodologia abordada na análise das séries temporais, bem como a utilizada nos experimentos já brevemente descritos.

5.2.1 Análise estatística espacial dos eventos de cintilação ionosférica no Brasil

Para a realização da análise estatística dos dados de cintilação ionosférica, representados pelos parâmetros S_4 e Φ_{60} , foram utilizados dados de oito estações de monitoramento do projeto CIGALA/CALIBRA. Como auxílio do banco de dados (PostgreSQL) instalado nos servidores da UNESP, foram realizadas consultas de modo a selecionar os dados de interesse. As consultas seguiram o seguinte padrão:

```
SELECT wn, tow, elev, s4, corr_s4, phi60l, p_ll, elev FROM ismr where svid<=37;
```

selecionando assim os atributos de elevação, valor do S_4 , correção do S_4 devido ao ruído ambiente e o parâmetro Φ_{60} de uma determinada estação para todo o período de sua

¹⁴ Cf. Molin (2010).

instalação. Foram, por fim, separados oito arquivos de aproximadamente 300 Mb cada com os dados requeridos.

Em seguida, para se tirar o melhor proveito de cada conjunto de dados, a metodologia apresentada na seção 4.3 foi utilizada. Inicialmente foi separado um período de duas semanas de dados de cada estação onde, comprovadamente não houve eventos de cintilação ionosférica. Essa comprovação se deu com a observação dos dados das demais estações, bem como pela escolha dos dados, que foram selecionados em períodos entre os meses de Junho e Julho de 2012 e 2013, próximo ao solstício de inverno, onde o hemisfério sul se encontra sob menor influência do Sol, diminuindo drasticamente a probabilidade de cintilação no período (GROVES, 2004). Em seguida, partindo de uma máscara de elevação de valor 0° em diante, foi realizada a análise espectral por *wavelets* da seção 4.3 em busca de um padrão sazonal com duração de 1 dia. Sabe-se que os satélites GNSS têm sua órbita de certa maneira previsível, e que ela se repete durante o dia. Combinando um satélite que realiza sempre o mesmo trajeto, com uma fonte de multicaminho ou obstrução fixa, tem-se um padrão de interferência que se repete, de maneira aproximada, todos os dias. Dessa forma, aumentando a máscara de elevação pouco a pouco e realizando a análise espectral em paralelo, é possível se observar o momento em que, devido à máscara, a fonte de interferência passa a não mais fazer efeito sobre o sinal. Assim, evita-se de utilizar máscaras de elevação de valor alto, quando na realidade, não são de fato necessárias. A Figura 49 mostra um exemplo do satélite GPS 22 na estação PRU1 e seu padrão de interferência dado pelo índice S_4 .

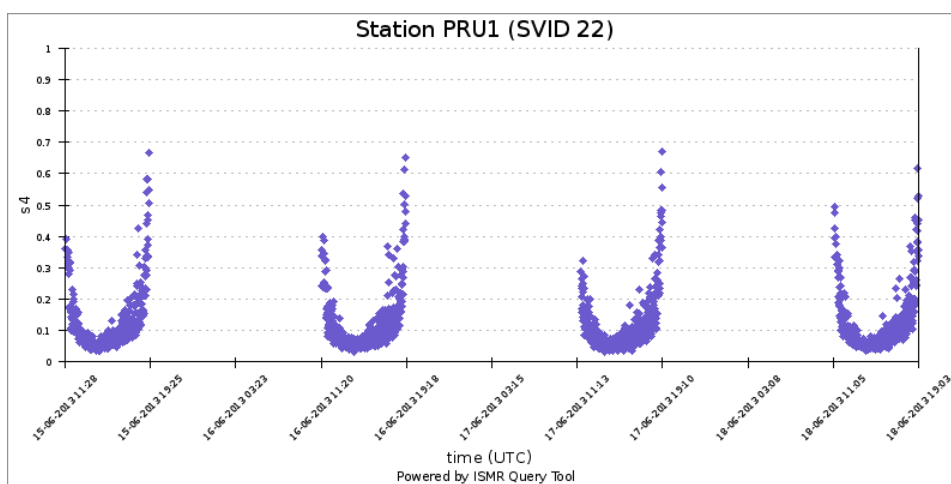


Figura 49 - Exemplo de satélite com comportamento sazonal diário de interferência.

Analisando a elevação do satélite quando o índice S_4 assume valores maiores que 0,25, vê-se que, nesse exemplo, a interferência começa com cerca de 27° .

Portanto, a análise espectral por *wavelets* encontraria, enquanto estivesse abaixo desse valor, um efeito periódico na série temporal com duração de um dia.

Como são vários satélites a serem avaliados, durante o período sem atividade significativa da ionosfera foi preparada uma série temporal do índice S₄ com todos os satélites em vista. Em seguida, época por época, foi tomada a variância do índice entre todos os valores calculados minuto a minuto. Essa abordagem permite que valores discrepantes sejam evidenciados. O resultado das análises encontra-se no Capítulo 6, na seção 6.1.

Portanto, com os dados filtrados pelo método descrito, os índices S₄ e Phi60 foram então reprojatados para a direção zenital, seguindo a teoria descrita na seção 3.3. Isso deu devido ao fato de que o intuito dessa pesquisa não é realizar uma análise climatológica da ionosfera sobre o território brasileiro, e sim, analisar o efeito da cintilação ionosférica diretamente sobre os receptores GNSS. Pela teoria abordada, sabe-se que a região com maior incidência de irregularidades se encontra sob a crista da anomalia equatorial, porém, faltam informações na literatura sobre exatamente em qual região os receptores começam a ser afetados de maneira significativa por tais irregularidades localizadas. Com os índices reprojatados, traz-se a influência de uma determinada região de abrangência para uma única localização, evidenciando assim o efeito direto de irregularidades sobre uma determinada posição.

Por fim, os dados foram ajustados à distribuição Weibull pelo método da máxima verossimilhança.

Para posteriores análises levando em conta a localização geográfica das estações, as coordenadas das estações de monitoramento utilizadas tiveram seus valores convertidos para o referencial geomagnético através do IGRF (*International Geomagnetic Reference System*). Pela teoria abordada no Capítulo 3, sabe-se que a correlação entre a posição e os efeitos da cintilação ionosférica se dá, majoritariamente, em relação à componente Latitude das coordenadas geomagnéticas. A Tabela 6 mostra a relação das estações utilizadas e suas coordenadas no IGRF.

Tabela 6 - Estações de monitoramento e suas coordenadas aproximadas no IGRF.

Estação	Latitude Geomagnética (°)	Longitude Geomagnética (°)
MANA/MAN2	6,49	12,52
PALM	-1,15	23,76
PRU2	-12,79	19,98
MACA/MAC2	-13,75	29,02
SJCU	-14,24	25,11
POAL	-20,71	19,71

Vale ressaltar que as estações MANA e MACA foram substituídas de suas localizações originais para pontos próximos. No entanto, foi mantida a coordenada original, tendo em vista que a acurácia necessária para a análise que se propõe é pequena uma vez que se sabe que as irregularidades que causam a cintilação no sinal podem chegar a centenas de quilômetros de comprimento (BASU, *et al.*, 1998; De FRANCESCHI *et al.*, 2006). Dessa forma, as coordenadas com a precisão apresentada na Tabela 6 mostram-se suficientes para a análise.

Frisa-se ainda que como a análise refere-se apenas aos eventos de cintilação ionosférica, foram utilizados apenas os dados referentes às épocas onde o índice S_4 ultrapassa o limiar de 0,3, adotado por muitos autores como um forte indicativo de interferência no sinal. Essa metodologia foi utilizada em estudos semelhantes e apresentou resultados satisfatórios (TIWARI, 2012).

5.2.2 Experimentos RTK no contexto da agricultura de precisão

No escopo dos experimentos relativos ao posicionamento por RTK na Agricultura de Precisão, foram utilizados três receptores GNSS com as seguintes especificações:

Receptor A: Receptor comercial com capacidade de rastreo GPS e GLONASS, L1, L2, L2C e L5, 220 canais disponíveis, tempo de inicialização menor que um minuto e precisão melhor que 2,5 cm (1 sigma) em condições normais. A taxa de rastreo é de até 10 Hz.

Receptor B: Receptor comercial, com firmware experimental atuando na melhoria do rastreo do sinal e, em teoria, melhoria no cálculo das posições. Receptor GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, rastreando todos os sinais dos quatro sistemas, com 136 canais disponíveis e taxa de rastreo de até 100 Hz.

Receptor C: Receptor comercial, com capacidade de rastreo dos sistemas GPS e GLONASS, com precisão melhor que 2,5 cm (1 sigma) em condições normais de rastreo. Conta com 55 canais disponíveis e taxa de rastreo de até 10 Hz.

A Tabela 7 apresenta uma comparação entre os equipamentos utilizados.

Tabela 7 - Sumário dos receptores utilizados nos experimentos GNSS/RTK.

	Receptor A	Receptor B	Receptor C
Constelações	GPS, GLO	GPS, GLO, BEI, GAL	GPS, GLO
Canais	220	155	55
Taxa de rastreo	<= 10 Hz	<= 100 Hz	<= 10 Hz
Precisão especificada	< 2,5 cm	Não especificada	< 2,5 cm

São descritos nas seções 6.2.2.1 e 6.2.2.2 as características individuais de cada um dos experimentos no contexto da Agricultura de Precisão.

5.2.2.1 Experimento RTK – Fazenda Guarani

Tendo em vista a problemática da cintilação ionosférica já abordada nessa pesquisa, foi realizado um experimento na unidade Cruz Alta da Usina Guarani S.A., visando identificar a ocorrência de cintilação e analisar o desempenho de dois receptores GNSS atuando em condições semelhantes de ambiente. Nesse experimento, foram utilizados para fins de comparação os receptores A e B.

O experimento proposto compõe-se de uma atividade de campo, do pós-processamento dos dados e da avaliação dos resultados obtidos.

Primeiramente, numa zona de plantio de cana da usina, foi instalada uma base de referência com o receptor *PolarXs*, para que fossem calculados os parâmetros de atividade na ionosfera no local. A Figura 50 mostra a base instalada em primeiro plano, e, ao fundo, a instalação onde o receptor e o computador para coleta dos dados se encontravam.



Figura 50 - Base utilizada para a inferência dos parâmetros de atividade da ionosfera e trator utilizado como *Rover*.

Em um dos tratores cedidos pela usina (Figura 50), foram instalados os dois sistemas de posicionamento que dividiam a mesma antena através de um divisor de sinais (*splitter*). O veículo equipado com os receptores é comumente utilizado nas atividades de agricultura de precisão na área de plantio, retratando fielmente a configuração utilizada no sistema de posicionamento implantado.

Dessa forma, para que fosse feita a análise comparativa entre os fabricantes A e B, ambos os receptores foram ligados ao sistema elétrico do trator e coletaram dados no período das 22h 00m do dia 02/02/2012, até às 08h 49m do dia 03/02/2012, UTC, contemplando assim um período de aproximadamente 10 horas, com taxa de coleta de 5 segundos, com o trator parado em uma localidade que apresentava as características típicas daquela região: topografia irregular, pássaros no entorno com possibilidade de se aproximarem das antenas, vegetação e etc. Apesar disso, o trator foi mantido próximo à fonte de transmissão da correção RTK (cerca de 100 metros), para que possíveis problemas de perda de sinal de rádio fossem eliminados das hipóteses.

Nessa configuração, o equipamento do fabricante A fornecia energia à antena, e gravava num arquivo a posição do trator. Já o equipamento do fabricante B, gravava apenas os dados brutos de observações GNSS, os quais foram processados posteriormente com as mesmas condições do receptor A: posicionamento por RTK, máscara de elevação de 10 graus e os sistemas GPS e GLONASS presentes na solução. A única diferença remanescente entre ambos os receptores, é que cada um utilizou sua própria base para o posicionamento. O receptor A utilizou a base existente da Usina Guarani, e o receptor B, a base que foi instalada em campo (Figura 50). Isso se deve ao fato de a base já existente da usina estar em um sistema de referência próprio, e, além disso, não gravar os dados brutos para um pós-processamento, o que não possibilitaria análise dos resultados do receptor B.

Os resultados e demais análises encontram-se no Capítulo 7.

5.2.2.2 Experimento RTK – ESALQ/USP

Assim como no experimento realizado na Usina Guarani, nesse teste pretende-se obter uma comparação entre receptores RTK no contexto da Agricultura de Precisão.

Em uma série de sessões de coleta de dados realizadas nas dependências da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) em Piracicaba - SP verificou-se uma comparação entre os receptores RTK B e C, previamente apresentados, de modo a inferir possíveis erros no posicionamento por conta de eventos de cintilação ionosférica.

Inicialmente, assim como no experimento anterior, foi instalada a cerca de 100 metros do local dos testes um receptor Septentrio *PolarxS* com a funcionalidade de monitorar parâmetros de cintilação ionosférica, chamada de estação PIRA. Em seguida, já na área de testes, foram fixados sobre um veículo motorizado elétrico os receptores B e C. Esse veículo se move por um trilho de metal com cerca de 20 metros de diâmetro, numa velocidade

compatível com a de maquinário agrícola em período de trabalho (entre 5 e 20 km/h). A alimentação de todo o sistema, incluindo os receptores, se deu por uma fonte externa, trifásica, e de corrente alternada, exigindo então o uso de fontes de conversão e alimentação também fixadas sobre o veículo. A Figura 51 mostra a montagem final do sistema já em funcionamento.

Próximo ao trilho foram também instaladas as bases RTK e outro receptor do mesmo modelo C, que por sua vez, permaneceu parado para que servisse de controle ao experimento. Os dados utilizados foram coletados nos dias 11 e 12 de Dezembro de 2012.

O comportamento dos receptores no teste cinemático e as análises derivadas são descritas detalhadamente no Capítulo 7.



Figura 51 - Receptores B e C instalados no veículo motorizado já sobre o trilho.

5.2.3 Experimento PPP/DGNSS no contexto do posicionamento *offshore*

Nas aplicações *offshore* há a necessidade da utilização de métodos de posicionamento precisos e em tempo real para que haja otimização na produção e para que não ocorram acidentes durante processos altamente complexos, como perfuração de poços e manutenção de redes de transporte de petróleo de gás natural. Tendo em vista esse contexto, nesse experimento são utilizados dados da empresa que fornece correções PPP e DGNSS à Petrobras S.A. visando à identificação do problema da cintilação ionosférica nesse ramo de aplicação.

Na atividade de perfuração de poços, inicialmente utiliza-se a técnica do PPP em tempo real por intermédio do uso de correções vindas de satélites, bem como outros sistemas integrados a este, a exemplo de equipamentos hidroacústicos. Caso essas correções

não sejam obtidas ou sejam consideradas pouco confiáveis, um operador transfere as atividades do PPP para o DGNSS, que utiliza como base uma estação no continente. Nas empresas de perfuração, normalmente, espera-se uma acurácia de até 2,5 metros no que é chamado de *Final Fix*, ou seja, o último momento de posicionamento antes que a broca de perfuração inicie seu contato com o solo (VERIPOS, 2012).

Nesse experimento foram analisados relatórios da empresa fornecedora de correções PPP a fim de se obter o panorama geral do comportamento de suas estações em um evento de cintilação ionosférica de grande intensidade e duração. Com esse objetivo, foi observada a qualidade das correções PPP e em seguida simulado um posicionamento DGNSS na cidade do Rio de Janeiro – RJ, utilizando a estação ONRJ, a qual se encontra numa área onde a maioria das aplicações *offshore* se passa no país. Para tal fim, também foram utilizadas as correções da companhia que fornece esses dados à Petrobras S.A., obtidos por intermédio de uma participação dessa empresa no projeto CIGALA.

5.2.4 Experimentos Relativo e PPP no contexto do posicionamento geodésico

Com o intuito de se analisar a influência da cintilação ionosférica no cálculo de coordenadas no contexto geodésico, foi realizado um experimento utilizando dados de estações da RBMC espalhadas pelo território brasileiro. As observações desses receptores foram processadas de duas maneiras distintas: Posicionamento relativo em rede e PPP.

O processamento de dados GNSS no modo relativo conta com duas estações, uma base fixa e conhecida e outra estação com coordenadas a determinar através do cálculo da chamada linha de base. Já o posicionamento relativo em rede utiliza-se de três ou mais estações nesse processo, tendo seus dados ajustados de maneira conjunta. É possível que se altere a maneira de processamento, ajustamento e análise dos dados. Nesse experimento, com a utilização do software TBC, são injuncionadas coordenadas de modo a fixar a rede em um determinado referencial em diferentes situações, sendo essas na presença e ausência de distúrbios ionosféricos. No que diz respeito ao PPP, diferentemente do experimento no contexto *offshore*, as coordenadas serão calculadas sem o auxílio de correções comerciais. Apesar do princípio ser o mesmo, dessa forma há mais controle sobre os parâmetros, havendo a possibilidade de se alterar as fontes das correções, inserção de modelos de troposfera, marés terrestres, cargas oceânicas e outros cabíveis¹⁵.

¹⁵ Cf. MONICO, 2008

Os três métodos são bastante comuns em atividades do dia-a-dia, como Georreferenciamento de Imóveis Rurais, transporte de coordenadas em obras de infraestrutura, estimativa de coordenadas de uma rede de receptores, entre inúmeras outras aplicações.

Nesses experimentos, foram selecionados dois conjuntos de dados na tentativa de representar os efeitos da cintilação em diferentes maneiras. O primeiro conjunto de dados se refere ao mês de Julho de 2012, onde os índices de cintilação normalmente são baixos. Já o segundo conjunto, pertence a Novembro do mesmo ano, mês esse que usualmente apresenta alta atividade na ionosfera.

As estações utilizadas para o experimento relativo em rede foram BELE, NAUS, IMPZ, PEPE, TOPL, MTVB, CUIB, BRAZ, ILHA, PPTE, ONRJ, UFPR e SCCH. E são apresentadas na Figura 52.



Figura 52 - Rede de estações da RBMC utilizadas no processamento relativo.

Já para o experimento no modo PPP, foram selecionadas as estações PAST, NAUS, RNNA, TOPL, CUIB, ILHA, MSCG, PPTE, ROSA, RIOD, ONRJ, UFPR, SMAR, e são representadas pela Figura 53.



Figura 53 - Estações utilizadas nos experimentos no contexto de posicionamento por PPP.

6 RESULTADOS E ANÁLISES DOS EXPERIMENTOS

O diferencial dos experimentos e desenvolvimentos propostos aqui, é a presença das estações equipadas com o receptor *PolaRxS*, monitor de eventos de cintilação ionosférica, nos locais em questão. Desse modo, há a possibilidade de verificação dos reais efeitos da cintilação sob os sinais dos satélites GNSS. Sem a utilização desses equipamentos, haveria apenas a possibilidade de suposição da causa dos efeitos observados nas coordenadas das aplicações de posicionamento, resultando em resultados dúbios e com campo para refutação.

Apresentam-se, portanto, nesse capítulo, os experimentos e análises realizados e já descritos em relação à proposta metodológica no Capítulo 5.

6.1 Análise estatística espacial dos eventos de Cintilação Ionosférica no Brasil

Com os dados das estações do projeto CIGALA/CALIBRA, realizou-se a análise proposta com o intuito de se estimar os parâmetros da distribuição Weibull referente aos eventos de cintilação ionosférica nos locais abordados. Para tal, inicialmente foi realizada uma filtragem e preparação dos dados, seguida da estimação dos parâmetros pela máxima verossimilhança e testes estatísticos pertinentes.

6.1.1 Filtragem, preparação e caracterização dos dados

Inicialmente, os arquivos com as observações dos índices S_4 e Φ_{60} foram analisados de modo a estabelecer critérios para sua utilização. Sabe-se que as estações instaladas em diferentes localidades sofrem diferentes influências do ambiente em seu entorno, sendo o multicaminhamento e a obstrução do sinal dos satélites efeitos a serem levados em consideração. Para que essas características locais não interfiram na análise de cintilação, em alguns trabalhos utilizam-se altos graus de máscara de elevação, variando de 15° até mais de 30° em alguns casos (TIWARI, 2012; SILVA, 2009). Como o número de estações do projeto não permite que se use em todos os casos máscaras de elevação com valor alto, sob risco de se perder a representatividade da extensa área de estudo, foi realizada uma análise por *wavelets* para detecção de padrões de multicaminhamento e obstrução. Procedimento similar já foi utilizado em diversos trabalhos na modelagem de efeitos no contexto GNSS alcançando resultados satisfatórios (SOUZA, 2008; ROSA, 2008).

Fez-se portando uma análise espectral por *wavelets*, através da *wavelet* de *Morlet*, variando a máscara de elevação desde 0° , e então aumentando o valor de um em um grau até que o efeito sazonal característico do multicaminhamento fosse eliminado.

Tomando a estação PRU2 como exemplo inicial, pode-se observar pela Figura 54, que mostra dados de 10 dias do mês de Junho de 2013, a influência da máscara de elevação adotada. Com todos os gráficos na mesma escala (de zero a um), nota-se que o nível médio de interferência na amplitude do sinal é cerca de 4 a 5 vezes menor, com uma máscara de elevação de 25°. Também é possível observar que a certa altura, já não comparece mais o efeito sazonal apontado na seção 5.1.

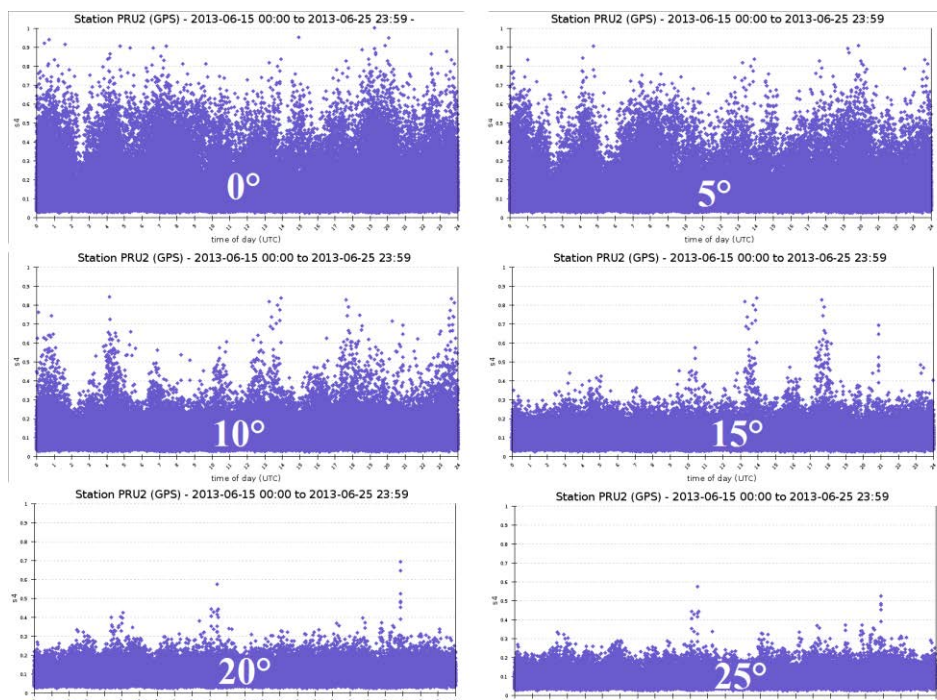


Figura 54 - Diferentes padrões de S4 para diferentes máscaras de elevação na estação PRU2 em um período sem cintilação ionosférica.

A Figura 55 mostra uma série temporal de duas semanas da variância do índice S₄ na estação PRU2 num período livre de interferência pela cintilação e com máscara de elevação de 15°. Por intermédio da variância do índice minuto a minuto, pode-se evidenciar épocas onde o índice mostrou-se menos estável. Como se sabe que no período em questão não houve cintilação, nota-se o efeito periódico causado pelas obstruções nas observações.

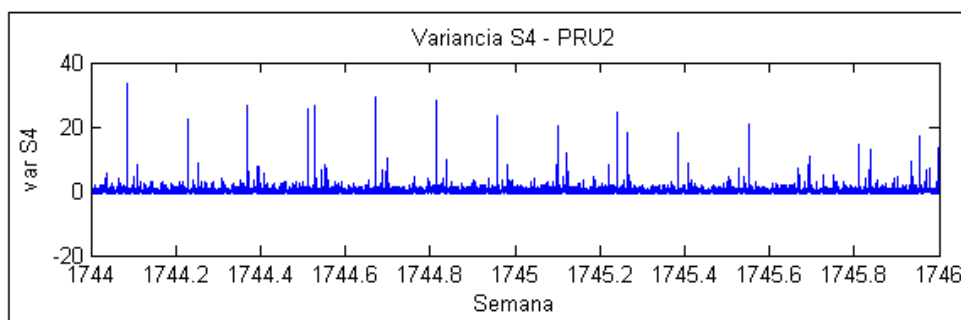


Figura 55 - Série temporal da variância do índice S_4 em duas semanas da estação PRU2 com máscara de elevação de 15° .

Portanto, aplicando a decomposição e análise espectral por *wavelets* na série temporal representada na Figura 55, foi obtido o resultado apresentado na Figura 56.

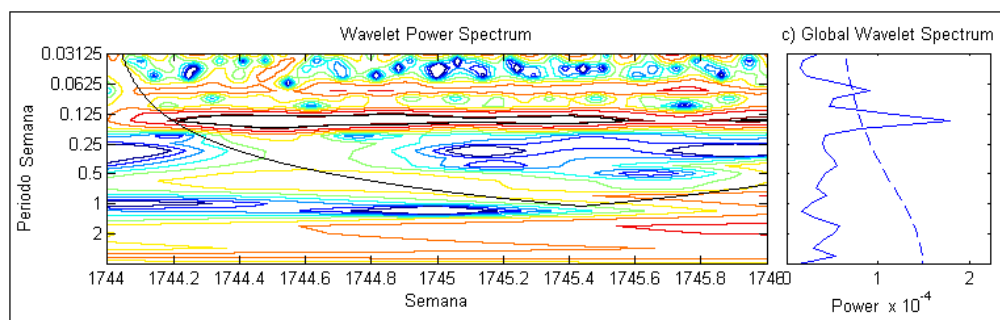


Figura 56 - Espectro da decomposição por *wavelets* da série temporal da estação PRU2 com máscara de elevação de 15° .

Extraindo os dados que geraram o gráfico, vê-se que o pico de correlação, representado pela curva em azul à direita, ocorre quando a *wavelet* se apresenta com um período igual a 0,14189 semana. Transformado em horas, o resultado é aproximadamente 23h50m, que, por sua vez, é o tempo estimado da repetição da órbita e, conseqüentemente, da interferência do sinal do satélite por um corpo fixo.

Como já mencionado, a análise foi refeita para 0° , 1° , 2° , e assim por diante até que o efeito do pico de potência da *wavelet* fosse insignificante. Para tal, adotou-se o limiar empírico de $9 \cdot 10^{-5}$. Esse limiar foi obtido através da correlação visual entre os dados da Figura 54 e da análise por *wavelets* para a estação PRU2. Portanto, caso a análise de potência do espectro não encontre nenhum valor acima desse limiar, adota-se o valor da máscara de elevação referente a este ponto do processo.

Novamente para a estação PRU2, utilizada em análise posterior, o ponto onde o espectro foi menor que o limiar foi encontrado em 25° . A Figura 57 mostra a série temporal da variância, bem como o espectro de *wavelets* para o mesmo conjunto. Nota-se que o maior valor não passa de $5 \cdot 10^{-5}$, estando, portanto, abaixo do limiar, sendo aceita essa máscara de elevação para esse conjunto de dados.

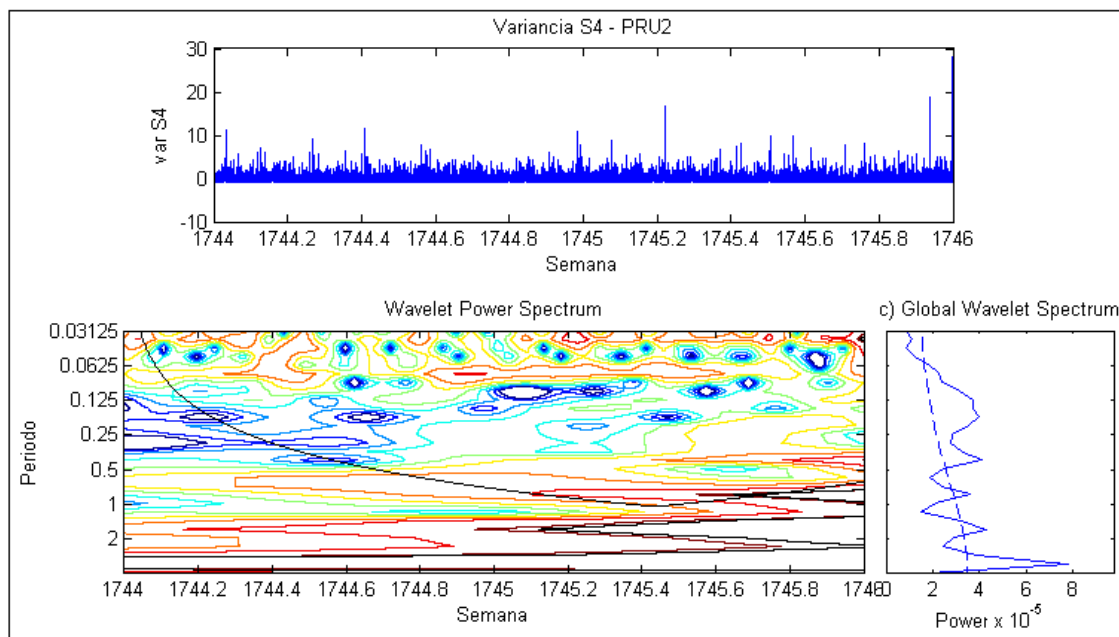


Figura 57 - Série temporal e espectro da decomposição por *wavelets* para a estação PRU2 com máscara de elevação de 25° .

Observa-se também um comportamento anômalo na Figura 57, pois foi encontrado pela análise por *wavelets* um período com potência do espectro de $8 \cdot 10^{-5}$. Mesmo estando abaixo do limiar adotado, vê-se que esse valor corresponde a um período de aproximadamente três semanas, sendo esse um período maior que o próprio conjunto de dados. Mais análises estão sendo feitas na metodologia para identificar a causa de tal comportamento, porém, pode-se afirmar com segurança que esse período não é de interesse para esse caso, onde as variações diárias ou menores são as que se encontram em foco.

Seguindo precisamente a mesma metodologia para as demais estações utilizadas na análise, apresenta-se a Tabela 8. Nela são mostradas as máscaras de elevação encontradas para cada uma das estações. Dessa forma, a utilização dos dados se torna otimizada, possibilitando uma maior abrangência das estações de rastreo, sem que haja interferência de outras fontes, senão, atmosféricas.

Tabela 8 - Estações de monitoramento e as máscaras de elevação utilizadas.

Estação	Máscara de elevação (°)
MANA/MAN2	6°/42°
PALM	25°
PRU2	25°
MACA/MAC2	15°/16°
SJCU	22°
POAL	26°

Uma situação que vale expor refere-se à situação da estação MANA. Essa estação encontrava-se instalada sobre o prédio da Faculdade de Odontologia da UEA (Universidade do Estado do Amazonas), sendo, em 27 de Outubro de 2012 removida e reinstalada, sob o nome MAN2, em outro prédio da mesma universidade a cerca de 2 Km da localização original. Na primeira instalação, verificou-se um nível de ruído muito baixo, já que com 6° de máscara de elevação, não se encontrou mais traços de interferências periódicas. No entanto, no novo local de instalação o método de decomposição da serie temporal por *wavelets* só identificou a série como livre de interferências após a aplicação de uma máscara de elevação de 42°, devido a um alto número de obstruções causadas por árvores de grande porte no entorno, típicas da região.

Já em relação à estação MACA, segundo as análises realizadas, mesmo após a substituição do local de instalação, as características permaneceram aproximadamente as mesmas, sendo assim possível o uso da mesma máscara de elevação em MACA e MAC2 (16°).

Finalizando assim preparação dos dados, adotou-se a metodologia descrita na seção 3.3 e projetaram-se os dados de S₄ e Phi60 para a direção zenital. Como já explicitado, o intuito dessa análise não é realizar uma climatologia do território nacional com o uso dos *pierce points* da ionosfera, e sim, realizar uma análise somente da influência da cintilação ionosférica sobre os receptores GNSS. Dessa forma, as análises subsequentes, com os índices já projetados referem-se à região de instalação de cada uma das estações.

Tendo, portanto, os dados já filtrados e remapeados, adotou-se a forma de análise proposta por Tiwari (2012), onde são analisados apenas eventos onde a ionosfera mostrou-se ativa. Nesse contexto, foram utilizados apenas os dados onde o índice S₄ é maior que 0,3, fazendo assim com que a análise seja feita de forma condicionada, isto é, os parâmetros são válidos uma vez que se sabe que houve interferência no sinal. Como a

proposta de análise refere-se apenas aos eventos de cintilação, percebe-se que de outra forma, a quantidade de dados não afetados seria consideravelmente maior que os dados de interesse, enviesando os resultados e inviabilizando a análise.

Para que seja feita uma melhor caracterização dos dados utilizados, foi realizada uma análise preliminar mostrando a quantidade de horas em cada arquivo de dados, bem como sua abrangência temporal e a quantidade de dados contaminados por efeitos da cintilação ionosférica. Consultados os dados de Janeiro de 2011, até Junho de 2013, a Tabela 9 representa a quantidade de dias utilizados nas análises das estações. A variação se dá por conta de tempo de instalação, eventos de indisponibilidade de energia elétrica, conexão com internet ou outros eventos que venham a tornar os dados indisponíveis.

Tabela 9 – Quantidade de dias analisados.

Estação	Dias utilizados
MANA/MAN2	253
PALM	339
PRU2	516
MACA/MAC2	287
SJCU	527
POAL	439

Já a Tabela 10 mostra a quantidade relativa de dados com cintilação encontrados nas amostras em diferentes níveis de intensidade.

Tabela 10 – Quantidade relativa de dados acima de cada limiar de S_4 em todo o conjunto de dados.

Estação	$S_4 > (\%)$							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
MANA/MAN2	0,262	0,103	0,041	0,015	0,004	0,001	0,0005	0,00020
PALM	0,507	0,189	0,071	0,024	0,008	0,002	0,0007	0,00023
PRU2	0,965	0,542	0,299	0,162	0,084	0,043	0,0207	0,00850
MACA/MAC2	0,291	0,134	0,062	0,027	0,011	0,004	0,0013	0,00482
SJCU	0,479	0,220	0,104	0,047	0,019	0,008	0,0030	0,00139
POAL	0,104	0,044	0,019	0,007	0,002	0,001	0,0003	0,00009

Por essas informações preliminares, vê-se que a estação de rastreo mais afetada de forma severa ($S_4 > 0,7$) é a estação PRU2, seguida pelas estações SJCU, MACA, PALM, MANA e POAL. Resultados esses já esperados pelo fato de as três primeiras estações encontrarem-se sob o efeito da anomalia equatorial.

A mesma informação mostrada na Tabela 10 é representada graficamente pela Figura 58, onde se observa a mesma ordem de intensidade e a característica exponencial dos dados.

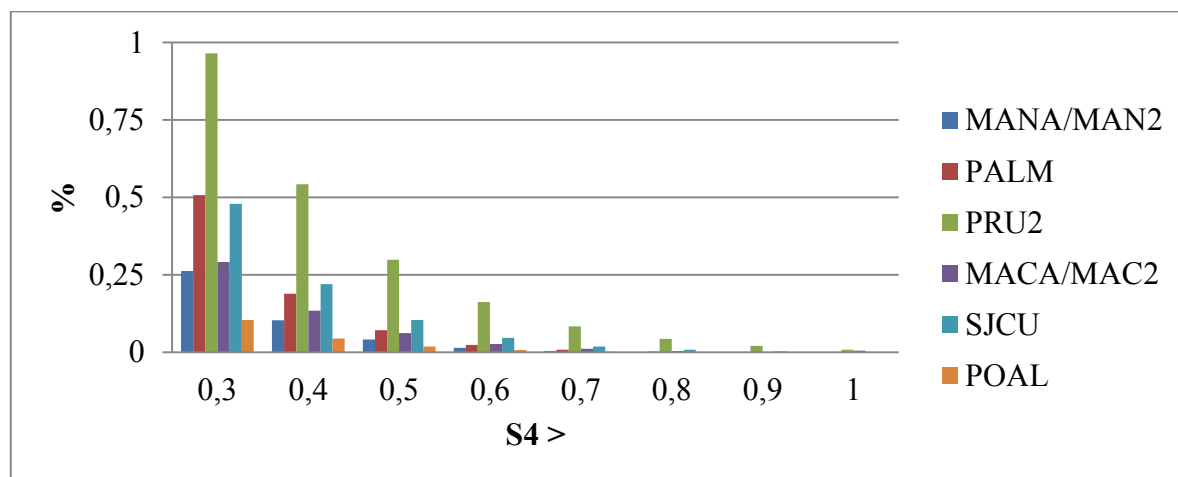


Figura 58 - Representação gráfica da porcentagem relativa de dados com efeitos da cintilação ionosférica.

Portanto, observa-se que as estações na região da anomalia têm eventos de cintilação ionosférica mais frequentes e mais intensos que as demais. A modelagem estatística dos dados apresentada na seção 6.1.2 dá um panorama mais exato dessa característica.

6.1.2 Ajuste dos dados à distribuição Weibull e análise de qualidade

Com a filtragem dos dados realizada, foi utilizada a metodologia abordada na revisão bibliográfica do Capítulo 5 para a estimação dos parâmetros da distribuição Weibull. Os resultados são apresentados na Tabela 11 juntamente com o resultado do teste KS e as latitudes magnéticas e geográficas das estações.

Tabela 11 - Resumo dos parâmetros calculados para as estações do projeto CIGALA/CALIBRA.

Estação	Distribuição Weibull		Teste KS	Latitudes	
	α	β	p-valor (%)	Geográfica	Magnética
MANA	0,4355028	0,05199616	08,08	-3,11°	6,49°
PALM	0,4419823	0,0538741	58,06	-10,19°	-1,15°
PRU2	0,6861598	0,1699702	95,63	-22,12°	-12,79°
MACA	0,5426489	0,0920945	81,01	-22,41°	-13,75°
SJCU	0,571498	0,09954842	58,49	-23,22°	-14,24°
POAL	0,4697768	0,0521554	10,07	-30,07°	-20,71°

Observa-se que num nível de significância de 5%, todos os ajustes da distribuição Weibull foram aceitos aos seus respectivos conjuntos de dados. É interessante notar que os maiores valores de ajuste deram-se nas estações onde, normalmente, os índices de cintilação são mais altos e mais recorrentes. De certo modo, o próprio valor do teste mostra que há uma significativa correlação entre a localização geográfica e os eventos de cintilação ionosférica.

Com relação aos testes paramétricos, vê-se pela Figura 59 as curvas teóricas (em vermelho) e os dados empíricos (histograma em preto). A aproximação entre ambos corrobora a informação dada pelo teste KS de que o ajustamento se deu de maneira adequada.

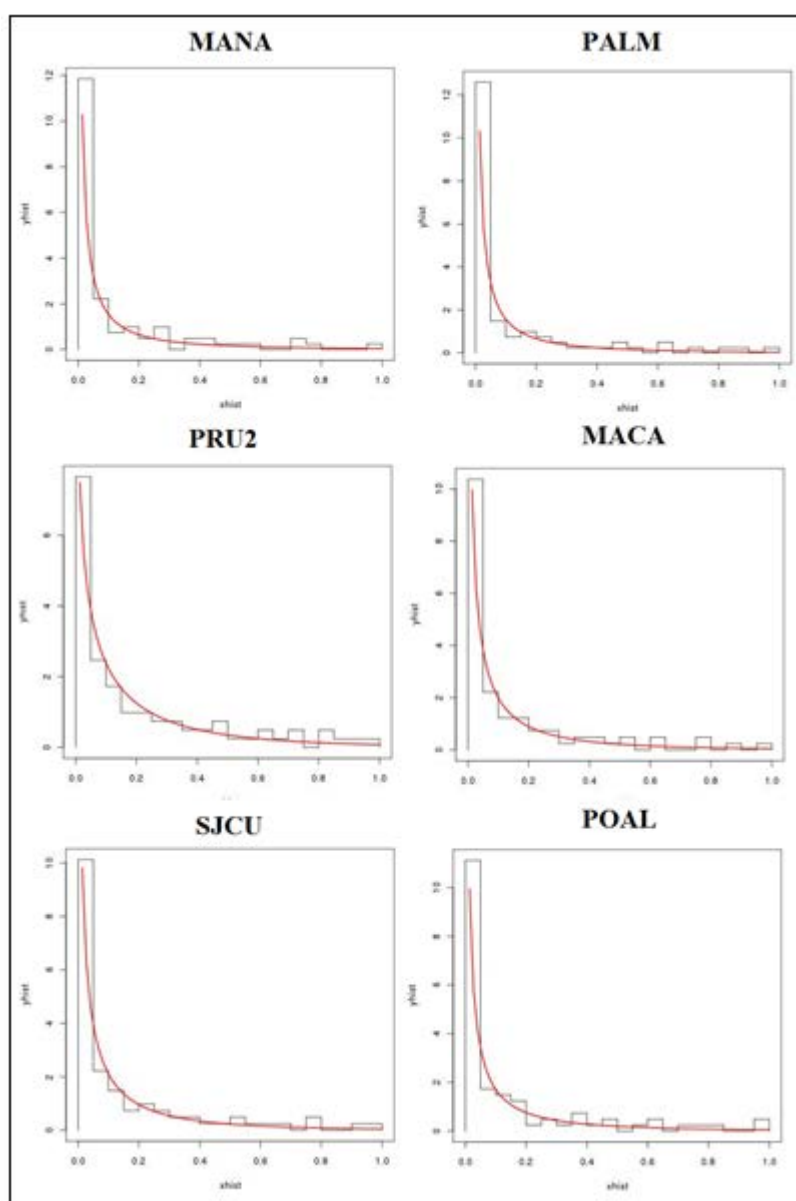


Figura 59 - Comparação entre curvas teóricas (em vermelho) e dados empíricos (histograma em preto) para as estações estudadas.

Já a Figura 60 mostra a relação entre as densidades acumuladas teórica e empírica da mesma forma que na Figura 59. Também é possível observar aqui um grau adequado de aproximação entre ambas as curvas.

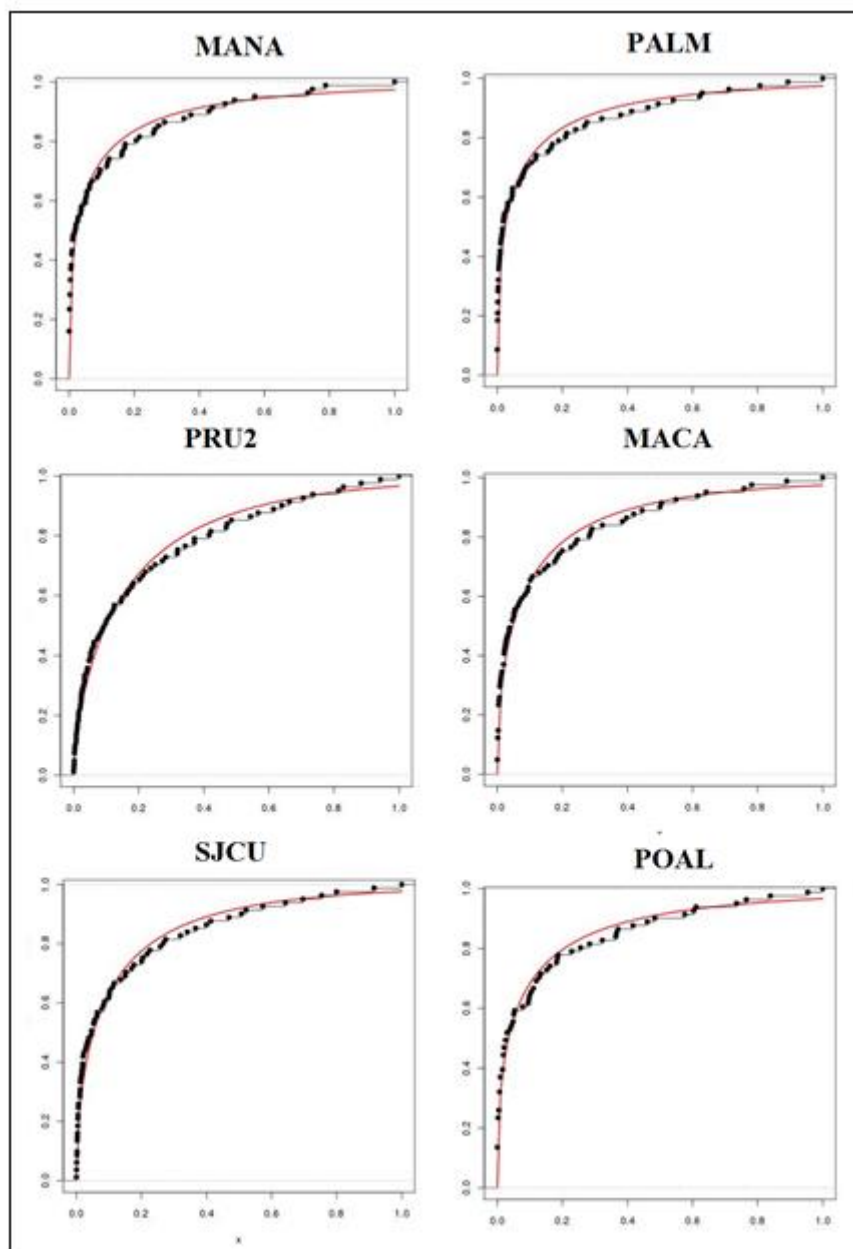


Figura 60 - Comparação entre densidades acumuladas teóricas (em vermelho) e dados empíricos (em preto) para as estações estudadas.

Dessa forma, conclui-se que o ajustamento da distribuição se deu de maneira adequada, podendo então ser utilizada como parâmetro representativo do conjunto de dados analisado. Portanto, nas análises subsequentes a qualidade dessa representatividade não é mais levada em consideração.

6.1.3 Análise probabilística dos resultados

Tendo o comportamento dos eventos de interferência caracterizados de forma satisfatória pela distribuição Weibull, a primeira análise realizada foi em relação à forma das curvas de densidade. Espera-se que por essa análise também se verifique a mesma ordem de intensidade dos eventos evidenciada na seção 6.1.2. Portanto, a Figura 61 mostra as curvas das estações estudadas para o intervalo onde o S_4 se encontra entre 0,3 e 0,4.

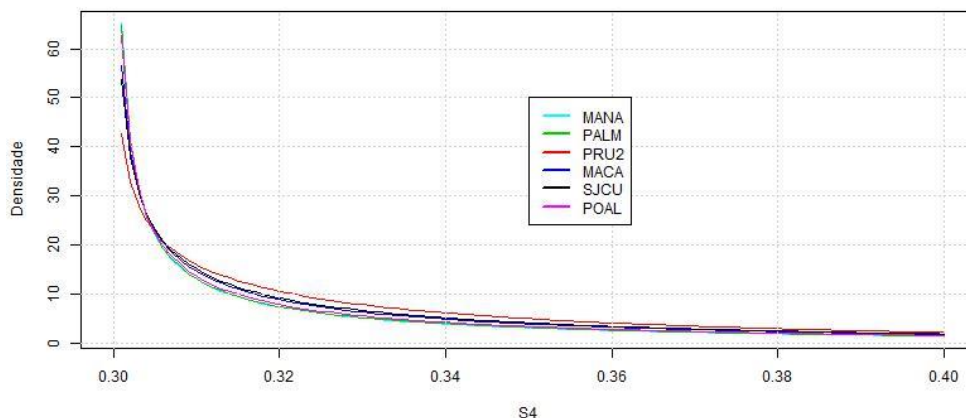


Figura 61 - Distribuição acumulada inversa de Weibull para as estações do projeto CIGALA/CALIBRA.

Há diferenças entre as estações, porém de baixa magnitude pois trata-se de um grande intervalo de tempo, logo, as curvas se encontram muito próximas umas das outras. Aumentando a resolução para um trecho do gráfico, podemos observar a ordem entre as estações que apontam maior intensidade de eventos de cintilação. A Figura 62 mostra uma aproximação do trecho no entorno do valor 0,35.

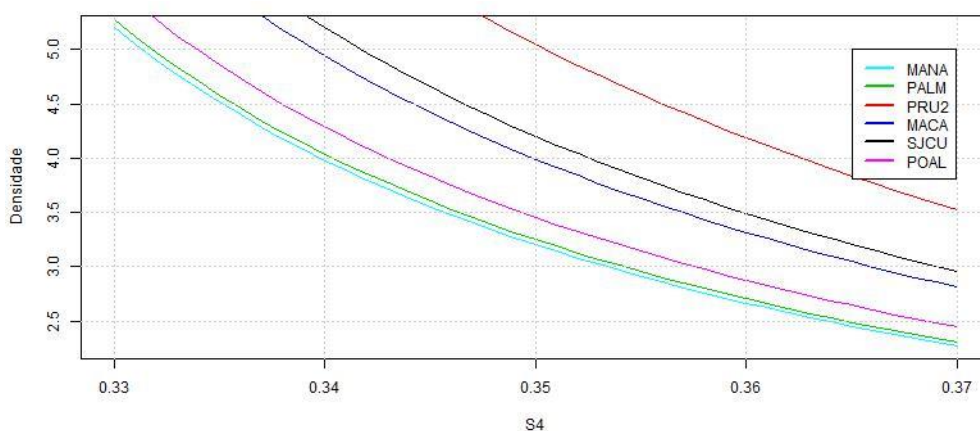


Figura 62 - Trecho das curvas de densidade da distribuição Weibull para as estações estudadas.

Apesar de as curvas estarem aparentemente muito próximas, deve-se ressaltar que a quantidade analisada de dados faz com que uma pequena mudança no valor de média seja apenas conseguida com uma grande quantidade de observações. Gráficamente as diferenças não aparentam ser significativas, porém, traduzindo as curvas em termos de probabilidades condicionadas, tem-se a Tabela 12, que mostra a probabilidade do índice S_4 ultrapassar diversos limiares, dado que o índice é maior que 0,3.

Tabela 12 - Probabilidade relativa de dados acima de cada limiar de S_4 .

Estação	P ($S_4 > x \mid S_4 > 0,3$) (%)							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
MANA/MAN2	100	26,46	16,56	11,70	08,78	06,85	05,49	04,49
PALM	100	26,86	16,77	11,81	08,84	06,87	05,49	04,47
PRU2	100	49,91	32,68	22,83	16,54	12,28	09,29	07,12
MACA/MAC2	100	35,14	21,80	14,98	10,87	08,17	06,29	04,94
SJCU	100	36,69	22,53	15,28	10,92	08,08	06,13	04,74
POAL	100	25,72	15,25	10,28	07,39	05,54	04,28	03,38

A Figura 63 mostra graficamente o resultado apresentado na Tabela 12.

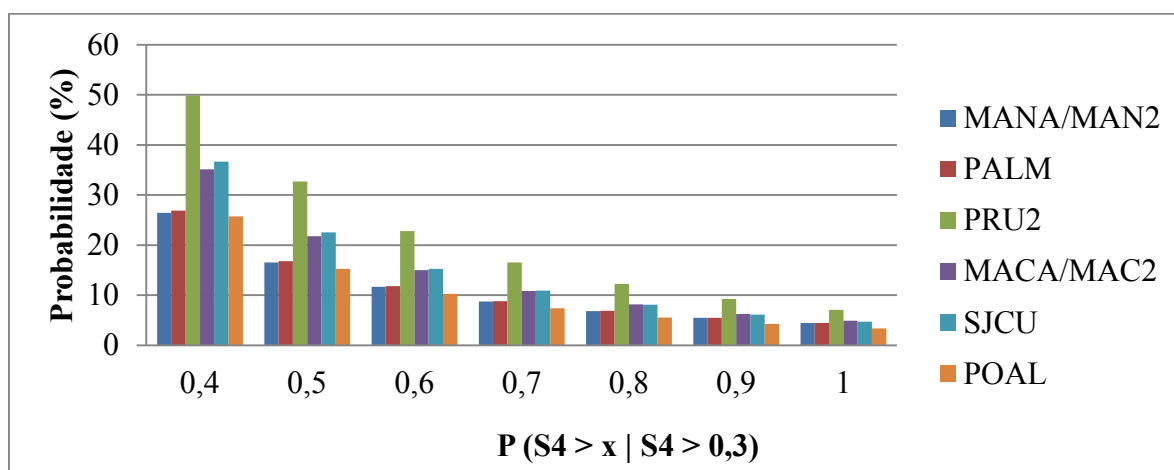


Figura 63 - Representação gráfica da probabilidade condicionada de dados com efeitos da cintilação ionosférica.

Nota-se pelos resultados obtidos que a ordem das estações com maior número de ocorrências severas (maior que 0,7) é PRU2, SJCU, MACA, PALM, MANA e POAL, sendo essa a mesma ordem da análise preliminar da seção 6.1.1. A exceção se dá nos valores maiores, próximos a 1, quando algumas ordens da distribuição se invertem, sendo esse

resultado proveniente de uma provável escassez de dados dessa magnitude, causando uma dificuldade de modelagem desse trecho da curva.

Durante o ciclo solar 24, o qual se encontra atualmente próximo ao auge de sua atividade, observou-se, como já citado, uma contagem abaixo do esperado de manchas solares. Os níveis de atividade solar foram insuficientes para iniciar eventos de cintilação ionosférica de magnitude severa, estando a maioria dos eventos caracterizados como fracos ou moderados.

Outro aspecto que chama atenção é o fato da estação PRU2 ter níveis significativamente maiores que as demais estações de rastreo, tanto na análise numérica preliminar, quanto na análise estatística. Pelos resultados apresentados na seção 6.1.1, vê-se que não há interferências periódicas, como multicaminho ou obstrução do sinal que justifiquem valores além do esperado. Dessa forma, há duas possibilidades que podem explicar o fenômeno. A primeira delas é alguma fonte de interferência não periódica e não retirada com a máscara de elevação de 25°, como problemas na fiação, defeito no receptor ou outras falhas de hardware. Uma segunda hipótese seria o fato da região dessa estação apresentar características atmosféricas que favoreçam o acontecimento de eventos de cintilação de maior magnitude. Atualmente, num raio de cerca de 2 km dessa estação há outras quatro unidades de monitoramento recém instaladas e com as mesmas características dessa. Nesse caso, há a possibilidade futura de que, com mais dados em períodos de ionosfera ativa, se possa fazer uma análise comparativa e verificar a real situação da estação PRU2.

Ainda com o uso desses resultados, podem-se quantificar os eventos em tempo real, época por época, indicando onde na curva de probabilidade cada um deles se encontra. Por exemplo, nas proximidades da estação SJCU, uma interferência que leve o índice S_4 a um valor de 1 está classificado como estando entre os 4% mais intensos dessa localidade.

Outra análise a ser realizada diz respeito à correlação entre os índices S_4 e Φ_{60} , mostrada na Tabela 13. É interessante notar que a correlação linear (ρ) entre os índices é maior nas estações onde há efeitos de maior intensidade. Teoricamente, essa correlação deve ser sempre alta (acima de 70%). No entanto, são admitidos alguns problemas nas metodologias utilizadas para os cálculos do índice Φ_{60} (MUSHINI, *et al.*, 2012).

Tabela 13 - Análise de correlação entre os índices S_4 e Φ_{60} .

Estação	$\rho(S_4, \Phi_{60})$
MANA/MAN2	24,5%
PALM	27,0%
PRU2	48,7%
MACA/MAC2	36,3%
SJCU	35,9%
POAL	32,8%

Por isso, nessa pesquisa, admite-se que ambos são moderadamente correlacionados de maneira linear a ponto de que a análise da cintilação em amplitude reflita também as características estatísticas da cintilação em fase, já que suas magnitudes são similares em sua concepção, e, em teoria, ambos os eventos são desencadeados pelo mesmo efeito (ITU, 2012).

6.1.4 Interpolação dos parâmetros pelo polinômio de Chebyshev

Expandindo o estudo para o território compreendido entre as estações, interpolaram-se os parâmetros apresentados na Tabela 11 em relação às suas coordenadas magnéticas. O resultado da interpolação foi obtido a partir de um polinômio de Chebyshev de quarto grau com os parâmetros para α e β apresentados Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros do polinômio de Chebyshev de quarto grau para os parâmetros da distribuição Weibull.

Coefficiente	α	β
C_1	0.47363847445	0.07259196886
C_2	-0.08858826530	-0.02373681857
C_3	-0.02886506901	-0.02323482085
C_4	0.07178466847	0.02467381662

Como resultado do ajuste pelo MMQ, ambos os vetores de resíduos tiveram média zero e desvio padrão 0,05 para α e 0,01 para β .

Dessa maneira, com o auxílio desses dados é possível que se calculem os parâmetros de forma e escala da distribuição Weibull para qualquer ponto entre as estações utilizadas, bastando que se entre com a latitude magnética do local em questão. Assim, a Figura 64 mostra uma superfície de probabilidade condicionada calculada pelos parâmetros do polinômio de Chebyshev para o índice S_4 entre 0,3 e 1,3. Também se observa pela figura que há uma diferença, ainda que sutil, na região sob influência da anomalia equatorial. Esse

mesmo padrão já foi observado por outros autores de maneira semelhante (WERNIK *et al.*, 2004).

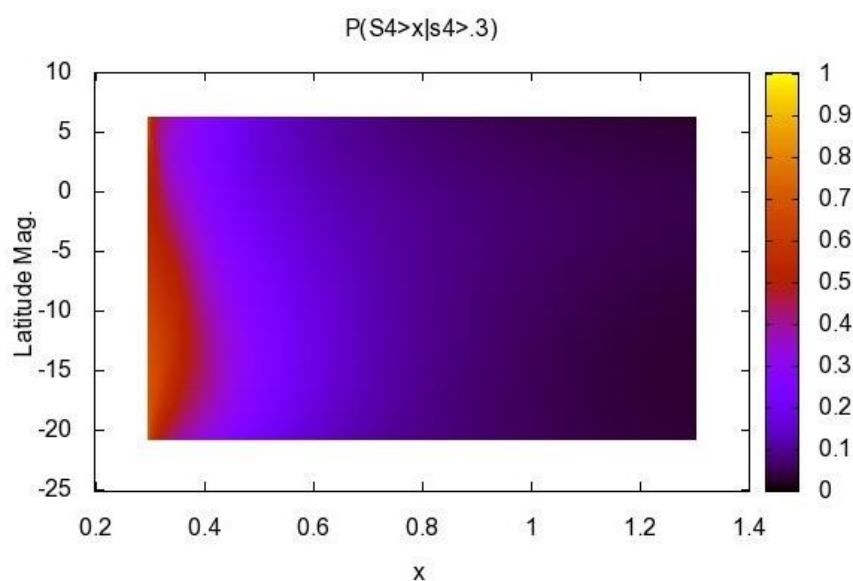


Figura 64- Superfície representando a função de densidade acumulada inversa Weibull interpolada para o intervalo entre as estações de rastreo.

Para que se observem melhor as características dessa região de maior atividade, é possível que se reduza a abrangência do índice para o intervalo entre 0,3 e 0,7, e em seguida entre 0,3 e 0,5 (Figura 65 e Figura 66), sendo assim possível notar com mais clareza essa região distinta.

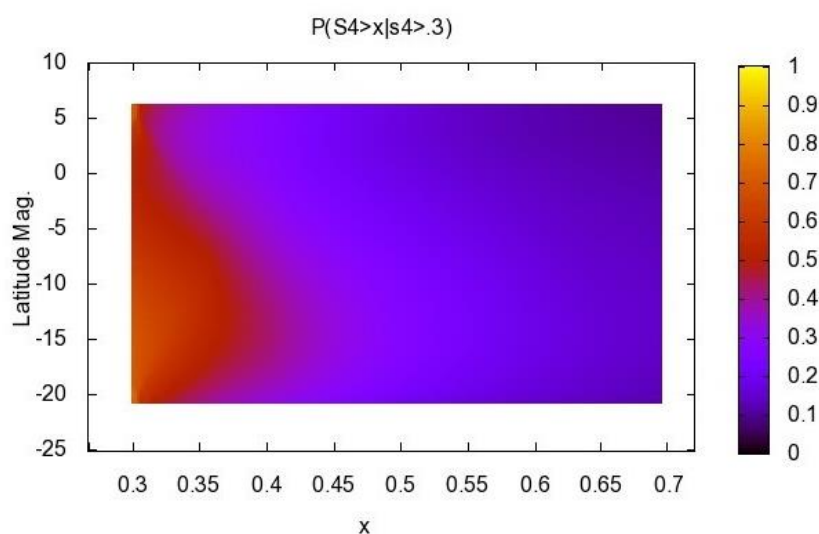


Figura 65 - Superfície representando a função de densidade acumulada inversa Weibull interpolada para o intervalo entre as estações de rastreo para S_4 entre 0,3 e 0,7.

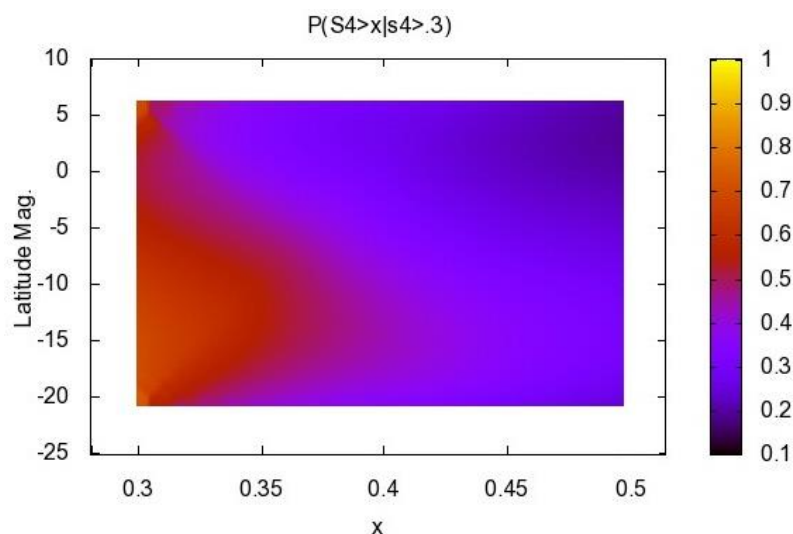


Figura 66 - Superfície representando a função de densidade acumulada inversa Weibull interpolada para o intervalo entre as estações de rastreo para S4 entre 0,3 e 0,5.

Com esse resultado, mostra-se claramente que há regiões de atividade ionosférica distintas no Brasil, havendo então a necessidade de diferentes abordagens e diferentes expectativas de interferência para cada região. Como já apresentado, o Brasil encontra-se majoritariamente dentro da região equatorial (até aproximadamente 20° de latitude magnética), com uma parte menor na região de latitudes médias (aproximadamente entre 20° e 60° de latitude magnética). Porém, pela Figura 66 evidencia-se uma região centrada em aproximadamente $-13,5^\circ \pm 3^\circ$ ¹⁶ onde a atividade é mais intensa devido, muito provavelmente, ao efeito direto da Anomalia Equatorial. Pela Figura 67 observa-se essa região destacada na cor azul escuro. No decorrer dos demais experimentos, a região onde se encontra a crista da Anomalia Equatorial e os mais intensos eventos de cintilação será referida como região Equatorial Média, pelo fato de ser o limite entre as regiões Equatorial e de Latitude Média.

Como informado anteriormente, o projeto CIGALA tem sua continuação através do projeto CALIBRA, onde estão previstas instalações de novas estações de monitoramento. Com isso, espera-se que o ajuste aos dados fique ainda mais adequado, com menores resíduos e uma maior representatividade, tornando a função interpoladora cada vez menos definitiva nesse processo.

¹⁶ Limiar obtido pela maximização da curva ajustada pelo polinômio de Chebyshev.

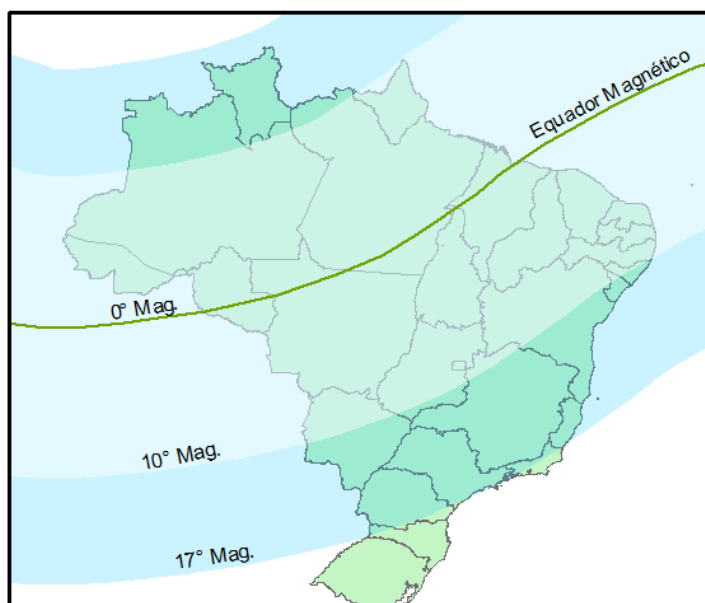


Figura 67 - Região "Equatorial Média" em azul escuro sobre o território brasileiro.

6.2 Experimentos RTK no contexto da Agricultura de Precisão

Nos tópicos a seguir, são descritos os resultados dos experimentos previamente propostos no contexto da Agricultura de Precisão.

6.2.1 Experimento RTK Fazenda Guarani

A Fazenda Guarani encontra-se a $-11,44^\circ$ de latitude magnética, estando, portanto, no intervalo mais crítico do país (região Equatorial Média) em relação à ocorrência e intensidade de cintilação ionosférica. Para essa região, a característica da probabilidade condicionada é representada pela Tabela 15. Nota-se que aproximadamente 13% dos eventos de cintilação nessa região têm intensidade igual ou maior a 0,7, indicativo este de grande probabilidade de interferência no sinal resultando em perda de ciclo, e perda da qualidade no resultado do posicionamento.

Tabela 15 - Probabilidade relativa de dados acima de cada limiar de S4 para a estação OLMP.

Estação	P (S ₄ > x S ₄ > 0,3) (%)							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
OLMP	100	40,47	25,79	17,97	13,14	09,91	07,65	06,00

Já a Figura 68 mostra a curva de probabilidade condicionada da estação.

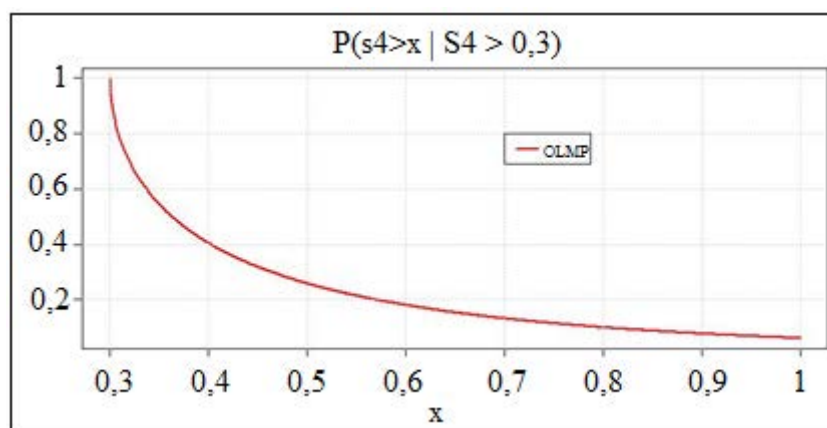


Figura 68 - Distribuição Weibull acumulada inversa da estação OLMP.

Por fim, a Figura 69 mostra a localização da estação OLMP em relação à área utilizada no estudo da seção 6.1.

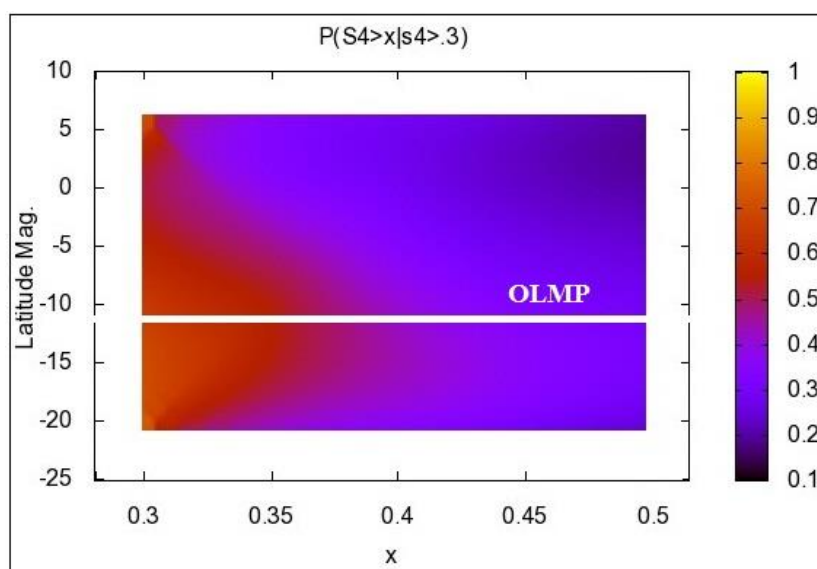


Figura 69 - Localização da curva de probabilidade condicionada da estação OLMP em relação à área de estudos.

Com o monitoramento da ionosfera feito pela estação base, foram obtidos os parâmetros S_4 e Φ_{60} de cintilação para aquela localidade. Na Figura 70 e Figura 71 esses parâmetros são representados.

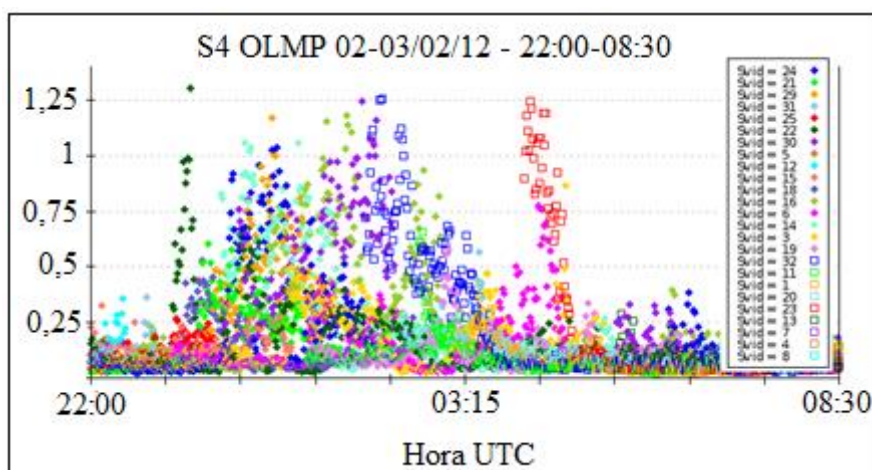


Figura 70 - Parâmetro S4 para o intervalo do experimento.

Durante o experimento foram rastreados 25 satélites GPS e em análise mais detalhada vê-se que ao todo 22 satélites tiveram índices S_4 , em algum momento, acima de 0,25. Complementarmente, observa-se 15 satélites com índice S_4 acima de 0,5. O evento de cintilação nessa ocasião teve uma duração total de cerca de 5:30 horas e seguiu o comportamento esperado pela curva de probabilidade condicionada apresentada na Figura 68.

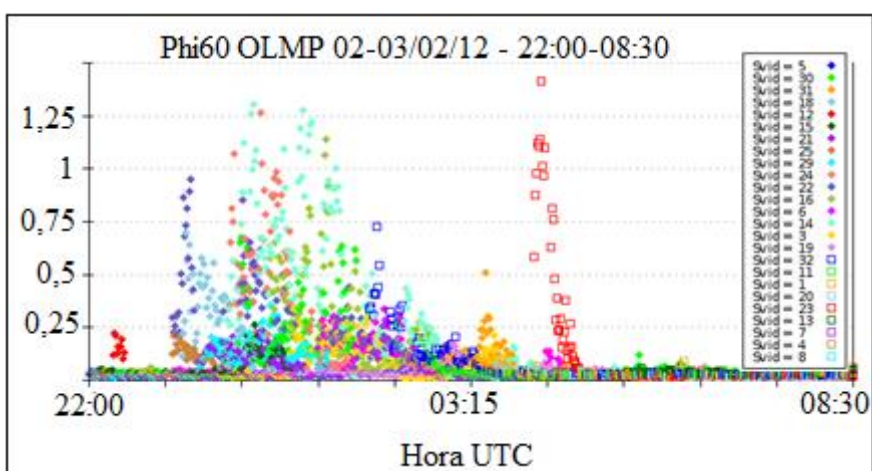


Figura 71 - Parâmetro Phi60 para o intervalo do experimento.

Numa última análise entre a Figura 70 e Figura 71, vê que os dados apresentam uma correlação linear de 82,72%, evidenciando, mais uma vez, a ocorrência desse evento, tornando assim o conjunto de dados obtidos válido para análise dos efeitos da cintilação ionosférica.

Quanto aos receptores instalados no trator, espera-se que, de alguma forma, mostrem os efeitos da cintilação ionosférica em suas coordenadas. A Figura 72 mostra os resultados para o Receptor A em suas componentes horizontais locais E e N, bem como na

componente local Up. Observa-se numa análise visual que a dispersão das três componentes é altamente correlacionada, alcançando picos de amplitude da dispersão de até 40 cm. A Tabela 16 mostra a relação de correlação entre as séries temporais dos eixos analisados.

Tabela 16 - Matriz de correlação entre as séries temporais de E, N e Up do receptor A.

	E	N	Up
E	100%	21,09%	1,7%
N	21,09%	100%	70%
Up	1,7%	70%	100%

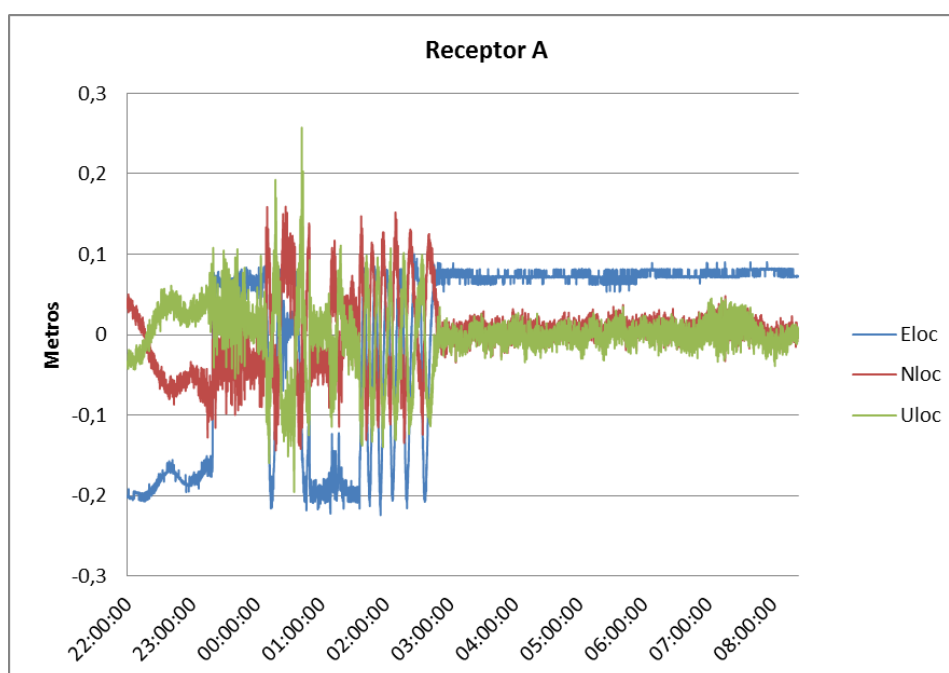


Figura 72 – Discrepâncias locais calculadas para o receptor A.

Já a Figura 73 mostra os mesmos resultados para o receptor do fabricante B em E, N e Up no referencial local. Nesse receptor observa-se um comportamento diferente do receptor A. A série temporal tem uma dispersão consideravelmente menor que a apresentada na Figura 72, sendo, portanto, mais estável. O único fator que se mostra desfavorável a esse receptor experimental é o fato de a solução RTK apresentar valores *outliers* esporádicos, mesmo quando em situação livre de cintilação ionosférica. A Tabela 17 mostra a correlação entre as componentes analisadas.

Tabela 17 - Matriz de correlação entre as séries temporais de E, N e Up do receptor b.

	E	N	Up
E	100%	6,5%	7,9%
N	6,5%	100%	43,33%
Up	7,9%	43,33%	100%

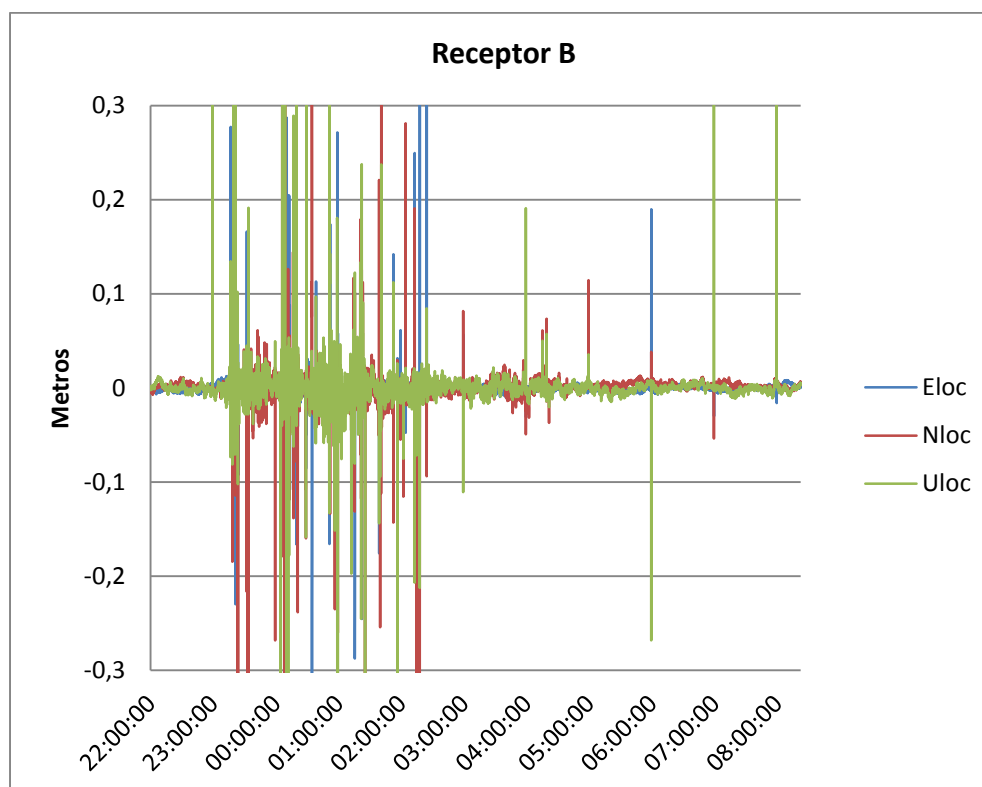


Figura 73 - Discrepâncias locais calculadas para o receptor B.

Por fim, a Tabela 18 mostra um quadro comparativo entre a média das coordenadas obtidas por ambos os receptores e seus respectivos desvios-padrão. Em verde, quando há melhoria da precisão, e vermelho quando há piora.

Tabela 18 - Sumário das coordenadas dos receptores A e B para todo o período.

Receptor	E (UTM)	N (UTM)	h
A	697714,316 ± 0,109	7713133,562 ± 0,05	511,088 ± 0,020
B	697667,945 ± 0,012	7713078,459 ± 0,013	513,114 ± 0,023

Por esses resultados, pode-se observar um viés entre as coordenadas estimadas de ambos os receptores. Isso se deve ao fato de terem sido utilizadas bases diferentes para o RTK, com diferentes referenciais. No caso da base OLMP, utilizada no receptor B, as coordenadas foram estimadas no PPP (Posicionamento por Ponto Preciso),

obtendo uma acurácia na casa centimétrica para todas as componentes. Já no caso da base da usina Guarani, usada para o receptor A, a coordenada foi obtida por posicionamento por ponto simples, com muito pouca acurácia, mostrando uma diferença de cerca de 50 metros na planimetria, e 2 metros na altimetria.

Observando então apenas os desvios-padrão das coordenadas estimadas, vê-se uma significativa melhoria na planimetria obtida pelo receptor B: quase 90% de precisão melhor em E e 60% em N. Apenas na componente h, os resultados se mostraram um pouco menos instáveis (cerca de 10% menos precisos). Essa deterioração na precisão da altura do receptor deve-se, provavelmente, a um algoritmo interno do receptor A que remove possíveis *outliers* da solução em tempo real.

A Figura 74 mostra – nessa ordem – as séries temporais de E, N e Up de ambos os receptores A e B, a média dos índices S_4 e Φ_{60} verticalizados e uma linha atravessando todos os gráficos marcando o início dos efeitos da cintilação ionosférica, apenas para referência. Nota-se que o efeito no cálculo das coordenadas é imediatamente afetado após o início do evento de cintilação.

Observa-se também pela análise das figuras com ambos os receptores representados, que o receptor comercial A, por diversas vezes tem variações de aproximadamente 30 centímetros entre uma época e outra, e não se tratam de *outliers*, pois tais variações permanecem por um intervalo considerável. Como não se tem acesso aos processos internos desse receptor, suspeita-se que isso se deva à solução errônea do vetor das ambiguidades dos satélites, causando erros na casa de um ciclo da fase, ou seja, aproximadamente 27 cm.

Já o receptor B, como se pode observar, apresenta um comportamento bem mais estável, com exceção dos *outliers* presentes em algumas poucas épocas, que poderiam ser retirados do processamento com testes estatísticos em tempo real e de complexidade relativamente baixa. O que explicaria esse comportamento mais estável são, provavelmente, as melhorias realizadas no firmware do receptor, alterando parâmetros internos do sistema de rastreamento do receptor como os da malha de captura de fase, controle de ganho e seleção de satélites a serem usados no cálculo dos resultados, sendo esses fatores auxiliares na redução do problema de defasagem do sinal e no problema da variação da potência do sinal.

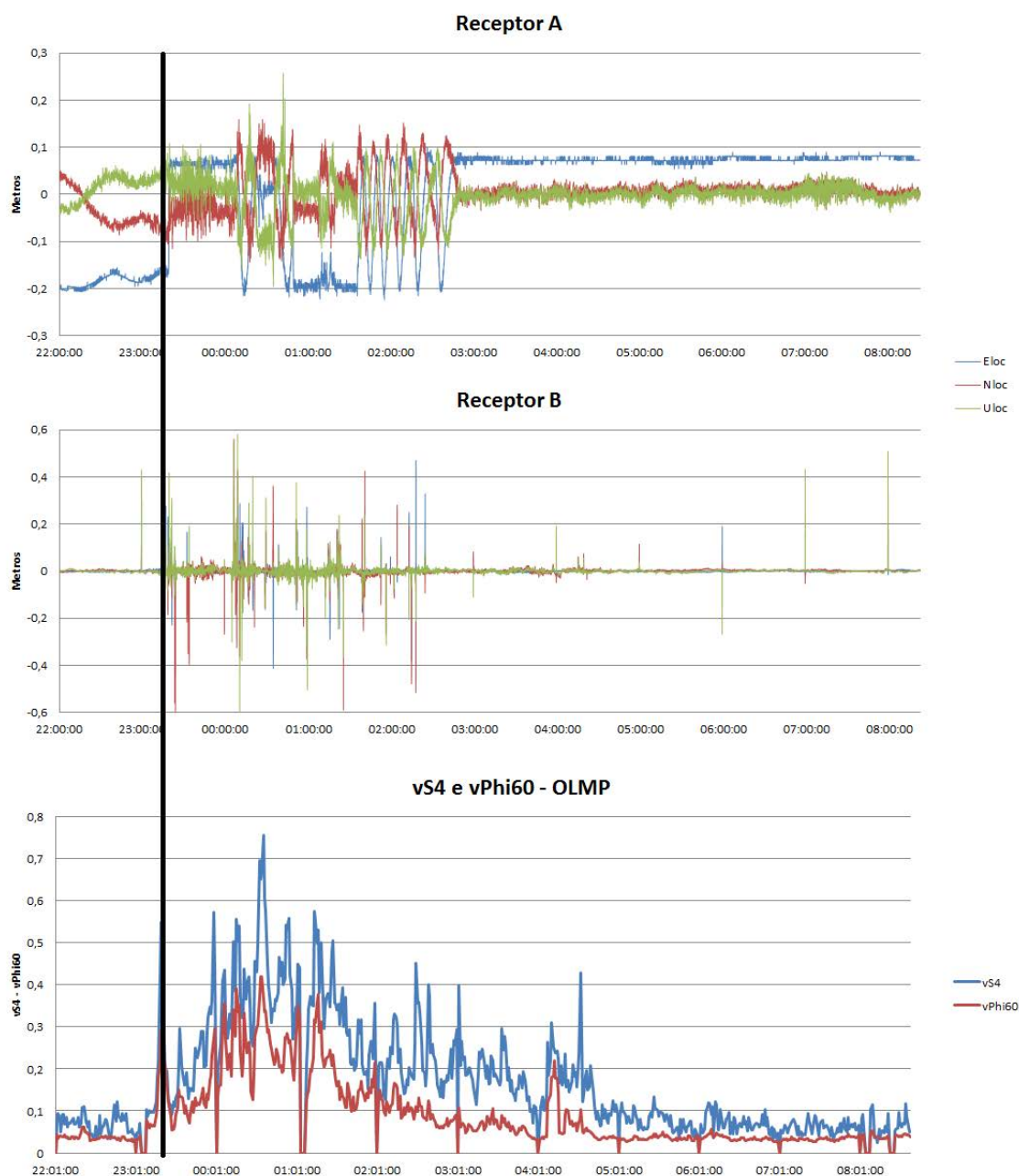


Figura 74 - Análise temporal comparativa entre os receptores A, B e os índices S4 e Phi60 verticalizados.

Com os resultados apresentados nesse experimento, pôde-se mostrar a importância do monitoramento da cintilação, bem como alguns aspectos no comportamento dos receptores sob tais eventos no contexto da Agricultura de Precisão. Foram citados os problemas que podem ser acarretados, e evidenciada uma situação onde um equipamento comercial – receptor A –, comumente utilizado para a agricultura, provavelmente falhou em resolver a ambiguidade durante um evento de cintilação, gerando um resultado não confiável,

ou um falso-negativo, corroborando com a premissa de que a cintilação ainda é um efeito a ser levado em consideração na fabricação de equipamentos.

Mostrou-se também que o receptor B foi consideravelmente mais eficiente em mitigar o efeito da cintilação ionosférica por intermédio da adaptação de seus parâmetros de rastreo para tal situação. Nesse caso, há o indicativo de que a cintilação é um problema passível, ao menos, de atenuação de seus efeitos sem que seja necessária uma solução mais dispendiosa como integração de outros sensores na solução das coordenadas.

6.2.2 Experimento RTK ESALQ/USP

O local dos experimentos realizados encontra-se a $-13,61^\circ$ de latitude magnética, estando, portanto, assim como no estudo de caso anterior, na área crítica de valores de intensidade de cintilação ionosférica. A Tabela 19 e a Figura 75 mostram a curva de densidade acumulada inversa da distribuição Weibull para essa coordenada. Observa-se que mais de 23% dos eventos têm intensidade maior que 0,5, e ainda que quase 11,5% dos eventos têm intensidade maior que 0,7, evidenciando assim a importância do monitoramento da atividade ionosférica nessa região.

Tabela 19 - Probabilidade relativa de dados acima de cada limiar de S4 para a estação PIRA.

Estação	P ($S_4 > x \mid S_4 > 0,3$) (%)							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
PIRA	100	38,48	23,76	16,12	11,51	08,49	06,42	4,94

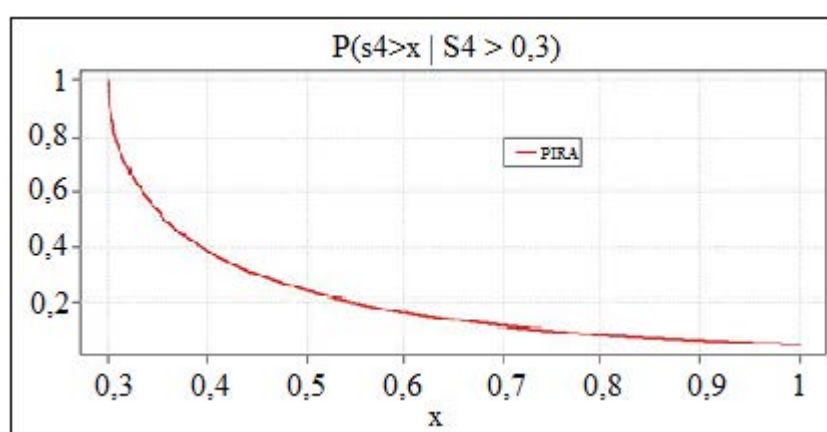


Figura 75 - Distribuição Weibull acumulada inversa da estação PIRA.

Já Figura 76 mostra onde a região em questão se encontra no panorama geral da área de estudos. Vê-se que ela se encontra muito próxima do pico máximo de atividade calculado pelo modelo desenvolvido na seção 5.1.

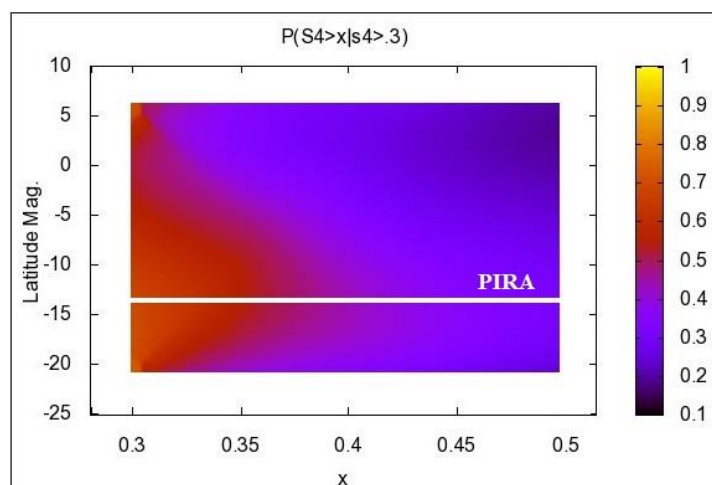


Figura 76 - Localização da curva de probabilidade condicionada da estação PIRA em relação à área de estudos.

O experimento aconteceu efetivamente entre os dias 11 e 14 de Dezembro de 2012, e o comportamento da ionosfera durante os períodos de coleta dos dados é verificado pelos índices S_4 e Φ_{60} , representado nas Figura 77 e Figura 78. Observa-se que, apesar de serem poucos os satélites afetados, os valores de S_4 e Φ_{60} são expressivos e, normalmente, suficientes para causar perda de ciclo nos sinais. No satélite 18, por exemplo, comparece uma média de S_4 igual a 0,6 durante as três noites, estando esse evento entre os 30% mais intensos da região.

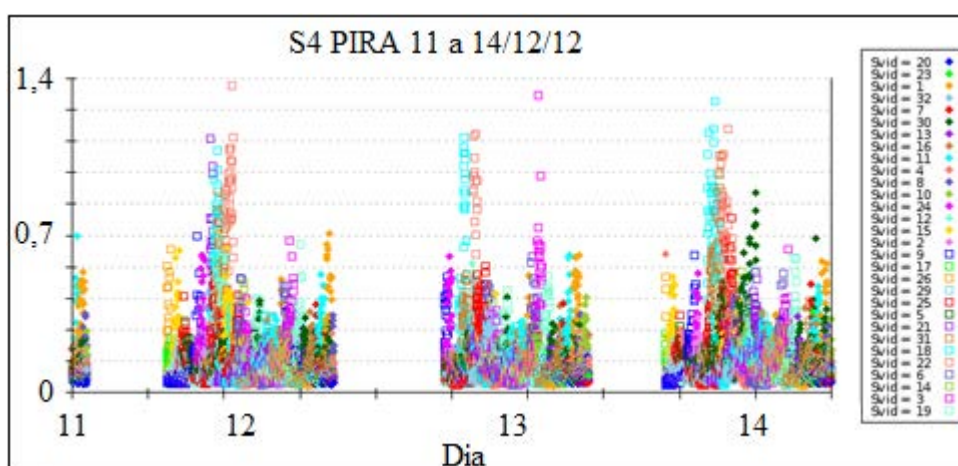


Figura 77 - Índice S_4 para os períodos de coleta de dados no experimento.

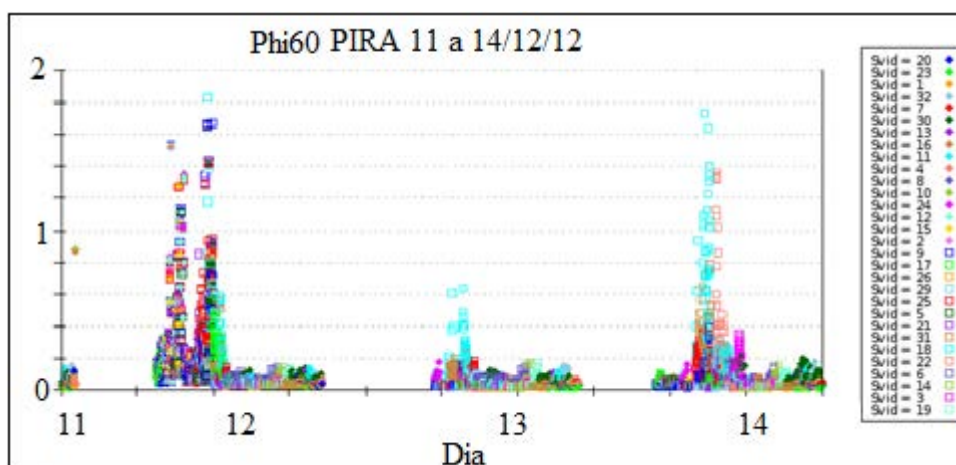


Figura 78 - Índice Phi60 para os períodos de coleta de dados no experimento.

Tendo em vista o contexto apresentado, foi selecionado o conjunto de dados entre os dias 11 e 12 de Dezembro de 2012 (o primeiro grupo maior das Figura 77 e Figura 78) para o experimento no modo cinemático. Nesse conjunto, a completeza dos dados é maior que nos demais, fazendo com que seja o período mais adequado a ser analisado nessa ocasião. As duas figuras seguintes mostram os índices S_4 e Phi60 para as épocas do experimento.

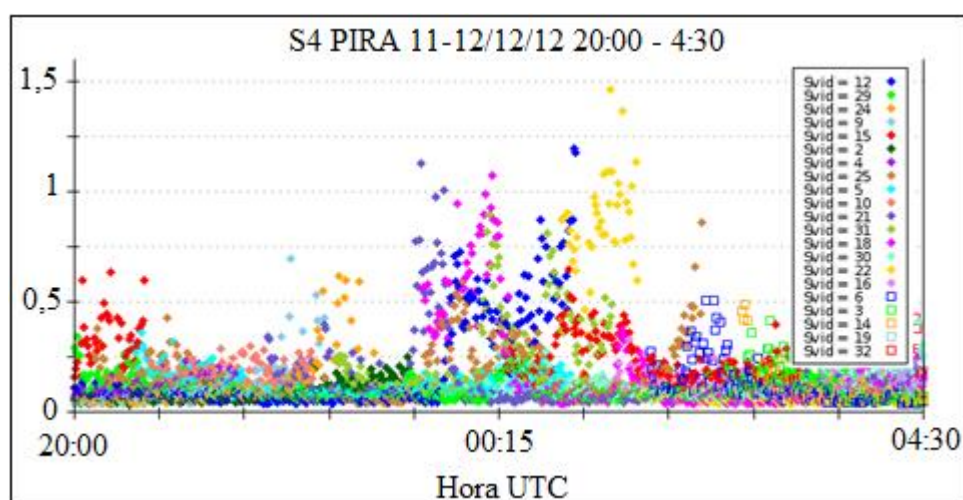


Figura 79 - Índice S_4 para o período do experimento.

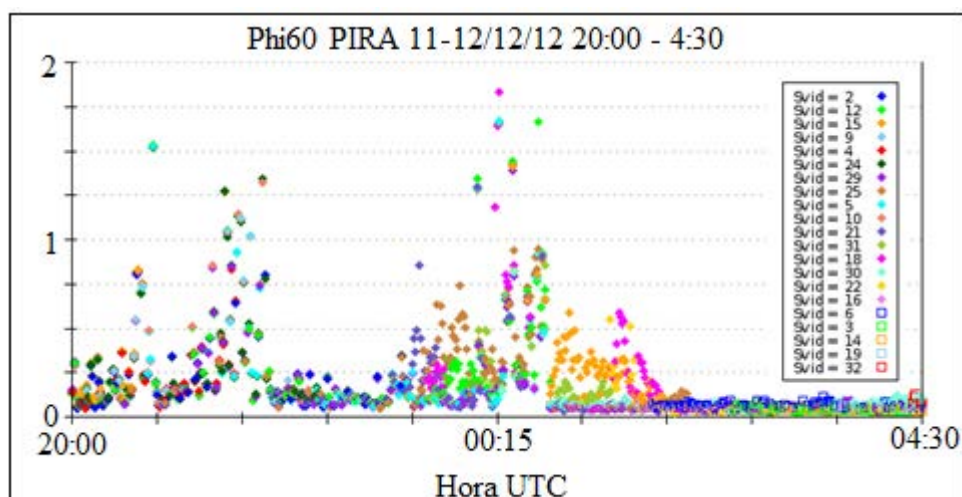


Figura 80 - Índice Phi60 para o período do experimento.

Já a Figura 81 mostra um exemplo da atividade ionosférica por intermédio do TEC. Nessa figura, o satélite 31 tem gradientes de TEC consideravelmente mais intensos que satélites sem interferência. Pode-se observar pelas figuras anteriores que esse satélite teve valores de S_4 e Phi60 também expressivos.

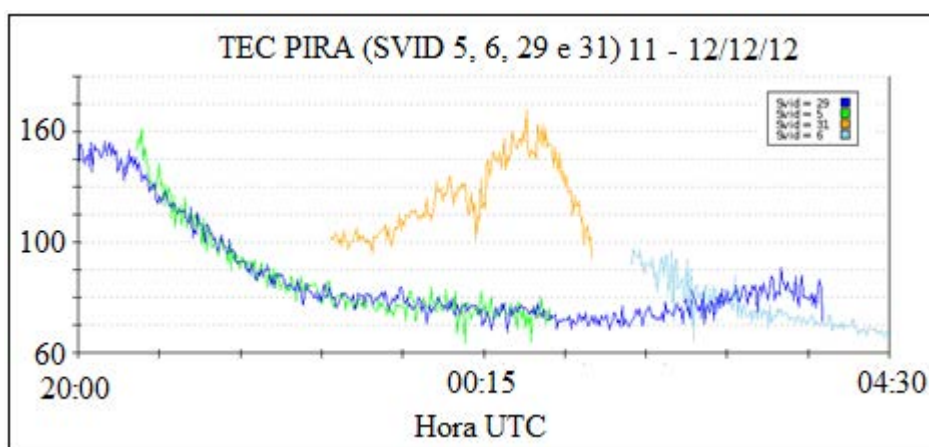


Figura 81 - TEC para quatro satélites no decorrer do experimento.

Numa análise mais detalhada, observa-se que num total de 21 satélites utilizados no posicionamento, 10 deles tiveram índice S_4 em algum momento maior que 0,5. O resultado do processamento realizado entre as 20h do dia 11 e 4:30h do dia 12 é apresentado na Figura 82.

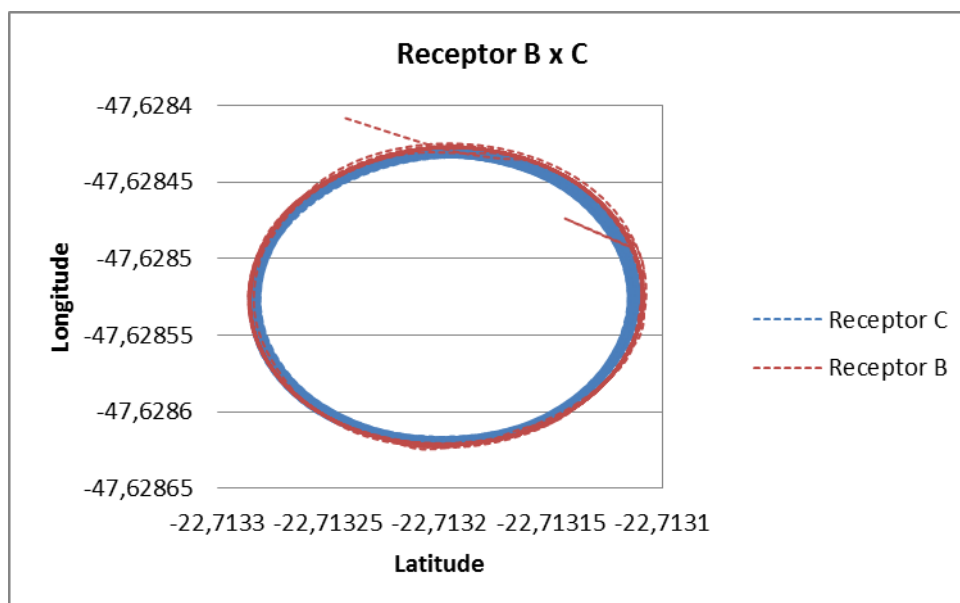


Figura 82 - Resultado do processamento dos receptores B e C.

Com a análise das coordenadas, constatou-se que o trilho utilizado no experimento tem diversas irregularidades ao longo de seu trajeto que dificultam o cálculo de um parâmetro de acurácia, onde, por exemplo, comparar-se-ia o raio estimado do trilho com um valor real. A Figura 83 mostra um trecho da estimação do valor do raio do trilho, evidenciando as irregularidades.

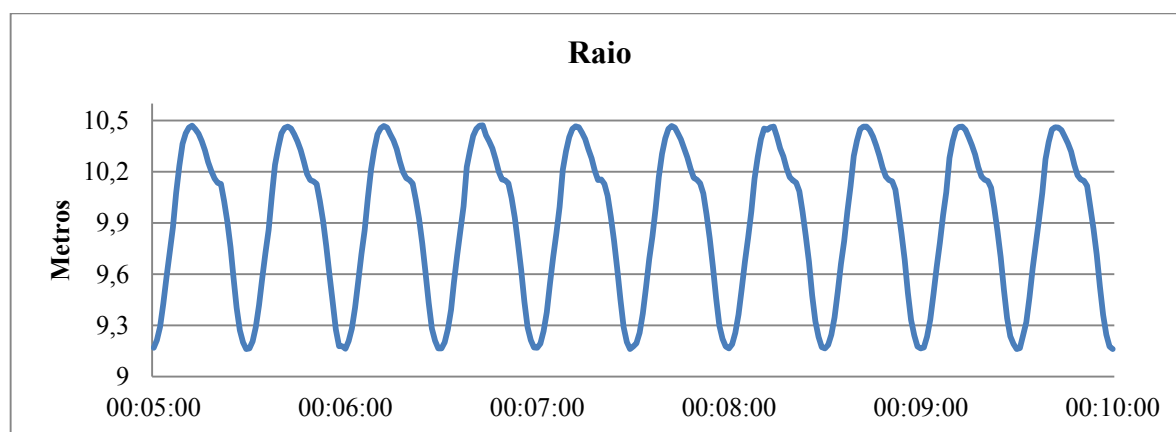


Figura 83 - Raio do trilho em um trecho de 5 minutos do experimento.

Por esse motivo, foi realizada apenas uma comparação relativa entre os equipamentos, sendo a parcela de contribuição de cada um no erro calculado um parâmetro difícil de estimar. Calculou-se então a distância entre os dois receptores para o período selecionado do experimento. Nesse caso, as coordenadas que se encontram no mesmo referencial foram subtraídas e em seguida seu valor resultante calculado sendo, por fim,

subtraído da distância real entre as antenas, qual foi medida em campo com o auxílio de uma trena. A Figura 84 mostra o resultado dessa diferença juntamente com os índices verticalizados S_4 e Φ_{60} .

Como já se sabe pelo experimento anterior realizado na Fazenda Guarani, o receptor B tem um comportamento estável, com baixa incerteza na estimativa das coordenadas, com o inconveniente de gerar *outliers* esporadicamente e independente dos parâmetros de cintilação. Nesse sentido, para que se possa conhecer o comportamento do receptor B e mais tarde inferir a parcela de cada receptor no erro apresentado na Figura 84, foi realizado um segundo processamento apenas com o Receptor C no modo estático, a exemplo do que aconteceu no experimento anterior.

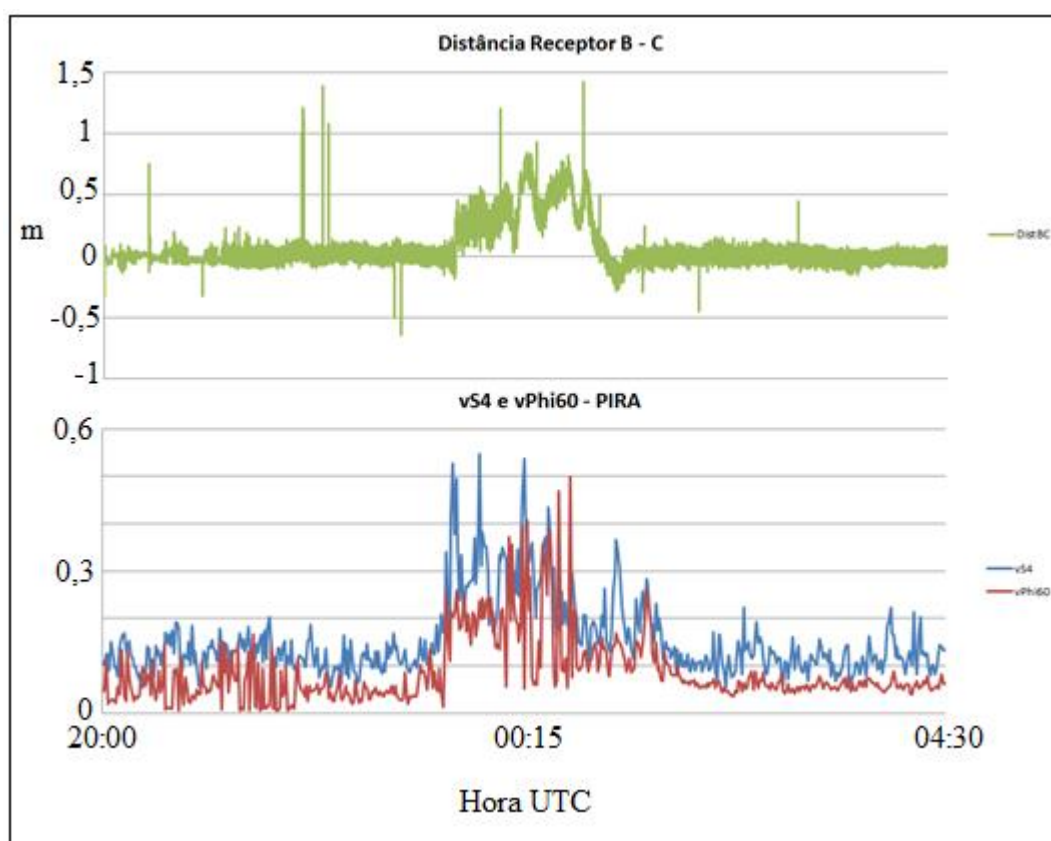


Figura 84 – Erro na distância calculado entre os receptores B e C durante o experimento e índices de parametrização da cintilação verticalizados.

O resultado obtido para o Receptor C é referente à noite do dia 12 para o dia 13, pois, no modo estático, foi onde se obteve um conjunto de dados mais consistente. A Figura 85 e Figura 86 mostram os valores de S_4 e Φ_{60} para o período desse teste específico.

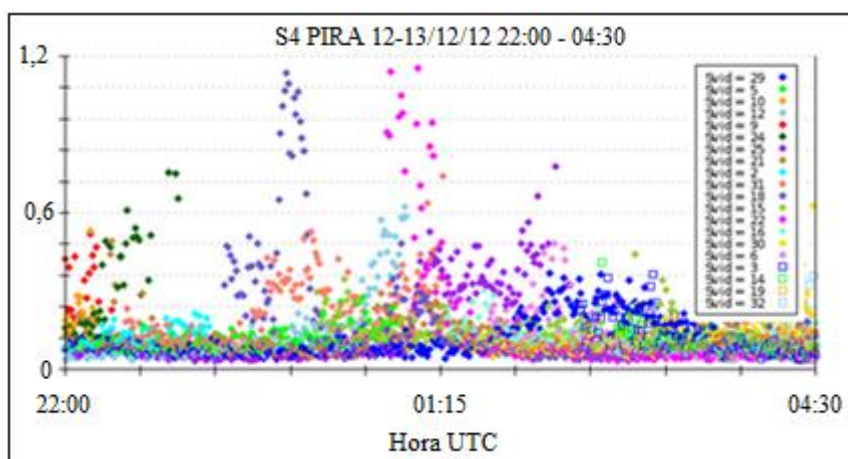


Figura 85 - Índice S4 para o experimento de caracterização do comportamento do Receptor C.

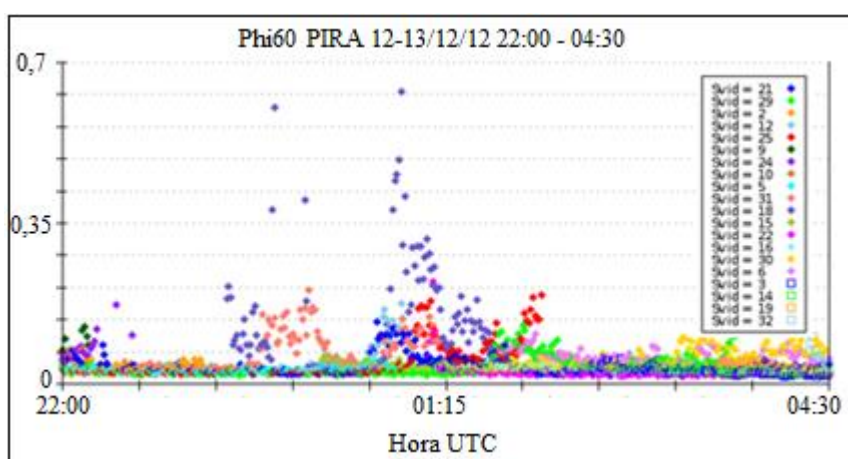


Figura 86 - Índice Phi60 para o experimento de caracterização do comportamento do Receptor C.

Nesse ambiente, o processamento RTK com o receptor parado apresentou os resultados mostrados na Figura 87. Esse resultado mostra que o Receptor C, assim como o Receptor A no experimento anterior, tem uma característica onde o erro nas coordenadas quando em condições adversas, se comporta como uma variável que deriva e leva uma provável solução equivocada da ambiguidade para as próximas épocas, diferentemente do Receptor B que se mantém estável.

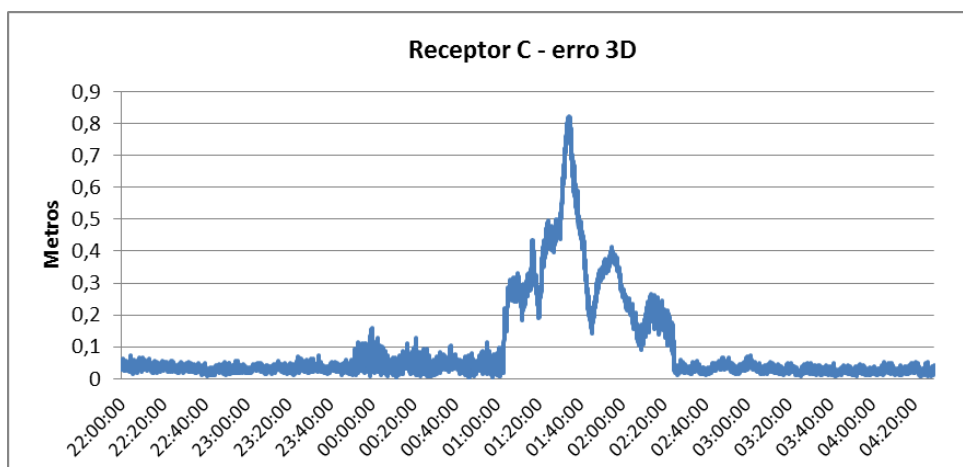


Figura 87 - Resultados do erro 3D do Receptor C parado no modo RTK.

Com base nessas características e naquelas descritas anteriormente, é plausível se afirmar que o comportamento no experimento cinemático, mostrado na Figura 84, seja dividido de modo que o Receptor A seja responsável pelos *outliers*, e o Receptor C pelo comportamento derivativo do erro, que se mantém por cerca de duas horas e chega a níveis de quase 1 metro em ambos os casos.

Com esse experimento, mostrou-se que os receptores da fabricante C também são susceptíveis a interferências advindas da ionosfera que possam comprometer uma operação que exija uma acurácia elevada no posicionamento. Mostrou-se que assim como o receptor A, o equipamento C também recorre ao erro estatístico do tipo II, apresentando ao usuário uma informação de posição fixa, quando na verdade as coordenadas derivam sistematicamente em uma direção até serem corrigidas, fato que ocorre apenas cerca de 90 minutos após o início da interferência.

Portanto, ressalta-se a importância da atenção do usuário e da realização de testes para que se conheça o comportamento desse tipo de equipamento na presença de interferências, tendo em vista que, uma vez em campo, as empresas usuárias desse tipo de tecnologia não dispõem de meios necessários para a verificação da situação da ionosfera, tampouco do clima espacial.

6.3 Experimento DGNSS/PPP no contexto do posicionamento *offshore*

Nas atividades de posicionamento *offshore*, a acurácia requerida é de qualidade inferior as das aplicações referentes à Agricultura de Precisão. No entanto, a confiabilidade e integridade dos dados é um fator ainda mais crítico que nas demais aplicações.

Na Figura 88 é mostrado um trecho do relatório de processamento de uma estação de controle de uma empresa fornecedora de correções PPP entre o início do dia 4 de Outubro de 2011, até o fim de 06 de Outubro do mesmo ano. Na parte de cima, é apresentado o erro planimétrico, e na de baixo o erro em altimetria. Em condições normais, como se pode observar nos trechos intermediários do gráfico, ambos os erros ficam na casa do decímetro ou menor. Já durante os períodos de maior ocorrência de cintilação, os erros ganham proporções inesperadas para o processo, chegando a quase 50 metros na planimetria, e mais de 100 metros na altimetria. Esses resultados mostram o quão sensível esse tipo de sistema é em relação a eventos de cintilação ionosférica.

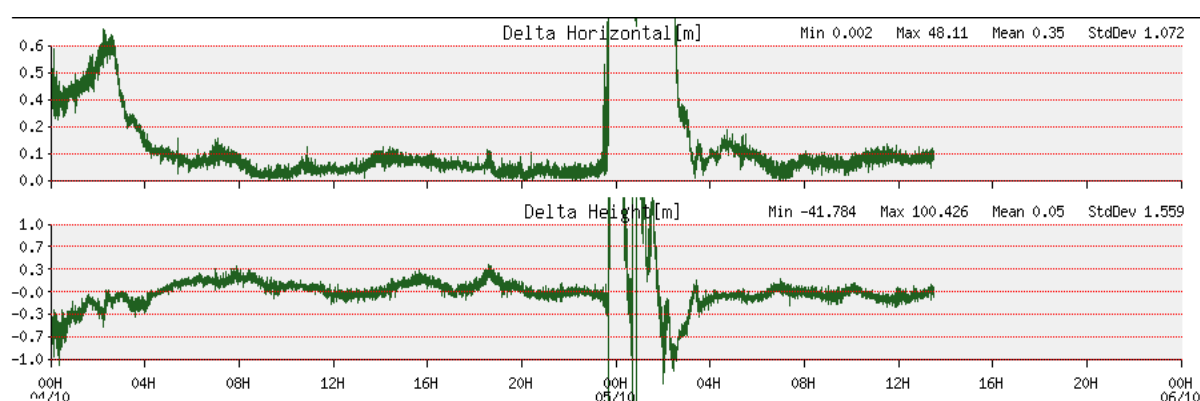


Figura 88 - Acurácia na posição de uma estação de referência PPP em Curitiba-PR durante 38 horas.

Também é possível observar que o erro fora dos padrões surge de maneira abrupta, sem qualquer sinal prévio no que diz respeito às coordenadas. Vê-se que os erros atingem níveis muito além dos esperados e que estes duram cerca de 3 horas, causando a queda do sistema de fornecimento de correções PPP, já que a confiabilidade é altamente prejudicada, forçando o operador a buscar alternativas a essas correções.

Por sua vez, outro relatório da mesma empresa mostra essa situação no mesmo intervalo de tempo. A Figura 89 representa o índice C/N0 de algumas estações da companhia.

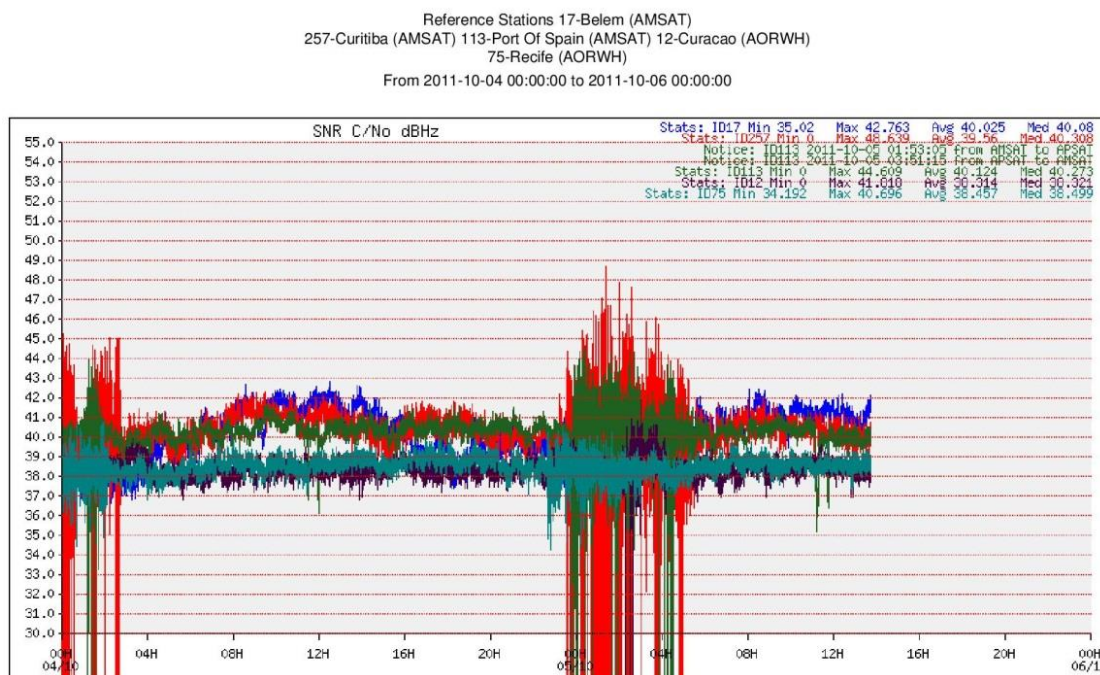


Figura 89 - Relatório mostrando a relação C/N0 para diversas estações de monitoramento das correções PPP em tempo real.

Nessa figura estão representadas as estações em Curitiba – PR (em vermelho), Belém – PA (em azul marinho), Recife – PE (em azul), Curaçao (em roxo) e Porto de Espanha - Trindade e Tobago (em verde). Como abordado anteriormente, um valor normal para a relação C/N0 é entre 37 e 45 dB-Hz. Para a estação de Curitiba – PR, esse valor chega a aproximadamente zero em alguns momentos, indicando que o ruído presente no sinal é muito maior que as informações úteis nele presentes, impossibilitando assim o cálculo de correções e, conseqüentemente, a obtenção de coordenadas de maneira acurada. Apesar da qualidade da imagem, é possível observar que a variação da relação C/N0 é consideravelmente grande, causando efeitos como os vistos na Figura 88.

Para justificar esses efeitos severos e de tamanha abrangência espacial, pode-se recorrer, além dos índices S4 e PHI60, aos índices globais de distúrbios da ionosfera.

Buscando então os dados referentes aos índices DST, Ax (AE, AU, AL e AO) e Kp, tem-se os resultados apresentados na Figura 90, Figura 91 e Figura 92.

Na Figura 90, o índice DST aponta nos primeiros 10 dias do mês de Outubro uma atividade de enfraquecimento do cinturão equatorial contínua, porém de baixa intensidade. Pode-se observar que os valores de DST estão na grande maioria do tempo abaixo da linha neutra, de 0 nT. Por consequência disso, a ionosfera terrestre torna-se instável, resultando em interferências nos sinais dos satélites GNSS. Observa-se também uma atividade

de tempestade geomagnética intensa entre os dias 24 e 25, porém, não há dados das correções PPP/DGPS para essa data.

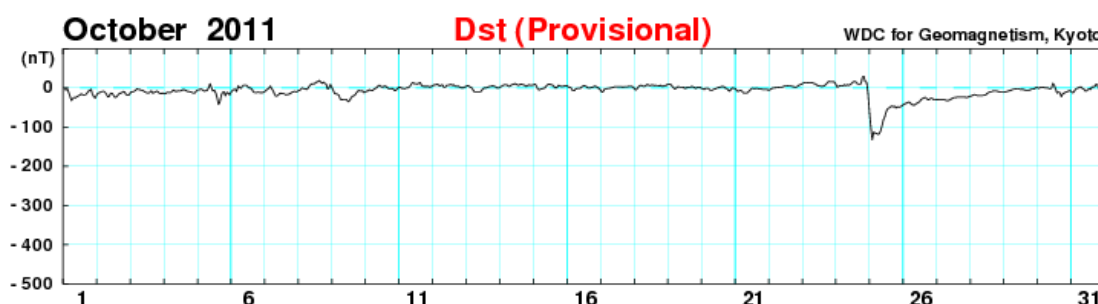


Figura 90 - Índice DST para o mês de Outubro de 2011 (Fonte: Kyoto WDC, 2011).

Já na Figura 91 e Figura 92, apresentam-se os índices AE, AU, AL e AO, descritos anteriormente. Pela amplitude de variação da intensidade do campo magnético (AE, ou AU-AL), percebe-se que em alguns períodos entre os dias 4 e 5, a camada eletricamente ativa da atmosfera terrestre sofreu variações na casa de até 1500 nT, corroborando com a possibilidade de instabilidade da ionosfera e por consequência, de interferência nos sinais vindas dessa fonte. Ainda, pelo índice Kp, sabe-se que a ordem dos dias com maiores distúrbios no mês de Outubro de 2011 foram, na ordem: 25, 1, 24, 5 e 2¹⁷.

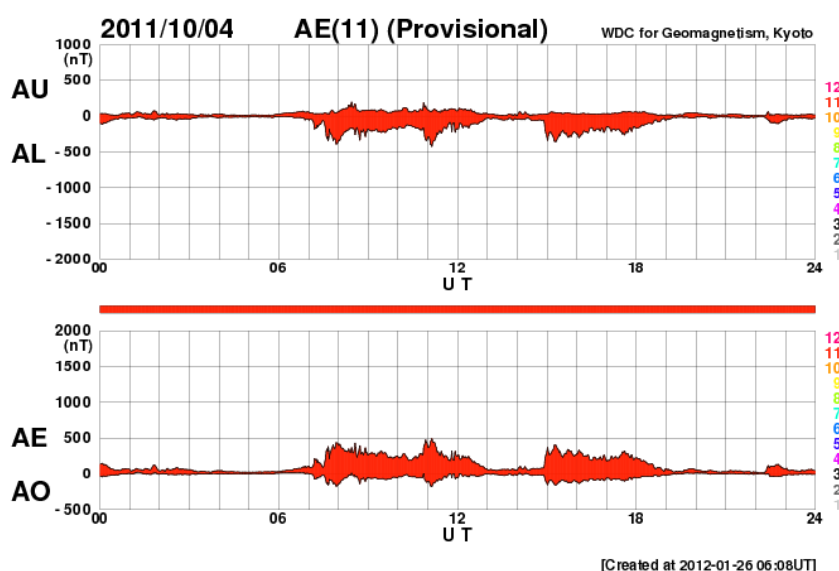


Figura 91 – Índices Ax para o dia 4 de Outubro de 2011 (Fonte: Kyoto WDC, 2011).

¹⁷ Estatística disponível em http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/quietdst/qd20101x.html

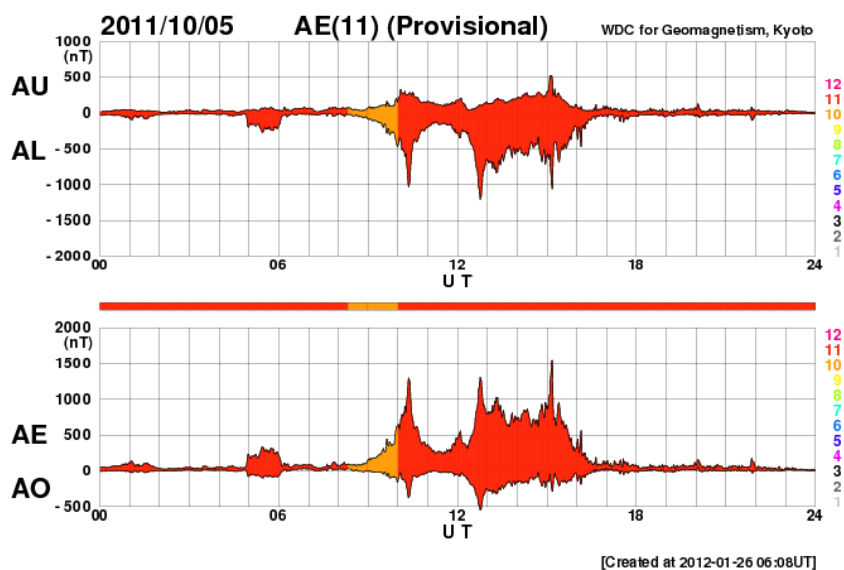


Figura 92 – Índices Ax para o dia 5 de Outubro de 2011 (Fonte: Kyoto WDC, 2011).

Analisando, por fim, os índices locais das estações CIGALA/CALIBRA, tem-se os índices S4, PHI60 e TEC para os dias 4 e 5 de Outubro de 2011 representados na Figura 93, Figura 94 e Figura 95.

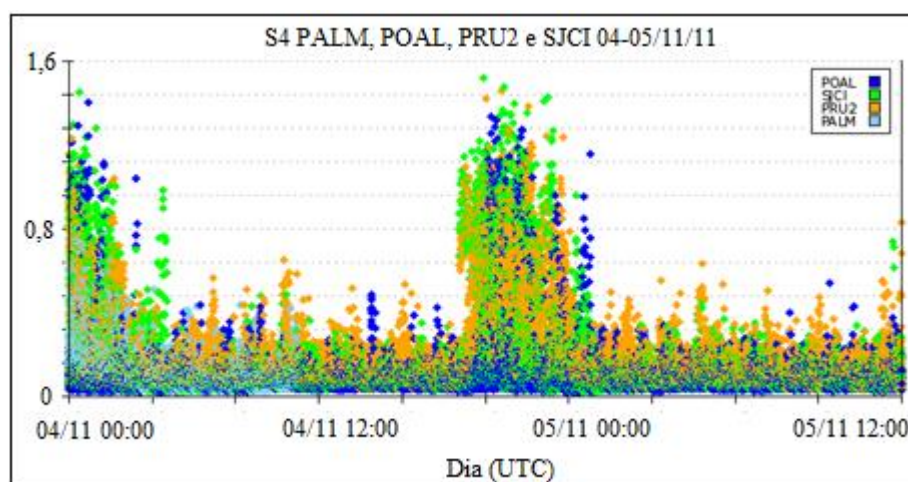


Figura 93 - Índice S4 para as estações POAL, SJCI, PRU2 e PALM nos dias 4 e 5 de Outubro de 2011.

Observa-se também, pela Figura 96, a região mais afetada pela cintilação ionosférica para os dois dias do experimento. A região destacada coincide com a denominada região Equatorial Média, apresentando efeitos distintos das demais latitudes, onde quase não há variação no índice S4 e, portanto, pouca interferência no rastreamento dos sinais GNSS.

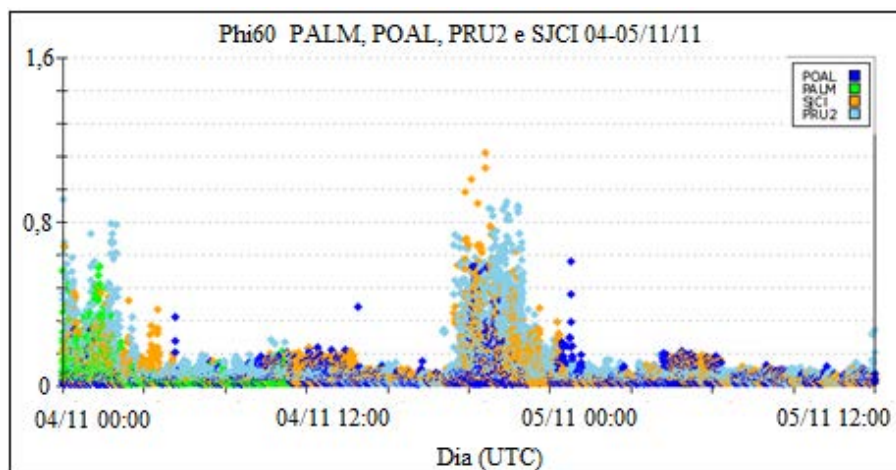


Figura 94 - Índice PHI60 para as estações POAL, SJCI, PRU2 e PALM nos dias 4 e 5/11/11.

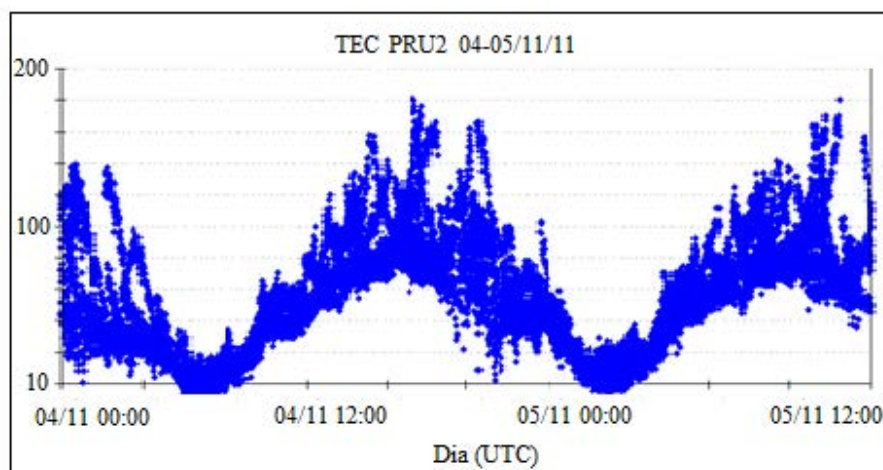


Figura 95 - TEC GPS na estação PRU2 para os dias 4 e 5/11/11.

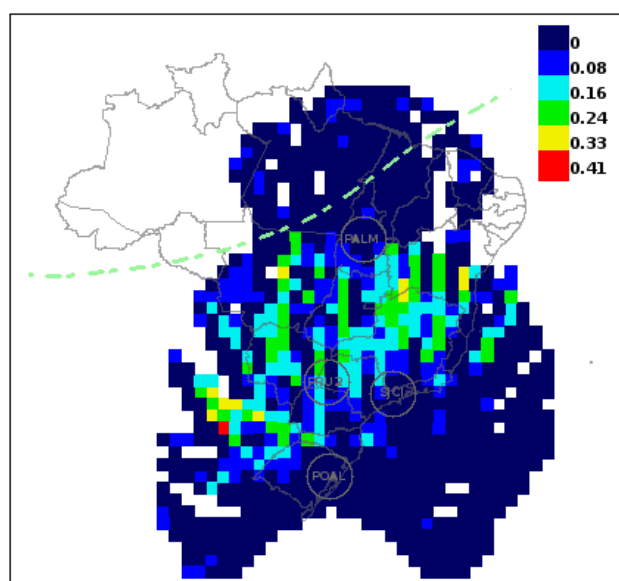


Figura 96 – Desvio-padrão em grid regular do índice S4 das estações PRU2, SJCI, PALM e POAL para o período do experimento.

Portanto, dado o panorama geral das condições ionosféricas para o período e com o intuito de mostrar os efeitos já comprovados nas correções comerciais utilizadas nas aplicações *offshore*, foi realizado um processamento DGNSS na região da cidade do Rio de Janeiro – RJ utilizando para isso dados da estação ONRJ da RBMC pelo software *POSTNAV*. Essa estação encontra-se à $-14,11^\circ$ de latitude magnética, tendo a curva de probabilidade de intensidade de cintilação descrita na Tabela 20 e representada na Figura 97.

Tabela 20 - Probabilidade relativa de dados acima de cada limiar de S4 para a estação ONRJ.

	P (S ₄ > x S ₄ > 0,3) (%)							
Estação	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
ONRJ	100	40,92	25,70	17,63	12,68	09,41	07,14	05,52

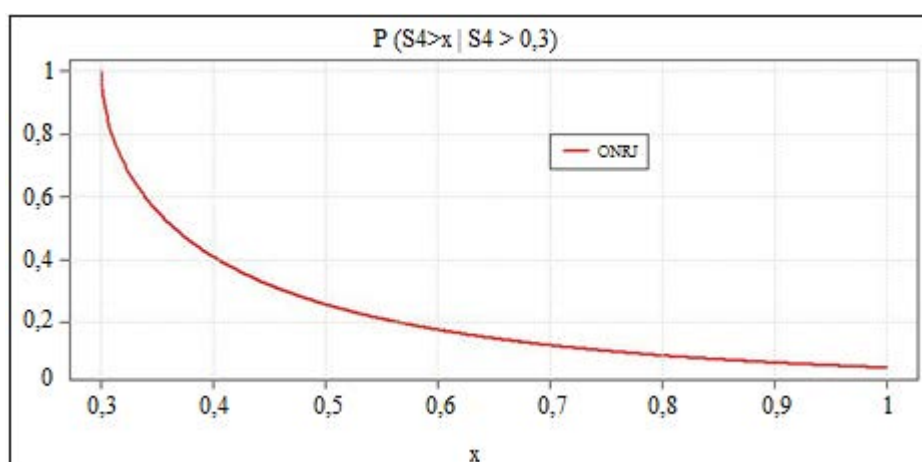


Figura 97 - Distribuição Weibull acumulada inversa da estação ONRJ.

Nota-se que os valores, assim como nos demais experimentos, são significantes e demandam atenção dos operadores que atuam nessa localidade.

Partindo do pressuposto de que o evento ocorreu, como mostrado anteriormente, pode-se analisar pela curva de probabilidade que a chance de um evento de magnitude severa atingir essa região é de cerca de 12%, validando a região como alvo de estudos e também enfatizando a localização como uma área onde atividades de posicionamento que demandam maior acurácia possam sofrer interrupções.

A Figura 98 mostra a localização da latitude magnética desse receptor em relação à área de estudos, comprovando o alto potencial de interferência advinda da ionosfera.

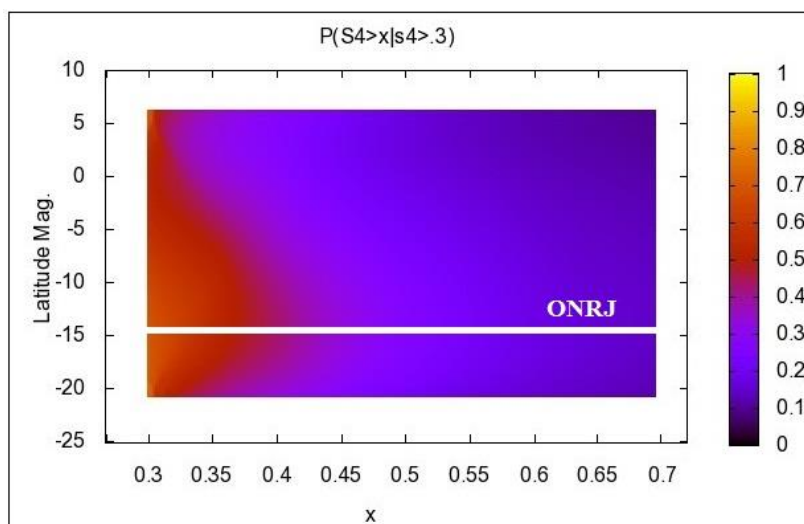


Figura 98 - Localização da curva de probabilidade condicionada da estação ONRJ em relação à área de estudos.

Durante o período aqui abordado, foram utilizadas as mesmas correções comerciais DGNSS para se calcular a posição de um receptor estático, porém, inserido no processamento como se estivesse no modo cinemático, simulando assim, uma atividade de perfuração de poços. Portanto, assumindo que a correção PPP não estava disponível no período, como mostra a Figura 88, foi realizado somente o processamento DGNSS, onde o resultado, como citado anteriormente, não deveria ultrapassar um erro de 2.5 metros, sob o risco de comprometer a operação de perfuração, causando prejuízos ou até acidentes.

Realizado o processamento dos dados, a Figura 99 representa a série temporal da resultante planimétrica das coordenadas no intervalo entre as 20h do dia 4 de e as 4:40h do dia 5 de Outubro.

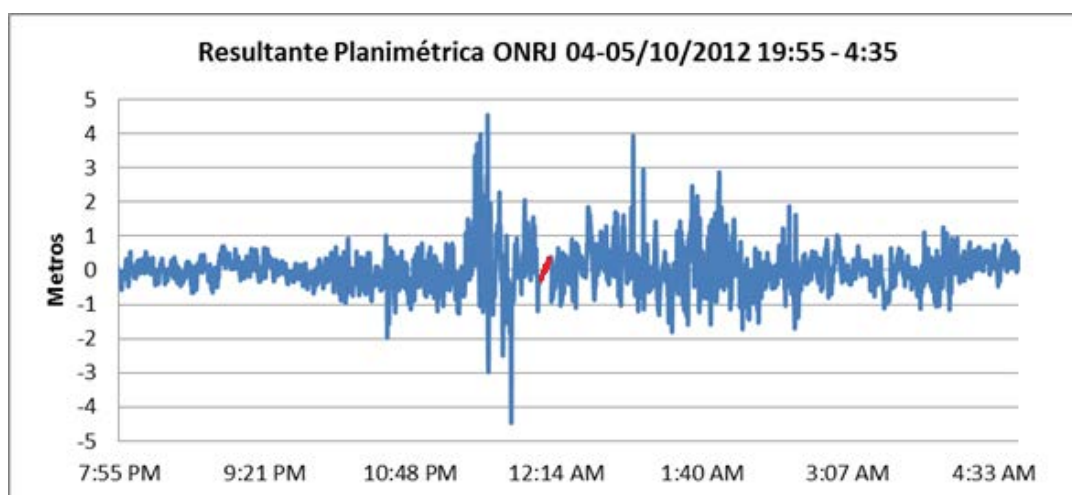


Figura 99 – Resultante planimétrica do processamento DGNSS dos dados.

Nota-se que na noite entre os dias 4 e 5, a variação na amplitude do erro planimétrico resultante das componentes chegou a aproximadamente 8 metros, e por um período de aproximadamente 20 minutos indicado em vermelho, não houve correção disponível, interrompendo completamente qualquer tipo de operação que dependa do PPP ou DGNSS em tempo real. Durante o período mais crítico, a resultante das coordenadas teve um desvio padrão de 90 centímetros e média de 17 centímetros de erro, enquanto que no período inicial do levantamento, o desvio padrão foi de 26 centímetros e a média de 5 centímetros. Numa aproximação, pode-se dizer que durante o período de cintilação, quando houve solução das coordenadas, o resultado apresentou-se de 3 a 4 vezes pior que o especificado pela fornecedora dos dados.

Portanto, com esse experimento, foi possível evidenciar a problemática da cintilação ionosférica nesse ramo do posicionamento por intermédio da análise dos relatórios de qualidade da empresa fornecedora de correções, bem como sua correlação com dados de distúrbios da atmosfera terrestre provenientes de diversas fontes. Fica evidente a necessidade de melhorias nos sistemas de cálculo de correções bem como nas técnicas de processamento e monitoramento para esse tipo de atividade na presença de cintilação.

Ressalta-se, por fim, a necessidade de conhecimento dos índices de cintilação ionosférica e também dos relacionados ao clima espacial de uma maneira geral nas áreas de aplicação do GNSS. Como analisado nesse experimento, eventos de maior abrangência podem tornar inviável uma mesma atividade em diversas localidades.

6.4 Experimentos de Posicionamento Geodésico nos PPP e Relativo

No primeiro conjunto de dados, foram escolhidos os dados dos dias 7 e 8 de Julho de 2012. Para esses dias, a Figura 100 e a Figura 101 mostram os índices S4 e Phi60 para as estações PALM, POAL e PRU2 da rede CIGALA/CALIBRA. As figuras não indicam qualquer sinal de interferências provenientes da ionosfera em qualquer uma das estações. Pela periodicidade observada, os poucos picos observados na Figura 100 são provenientes de multicaminho e obstruções próximas às estações PALM e PRU2, afetando poucas épocas e com intensidade menor que eventos de cintilação ionosférica, não sendo significativos no resultado final.

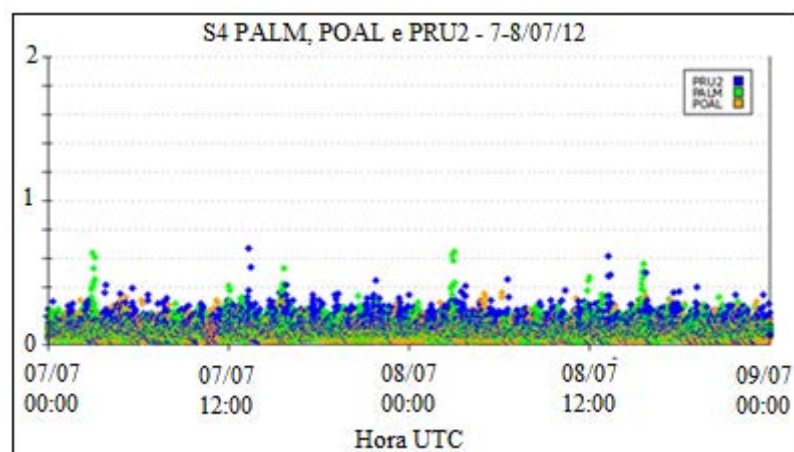


Figura 100 - Índice S4 para os dias 7 e 8 de Julho de 2012 das estações PALM, POAL e PRU2 da rede CIGALA/CALIBRA.

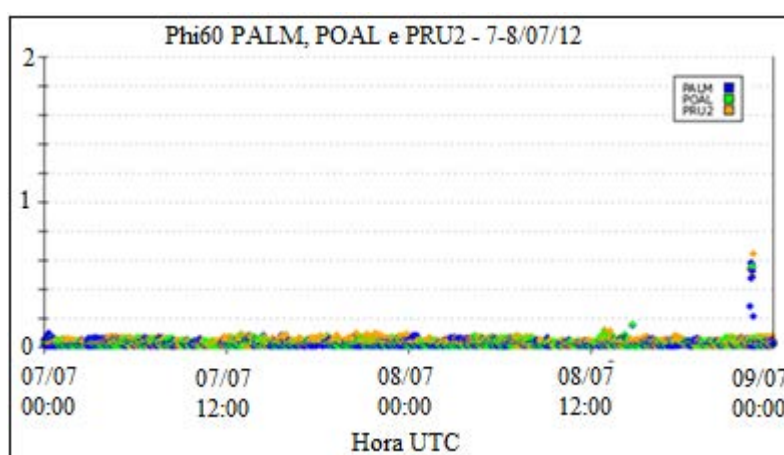


Figura 101 - Índice PHI60 para os dias 7 e 8 de Julho de 2012 das estações PALM, POAL e PRU2 da rede CIGALA/CALIBRA.

Já para o segundo conjunto de dados escolhidos, a Figura 102 e a Figura 103 mostram que nos dias 7 e 8 de Novembro de 2012, os mesmos índices apresentados anteriormente indicam uma forte interferência no sinal, tanto em fase quanto em amplitude, justamente nos horários propícios à cintilação, sendo assim, um forte indício da ocorrência de tal fenômeno.

A Figura 104 mostra o comportamento do índice S₄ para os dois períodos escolhidos no experimento. O mapa mostra o desvio padrão do índice em cada uma das células de uma grade regular projetado sobre a área do experimento, sendo representados à esquerda os dados do mês de Julho, e a direita, do mês de Novembro de 2012. É possível notar o efeito da Anomalia Equatorial na área equatorial média, afetando diretamente as estações de rastreo no entorno dessa região.

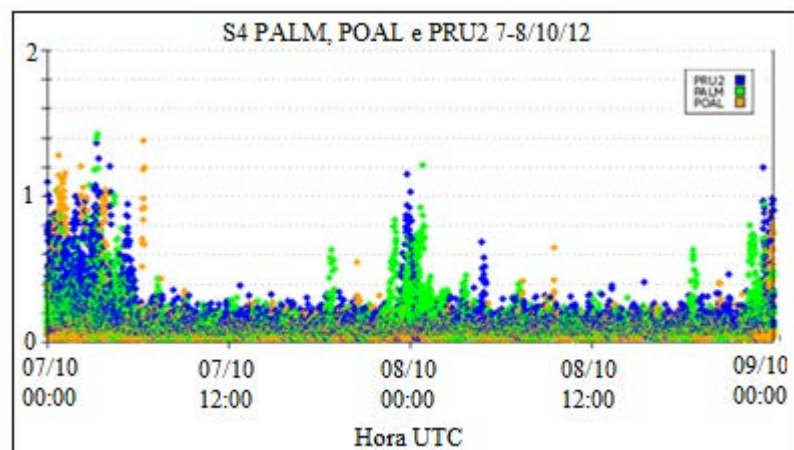


Figura 102 - Índice PHI60 para os dias 7 e 8 de Novembro de 2012 das estações PALM, POAL e PRU2 da rede CIGALA/CALIBRA.

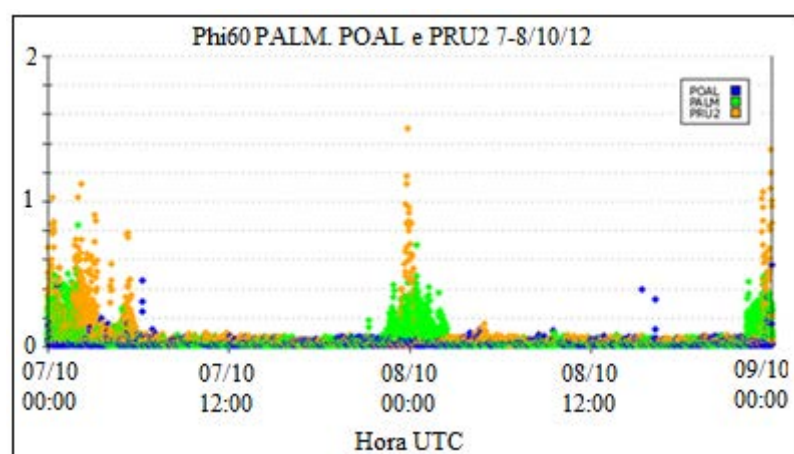


Figura 103 - Índice PHI60 para os dias 7 e 8 de Novembro de 2012 das estações PALM, POAL e PRU2 da rede CIGALA/CALIBRA.

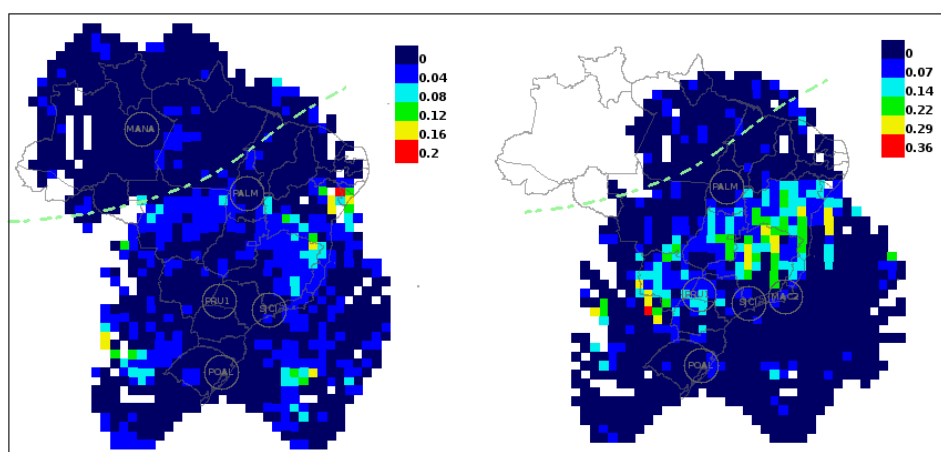


Figura 104 - Desvio padrão do índice S4 em grid regular para os dias 7 e 8 de Julho (esquerda) e 7 e 8 de Novembro (direita).

Tendo, portanto, dados representativos da ocorrência de cintilação, foram realizados dois experimentos no contexto do posicionamento no modo PPP e relativo. Os

experimentos obedeceram as características apresentadas na Tabela 21, escolhidas de forma a evidenciar o efeito atmosférico abordado.

Tabela 21 - Resumo das características dos experimentos PPP e Relativo.

	PPP	Relativo
Início	Com cintilação 07/11/2012 00h Sem cintilação 07/07/2012 00h	Com cintilação 07/11/2012 22h Sem cintilação 08/11/2012 06h
Fim	Com cintilação 08/11/2012 24h Sem cintilação 08/07/2012 24h	Com cintilação 08/11/2012 03h Sem cintilação 08/11/2012 11h
Dinâmica	Cinemático	Estático
Número de estações	13	13
Constelações	GPS e GLONASS	GPS
Ambiguidade	<i>Float</i>	<i>Float</i>

No posicionamento relativo, foram escolhidos dados temporalmente próximos, reduzindo assim efeitos sazonais que influenciem o cálculo da linha de base, tendo em vista que diferenças na ionosfera e troposfera sobre estações em uma mesma linha de base podem causar resíduos nas duplas diferenças e serem confundidos com distúrbios provenientes de eventos de cintilação ionosférica. Já no PPP, as observações não são diferenciadas, sendo menos susceptíveis à esse tipo de situação. Dessa forma, pôde-se escolher dados temporalmente mais distantes de forma a evidenciar o efeito em diferentes intensidades de interferência da ionosfera.

Os resultados dos processamentos e demais análises encontram-se nos tópicos seguintes.

6.5.3 Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

O PPP conta com um paradigma diferente dos processamentos relativos. Nesse caso, as coordenadas são calculadas de maneira absoluta, com o uso de apenas um receptor e correções advindas de uma rede de abrangência global.

Utilizando dados da mesma rede de monitoramento contínuo nos meses de Julho e Novembro de 2012, foi realizado um posicionamento por ponto preciso no modo cinemático, época por época e analisada a dispersão da estimativa de coordenadas de todo o período. Como esse método não depende, pelo menos diretamente, de outras estações, espera-se que o resultado mostre os efeitos da cintilação ionosférica na região Equatorial Média.

Diferentemente do experimento no modo relativo de processamento, nesse caso não há a necessidade de levar em consideração os efeitos que possam causar inserção de erros por conta de resíduos das diferenciações de observações, como no caso das duplas diferenças. Assim, espera-se que os erros se apresentem de maneira absoluta, evidenciando as localizações onde os efeitos da cintilação mais são notados.

Portanto, realizando o processamento dos dados no software *PPP-NRCan* com máscara de elevação de 10° , substituição retroativa (mitigando o efeito de dispersão causado pelo tempo de convergência do PPP), efemérides e erros de relógio finais advindos do IGS e combinação *ion-free*, eliminando assim quase todo o efeito de atraso da ionosfera, foram obtidos os resultados de dispersão das coordenadas 3D representados na Figura 105.

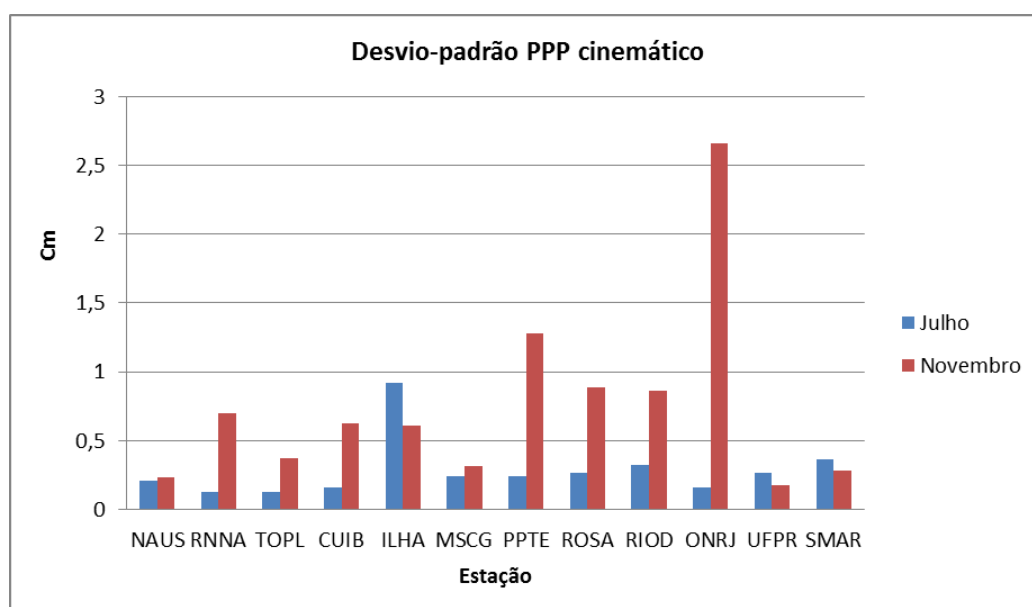


Figura 105 - Resultado do processamento PPP das estações utilizadas no experimento.

Nos dados referentes ao mês de Julho, o comportamento é uniforme, com exceção da estação ILHA, que apresentou alguma discrepância isolada. Já nos dados relativos ao mês de Novembro, observa-se uma maior dispersão nas estações PPTE, ROSA, RIOD e ONRJ em relação às demais, evidenciando, novamente, o mesmo efeito abordado nos experimentos com processamento relativo. Nessas estações, a precisão é de 3 a 12 vezes pior na ocasião onde houve cintilação.

Salienta-se que as estações estão dispostas no gráfico em ordem decrescente de latitude, estando os pontos mais afetados na região Equatorial Média.

Para efeito de comparação, observa-se a estação NAUS, onde os desvios em Julho e Novembro foram muito próximos, cerca de 0,25 cm. Já a estação PPTE, localizada

numa região de alta atividade ionosférica, teve o desvio-padrão em Julho equivalente a também 0,25 cm, porém em Novembro o valor de 1,25 cm. Apesar de parecerem valores baixos, o conjunto de dados contou com 48 horas de observação, com taxa de coleta de 30 segundos, totalizando assim quase 350 mil épocas. Para que um desvio padrão tenha um valor 5 vezes maior para um conjunto do mesmo tamanho, são necessários dados significativamente dispersos, mostrando que, em alguns momentos do processamento dos dados realmente houve algum tipo de interferência de magnitude expressiva.

6.4.1 Posicionamento Relativo

Utilizando os dados das estações apresentadas na Figura 52 foi realizado um processamento de dados no modo relativo em rede, com o ajustamento das observações feito pelo método do ajustamento paramétrico e pela injunção absoluta das estações SMAR e RNNA, localizadas nas extremidades da figura formada pela rede.

Por ser esta uma modalidade de posicionamento sensível à diferenças atmosféricas entre as estações de rastreo, e também pelo fato da área de abrangência ser considerável do ponto de vista da variabilidade dos distúrbios espacialmente correlacionados, utilizou-se nesse experimento dados da noite entre os dias 7 e 8 de Novembro de 2012 (ver Tabela 21), assumindo assim, que num mesmo dia a variabilidade dos efeitos de baixa frequência temporal da atmosfera sejam negligenciáveis. Dessa forma, foram separadas 10 horas de dados, sendo 5 delas com ocorrência de cintilação e 5 com baixa atividade ionosférica.

A Figura 106 mostra, à esquerda, o desvio padrão em cada célula do mapa para o índice S_4 entre as 22h, UTC, do dia 7 de Novembro até as 03h do dia seguinte. À direita, da mesma forma, são apresentados os dados entre às 06h do dia 8 até as 11h do mesmo dia. Pela figura, observa-se uma irregularidade concentrada na região centro oeste do país no momento mais propício à ocorrência de cintilação.

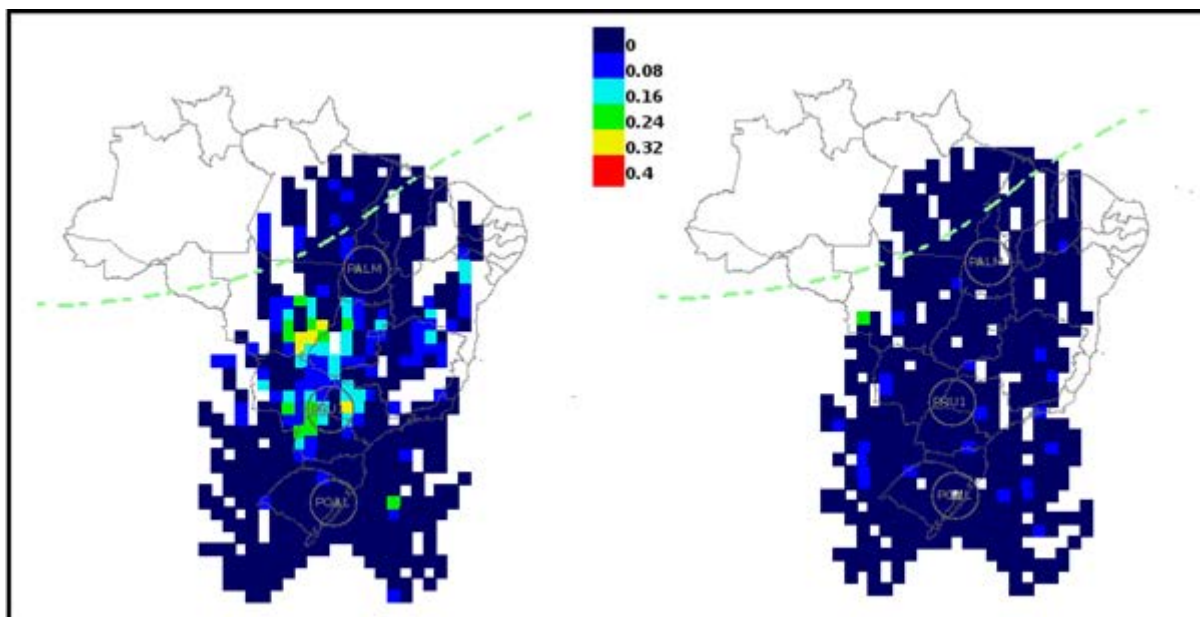


Figura 106 - Desvio padrão do índice S4 em grid regular para os dados do experimento relativo entre às 22h e 03 h (esquerda) e entre às 06h e 11h (direita).

Dessa forma, com as linhas de base independentes selecionadas na região de estudos, é possível que se utilize, como já citado, o método do ajustamento paramétrico com duas injunções absolutas. Em linhas gerais, esse método permite que se calcule a precisão da estimativa de coordenadas de uma rede partindo de dois pontos considerados conhecidos. Dessa forma, com a rede “amarrada” a um referencial, estima-se as coordenadas e a MVC das demais estações (GEMAEL, 1994).

No software TBC, linhas de base são abordadas como comprimento, azimute e diferença de altura entre os pontos. Opcionalmente, foram inseridas estimativas das coordenadas de cada estação, provenientes dos descritivos oficiais do IBGE. Dessa forma, é possível que seja feita uma análise de tendência, já que o relatório de processamento informa a diferença entre as coordenadas estimadas e as coordenadas inseridas. Em outras palavras, sabendo a coordenada real, é possível que se calcule o quanto a estimativa proporcionada pelo software está enviesada em relação ao valor verdadeiro. Por ser um posicionamento no modo estático e, como dito anteriormente, muito utilizado na estimativa de coordenadas em redes geodésicas espera-se que os parâmetros sejam o menos enviesados possível. Os resultados do viés (tendência) calculado no ajustamento são apresentados na Figura 107 e Figura 108.

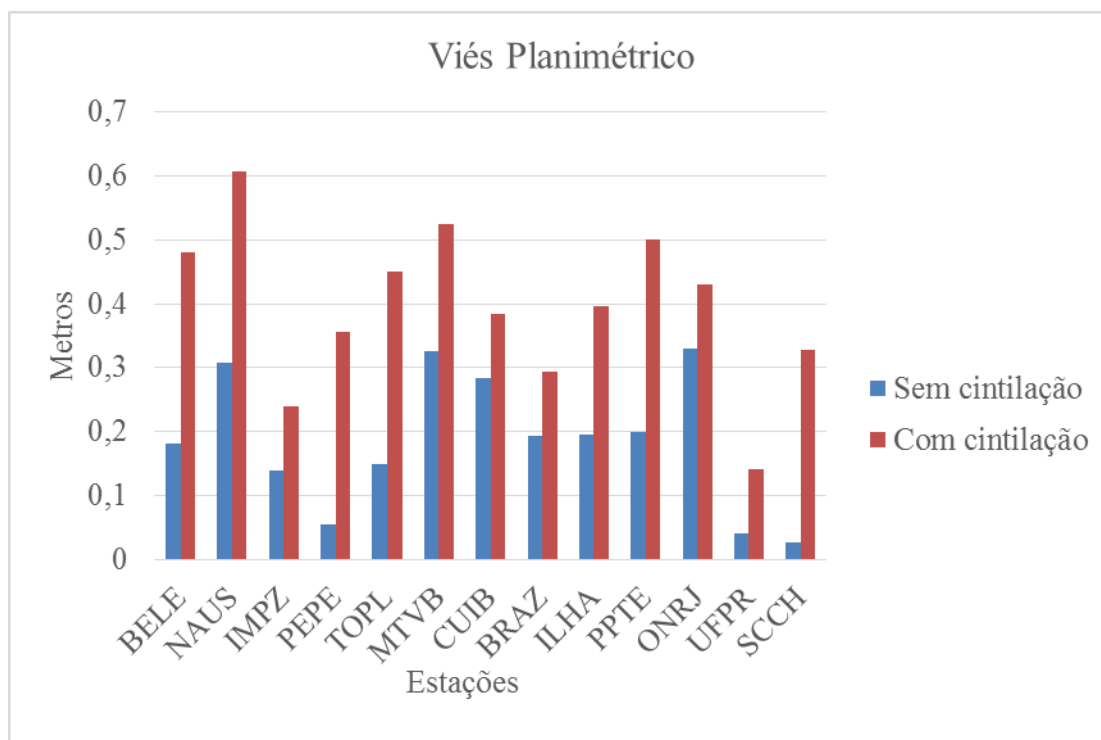


Figura 107 - Viés planimétrico das estações analisadas no experimento.

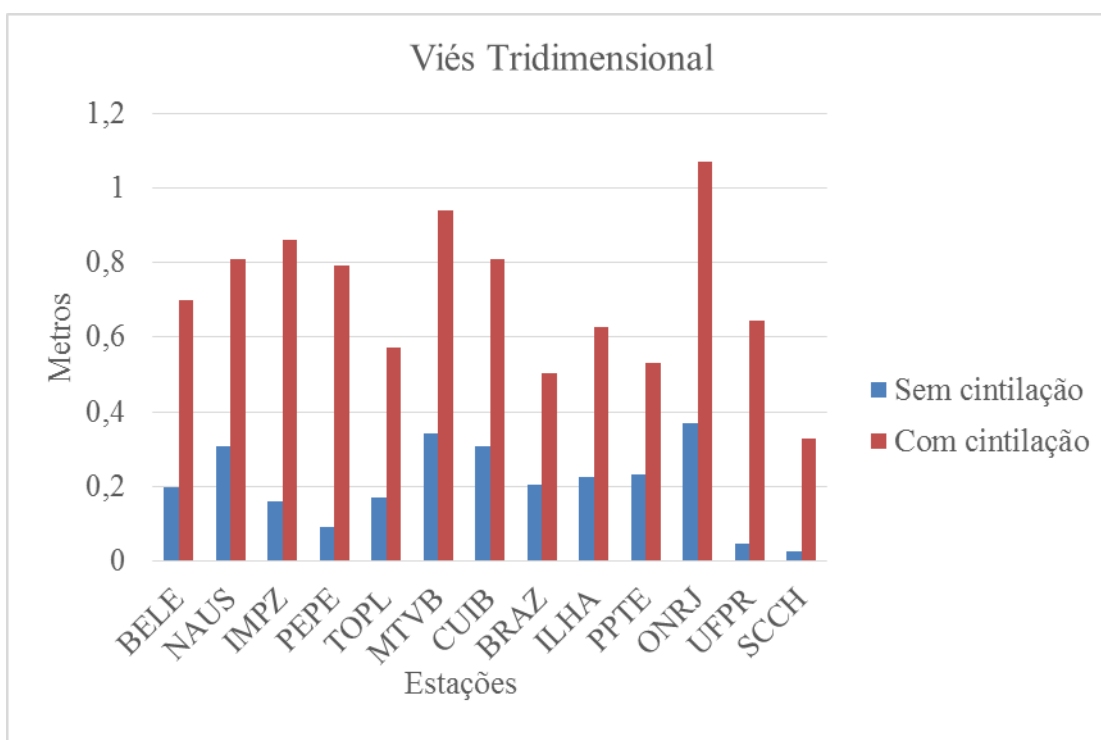


Figura 108 - Viés tridimensional das estações analisadas no experimento.

Observa-se que o erro cometido em ambas componentes é consideravelmente maior no período que abrange observações em momentos simultâneos à eventos de cintilação ionosférica. Enquanto no período sem distúrbios as coordenadas

encontram-se, na maioria dos casos, no entorno de 20 cm, justificável pela solução *float* e pelas longas linhas de base, em momentos de cintilação os valores se encontram entre 2 e 5 vezes piores alcançando uma média de 60 cm, sendo essa diferença mais significativa quando se insere a componente altimétrica nos cálculos.

No que diz respeito à precisão e dispersão dos dados, a Figura 109 e Figura 110 mostram o desvio-padrão da componente planimétrica e tridimensional estimada para cada uma das estações.

Outra característica é o visível comportamento instável do erro no período com cintilação. Dessa forma, mostra-se uma situação onde há a necessidade de atenção aos parâmetros da ionosfera ao se realizar uma atividade de estimativa de coordenadas, pois, mesmo em um resultado onde os relatórios do software não apontam nenhuma anomalia dessa dimensão, perde-se em qualidade de maneira considerável ao se escolher um conjunto de dados de um período não favorável.

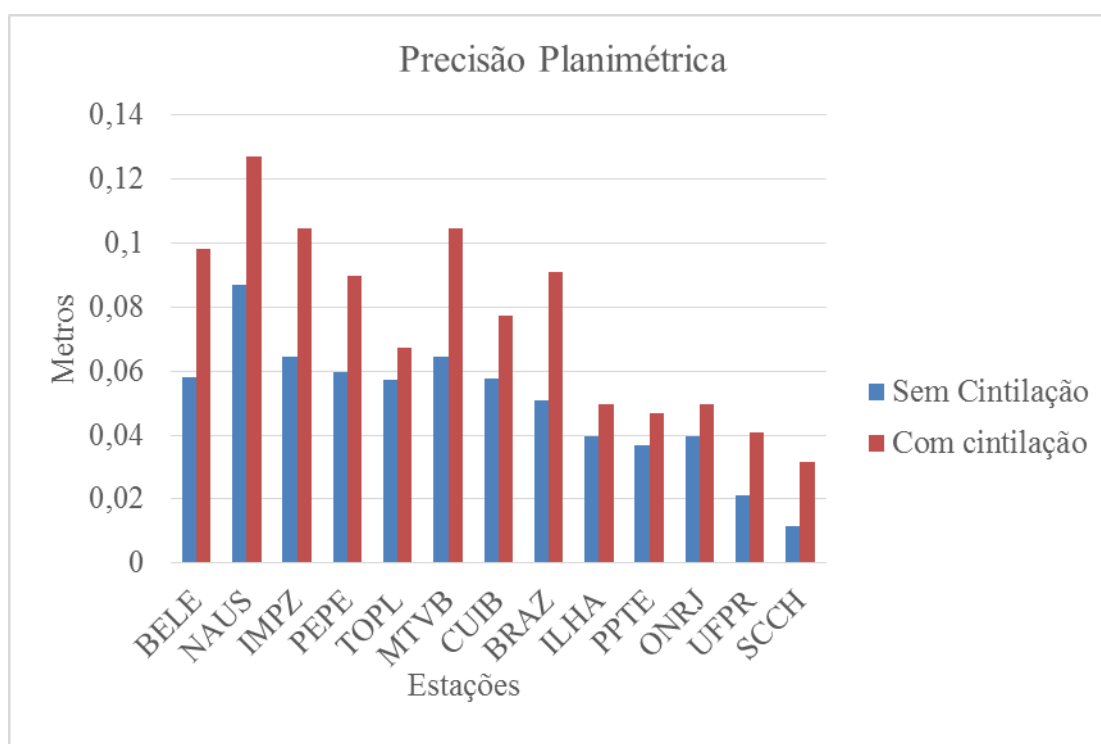


Figura 109 - Desvio-padrão planimétrico das estações analisadas no experimento.

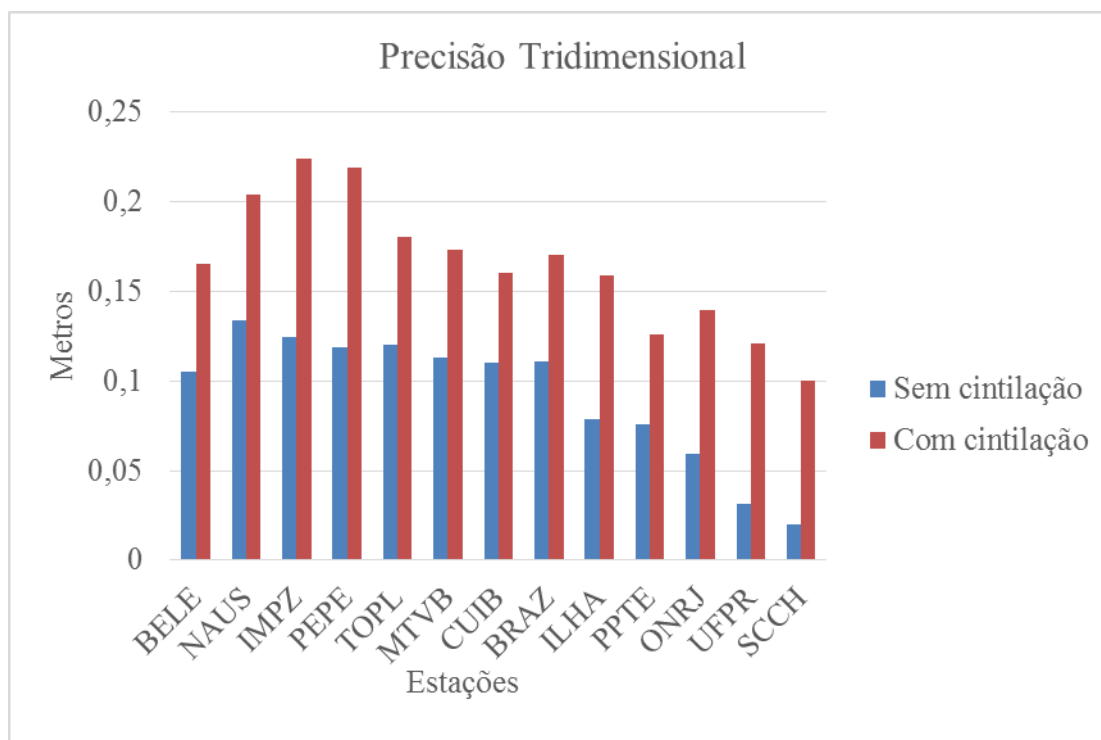


Figura 110 - Desvio-padrão tridimensional das estações analisadas no experimento.

Pelos resultados apresentados, faz-se evidente que no contexto do posicionamento geodésico a cintilação ionosférica é um efeito presente que acaba por comprometer a qualidade da estimativa de coordenadas. Foi possível observar que apesar da influência desse efeito se dar em diferentes maneiras dependendo da estratégia adotada para a obtenção de coordenadas, sempre há uma diferença significativa entre dados contaminados pelo efeito da cintilação e dados tomados em ambiente livre desse efeito. Ressalta-se também o fato do software comercial aceitar os resultados sem nenhum aviso ao usuário, abrindo espaço para uma queda na precisão na estimativa de coordenadas quando processadas por um usuário sem conhecimento das condições atmosféricas no período do levantamento. Assim como no experimento relacionado ao RTK na Agricultura de Precisão, os resultados apresentam-se com um erro real maior que a precisão informada, levando a crer numa solução errônea, ou falso-negativo, no cálculo da posição.

Por fim, esse resultado mostra de forma clara que há a necessidade de conhecimento por parte do operador de índices de distúrbios da ionosfera, e atenção na hora da realização de levantamentos para que não ocorram imprevistos a ponto de demandar uma nova seção de coleta de dados, causando no mínimo prejuízos e atrasos em projetos caso os erros sejam detectados a tempo.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os experimentos e o levantamento de informações realizado, foi possível atingir os objetivos previamente propostos para essa pesquisa. Foram realizados experimentos no contexto de três atividades de posicionamento que demandam alta disponibilidade e acurácia dos resultados: Agricultura de precisão, Posicionamento *offshore* e Posicionamento Geodésico, além de uma modelagem estatística dos dados do projeto CIGALA/CALIBRA. No que concerne ao levantamento de informações, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica, abrangendo desde os princípios do GNSS, passando pela propagação dos sinais pela ionosfera, bem como a origem de distúrbios magnéticos de origem solar e terrestre, sendo encerrada numa revisão sobre algumas ferramentas úteis na análise de séries temporais.

Vê-se pelos resultados da modelagem realizada e pelos experimentos conduzidos que a cintilação ionosférica é um problema a ser levado em consideração, mesmo quando se trata de receptores mais modernos e das atividades de posicionamento mais dedicadas e dispendiosas do ponto de vista financeiro.

Na modelagem dos dados pela distribuição de Weibull e pelo polinômio de Chebyshev, notou-se uma região em específico, diferente das demais na região Equatorial. Essa região, situada na crista da Anomalia Equatorial, denominada nesse trabalho de região Equatorial Média, apresenta eventos de cintilação ionosférica com valores de 2 a 3 vezes maiores que em localidades mais próximas do Equador, ou na região de Latitudes Médias. Essa região encontra-se, numa média histórica, entre aproximadamente 10° e 17° de latitude magnética, abrangendo assim os estados do Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Bahia, Espírito Santo, Sergipe e Alagoas bem como o sul do Mato Grosso do Sul, sul de Goiás e praticamente a metade oeste do Rio de Janeiro.

Como a região abordada nessa dissertação é a mais industrializada a América do Sul, atenta-se também para a coincidência de ser a mais ativa do ponto de vista da cintilação ionosférica, gerando assim material para estudo do comportamento dessa parcela da atmosfera, bem como situações inconvenientes para os usuários nos campos de Agricultura de Precisão, Posicionamento *offshore*, Georreferenciamento de imóveis rurais, entre tantos outros que dependem de acurácia e disponibilidade dos sistemas GNSS.

Nos experimentos relativos à Agricultura de Precisão, observou-se que os sistemas comerciais, largamente utilizados no mercado nacional sofrem intensas interferências quando operam em períodos onde há o efeito de cintilação presente no sinal recebido pela antena do receptor. Foi constatado que tais receptores, sob efeito de cintilação,

recaem sobre o erro estatístico do tipo II, onde uma posição equivocada, provavelmente por conta de uma falsa solução da ambiguidade, é adotada como verdadeira, gerando um “falso negativo” perigoso para a operação do equipamento e para o bom andamento de operações de adubação, plantio e colheita. Nota-se que os receptores A e C demoraram algumas dezenas de minutos para que o equívoco na convergência do resultado final fosse corrigido, resultando em erros com amplitude na casa de 40 cm para o equipamento A e 80 cm para C, respectivamente 8 e 16 vezes maiores que o especificado em condições normais de operação, algo que já não ocorre no receptor B. Nesse equipamento, seu firmware experimental mostrou-se um pouco mais eficiente ao combater os falsos negativos decorrentes da interferência do sinal. Nota-se que a média das coordenadas permanece sempre na posição real do receptor, sendo a influência da ionosfera nesse caso influente apenas na dispersão dessas coordenadas, que aumenta na presença de cintilação ionosférica, porém sem que o erro resultante derive sistematicamente para alguma direção. Nesse receptor, o comportamento adverso recorrente é o da presença de *outliers* com duração máxima de uma época, o que, a primeira vista, mostra-se uma característica menos danosa e mais provavelmente passível de solução no nível de software.

Com relação ao experimento PPP/DGNSS no contexto do posicionamento *offshore*, foi notória a clara fragilidade do sistema de cálculo de correções às coordenadas quando em presença de um efeito de distúrbio magnético. Nota-se que o evento na ionosfera teve uma abrangência continental, refletindo assim em declínio na confiabilidade e disponibilidade das estações de monitoramento que são utilizadas em tempo real para o cálculo das correções. Num primeiro momento, as correções PPP ficaram comprometidas e “desligadas” pelo fato de resultarem em cálculos de coordenadas com dezenas de metros de variação. Esse desligamento durou aproximadamente 5 horas, obrigando operadores a substituir o método de posicionamento para o DGNSS. Nesse caso, foram processados dados de uma estação da RBMC no entorno da área onde há mais usuários dessas correções no Brasil. Os resultados mostraram que, assim como no PPP, as coordenadas resultantes apresentaram uma dispersão maior que o permitido para esse tipo de operação, excedendo em quase 4 vezes o erro máximo adotado para a aplicação de perfuração de poços. No caso desse experimento, como mostrado na revisão bibliográfica, eventos de origem solar como o que desencadeou interferências de tamanha proporção são satisfatoriamente preditos por intermédio da análise de imagens e parâmetros advindos de missões espaciais, bem como da medição de parâmetros como o K_p , AE e D_{ST} . Com uma fonte confiável de informações e um

operador atento a esses parâmetros, a operação poderia ser reagendada ou interrompida antes que tais erros interferissem já durante a atividade de posicionamento.

Já no experimento referente ao contexto do posicionamento geodésico, foi também evidenciada a interferência da cintilação ionosférica. No que diz respeito ao processamento de dados no modo PPP, observou-se o efeito esperado pela interferência atmosférica. No processamento dos dados no modo cinemático com dois dias de duração, o desvio padrão das coordenadas cujo valor ideal tenderia a 0, apresentou picos próximos de 1 cm e até valores fora da curva com cerca de 2,5 cm no caso da estação ONRJ, no Rio de Janeiro. Esse resultado mostrou que esse método de posicionamento é também sensível aos efeitos da cintilação ionosfera, devendo o operador ficar atento ao realizar um levantamento, sob o risco de haver a necessidade de se refazer o trabalho por conta de uma dispersão das coordenadas acima do esperado. No experimento de posicionamento relativo em rede, observou-se que a influência da ionosfera na região de Equatorial Média foi decisiva para os erros encontrados nesse experimento. Foi possível notar que as estações que se encontram sob a crista da Anomalia Equatorial têm uma dispersão consideravelmente maior nos valores de suas coordenadas e na acurácia das linhas de base calculadas. Nesse experimento em específico, notou-se um erro de mais de um metro na estimativa das coordenadas, e dispersão das medidas sempre acima que os correspondentes no período sem cintilação sendo, nesse caso, evidenciada uma situação onde o administrador de uma rede de estações GNSS pode obter valores menos acurados na solução geral das coordenadas, caso escolha um período de dados menos favorável a esse processamento. Desse modo, valores de coordenadas com um desvio-padrão maior que o ideal podem ser propagados a outras estações que as utilizem como base.

Portanto, por intermédio dos resultados obtidos, ressalta-se a importância do monitoramento da ionosfera e de parâmetros referentes ao clima espacial para que sejam, na medida do possível, evitados imprevistos durante operações de campo e nos processamentos dos dados, gerando prejuízos pelo fato dos usuários não saberem, por exemplo, se a causa de uma falha na linha de plantio ou na perfuração de um poço se deve ao maquinário não calibrado ou ao sistema de posicionamento, tendo em vista que falsos negativos são frequentemente encontrados.

Recomenda-se, com a continuidade do projeto CIGALA, via o projeto CALIBRA, que a análise estatística seja realizada futuramente com um maior número de estações de rastreamento e maior cobertura temporal, havendo assim a possibilidade de uma amostragem ainda mais abrangente do território brasileiro. No que diz respeito à metodologia

de filtragem de dados com multicaminho, há a possibilidade do uso de *wavelets* variando não somente os ângulos de elevação, como realizado nesse trabalho, mas também o azimute. Dessa forma, seriam retirados do processamento apenas os dados das regiões específicas que causam a interferência, e não mais todo o entorno até determinado grau de elevação. Além dessa técnica, é também provável que outros índices como a variação da diferença entre o código e a fase também possam diferenciar índices S_4 altos provenientes de cintilação ou de obstrução/multicaminho.

Recomenda-se também a realização de mais experimentos nas áreas sob forte influência da ionosfera conforme forem sendo conquistados avanços nas técnicas de rastreamento de sinais na presença de cintilação ionosférica. Nesse contexto, é de interesse científico e comercial que se estabeleça uma metodologia fixa e satisfatória para o teste de receptores em campo, tendo em vista que simuladores de sinais GNSS, equipamentos ideais para os testes, são extremamente caros, não sendo encontrados facilmente no Brasil. Com uma metodologia bem definida, receptores de diferentes modelos poderiam ser postos à prova de maneira a avaliá-los, dando um retorno para a sociedade dos trabalhos de pesquisa realizados nesse contexto. Para isso, há a possibilidade de adotar como ponto de partida a metodologia adotada no experimento descrito na seção 5.2.2, que, apesar de contar com alguns problemas, pode ser melhorada sem muito despendimento.

Por fim, ressalta-se a importância dos usuários de sistemas GNSS conhecerem os efeitos da cintilação ionosférica e do clima espacial nos sinais de rastreamento, evitando assim maiores problemas durante operações de navegação e posicionamento. Como descrito nos capítulos 3 e 4, atualmente existem diversos centros e projetos de pesquisa que visam o estudo e monitoramento das condições atmosféricas no Brasil, bastando haver interesse do usuário em fazer uso de tais informações. Em suma, assim como no princípio do funcionamento do sistema GPS, quando era necessária a previsão de quando haveria condições favoráveis para o rastreamento de satélites devido ao baixo número destes, também hoje em dia, faz-se necessária a atividade de planejamento das atividades, tendo em vista que nem sempre a precisão desejada é a precisão adquirida, por conta de efeitos completamente alheios ao usuário. Portanto, neste aspecto, o conhecimento dos efeitos da ionosfera e a cintilação nos sinais GNSS são fundamentais.

REFERÊNCIAS

- AARONS, J., MACKENZIE E., BHAVNANI K., High-latitude analytical formulas for scintillation levels, **Radio Sci.**, 15, 115-127, 1980.
- AARONS, J, Construction of a model of equatorial scintillation intensity, **Radio Sci.**, 20, 397-402, 1985.
- 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.
- ALEXANDER, D., RICHARDSON, I. G., ZURBUCHEN, T. H., A brief history of CME science. Holanda, **Space Science Rev.**, 2006.
- ALFONSI, L., SPOGLI, L., FRANCESCHI G. DE, ROMANO, V., AQUINO, M., DODSON, A., MITCHELL, C. N., Bipolar climatology of GPS ionospheric scintillation at solar minimum, **Radio Sci.**, 46, RS0D05, doi:10.1029/2010RS004571, 2011.
- AMENDOLA, G.V., **Análise do comportamento da ionosfera a partir de medidas em VHF**, 2003, 105 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro
- ANDERSON, D. N., REINISCH, B., VALLADARES, C., CHAU, J, VELIZ, O., Forecasting the occurrence of ionospheric scintillation activity in the equatorial ionosphere on a day-to-day basis, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 66(17), 1567–1572, doi:10.1016/j.jastp.2004.07.010, 2004.
- AQUINO, M., ANDREOTTI, M.; DODSON, A.; STRANGWAYS, H., On the Use of Ionospheric Scintillation Indices as Input to Receiver Tracking Models. **Journal Advances in Space Research**, 40(3), 426-435, 2007.
- AXFORD, W.I., HINES, C.O. A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms. **Can. J. Phys.** 39, 1433., 1961.
- BHATTACHARYYA, A., YEH K.C., S.J. FRANKE, Deducing turbulence parameters from transionospheric scintillation measurements, **Space Sci. Rev.** 61, 335-386, 1992.
- BASU, S.U., KHAN, B.K., Model of equatorial scintillation from in-situ measurements, **Radio Sci.**, 11, 821-832, 1976.
- BASU S., WEBER E.J., BULLETT T.W., KASKINEN M.J., MACKENZIE E., DOHERTY P., SHEEHAN R., KUENZLER H., NING P., BONGIOLATTI J., Characteristics of plasma structuring in the cusp/cleft region at Svalbard; **Radio Sci.** **33(6)**1885–1899, 1998.
- BASU S.U., WEBER E.J., COLEY W.R., Case study of polar capscintillation modeling using DE 2 irregularity measurements at 800 km, **Radio Sci.**, 23,545-553, 1988.
- BÉNIGUEL, Y., BUONOMO S., A multiple phase screen propagation model to estimate fluctuations of transmitted signals, **Phys. Chem. Earth (C)**, 24, 333-338, 1999.
- BARTELS J. ;HECK N. H.; JOHNSTON F., The three-hour-range index measuring geomagnetic activity, **J. Geophys. Res.**, 44, 411-, 1939.
- BEIDOU** – Site do governo Chinês que apresenta as informações oficiais sobre o sistema de posicionamento BeiDou. Disponível em: <<http://www.beidou.gov.cn/>>, Acesso em Jul. 2012.

BOX, G. E. P., JENKINS, G. M., REINSEL, G. C., **Time Series Analysis, Forecasting and Control**, 3ª ed. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1994.

BRIGGS B. H., PARKIN, I. A., On the variation of radio star and satellite scintillations with zenith angle, **J. Atmospheric Terr. Phys.**, 85, 339-366, 1963.

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

CAMARGO, P.O.; MATSUOKA, M.T.; **Mapas da Ionosfera para a região do Brasil**. In: SIRGAS – Workshop GT1, 2006, Disponível em: <http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol10/06_deOliveira_Iono.pdf> Acesso em 15 Abr. 2012

CHYTIL, B., The basic characteristics of the scintillation of radio waves after passing through the ionosphere. Praga, **Studia Geoph. Et Geod.**, 11, 1967.

CIGALA - CONCEPT FOR IONOSPHERIC SCITILLATION MITIGATION FOR PROFESSIONAL GNSS IN LATIN AMERICA, 2012. Disponível em: <http://cigala.galileoic.org/> Acesso em 01 Abr. 2012

CLEVELAND, W. P., TIAO, G.C., Decomposition of Seasonal Time Series: A Model for the Census X-11 Program, **Journal of the American Statistical Association**, Vol. 71, Iss. 355, 1976

CONKER, R.S., EL-ARINI M.B., HEGARTY C.J., HSIAO T. Modelling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System Availability, **Radio Sci.**, 38 (1), 1001, doi:10.1029/2000RS002604, 2002.

CONOVER, W.J. **Practical Nonparametric Statistics**. 3rd Ed. Texas, USA, 1999. ISBN 0-471-16068-7

CHRISTOPOULOU, E. B., SKONDRAS, A. N., GEORGAKILAS, A. A. Time series analysis of sunspot oscillations using the wavelet transform. **IEEE**, 2002. 4p., 2001.

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

DAVIS, T. N.; SUGIURA M., Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations, **J. Geophys. Res.**, 71, 785-, 1966.

DE FRANCESCHI, G., ALFONSI, L., ROMANO, V., ISACCO: an Italian project to monitor the high latitudes ionosphere by means of GPS receivers. **GPS Solut.** 10:263–267 DOI 10.1007/s10291-006-0036-6, 2006

De PAULA, E. R. , IYER, K. N., HYSELL, D. L., RODRIGUES, F. S., KHERANI, A. , JARDIM, A. C., REZENDE, L. F. C., DUTRA, S. G., TRIVEDI, N. B., Multi-technique investigations of storm-time ionospheric irregularities over the São Luís equatorial station in Brazil. **Annales Geophysicae**, França, v. 22, p. 3513-3522, 2004.

DI GIOVANNI, G., RADICELLA, S. M., An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. **Advances in Space Research**. 10(11), p. 27-30, 1990.

ELY, C. V., **Estudo da ionosfera da região brasileira com dados dos satélites Formosat-3/Cosmic e de digisondas**. 2010. 150p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

ESA – European Space Agency – Site mantido pela União europeia e pela Agencia Espacial Europeia que apresenta as informações oficiais sobre o sistema de posicionamento Galileo. Disponível em: <<http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>> Acesso em Jul. 2012

FREMOUW, E. J., AND C. L. RINO, An empirical model for average F – layer scintillation at VHF/UGF, **Radio Sci.**, 8, 213-222, 1973.

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

FSA/IANC – FEDERAL SPACE AGENCY/INFORMATION AND ANALYTICAL CENTER – Site do governo Russo que apresenta as informações oficiais sobre o sistema GLONASS. Disponível em: <<http://www.glonass-ianc.rsa.ru/en/GLONASS/>>, Acesso em Jul. 2012

GEMAEL, C., **Introdução ao ajustamento de observações**: aplicações geodésicas. Curitiba, Ed. UFPR, 1994.

GPS – GLOBAL POSITIONING SYSTEM – Site do governo Americano que apresenta as notícias e informações oficiais sobre o desenvolvimento do sistema GPS. Disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/>>, Acesso em Jul. 2012.

GPS-SPS – GPS Standard Positioning Service. – Padrões do sistema GPS. Disponível em: <<http://www.gps.gov/technical/ps/>> Acesso em Jun. 2008.

GROVES, K., **Monitoring Ionospheric scintillation with GPS**, In: Colloquium On Atmospheric Remote Sensing Using The Global Positioning, Boulder – CO, 2004.

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

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, June 2009 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652009000200010>. Acessado em 09 Ago. 2012.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS theory and practice**. 5 Ed. New York: Springer Wien, 2001.

INGV - ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA – Instituição italiana que concentra estudos em Geofísica e Vulcanologia. Disponível em: <<http://portale.ingv.it/temi-ricerca/sole-terra/la-meteorologia-spaziale/>> Acesso em Fev. 2010

IAE - INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO – Instituto do governo brasileiro que realiza estudos, também, na área de Aeronomia Disponível em: <<https://sites.google.com/site/anomaliamagneticabrasileira/campus-de-paula-freitas/>> Acesso em Ago. 2012

INPE/DAE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS / DIVISÃO DE AERONOMIA – Instituto do governo brasileiro que realiza pesquisas na área espacial e de Aeronomia. Disponível em: <<http://www.dae.inpe.br>>, Acesso em Dez. 2012.

IPPOLITO, L.J., **Satellite Communications Systems Engineering**: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance, John Wiley & Sons, 2008.

IPS – RADIO AND SPACE SERVICES – Agência governamental australiana que realiza pesquisas na área de propagação de sinais e Clima espacial. Disponível em: <<http://www.ips.gov.au>>, acesso em Abr., 2013.

ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION - **Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems**, Manual de Recomendações, 2012.

IYER, K. N., SOUZA J.R., PATHAN B.M., ABDU M.A., JIVANI M.N., JOSHI H.P., A model of equatorial and low latitude VHF scintillation in India, **Indian J. Radio & Space Phys.**, 35, 98-104, 2006.

JAKULSKI, T.; AVEIRO, H.C.; MOOR, L.P.; DENARDINI, C.M.; MURALIKRISHNA, P.; SCHUCH, N.J. **Estudo do plasma ionosférico da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) utilizando Riômetros**. In: XXI Congresso de iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia: Anais. 2006

JOSEPH, A., **Measuring GNSS signal strength**, In: INSIDE GNSS. Disponível em: < www.insidegnss.com/node/2396> Acesso em Dez. 2010.

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.

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

KLOBUCHAR, J.A., **Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users**, *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Sys.*, AES-23, 325-331, 1987.

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

KYOTO WDC – World Datacenter for Geomagnetism - Página da Universidade de Kyoto, Japão. Disponível em: < <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>>. Acesso em Dez. 2012.

LAWLESS, J.E., **Statistical Models and Methods for Lifetime Data**, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1982.

LEWIS, J. S. **Physics and Chemistry of the Solar System**, 2ª Ed. Burmington, MA, Elsevier Academic Press, Inc., 2004.

LI G., NING B., REN Z., HU L., Statistics of GPS ionospheric scintillation and irregularities over polar regions at solar minimum; **GPS Solut.**, doi: 10.1007/s10291-009-0156-x, 2010.

MANNUCCI, A.J., WILSON, B.D., EDWARDS, C. D., A new method for monitoring the Earth ionosphere total electron content using the GPS global network, **Proceedings of ION GPS-93**, pp.1323-1332, 1993.

MARQUES, H.A.; MONICO, J.F.G.; AQUINO, M. ,RINEX HO: second-and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files, **GPS solut.**,15,3,305-314,2011.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira, **Revista Brasileira de Cartografia**,1,56,2009

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Análise da ionosfera usando dados de receptores GPS durante um período de alta atividade solar e comparação com dados de Digissondas. **Rev. Bras. Geof.** [online]. vol.27, n.4, pp. 565-582. ISSN 0102-261X, 2009.

- MATSUOKA, M. T.; **Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS**, 2003, 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, Presidente Prudente
- McNAMARA L.F. **The ionosphere: communications, surveillance and direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 1991
- MEYER, P.L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**, 2 Ed., Rio de Janeiro: LTC, 1983.
- MOLDWIN, M. **An Introduction to Space Weather**, 3 Ed., New York: Cambridge Press, 2008.
- MOLIN, J. P. **Conceito de Agricultura de Precisão**. In: 1ª CONVENÇÃO DA REDE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2010, Piracicaba. Anais, 2010
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Unesp, 2008. 476p.
- MONTGOMERY, D. C., JENNINGS, C. L., KULAHCI, M., **Introduction to Time Series Analysis and Forecasting**: Edition 1. John Wiley & Sons, 2011.
- MOOD, A.M.; GRAYBILL, F.A.; BOES, D.C. **Introduction to the Theory of Statistics**. London: McGraw-Hill, 1974.
- MORAES, A. O., PAULA, E. R., PERRELLA, W. J., RODRIGUES, F. S., On the distribution of GPS signal amplitudes during low-latitude ionospheric scintillation. **GPS Solut.**, 2012.
- MORETTIN, P.A. **Ondas e ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 272 p., 1999.
- MUSHINI, S. C., JAYACHANDRAN, P. T., LANGLEY, R. B., MACDOUGALL, J. W., POKHOTILOV, D., Improved amplitude- and phase-scintillation indices derived from wavelet detrended high-latitude GPS data, **GPS Solut.**, 16:363–373, 2012.
- NASA/GSFC – GODDARD SPACE FLIGHT CENTER / NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION** – Site da agência espacial americana - Disponível em: <<http://gsfc.nasa.gov/>> Acesso em Dez. 2012
- NASA/SoHO – SOLAR AND HELIOSPHERE OBSERVATORY / NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION** – Site da agência espacial americana - Disponível em: <<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>> Acesso em Jun. 2013
- NAKAGAMI, M., The m-Distribution, a general formula of intensity of rapid fading. In **Statistical Methods in Radio Wave Propagation**, Pergamon Press, 1960.
- NATIONAL GEOGRAPHIC (BRASIL): **O impacto das tempestades solares em nossa vida**. São Paulo: Ed. Abril, n. 147, Jun. 2012.
- NOAA/SWPC – SPACE WEATHER PREDICTION CENTER / NATIONAL OCEANICS AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION** – Site do órgão governamental norte-americano que conduz pesquisas relacionadas aos oceanos e atmosfera terrestre. Disponível em: <<http://swpc.noaa.gov/>>. Acesso em Jun. 2012
- PAULINO, I. MEDEIROS, A. F., BURITI, R. A., TAKAHASHI, H., SOBRAL, J. H. A. GOBBI, D., Plasma bubble zonal drift characteristics observed by airglow images over Brazilian tropical region. **Rev. Bras. Geof.**, São Paulo, v. 29, n. 2, 2011
- REZENDE, L. F. C.; PAULA, E. R.; BATISTA I.S.; Study of ionospheric irregularities during intense magnetic storms. **Rev. Bras. Geof.**, São Paulo, 2010.

REZENDE, L. F. C, PAULA, E. R., STEPHANY, S. , KANTOR, I. J. , MUELLA, M. T. A. H. , SIQUEIRA, P. M. , CORREA, K. S., Survey and prediction of the ionospheric scintillation using data mining techniques. **Space Weather (Online)**, v. 8, p. S06D09, 2010.

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

ROSA, G. P. S., **Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS: uma proposta metodológica para eliminação de efeitos sazonais**, 2008, 106 f., Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, Presidente Prudente

SALOMONI, C.S.; MATSUOKA, M.T.; SOUZA, S.F.; CAMARGO, P.O.. Análise e comparação do comportamento da ionosfera e do posicionamento por ponto em períodos de alta e baixa atividade solar. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, p. 333-351, 2009.

SATIRAPOD, C.; WANG, J.; RIZOS, C. **Modelling residual systematic errors in GPS positioning: methodologies and comparative studies**. In: IAG SYMP 2001, Budapest, Hungary. Vistas for Geodesy in the New Millennium, v.125, Springer-Verlag, p. 410-414, 2001.

SCHWENN, R., **Space Weather: The Solar Perspective**, **Living Rev. Solar Phys.** 3, 2006.

SEEBER, G.. **Satellite Geodesy**. 2ª ed. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SILVA, H.A., **Avaliação de modelos estocásticos no posicionamento GNSS**, 2009, 111 f., Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, Presidente Prudente

SKONE, S. **GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillations conditions**. In: IGS Network Workshop, Soria Moria, Oslo, Norway, 12-14 July, 2000.

SOUZA, E. M., **Análise Wavelet: detecção e redução do multicaminho no posicionamento relativo GPS estático e cinemático**. 2008. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Estado de São Paulo, Presidente Prudente.

SPIEGEL, M. R., **Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas**. McGraw Hill, 1992.

SPOGLI, L., ALFONSI, L., FRANCESCHI, G. ,ROMANO, V., AQUINO, M., DODSON, A., Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid-latitude European regions, **Ann. Geophys.**, 27, 3429–3437, doi:10.5194/angeo-27-3429-2009, 2009.

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

STRANGEWAYS, H. J. Determining scintillation effects on GPS receivers. **Radio Sci.**, 44: RS0A36. doi:10.1029/2008RS004076, 2009.

STREETS, R. B. Jr., Variation of radio star and satellite scintillations with sunspot number and geomagnetic latitude, ?, 1969.

TIWARI, S. JAIN, A., SARKAR, S., JAIN, S., GWAL, A. K., Ionospheric irregularities at Antarctic using GPS measurements, **J. Earth Syst. Sci.**, 121 , n2, pp. 345-353, 2012.

TORRENCE, C., COMPO, G.P., **A Practical Guide to Wavelet Analysis**. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1998. 18 p. Disponível em <<http://atoc.colorado.edu/research/wavelets>>. Acesso em: 12 de maio 2013.

VAN DIERENDONCK, A.J., HUA, Q., KLOBUCHAR, J., 1993. Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers. In: **Proceedings of ION GPS 93**, Salt Lake City, pp. 1333–1342, 1993.

VERIPOS – site da empresa Veripos que apresenta informações sobre as atividades desenvolvidas pela companhia. Disponível em : <www.veripos.com> , Acesso em Out. 2012.

YEH, K.C., LIU, C.H, Radio wave scintillations in the ionosphere, **Proc. IEEE** **70**, 324-360, 1982.

YOUSEF, S. M., **The solar Wolf-Gleissberg cycle and its influence on the earth**, In: Proceedings of ICEHM2000, Egito, pp. 267-293, 2000.

WERNIK, A. W., ALFONSI, L., MATERASSI, M., Ionospheric irregularities, scintillation and its effect on systems, **Acta Geoph. Polonica**, 52, 2004.

WERNIK, A. W., ALFONSI, L., MATERASSI, M., Scintillation modeling using in situ data, **Radio Sci.**, 42, RS1002, doi: 10.1029/2006RS003512, 2007.

WERNIK, A. W., SECAN, J. A., FREMOUW, E. J., Ionospheric irregularities and scintillation, **Adv. Space Res.**, 31 (4), 971-981, 2003.