

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Programa de Pós-Graduação em
Ciências e Aplicações Geoespaciais – CAGE

EDITH LILIANA MACOTELA CRUZ

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS UTILIZANDO A
TÉCNICA DE VLF

São Paulo - Brasil

2015

EDITH LILIANA MACOTELA CRUZ

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS UTILIZANDO A
TÉCNICA DE VLF**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geoespaciais.

Orientador: Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin

São Paulo - Brasil

2015

C957c

Cruz, Edith Liliana Macotela

Contribuição ao estudo de distúrbios ionosféricos utilizando a
técnica de VLF. / Edith Liliana Macotela Cruz – São Paulo, 2015.

76 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Programa de Ciências e Aplicações Geoespaciais) -
Universidade Presbiteriana Mackenzie - São Paulo, 2015.

Orientador: Jean-Pierre Raulin.

Bibliografia: f. 71-75.

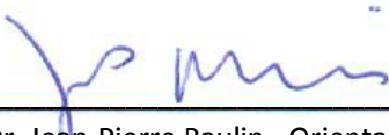
EDITH LILIANA MACOTELA CRUZ

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS UTILIZANDO A
TÉCNICA DE VLF**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geoespaciais.

Aprovada em

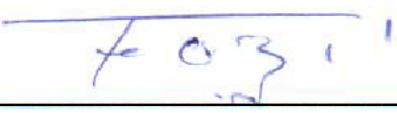
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin - Orientador
Universidade Presbiteriana Mackenzie / CRAAM



Profa. Dra. Emilia Correia
Universidade Presbiteriana Mackenzie / CRAAM



Dr. Fernando Bertoni
Universidade Estadual da Paraíba

À Bernarda, Iris e Edith, por
tudo o que elas me deram.

AGRADECIMENTOS

Início os agradecimentos ao professor Pierre Kaufmann, coordenador do Centro de Radioastronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM), por me dar a oportunidade de trabalhar no grupo de pesquisa.

Ao professor Jean-Pierre Raulin, por confiar em mim como estudante, por me orientar desde a iniciação científica no Peru e por contribuir no meu desenvolvimento profissional com seus conselhos e observações, sempre falando a verdade.

À professora Emília Correia e ao Doutor Fernando Bertoni, por serem parte da banca examinadora e pelas avaliações e sugestões realizadas, contribuindo na melhora do trabalho de pesquisa.

Aos professores do CAGE Martha Casiano, Adriana Valio, Carlos Giménez, Luiz Botti e Marcelo de Juli, por oferecerem seus conhecimentos em todas as conversas durante as aulas. E aos companheiros de crédito, entre eles a Denis, Luis, Fernando e Yuri.

À Lucíola, Ana Carolina, Valdomiro e Aurélio, por ajudarem em todos os trâmites burocráticos, que fizeram a vida durante o mestrado amena. Também agradeço à equipe de segurança do Mackenzie, por estarem dispostos a ajudar em todo momento, inclusive os domingos e feriados.

Aos meus amigos Edith, Betty, Ray, Ana, Rosa, Diana, e Alberto, por estarem sempre comigo em todos os momentos, inclusive os piores, e sem a presença dos mesmos, concluir o mestrado teria sido mais difícil. Minha gratidão, também a todos aqueles que eu conheci durante o mestrado, que compartilharam seu carinho e apoio, muito obrigada a todos.

A minha amada família, por me darem os valores com os quais eu vivo, e finalmente agradeço de forma especial a José, por estar sempre ao meu lado, vivenciando todos meus momentos durante a pesquisa, e por todo seu carinho que me dedica.

Agradeço ao financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - processo 130082/2013-9.

Afirmo muitas vezes que, se você medir aquilo de que está falando e expressar em números, você conhece alguma coisa sobre o assunto; mas, quando você não o pode expressar em números, seu conhecimento é pobre e insatisfatório.

William Thomson (Lorde Kelvin)

RESUMO

O sistema Terra-baixa ionosfera se comporta como um guia de onda para a propagação de ondas de rádio de frequências muito baixa (VLF). Se neste sistema a condutividade elétrica das fronteiras é perturbada, a propagação da onda é também perturbada. Existe uma variedade de fenômenos físicos transientes que alteram significativamente a condutividade elétrica da baixa ionosfera. Essas alterações são observadas como variações da fase e/ou amplitude com respeito ao nível quiescente. O presente trabalho tem como finalidade estudar a resposta da baixa ionosfera a fenômenos que produzidos na Terra, no sistema solar e até aqueles produzidos muito além do sistema solar. Com esse fim foram utilizados dados de VLF de fase e de amplitude fornecidos pela rede SAVNET (South America VLF NETwork) para o ciclo solar 24. Foi encontrado que a correção pelo fator de distância iluminada e o coeficiente de altura de referência permitem normalizar o efeito do distúrbio ionosférico a partir do sinal de VLF propagado em trajetos com direção de propagação norte-sul ou oeste-leste. O limiar de detecção das perturbações causadas pelo excesso na incidência dos raios-X é $1,8 \times 10^{-9} \text{ Jm}^{-2}$ para a ionosfera noturna e $2,6 \times 10^{-7} \text{ Jm}^{-2}$ para a ionosfera diurna. Perturbações ionosféricas observadas como alterações nos períodos do sinal de VLF, na faixa de infrassom, foram observadas entre 6 e 14 dias antes dos eventos sísmicos de magnitude 7 acontecidos no Haiti no ano 2010 e no Peru no ano 2011. Alterações nas periodicidades, da ordem de dezenas de minutos, foram observadas quando a sombra do eclipse solar total de 2010 se deslocava sobre a Terra. Devido ao eclipse, a altura de referência da ionosfera aumentou em $\sim 3 \text{ km}$ e a densidade eletrônica diminuiu em 60% com respeito ao nível quiescente. Finalmente, foi encontrado que o coeficiente de recombinação efetiva, para o tempo do eclipse e para uma altura de 80 km, foi de $1,1 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$, que é um valor intermediário entre as condições diurnas e noturnas.

Palavras-chave: técnica de VLF, baixa ionosfera, condutividade elétrica, perturbações ionosféricas.

ABSTRACT

The Earth-Low ionosphere system behaves as a waveguide for the propagation of radio waves of very low frequency (VLF). If in this system the electrical conductivity of its boundaries is perturbed, the propagation of the VLF waves will also be perturbed. There is a diversity of transient physical phenomena that are able to alter significantly the electrical conductivity of the lower ionosphere. The disturbance in this region is able to produce phase and amplitude variations with respect to a quiescent level of these waves. The aim of the present work is to study the response of the lower ionosphere to phenomena originated in the Earth, our solar system or even much farther away. For this purpose, VLF data obtained by SAVNET (South American VLF Network) during the solar cycle 24 was used. It was found that the correction by both the length of the path illuminated by the flare and the reference height coefficient allows normalizing the effect of ionospheric disturbances observed in the VLF phase signals that propagated along trajectories with a north-south or west-east direction, separately. The lower limit of detection for disturbances caused by the X-ray radiation excess is $1.8 \times 10^{-9} \text{ Jm}^{-2}$ and $2.6 \times 10^{-7} \text{ Jm}^{-2}$ for the nighttime and daytime lower ionosphere, respectively. Changes in the periodicities of the VLF signal, in the infrasonic band, were observed between 6 and 14 days prior to the seismic events, of magnitude 7, occurred in Haiti in 2010 and in Peru in 2011. Increases in the periodicities of the order of few minutes were observed when the shadow of the total solar eclipse of 2010 was moving on the Earth. Due to the solar eclipse the ionospheric reference height increased in ~ 3 km and the electron density decreased in 60 % of its quiescent level. Finally, it was found that the effective recombination coefficient, for 80 km height, was $1.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ during the time of the eclipse, which is an intermediate value between the diurnal and nocturnal conditions.

Key words: VLF technique, lower ionosphere, electric conductivity, ionospheric disturbances.

LISTA DE ABREVIATURAS

ACS	<i>Anti-Coincidence Shield</i>
AGW	<i>Acoustic Gravity Waves</i>
AMAS	Anomalia Magnética do Atlântico Sul
ATI	Estação receptora de VLF – Atibaia
AWESOME	<i>Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modeling and Education</i>
CAS	Estação receptora de VLF – Casleo
EACF	Estação receptora de VLF – Estação Antártica Comandante Ferraz
EUV	Extremo Ultravioleta
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSN	<i>Global Seismographic Network</i>
IBAS	<i>INTEGRAL Burst Alert system</i>
ICA	Estação receptora de VLF – Ica
IDL	<i>Interactive Data Language</i>
IEACF	Fator de iluminação para o trajeto NPM-EACF
INTEGRAL	<i>INTERnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory</i>
IROI	Fator de iluminação para o trajeto NPM-ROI
Ly- α	Radiação da linha Lyman- α , 1216 Å
Ly- β	Radiação da linha Lyman- β , 1026 Å
MSK	<i>Minimum Shift Keying</i>
NAA	Estação transmissora de VLF – <i>Navy Radio Station at Cluter</i> , 21 kHz
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NPM	Estação transmissora de VLF – <i>Navy Radio Station at Pearl Harbor</i> , 21,4 kHz
OTTB	<i>Optically Thin Thermal Bremsstrahlung</i>
PLO	Estação receptora de VLF – Punta Lobos
ROI	Estação receptora de VLF – Radiobservatório do Itapetinga
SAVNET	<i>South America VLF NETwork</i>
SDAC	<i>Solar Data Analysis Center</i>
SFA	<i>Sudden Field Anomaly</i>
SGR	<i>Soft Gamma ray Repeater</i>
SoftPAL	<i>Software Phase and Amplitude Logger</i>
SPI	<i>SPectrometer for INTEGRAL</i>
SPA	<i>Sudden Phase Anomaly</i>
SSW	<i>SolarSoftWare</i>
TE	Transversal Elétrico
TEM	Transversal Eletromagnético

TM Transversal Magnético
VLF *Very Low Frequency, 3 - 30 kHz*
USGS *U.S. Geological Survey*

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

<i>a</i>	Raio da Terra, m
<i>A</i>	Área do loop, m ²
<i>A</i>	Amplitude da onda de VLF, dB
<i>A</i> ₀	Nível quiescente da amplitude do sinal de VLF, dB
<i>b</i>	Total de espiras individuais, adimensional
<i>B</i>	Campo magnético da Terra, T, kg ⁻¹ Cs ⁻¹
<i>c</i>	Velocidade da luz no espaço livre, 3 × 10 ⁸ ms ⁻¹
<i>C</i>	Total de contagens medido pelo sensor ACS/SPI do INTEGRAL, contagens
<i>d</i>	Distância de propagação da onda de VLF, m
<i>d</i> _{ilu}	Comprimento da trajetória de VLF que sofre a perturbação, Mm
<i>d</i> _o	Comprimento do trajeto que foi afetado pelo eclipse no tempo da máxima variação de fase, Mm
<i>-dI</i>	Decréscimo na intensidade da radiação, Wm ⁻² Hz ⁻¹
<i>d</i> _{NAA}	Distância até a transmissora NAA, Mm
<i>d</i> _{NPM}	Distância até a transmissora NPM, Mm
<i>ds</i>	Elemento de comprimento da linha de visada, m
<i>E</i> ₀	Módulo da intensidade do campo elétrico da onda de VLF, Vm ⁻¹
<i>E</i> _{z,1}	Intensidade do campo elétrico vertical para o primer modo, dB, Vm ⁻¹
<i>f</i>	Frequência da onda, Hz
<i>f</i> _{x(t)}	Variação temporal do fluxo de raios-X, Wm ⁻²
<i>F</i> ₀₋₂	Fluxo de raios-X na faixa de energia < 2Å, Wm ⁻²
<i>F</i> _{min}	Fluênciia mínima, Jm ⁻²
<i>F</i> ₂₅	Fluênciia na faixa de energia entre 25 keV e 2 Mev, Jm ⁻²
<i>h</i>	Altitude, km
<i>h</i> _e	Altura efetiva da antena vertical, m
<i>h</i> _m	Altura da máxima taxa de produção, m
<i>h'</i>	Altura de referência da baixa ionosfera, km
<i>H</i>	Escala de altura, m
<i>H</i> ₀	Módulo da intensidade do campo magnético da onda de VLF, Am ⁻¹
<i>I</i>	Radiação incidente, Wm ⁻² Hz ⁻¹
<i>j</i>	Número imaginário, adimensional
<i>k</i>	Coeficiente empírico = 0,66, adimensional
<i>k</i> _B	Constante de Boltzmann, 1,38 × 10 ⁻²³ JK ⁻¹
<i>L</i>	Taxa de perda de elétrons por recombinação, cm ⁻³ s ⁻¹
<i>m</i> _e	Massa do elétron, 9,1 × 10 ⁻³¹ kg
<i>n</i>	Número de modo, adimensional

N	Número de partes em que foi dividido o trajeto de propagação, adimensional
N_e	Densidade eletrônica, cm^{-3}
N_{ep}	Densidade eletrônica perturbada, cm^{-3}
N_{eq}	Densidade eletrônica quiescente, cm^{-3}
N_n	Densidade dos elementos neutros, cm^{-3}
N_+	Densidade dos íons positivos, cm^{-3}
N_-	Densidade dos íons negativos, cm^{-3}
O_m	Máximo de obscurecimento ao longo do trajeto de VLF, %
P_r	Potência radiada pelo transmissor, W
q	Taxa de produção eletrônica, $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$
q_e	Carga da partícula, $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
q_m	Taxa de produção eletrônica na altura h_m , $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$
t	Tempo, s
t_i	Tempo de inicio do evento, s
t_f	Tempo final do evento, s
t_{Om}	Tempo em que ocorre o máximo de obscurecimento O_m , s
$t_{\Delta\phi}$	Tempo em que a máxima variação da fase $\Delta\phi$ é observada, s
T	Temperatura absoluta, K
v_ϕ	Velocidade de fase da onda de VLF, ms^{-1}
V_V	Voltagem induzida na antena vertical, V, $\text{kg m}^2\text{A}^{-1}\text{s}^{-3}$
V_L	Voltagem induzida na antena loop, V, $\text{kg m}^2\text{A}^{-1}\text{s}^{-3}$
y	Altura reduzida do gás neutro, adimensional

Gregos

α	Coeficiente de recombinação, $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$
α_e	Coeficiente de recombinação eletrônica, $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$
α_{eff}	Coeficiente de recombinação efetiva, $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$
α_i	Coeficiente de recombinação iônica, $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$
α_{med}	Taxa de atenuação média do trajeto ou uma seção do trajeto, dB/Mm
β	Gradiente de condutividade, km^{-1}
Δ	Variação de uma quantidade, adimensional
ε	Força eletromotriz induzida na antena, V
ε_0	Permissividade no vácuo, $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$
η	Índice de refração da propagação das ondas eletromagnéticas pela ionosfera, adimensional
θ	Ângulo entre a direção de propagação da onda e o campo geomagnético, graus
λ	Comprimento de onda, km
λ	Razão entre a densidade dos íons negativos e elétrons, adimensional
Λ_n	Fator de excitação relativo ao enésimo modo, dB
μ_0	Permeabilidade no vácuo, $4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$
ν	Frequência de colisão entre os elétrons e as partículas neutras, Hz
σ	Seção transversal de absorção dos fótons, cm^2

σ	Desvio padrão, as unidades são as mesmas da medida da variável
\emptyset	Fase da onda de VLF, graus
\emptyset_0	Nível quiescente da fase do sinal de VLF, graus
ϕ_B	Fluxo magnético da onda, Vs, Tm ⁻²
χ	Ângulo zenital, graus
ψ	Ângulo formado entre o eixo da antena e o campo elétrico ou magnético da onda, graus
ω	Frequência angular da onda, rad
ω_0	Frequência angular de oscilação do plasma, rad
ω_g	Frequência angular de giro de um elétron em uma densidade de fluxo magnético, rad
ω_r	Parâmetro de condutividade, Hz

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	13
1.1 Revisão Sobre as Características da Ionosfera Terrestre: Baixa Ionosfera	14
1.1.1 Composição	15
1.1.2 Formação da baixa ionosfera	16
1.1.2.1 Produção de ionização	16
1.1.2.2 Perda de ionização	18
1.1.3 As regiões ionosféricas D diurna e E noturna	19
1.1.4 Distúrbios ionosféricos	21
1.2 Propagação de Ondas Eletromagnéticas de Baixa Frequência dentro do Guia de Onda Terra-Ionosfera e a Recepção do Sinal de VLF	22
1.2.1 Índice de refração para a propagação de ondas de VLF na baixa ionosfera	22
1.2.2 Propagação de ondas de VLF dentro do guia de onda Terra-ionosfera	24
1.2.3 Antenas receptoras do sinal de VLF	28
CAPÍTULO 2 – INSTRUMENTAÇÃO E DADOS IONOSFÉRICOS	30
2.1 A Rede SAVNET	30
2.2 Dados Ionosféricos: VLF	32
CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS	36
3.1 Normalização dos Distúrbios Ionosféricos Medidos em Diferentes Trajetos de Propagação	36
3.2 Sensibilidade Ionosférica a Distúrbios Produzidos pelo Fluxo Explosivo em Raios-X	44
3.2.1 A ionosfera noturna	44
3.2.2 A ionosfera diurna	47
3.3 Distúrbios Ionosféricos que Produzem Alterações das Periodicidades Presentes no Sinal de VLF	53
3.3.1 A ionosfera noturna	54
3.3.2 A ionosfera diurna	58
3.4 Mudança de Alguns Parâmetros Ionosféricos Associados ao Distúrbio Produzido pelo Eclipse Solar de 2010	63
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS	71

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

As ondas de rádio de frequências muito baixas (VLF, *Very Low Frequency*, 3 - 30 kHz) propagam-se com pouca atenuação em longas distâncias dentro de um guia de onda natural, denominado guia de onda Terra-ionosfera. Neste guia a fronteira inferior é formada pela superfície terrestre e a fronteira superior pela baixa ionosfera. Durante o dia, a baixa ionosfera é também conhecida como região-D. Durante a noite, a região-D desaparece e as ondas são refletidas pela base da região-E ionosférica. O monitoramento contínuo da baixa ionosfera, utilizando a técnica de VLF, permite estudar as mudanças na sua condutividade elétrica causadas por uma variedade de fenômenos físicos transientes e de longo prazo. A técnica de VLF detecta estas mudanças como variações na fase e/ou amplitude do sinal de rádio com respeito a seu nível quiescente.

A baixa ionosfera pode ser afetada por fenômenos produzidos na Terra (e.g. terremotos, relâmpagos, ondas de gravidade e planetárias), no sistema solar (e.g. eclipse solar, explosão solar) ou em objetos celestes muito além do sistema solar (e.g. surtos de magnetares). Os efeitos observados no sinal de VLF dependem da localização do transmissor e do receptor na Terra, do comprimento do trajeto de propagação de VLF, do valor de ângulo zenital da fonte que produz perturbação ao longo do trajeto, da direção de propagação da onda, da frequência de observação, do período de atividade solar, etc. Assim, o uso da técnica de VLF permite detectar diferentes fenômenos físicos transientes e seu estudo resulta no conhecimento do comportamento da baixa ionosfera em diferentes condições. No presente trabalho, foram utilizados dados fornecidos principalmente pela rede SAVNET (*South America VLF NETwork*) para estudar a resposta da baixa ionosfera a uma variedade de fenômenos físicos transientes. Os resultados deste estudo contribuirão para: (i) determinar um método que permita comparar as perturbações observadas no sinal de VLF medidos em diferentes trajetos de propagação, (ii) estabelecer o limite inferior da sensibilidade ionosférica e sua dependência com as condições de iluminação, (iii) determinar a associação entre a ocorrência de fenômenos geofísicos e as alterações nas periodicidades do sinal de

VLF e (iv) estimar as variações de altura de referência, densidade eletrônica e coeficiente de recombinação da baixa ionosfera produzida pelo eclipse solar de 2010.

O trabalho foi dividido como segue: o Capítulo 1 inicia com uma revisão sobre as características da baixa ionosfera terrestre, depois se descreve a propagação de ondas de VLF no guia de onda Terra-ionosfera e finaliza com uma breve explicação sobre a recepção do sinal de VLF. Neste trabalho a revisão é concentrada no caso de baixas e médias latitudes devido ao fato de que o sinal de VLF principalmente se propaga nessas regiões da Terra. O Capítulo 2 apresenta a instrumentação e os dados de VLF utilizados na análise. O Capítulo 3 inicia com a procura por um método de normalização das perturbações observadas na fase do sinal de VLF causada pelas explosões solares, em seguida apresenta-se o estudo da sensibilidade ionosférica diurna e noturna. Posteriormente, uma análise para determinar a associação entre as mudanças nas periodicidades observadas no sinal de VLF e alguns fenômenos geofísicos é apresentada. O capítulo conclui com um estudo sobre as variações dos parâmetros de altura de referência, densidade eletrônica e coeficiente de recombinação da baixa ionosfera produzido por um eclipse solar total. Por último, as conclusões e perspectivas do trabalho são resumidas no Capítulo 4.

1.1 Revisão sobre as características da Ionosfera Terrestre: Baixa Ionosfera

A Atmosfera terrestre pode ser classificada de acordo com sua variação espacial da temperatura, composição, estado da mistura e ionização. A FIGURA 1 mostra os parâmetros mais utilizados na classificação das regiões atmosféricas. Segundo o parâmetro de ionização, a parte da atmosfera situada aproximadamente entre 50 e 1000 km de altitude é denominada de ionosfera. Na ionosfera existe quantidade suficiente de elétrons livres que podem afetar a propagação das ondas de rádio (DAVIES (1990), p. 1). A baixa ionosfera localiza-se aproximadamente entre 50 e 100 km de altitude (BELROSE e BURKE, 1964).

1.1.1 Composição

Os gases que compõem a baixa ionosfera podem ser divididos em componentes majoritários e minoritários. Os principais componentes majoritários são N₂ e O₂; estes gases coexistem

em igual proporção até ~ 100 km de altitude (HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 10). Já os componentes minoritários são NO, H₂O, CO₂, O₃, OH, NO₂, HO₂, H, N, O e metais alcalinos (SCHUNK (1996), p. 14; HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 11).

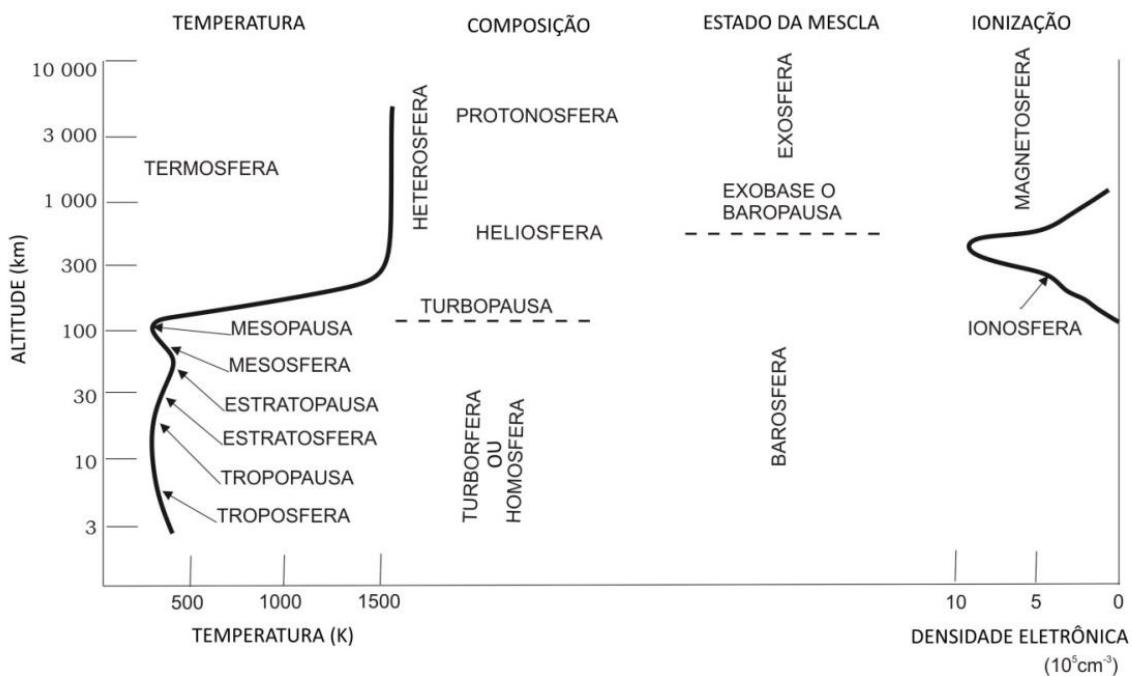


FIGURA 1 – Distribuição vertical da atmosfera neutra segundo o perfil da temperatura, composição, estado da mescla e ionização. (Fonte: adaptado de HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 4).

A distribuição vertical das principais espécies neutras da baixa ionosfera é mostrada na FIGURA 2. As espécies neutras descritas pelo modelo de atmosfera MSIS-E-90 para a região do Peru (Lat.: -12,5°; Long.: -77,0°), no dia 01 de janeiro de 2014 às 15:00 UT, são mostradas na FIGURA 2a. As espécies neutras não descritas pelo modelo MSIS-E-90 (para localização e tempos arbitrários) são mostradas na FIGURA 2b. Da FIGURA 2 pode-se observar um decréscimo dos componentes moleculares e um aumento dos componentes atômicos com o aumento da altitude. De todos os constituintes minoritários o NO é o mais importante (NICOLET e AIKIN, 1960), sendo que ele é ionizado pela intensa linha Lyman- α (Ly- α , 1216 Å), emitida por todo o disco solar, para assim formar a baixa ionosfera diurna.

1.1.2 Formação da baixa ionosfera

A ionosfera é formada pela ionização dos gases atmosféricos como N₂, O₂ e O (HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 14). Na baixa ionosfera a radiação ultravioleta extremo (EUV) e raios-X, provenientes da cromosfera e coroa solar, são capazes de produzir ionização. Uma vez que a ionização é produzida, os íons e os elétrons tendem a recombinar e reagir com os

constituítes gasosos para produzir outros íons. Portanto, existe um equilíbrio dinâmico em que a densidade eletrônica N_e depende da velocidade relativa da produção e da perda. Em termos gerais, a taxa de variação da densidade eletrônica é expressa pela equação de continuidade (HUNSUCKER e HARGRAVES (2003), p. 14), onde o termo de perda por difusão é desprezível para a baixa ionosfera e, consequentemente, é escrita como:

$$\partial N_e / \partial t = q - L \quad (1)$$

sendo q a taxa de produção eletrônica e L a taxa de perda por recombinação. Os mecanismos de produção e recombinação são descritos a seguir.

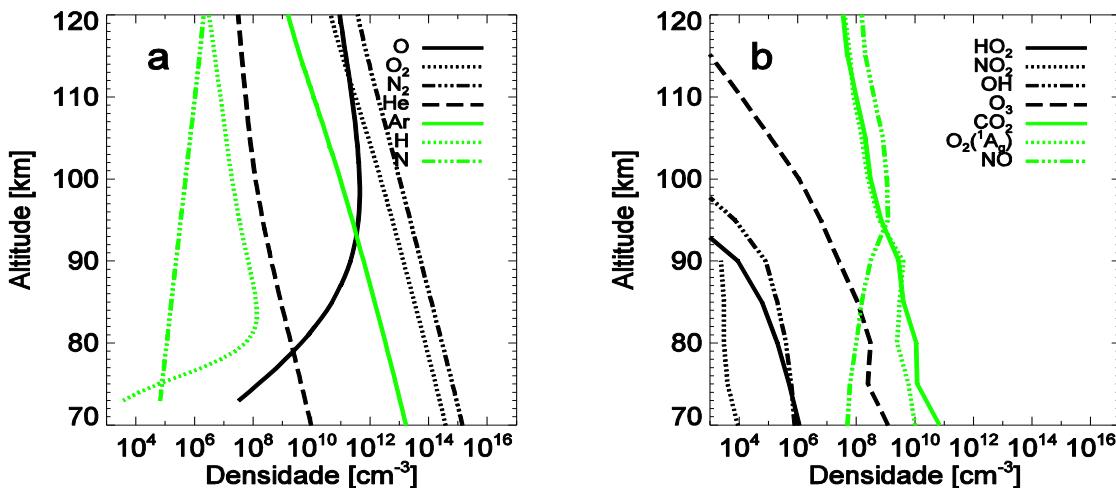


FIGURA 2 – Distribuição vertical dos constituintes majoritários da baixa ionosfera (a) segundo o modelo atmosférico MSIS-E-90 (Fonte: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html) e dos constituintes minoritários (b) não cobertos pelo mesmo modelo (Fonte: adaptado de SCHUNK (1996), p. 15).

1.1.2.1 Produção de ionização

As principais fontes de ionização da ionosfera são os fótons (radiação) e a precipitação de partículas energéticas. Para que exista ionização as energias das fontes devem ser superiores ao potencial de ionização ou à energia de ligação de um átomo ou molécula (KIVELSON e RUSSELL (1995), p. 184). A ionização por partículas é mais importante nas altas latitudes (HUNSUCKER e HARGRAVES (2003), p. 105), enquanto nas baixas e médias latitudes a **fotoionização**, ou ionização por radiação, é o processo mais importante.

Na atmosfera, a intensidade de radiação solar aumenta com a altitude h , enquanto a concentração do gás ionizável diminui. Portanto, N_e terá um máximo em alguma altitude que variará de acordo com a posição do Sol (KIVELSON e RUSSELL (1995), p. 184). O modelo

ionosférico desenvolvido por Chapman em 1931, **teoria de Chapman**, é utilizado para entender o comportamento da ionosfera e suas variações. Em um tratamento simples é suposto que: (i) a atmosfera é composta somente de um constituinte gasoso, exponencialmente distribuído com escala de altura H constante, (ii) a atmosfera está horizontalmente estratificada, (iii) a radiação é absorvida em proporção com a concentração dos elementos neutros e (iv) o coeficiente de absorção é constante (no caso de uma radiação monocromática). A intensidade da radiação incidente I decresce como:

$$-dI/ds = \sigma N_n I \quad (2)$$

onde $-dI$ é o decrescimento na intensidade da radiação, ds o elemento do comprimento da linha de visada, σ a seção transversal de absorção dos fótons e N_n a densidade dos elementos neutros. A função de produção de Chapman é usualmente escrita como:

$$q = q_m \exp(1 - y - \sec(\chi) e^{-y}) \quad (3)$$

sendo y a altura reduzida do gás neutro, $y = (h - h_m)/H$, h_m a altura da taxa máxima de produção, q_m a taxa de produção para h_m e χ o **ângulo zenital**.

χ é o ângulo formado entre o zênite do local de observação e a linha de visada do objeto astronômico (FIGURA 3a). O valor de χ muda segundo a latitude, data a hora do dia. Ao nível de mar χ varia entre 0° e 90° , mas visto de uma altitude maior na Terra, o objeto pode ser visto abaixo do horizonte, devido à curvatura da Terra, e o máximo valor de χ se incrementa como $\chi_{max} = 90 + 0,0091 \times h^{0,5}$ (CLARK (1990), Apêndice C, p. 270). Um valor de χ mais próximo do zero indica que o efeito da radiação é maior. Portanto, a função de produção de Chapman infere que em uma atmosfera isotérmica, a altitude da máxima taxa de produção incrementa quando o ângulo zenital também incrementa, enquanto a razão de ionização decresce. O comportamento deduzido da função de Chapman é mostrado na FIGURA 3b.

1.1.2.2 Perda de ionização

Na baixa ionosfera os elétrons desaparecem em virtude da recombinação dissociativa (MITRA, 1968), sendo X, Y e Z gases ionizáveis. A recombinação é definida como:

$$L = \alpha N_e N_+ \quad (4)$$

onde N_+ é a densidade iônica e α o coeficiente de recombinação.

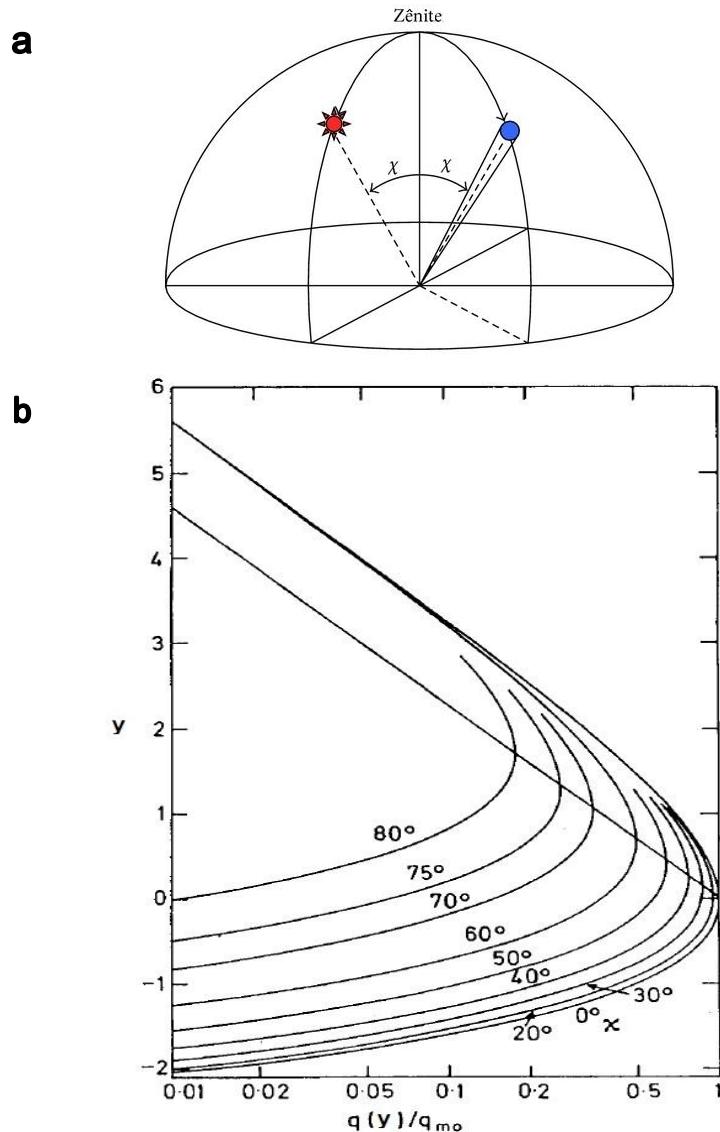


FIGURA 3 – (a) Representação gráfica do ângulo zenital para dois objetos celestes quaisquer, representados por uma estrela vermelha e um círculo azul, e **(b)** a função de produção de Chapman para diferentes χ (**Fonte:** adaptado de HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 16).

Na baixa ionosfera existe também um número significativo de íons negativos; então, para que exista neutralidade elétrica, se requer que $N_e + N_- = N_+$, onde N_- é a densidade dos íons negativos. Como os íons negativos e positivos podem recombinar-se entre si, o balanço global entre produção e perda é:

$$q = \alpha_e N_e N_+ + \alpha_i N_- N_+ \quad (5)$$

onde α_e e α_i são os coeficientes de recombinação eletrônica e iônica, respectivamente. A razão entre a densidade dos íons negativos e elétrons é representada por λ , então:

$$q = (1 + \lambda)(\alpha_e + \lambda\alpha_i)N_e^2 \quad (6)$$

onde $(\alpha_e + \lambda\alpha_i)$ é chamado de coeficiente de recombinação efetiva α_{eff} (MITRA e JONES, 1954). Quando $\lambda\alpha_i \ll \alpha_e$, a equação (6) torna-se:

$$q = (1 + \lambda)\alpha_e N_e^2 \quad (7)$$

1.1.3 As regiões ionosféricas D diurna e E noturna

A densidade eletrônica da ionosfera apresenta grande variabilidade, tanto espacial quanto temporal. Estas variações resultam fundamentalmente devido à ação da radiação solar ionizante e cósmica, às variações sazonais, à rotação terrestre e à distribuição do campo magnético terrestre. A variabilidade da densidade eletrônica divide a ionosfera em diversas camadas denominadas por Appleton como D, E e F (RATCHLIFFE (1970), p. 36). O perfil vertical diurno e noturno das diferentes regiões ionosféricas durante o mínimo e máximo de atividade solar é mostrado na FIGURA 4.

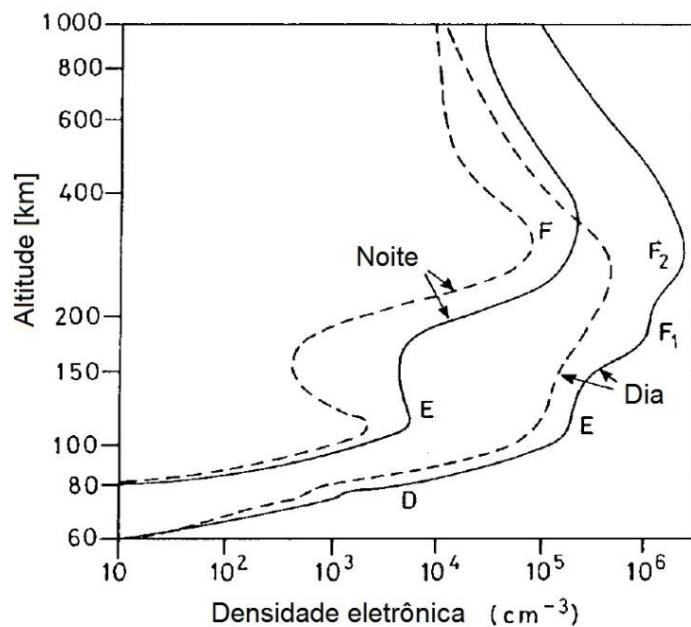


FIGURA 4 – Perfil vertical da densidade eletrônica da ionosfera para médias latitudes durante o máximo (—) e mínimo solar (- - -). (Fonte: adaptado de HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 13).

A região-D se situa entre 60 e 90 km de altitude e sua densidade eletrônica típica varia entre 10^2 e 10^4 cm⁻³ (HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 13). As principais fontes de ionização nesta região são:

- (i) A radiação Ly-α, que ioniza o NO e é o principal responsável pela criação e manutenção da região-D ionosférica (NICOLET e AIKIN, 1960).

- (ii) Os raios-X com comprimento de onda < 2 Å (PACINI E RAULIN, 2006), que ionizam todos os constituintes atmosféricos e
- (iii) A radiação EUV entre 1027 Å e 1118 Å, que ioniza outros constituintes minoritários (HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 31).

A alta densidade de elementos neutros desta região permite um elevado número de colisões entre íons, elétrons e partículas neutras. Quando a fonte ionizante desaparece, essa alta densidade resulta em uma rápida recombinação (HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 36).

A região-E se localiza entre os 90 e 140 km de altitude e pode existir tanto de dia quanto de noite, variando de $\sim 1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ para o dia até $\sim 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ para a noite (MOHINO, 2005). As principais fontes de ionização noturna são (i) a luz das estrelas entre 911 Å e 1026 Å, (ii) a radiação Ly-β (GELLER et al., 1975) e (iii) a ionização ocasionada pelos meteoritos (HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 27). As características típicas da baixa ionosfera são resumidas na TABELA 1.

TABELA 1 – Propriedades típicas das regiões ionosféricas D diurna e E noturna.

Região	Altitude [km]	Tempo	N_e [cm ⁻³]	Espécies neutras	Fontes de ionização	Espécies iônicas
D	60 - 90	Dia	$10^2 - 10^4$	NO O ₂ N ₂	Ly-α Raios-X	NO^+ $O_2^+ N_2^+$
E	90 - 140	Dia/Noite	$10^3 - 10^5$	N ₂ O ₂ O NO	Ly-β, Luz de estrelas	$O_2^+ NO^+$

1.1.4 Distúrbios ionosféricos

Os distúrbios ionosféricos se traduzem em mudanças repentinas de N_e . A ionização produzida por raios-X emitidos durante explosões solares gera excessos de N_e (e.g. BRACEWELL, 1949; COMARMOND, 1977; PACINI e RAULIN, 2006; ŽIGMAN et al., 2007; RAULIN et al., 2013; BASAK e CHAKRABARTI, 2013). Os surtos de magnetáres também produzem excessos de N_e (e.g. FISHMAN e INAN, 1988; INAN et al., 1999; TANAKA et al., 2008; TERASAWA et al., 2005; INAN et al., 2007; MEREGHETTI et al., 2009; TANAKA et al., 2010; RAULIN et al., 2014). No entanto, um decréscimo de N_e ocorre durante os eclipses solares (e.g. BRACEWELL, 1952; CRARY e SCHNEIBLE, 1965; SEARS, 1965; KAUFMANN e

SCHAAL, 1968; HOY, 1969; SCHAAL et al., 1970; CLILVERD et al., 2001; CHERNOGOR, 2010; GUHA et al., 2010).

Na atmosfera, o deslocamento das ondas de gravidade acústicas (AGW, *Acoustic Gravity Waves*), geradas quando as forças de compressão e gravitacional atuam juntamente, também podem causar distúrbios ionosféricos (HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 57). Estudos teóricos e experimentais mostraram que as fontes de AGW na ionosfera podem ser terremotos, erupções vulcânicas, tempestades elétricas, eclipses solares, excitação *in situ* pela passagem do terminador (linha em movimento que separa o lado diurno e noturno do planeta), eletrojatos polares e equatoriais, meteoros, fortes explosões e lançamentos de foguetes poderosos (KALADZE et al., 2008). Os períodos dos AGW com duração maior do que 15 minutos são associados a ondas de gravidade e os períodos de uns poucos minutos, a ondas acústicas (HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 55).

Também foram relatadas anomalias ionosféricas como precursores sísmicos (e.g. HAYAKAWA et al., 1996; MOLCHANOV e HAYAKAWA, 1998). Embora existam numerosos relatos de precursores sísmicos de origem ionosférica, o mecanismo que relaciona os terremotos com a mudança da condutividade ionosférica ainda não é claro. Outros fenômenos transitórios que perturbam a ionosfera são as explosões nucleares e os relâmpagos (BARR et al., 2000).

Em geral, os estudos desenvolvidos relatam que a resposta da ionosfera à perturbação varia segundo sua intensidade, variação temporal, período do ciclo de atividade solar, localização na Terra, etc. A técnica de VLF permite medir as perturbações da baixa ionosfera como repentinas anomalias na fase (SPA, *Sudden Phase Anomaly*) ou na amplitude (SFA, *Sudden Field Anomaly*). O mecanismo de propagação da onda de VLF dentro do guia de onda natural formado entre a Terra e a ionosfera é explicado a seguir.

1.2 Propagação de Ondas Eletromagnéticas de Baixa Frequência dentro do Guia de Onda Terra-Ionosfera e a Recepção do Sinal de VLF

As ondas de VLF propagam-se através de múltiplas reflexões dentro de um guia de onda natural, limitado pela base da ionosfera e pela superfície da Terra. Este guia é denominado

guia de onda Terra-ionosfera. Ao se propagar, as ondas de VLF sofrem pouca atenuação e levam consigo informação referente às condições elétricas das fronteiras do guia. Portanto, a propagação de VLF se converte em uma ferramenta para o estudo das perturbações ionosféricas causadas pela atividade solar, surtos de estrelas remotas, fenômenos atmosféricos, etc. As perturbações são observadas como mudanças repentinas na fase $\Delta\phi$ e/ou na amplitude ΔA do sinal de VLF. O mecanismo pelo qual as ondas de VLF são refletidas dentro do guia de onda segundo a teoria de modos será explicado a seguir.

1.2.1 Índice de refração para a propagação de ondas de VLF na baixa ionosfera

O índice de refração η para um meio ionizado é expresso pela equação de Appleton-Hartree (HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 140):

$$\eta^2 = 1 - \frac{X}{1 - jZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - jZ)} \pm \left(\frac{Y_T^4}{4(1 - X - jZ)^2} + Y_L^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

onde X, Y e Z são quantidades adimensionais definidas como:

$$X = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \quad (9)$$

$$Y = \frac{\omega_g^2}{\omega^2} \quad (10)$$

$$Z = \frac{\nu}{\omega} \quad (11)$$

sendo

$$\omega_0^2 = \frac{N_e q_e^2}{\epsilon_0 m_e} \quad (12)$$

$$\omega_g = \frac{q_e}{m_e} B \quad (13)$$

$$Y_L = Y \cos\theta \quad \text{e} \quad Y_T = Y \sin\theta \quad (14)$$

ω_0 a frequência angular de oscilação do plasma, ω_g a frequência angular de giro de um elétron na presença do campo geomagnético B , ν a frequência de colisão entre elétrons e partículas neutras, ω a frequência angular da onda, q_e a carga do elétron, m_e a massa do

elétron, ε_0 a permissividade no vácuo e θ o ângulo entre a direção de propagação da onda e o campo geomagnético. Para uma propagação no interior do guia de onda $\eta \approx 1$, o que implica uma propagação no espaço livre. Para o caso das fronteiras $\eta = 0$ ou imaginário, resultando em uma reflexão da onda (KRAUS (1986), p. 5-10).

A dependência dos parâmetros X, Y e Z com a altura são mostradas na FIGURA 5. Nesta figura a linha traço-pontilhada horizontal delimita as regiões onde a colisão (zona inferior) e o campo magnético (zona superior) são dominantes. A seta indica a altura onde $X = Z$, altura na qual a onda de VLF é refletida. Na figura, esta altura é 72,5 km. No cálculo foi considerada uma frequência de propagação de 24 kHz, a densidade eletrônica variando entre 1×10^7 a $3 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ e que o campo geomagnético entre 24,4 a 24 nT para as alturas entre 60 e 100 km, respectivamente. Para obter a frequência de colisão em função da altura h foi utilizada a expressão de Morfitt e Shellman (1976):

$$\nu(h) = 1,82 \times 10^{11} \exp(-0,15h) \quad (15)$$

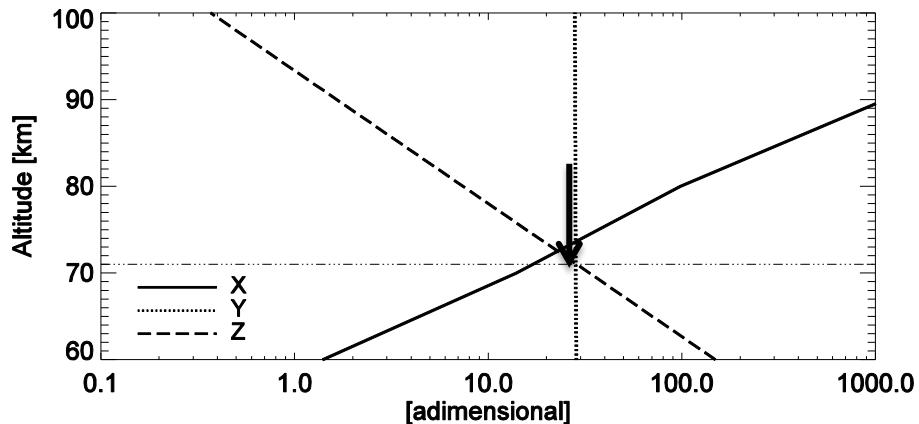


FIGURA 5 – Variação dos parâmetros X, Y e Z em função da altura. A linha horizontal indica a altura acima da qual o plasma é dominado pelo campo geomagnético, e abaixo da qual é dominado pela colisão. A seta designa a altura onde $X=Z$, altura de reflexão da onda.

Na FIGURA 5 pode-se observar que quando a colisão domina o termo Y pode ser ignorado. Para tais condições a equação (8) é reescrita como:

$$\eta^2 = 1 - j \frac{X}{Z} = 1 - j \frac{\omega_0^2}{\omega \nu} = 1 - j \frac{\omega_r}{\omega} \quad (16)$$

ω_r foi definido por Wait e Spies (1964) como o parâmetro de condutividade. A dependência deste parâmetro com a altura é:

$$\omega_r(h) = \omega_0^2(h)/\nu(h) = 2,5 \times 10^5 \exp[\beta(h - h')] \quad (17)$$

onde h' é a altitude na qual $\omega_r(h) = 2,5 \times 10^5$ Hz, também conhecida como a altura de referência da baixa ionosfera. β é o gradiente de condutividade. Valores típicos de h' e β são 70 km e $0,3 \text{ km}^{-1}$ para o dia (WAIT e SPIES, 1964) e ~ 88 km (SAMANES et al., 2015) e $0,5 \text{ km}^{-1}$ (WAIT e SPIES, 1964) para a noite, respectivamente.

1.2.2 Propagação de ondas de VLF dentro do guia de onda Terra-ionosfera

A teoria de modos para o caso de ondas eletromagnéticas guiadas na cavidade entre a Terra e a ionosfera foi apresentada por Wait and Murphy (1957). Esta teoria é válida para explicar o comportamento da propagação de ondas de VLF em distâncias maiores do que 1 Mm. Um modo de onda guiado existe quando a energia eletromagnética é encaminhada entre dois limites refletores. Segundo a teoria de modos existem três tipos de modos primários:

- (i) Modo transversal eletromagnético (TEM). Neste tipo de modo não existe componente elétrica e magnética na direção de propagação da onda ($H_z = E_z = 0$).
- (ii) Modo transversal elétrico (TE). Este tipo de modo se caracteriza por apresentar somente componente magnética na direção de propagação da onda ($H_z \neq 0; E_z = 0$).
- (iii) Modo transversal magnético (TM). Neste tipo de modo existe somente componente elétrica na direção de propagação da onda ($H_z = 0; E_z \neq 0$).

O número de modos usualmente inicia-se em zero e incrementa-se em inteiros. Dentro do guia de onda podem coexistir diferentes tipos de modos se propagando, assim como diferentes números do mesmo tipo. A FIGURA 6 mostra que o campo elétrico da onda próximo da antena é radiado de forma esférica. Quando a energia radiada chega até a ionosfera, esta é refletida e o resultado das ondas em subida e descida pode ser considerado como sendo o resultado de uma soma de modos.

A intensidade do campo elétrico vertical para uma propagação do sinal de VLF sobre oceano, durante o dia, supondo um guia de onda esférico de altura uniforme é dado por (WATT (1967), p. 300 e 375):

$$E_{z,n} \left[dB, \frac{V}{m} \right] = 164,3 + 10 \log P_r - 10 \log f - 20 \log h' + 20 \log |\Lambda_n| - 10 \log \left(a \sin \left(\frac{d}{a} \right) \right) - \alpha_{med} d / 10^6 \quad (18)$$

sendo $E_{z,n}$ o campo elétrico vertical do enésimo modo, n o número de modos, que deve ser ≥ 1 , P_r a potência radiada pelo transmissor, f a frequência da onda, Λ_n o fator de excitação relativo ao enésimo modo (WATT (1967), p. 303), a o raio da Terra, d a distância entre o transmissor e o receptor de VLF e α_{med} a taxa de atenuação média ao longo de um trajeto uniforme ou uma seção do trajeto (WATT (1967), p. 319-320). A taxa de atenuação depende, dentre outros parâmetros, da direção de propagação e da contribuição devida à condutividade do terreno.

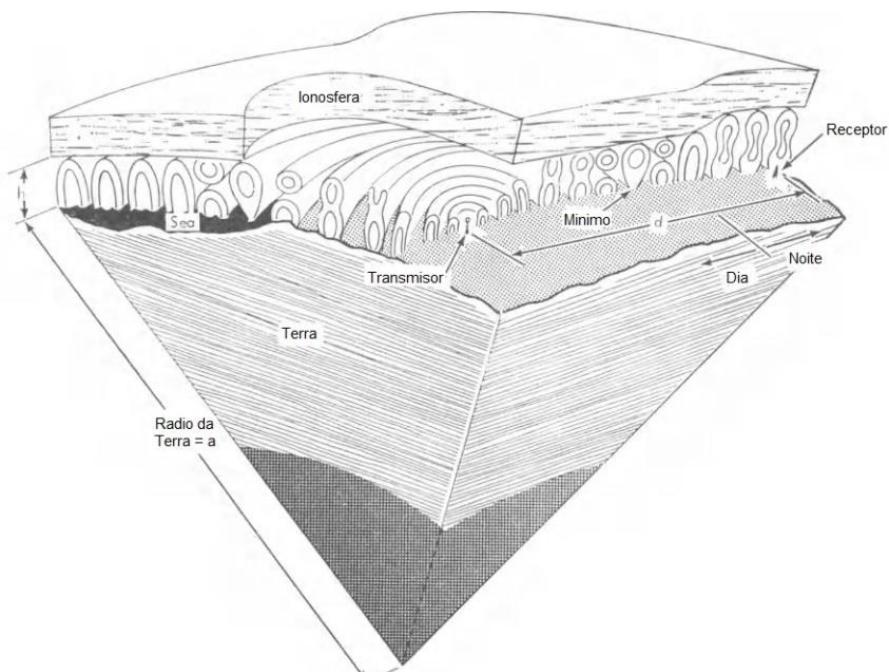


FIGURA 6 – Padrões de campo elétrico aproximado dentro do guia de onda Terra-ionosfera. (Fonte: adaptado de WATT (1967), p. 298).

A intensidade do campo elétrico em função da distância, equação (18), é mostrada na FIGURA 7. Na figura, observa-se a intensidade do sinal ao longo do trajeto de propagação desde o transmissor até o receptor para uma direção de propagação oeste-leste. No cálculo foram utilizados os resultados teóricos de Λ_n e α_{med} de Wait e Spies (1964). Foi suposto também que o sinal de 24 kHz foi emitido com uma potência de 500 kW, que a altura de referência da ionosfera desde o transmissor até o receptor é 70 km e que somente o modo um se propagou dentro do guia de onda.

A velocidade de fase do primeiro modo de propagação pode ser definida como (de WAIT, 1959):

$$\nu_\phi = c \left(1 - \frac{h'}{2a} + \frac{\lambda^2}{32h'^2} \right) \quad (19)$$

onde λ é o comprimento de onda, c a velocidade da luz no espaço livre, a o raio da Terra e h' a altura de referência da baixa ionosfera. A partir da equação (19) pode-se conhecer a dependência da velocidade de fase com a altura de referência da ionosfera e com a frequência da onda. Esta dependência é mostrada na FIGURA 8 para as altitudes de 60, 70, 80 e 90 km e para as frequências entre 8 e 29 kHz. Pode-se observar na figura que, independentemente da frequência da onda, a velocidade de fase aumenta quando a altura do guia diminui.

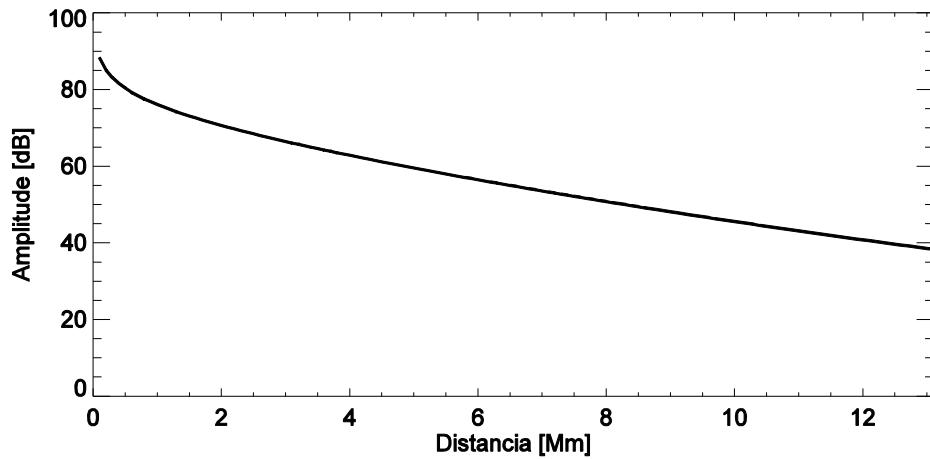


FIGURA 7 – Intensidade do campo elétrico em função da distância de propagação da onda de VLF.

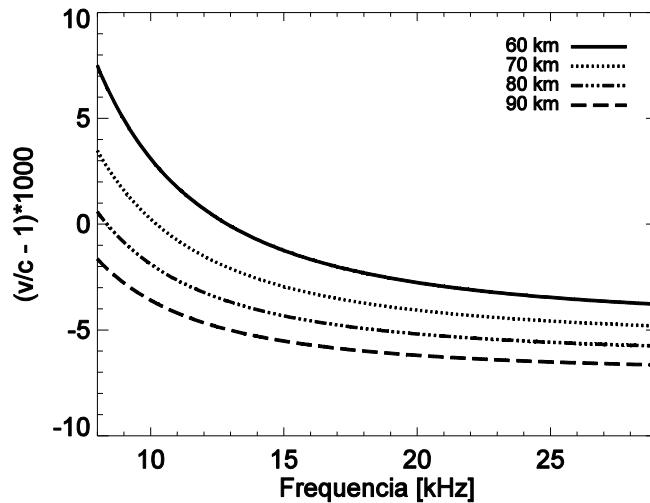


FIGURA 8 – Dependência da velocidade de fase com a altura para diferentes frequências da onda de VLF.

A relação entre a variação da velocidade de fase v_ϕ e a variação de fase $\Delta\phi$ é:

$$\Delta\phi = 360 \frac{d}{\lambda} \frac{\Delta v_\phi}{c} \quad (20)$$

onde d é a distância entre o transmissor e o receptor de VLF, λ o comprimento da onda e c a velocidade da luz no espaço livre. A partir das equações (19) e (20) foi obtida a variação da altura de referência $\Delta h'$ em função da variação de fase $\Delta\phi$; a equação é escrita como:

$$\Delta h' = \frac{\Delta\phi \lambda}{360 d \left(\frac{1}{2a} + \frac{\lambda^2}{16h'^3} \right)} \quad (21)$$

sendo λ o comprimento da onda, d a distância entre o transmissor e o receptor de VLF, a o raio da Terra e h' a altura de referência da baixa ionosfera.

1.2.3 Antenas receptoras do sinal de VLF

Uma antena receptora é um dispositivo que, quando colocado em um campo eletromagnético, permite extrair energia do campo. Em VLF existem em geral dois tipos de sensores receptores: o sensor de campo elétrico e o sensor de campo magnético. O sensor de campo elétrico é uma **antena vertical**. Esta antena é sensível à variação da componente elétrica E_z da onda de VLF que provém de qualquer direção. E_z provoca uma oscilação dos elétrons constituintes do material condutor da antena, o que induz uma corrente elétrica variável. A voltagem induzida na antena pode ser definida por (WATT (1967), p. 401):

$$V_V = E_0 h_e \cos\psi = E_z h_e \quad (22)$$

sendo E_0 o módulo da intensidade do campo elétrico da onda de VLF, ψ o ângulo formado entre a antena vertical e o campo elétrico, e h_e a altura efetiva da antena. h_e é, em geral, a metade da altura física (WATT (1967), p. 401). Da equação (22) pode-se deduzir que se h_e aumenta a voltagem no terminal da antena aumenta. A FIGURA 9 mostra a interação entre o campo elétrico da onda de VLF e a antena vertical.

O sensor do campo magnético é uma **antena Loop**. O princípio de operação deste tipo de antena é um embobinado com núcleo de ar sensível à variação do campo magnético da onda de VLF (FIGURA 10). As Antenas loop são antenas direcionais, portanto deve-se utilizar duas antenas orientadas ortogonalmente, uma com respeito à outra, para medir campos magnéticos de qualquer direção. O funcionamento deste tipo de antena pode ser explicado a partir da lei de indução de Faraday, onde a força eletromotriz ε ao redor de uma espira é proporcional à variação do fluxo magnético $d\phi/dt$ que atravessa a área da espira. No caso de b espiras individuais:

$$\varepsilon = -b \frac{d\phi_B}{dt} \quad (23)$$

A direção da força eletromotriz é dada pela lei de Lenz. A voltagem induzida pela onda nos terminais do loop é determinada a partir de:

$$V_L = 2\pi\mu_0 b A \cos(\psi) H_0 f \quad (24)$$

sendo ψ o ângulo formado entre as linhas do fluxo e o eixo do loop, μ_0 a permeabilidade no vácuo, A área do loop e H_0 o módulo da intensidade do campo magnético da onda incidente no loop. Da equação (24) pode-se deduzir que quando a frequência monitorada é muito pequena a voltagem medida também é muito pequena. A voltagem pode aumentar acrescentando o número de espiras ou a área da antena. Porém, antenas de grande tamanho são inviáveis. Por isso, as antenas de VLF têm um tamanho bastante pequeno em relação ao comprimento de onda a detectar.

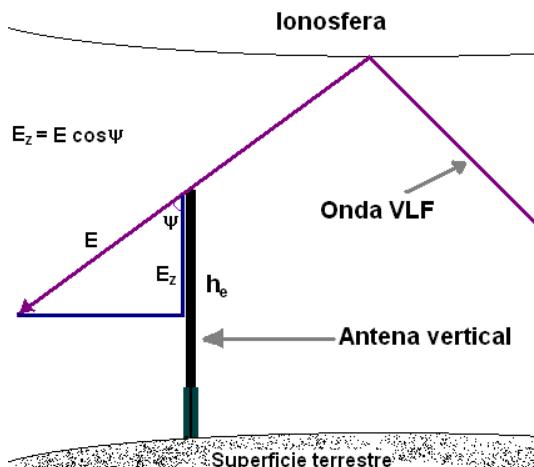


FIGURA 9 - Interação entre o campo elétrico da onda de VLF e a antena vertical. (Fonte: adaptado de WATT (1967), p. 401).

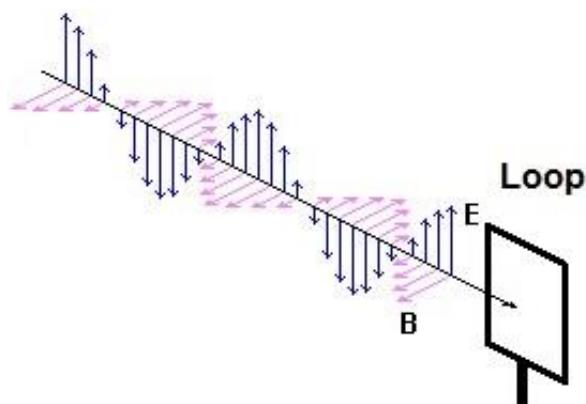


FIGURA 10 - Interação entre o campo magnético da onda de VLF e a antena loop.

CAPÍTULO 2 – INSTRUMENTAÇÃO E DADOS IONOSFÉRICOS

A técnica de VLF utiliza o sinal de rádio emitido por transmissores instalados em diferentes partes do mundo. O sinal propaga-se em longas distâncias dentro do guia de onda Terra-ionosfera com pouca atenuação. A variação regular diurna do sinal emitido, juntamente com a sensibilidade deste às variações da condutividade elétrica da ionosfera, torna o monitoramento da propagação de ondas de VLF uma ferramenta útil para o estudo da baixa ionosfera. No estudo foram utilizados dados da fase e amplitude do sinal de VLF. A ferramenta utilizada para ler, filtrar e visualizar os dados foi o IDL (*Interactive Data Language*), que é uma linguagem de programação científica que permite o desenvolvimento de programas conforme a necessidade do estudo desenvolvido. Juntamente com o IDL, também foram utilizadas rotinas do SSW (*SolarSoftWare*). O SSW fornece um conjunto de programas que ajudam na análise no campo da física solar. A descrição da instrumentação que monitora o sinal de VLF e os dados utilizados no estudo são explicados a seguir.

2.1 A Rede SAVNET

A rede SAVNET (*South America VLF NETwork*) é um conjunto de receptores de VLF instalados em diferentes localizações na América do Sul e na Antártica, em operação desde o ano 2006 (RAULIN et al., 2009). A rede monitora a condutividade elétrica da baixa ionosfera utilizando o sinal emitido por transmissores instalados nos Estados Unidos da América e na Austrália. Os dados coletados pela SAVNET são armazenados com uma resolução temporal de um segundo. Alguns dos objetivos científicos da rede são: (i) monitoramento contínuo e de longo prazo da atividade solar, (ii) estudo da anomalia magnética do atlântico sul, (iii) estudo da baixa ionosfera e (iv) estudo de fenômenos atmosféricos e naturais. A FIGURA 11 mostra a posição dos receptores da SAVNET (triângulos vermelhos) e dos transmissores de VLF instalados na América do Norte e a Austrália (losangos verdes).

Cada estação receptora da SAVNET é composta por quatro antenas: uma antena de GPS (*Global Positioning System*), cuja finalidade é proporcionar um sinal muito preciso em

tempo. Uma antena vertical e duas antenas loops que são sensíveis à variação do campo elétrico e magnético da onda de VLF, respectivamente. A FIGURA 12a mostra o diagrama da configuração das quatro antenas que compõem os receptores da rede SAVNET. Essa figura mostra que os sinais das antenas são amplificados, digitalizados e armazenados em um computador. No caso dos receptores da SAVNET, a fase e a amplitude do sinal de VLF são calculadas a cada 1 segundo utilizando o SoftPAL (*Software Phase and Amplitude Logger*) (DOWDEN e ADAMS, 2008). A FIGURA 12b apresenta as antenas de VLF instaladas na estação receptora de PLO (Peru). Nesta figura as orientações leste-oeste e norte-sul dos loops estão especificadas com as letras E-W e N-S, respectivamente.

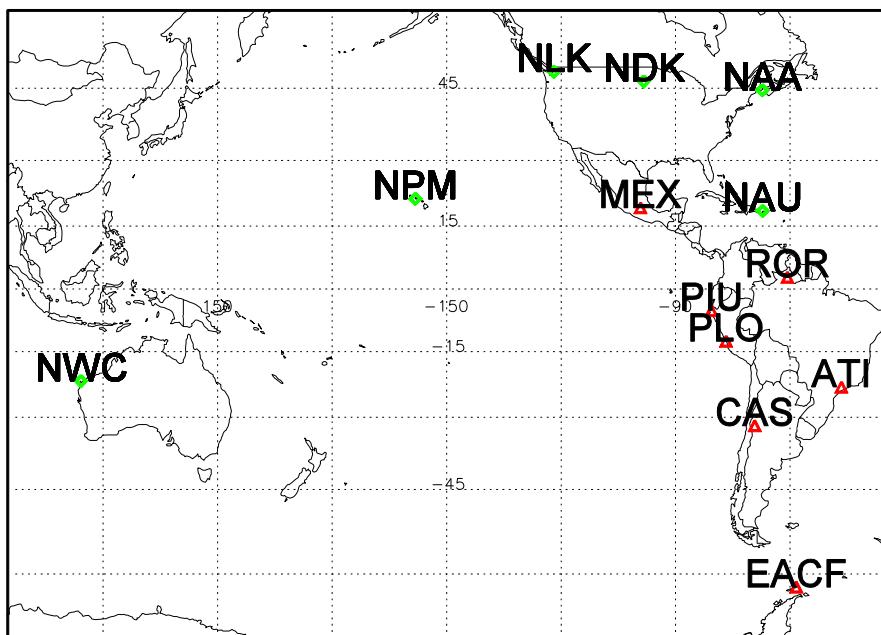


FIGURA 11 – Posição dos receptores da SAVNET (triângulos vermelhos) e dos transmissores de VLF (losangos verdes).

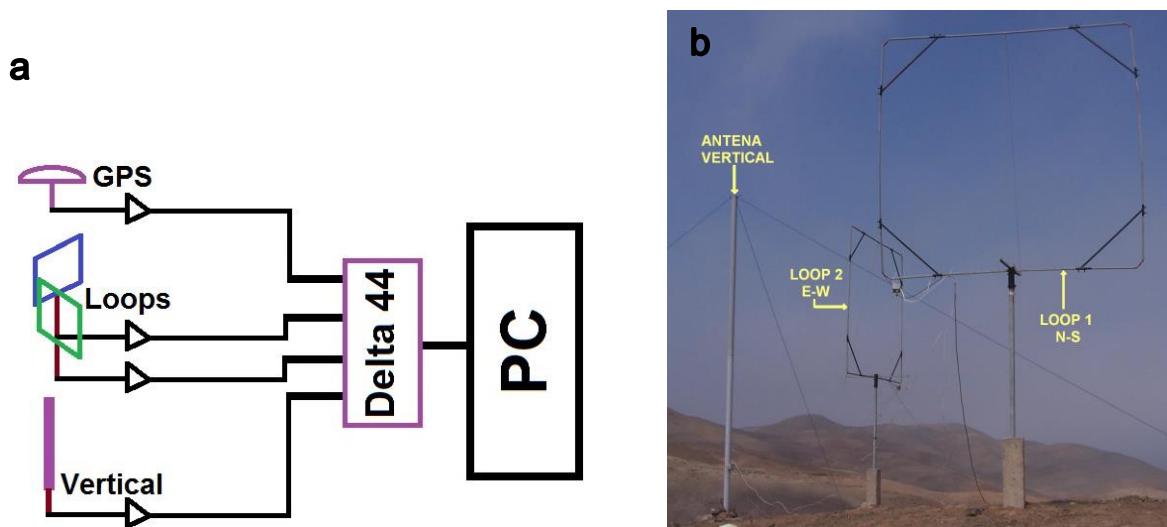


FIGURA 12 – Configuração dos receptores da rede SAVNET (a) e as antenas instaladas na estação de PLO (b).

2.2 Dados Ionosféricos: VLF

No estudo foram utilizados os sinais de VLF emitidos pelos transmissores NAA e NPM e coletados pelos receptores da SAVNET do Peru, Argentina, Brasil e Antártica. Na região de São Paulo (Brasil) e na Estação Antártica Comandante Ferraz também operam receptores que utilizam a tecnologia do sistema AWESOME (*Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modeling and Education*, (COHEN et al., 2010)). Estes receptores iniciaram operação no ano 2006 e desde então armazenam dados com uma resolução temporal de 20 ms. Os dados fornecidos por estes últimos receptores foram utilizados somente para corroborar as medições feitas pela SAVNET ou quando o monitoramento da SAVNET foi interrompido (e.g. manutenção, etc.). Os transmissores T_x e receptores R_x de VLF utilizados para o desenvolvimento da pesquisa são apresentados na TABELA 2. Esta tabela apresenta a localização das estações, a frequência f e a potência P_r de operação dos transmissores e as distâncias desde os receptores até os transmissores d_{NAA} e d_{NPM} , respectivamente.

TABELA 2 - Localização dos transmissores e receptores de VLF, frequência e potência de operação dos transmissores e a distância de separação entre os transmissores e receptores.

	ID	Coordenadas [°]	f [kHz]	P_r [kW]
TX	NPM - Havaí	21,4 N 158,1 W	24,4	1000
	NAA - Cutler	44,7 N 67,3 W	24,0	600
RX SAVNET		Coordenadas [°]	d_{NAA} [Mm]	d_{NPM} [Mm]
	PLO – Punta Lobos	12,5 S 76,8 W	6,46	9,64
	CAS – Casleo	31,8 S 69,3 W	8,54	11,19
	ICA – Ica	14,0 S 75,7 W	-	9,86
RX AWESOME	ATI – Atibaia	23,2 S 46,5 W	7,87	13,04
	ROI – Radiobservatório do Itapetinga	23,2 S 46,5 W	-	13,04
	EACF – Estação Antártica Comandante Ferraz	62,1 S 58,4 W	-	12,66

O monitoramento contínuo da baixa ionosfera durante vários dias quiescentes mostra que a variação diurna da fase e da amplitude do sinal de VLF é estável e reproduzível. Essa variação diurna é conhecida como nível quiescente ou de referência (ϕ_0 e A_0 para a fase e a amplitude, respectivamente). O nível quiescente é o nível observado quando a baixa

ionosfera não está influenciada por nenhuma fonte capaz de alterar sua condutividade elétrica. A FIGURA 13 mostra a variação diurna quiescente da fase (a) e da amplitude (b) do trajeto NAA-PLO, cuja propagação é na direção norte-sul.

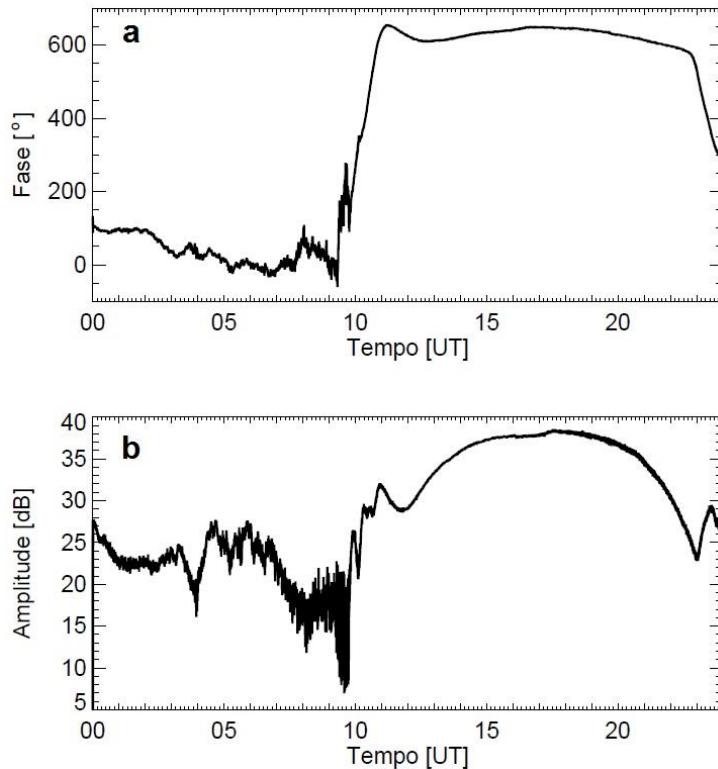


FIGURA 13 – Evolução temporal da variação quiescente da fase (a) e da amplitude (b) para o dia 28 de março de 2008 propagado no trajeto NAA-PLO.

Quando acontecem mudanças repentinas da condutividade elétrica da baixa ionosfera, esta é observada como repentinas anomalias na fase (SPA, *Sudden Phase Anomaly*) ou na amplitude (SFA, *Sudden Field Anomaly*) do sinal de VLF. A medida da variação observada ($\Delta\phi$ e ΔA , respectivamente) é calculada a partir da variação absoluta ou relativa do sinal com respeito de seu nível quiescente. A FIGURA 14 mostra a anomalia observada na fase do sinal de VLF de 24 kHz produzido por uma explosão solar (curva cor vermelha) e sua respectiva variação quiescente diurna.

A reprodutibilidade das medições obtidas por diferentes receptores de VLF é mostrada na FIGURA 15. Esta figura apresenta SPAs observados nos sinais de VLF propagados nos trajetos NPM-ATI, NPM-ROI, NPM-PLO e NPM-ICA, onde as barras representam um erro de $3\sigma_\phi$, sendo σ_ϕ o desvio padrão da diferença entre a fase perturbada e o nível quiescente do sinal, e a reta é a resultante do ajuste linear dos dados observados. Os receptores de ROI e ICA estão localizados próximos dos receptores de ATI e PLO, respectivamente. A FIGURA 15

mostra ótima correlação entre as medidas dos SPAs nos diferentes trajetos; portanto, o resultado confirma a grande reproducibilidade das medições obtidas pelos receptores de VLF.

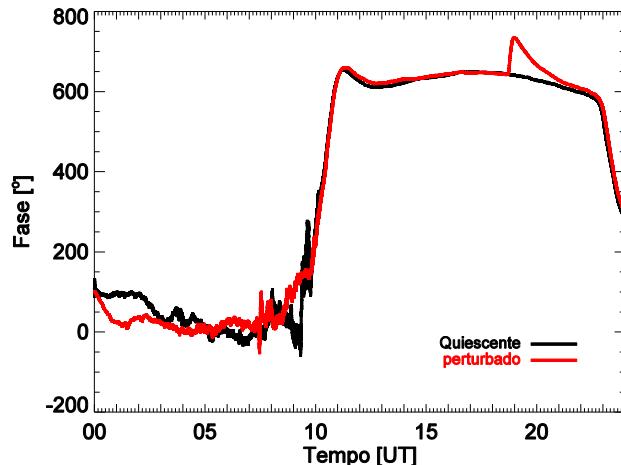


FIGURA 14 – Perturbação observada na fase do sinal de VLF, propagado no trajeto NAA-PLO, causada por uma explosão solar de ocorrida em 25 de março de 2008 às 19:00 UT, comparada com o dia quiescente mais próximo ao evento (28 de março de 2008).

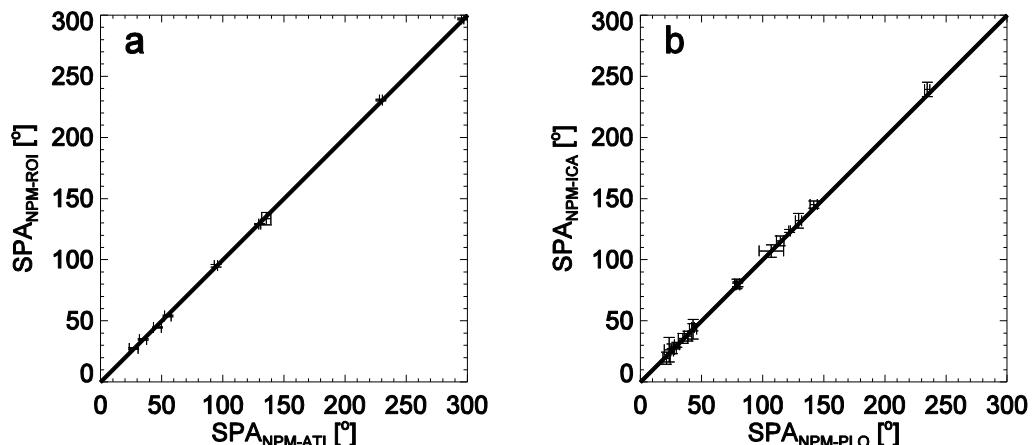


FIGURA 15 – Medida de SPAs observados nos trajetos NPM-ATI e NPM-ROI (a) e NAA-PLO e NAA-ICA (b).

CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS

Os distúrbios ionosféricos são produzidos por fenômenos capazes de modificar a condutividade elétrica da baixa ionosfera. O efeito do distúrbio ionosférico observado no sinal de VLF depende das características de propagação. Algumas dessas características são: a frequência do sinal emitido pela antena transmissora, o comprimento e as condições de iluminação do trajeto de propagação. Portanto, a primeira parte deste capítulo apresenta o procedimento de normalização dos SPAs para trajetos com a mesma direção de propagação. Normalizar os SPAs permitirá conhecer o efeito do distúrbio na ionosfera. Para que a ionosfera seja perturbada significativamente a energia da fonte que gera a perturbação tem que ser superior ao limiar da sensibilidade ionosférica. Em vista disso, o estudo sobre a sensibilidade da baixa ionosfera durante a noite e durante o dia é apresentada na segunda parte do capítulo. Os resultados deste estudo determinarão a fluênciá mínima capaz de causar uma perturbação da condutividade elétrica da baixa ionosfera. As perturbações ionosféricas podem também produzir mudanças periódicas no sinal de VLF. Assim, uma análise das periodicidades observadas no sinal de VLF é apresentada na terceira parte do capítulo, onde se determina sua associação com os fenômenos geofísicos, e.g. terremotos e eclipses solares. Em relação aos eclipses solares, as variações de h' , N_e e α_{eff} produzidos pelo eclipse de 2010 são apresentadas na última parte do capítulo.

3.1 Normalização dos Distúrbios Ionosféricos Medidos em Diferentes Trajetos de Propagação

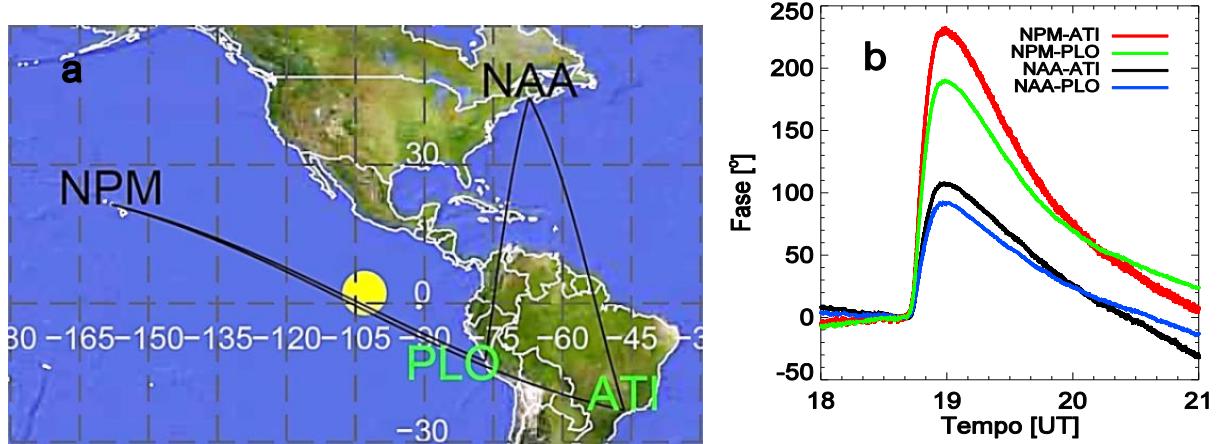
O sinal de VLF se propaga em longas distâncias dentro do guia de onda Terra-ionosfera, atravessando regiões com condições de iluminação diferentes. As condições de iluminação dependem do comprimento da porção do trajeto iluminado (d_{ilu}) pela fonte ionizante e do ângulo zenital χ da fonte ionizante. As condições de iluminação para cada trajeto de propagação de VLF são diferentes, porém o efeito produzido na ionosfera deveria ser medido independentemente das características da trajetória de propagação. Assim, neste

estudo determina-se o procedimento de normalização dos SPAs causados por explosões solares para trajetos de VLF com igual direção de propagação. Com isto, evita-se a influência da direção de propagação na medição dos SPAs.

Para escolher um método de normalização foram utilizados os sinais propagados nos trajetos NAA-PLO, NAA-ATI, NPM-PLO e NPM-ATI, no período entre abril de 2007 e novembro de 2011. Neste período foram selecionados 14 SPAs, cujas características são resumidas na TABELA 3. Esses eventos foram observados simultaneamente quando os quatro trajetos de VLF estavam totalmente iluminados pelo Sol no tempo do máximo da explosão solar. Assim, para os eventos aqui estudados, d_{ilu} é a distância entre o transmissor e o receptor. A configuração espacial dos quatro trajetos de VLF é mostrada na FIGURA 16a, onde o círculo amarelo indica a posição do Sol no dia 25 de março de 2008 às 19:00 UT. Na figura, pode-se observar que os trajetos NAA-ATI e NAA-PLO têm maior componente norte-sul e os trajetos NPM-PLO e NPM-ATI maior componente oeste-leste. A figura mostra também que os dois primeiros trajetos de propagação não são paralelos entre si, ao contrário dos trajetos NPM-PLO e NPM-ATI. A FIGURA 16b mostra o efeito da explosão solar de classe M1.7 do dia 25 de março de 2008 medido nos quatro trajetos de propagação. Nesta figura pode-se observar que a variação de fase produzida pela explosão depende de d_{ilu} (ver TABELA 2), sendo menor para d_{ilu} menores.

TABELA 3 – Dia, tempo e classe do evento que produziram SPAs medidos no sinal propagado nos trajetos NPM-ATI, NPM-PLO, NAA-ATI e NAA-PLO e seus respectivos erros de medição.

Nº	Data	Tempo [UT]	Classe	SPA _{NPM-ATI} [°]	SPA _{NPM-PLO} [°]	SPA _{NAA-ATI} [°]	SPA _{NAA-PLO} [°]
1	20070710	17:58	C5.2	154,8 (2,0)	121,2 (0,8)	74,2 (0,8)	56,7 (0,6)
2	20080325	18:59	M1.7	229,3 (2,4)	189,0 (0,6)	107,5 (1,2)	91,5 (0,6)
3	20100119	17:59	C5.1	135,6 (7,6)	105,7 (2,0)	73,5 (3,6)	59,7 (1,4)
4	20100206	19:03	M2.9	287,8 (4,4)	234,6 (1,6)	147,3 (3,6)	119,7 (1,2)
5	20100327	18:31	C3.8	94,4 (2,8)	79,5 (0,8)	43,8 (1,6)	37,3 (0,8)
6	20100807	18:31	M1.0	129,5 (1,6)	105,4 (0,4)	53,3 (0,4)	42,4 (0,6)
7	20110308	18:29	M4.4	293,5 (3,2)	241,8 (2,2)	163,2 (1,0)	135,1 (1,0)
8	20110310	19:10	C4.0	88,2 (2,0)	73,3 (0,8)	36,4 (1,8)	34,1 (0,8)
9	20110315	17:37	C2.9	46,3 (2,0)	35,6 (1,0)	29,4 (0,6)	24,7 (0,8)
10	20110729	18:06	C3.2	55,1 (5,4)	45,1 (0,6)	27,1 (0,6)	21,6 (0,4)
11	20110805	17:49	C1.8	44,7 (6,0)	34,5 (0,4)	19,5 (0,4)	14,8 (0,6)
12	20110808	18:11	M3.5	244,4 (6,4)	196,6 (0,6)	127,8 (0,6)	104,9 (0,6)
13	20110901	18:23	C2.0	34,3 (5,6)	29,9 (0,6)	12,8 (0,6)	12,1 (0,8)
14	20110903	17:38	C2.5	27,1 (7,2)	22,1 (0,6)	12,8 (0,6)	10,3 (0,8)



Para uma análise dos SPAs independente da direção de propagação foram analisados separadamente os trajetos NAA-ATI e NAA-PLO dos trajetos NPM-ATI e NPM-PLO. A FIGURA 17 mostra os 14 eventos de avanço de fase, normalizados pela respectiva distância d_{ilu} , observados nos trajetos norte-sul (FIGURA 17a) e nos trajetos oeste-leste (FIGURA 17b). As barras de erro representam três desvios padrão ($3\sigma_\phi$) da diferença de fase entre o máximo da perturbação e o nível quiescente do sinal de VLF. Em cada figura, as linhas tracejadas representam avanços de fase normalizados, independentes do trajeto utilizado.

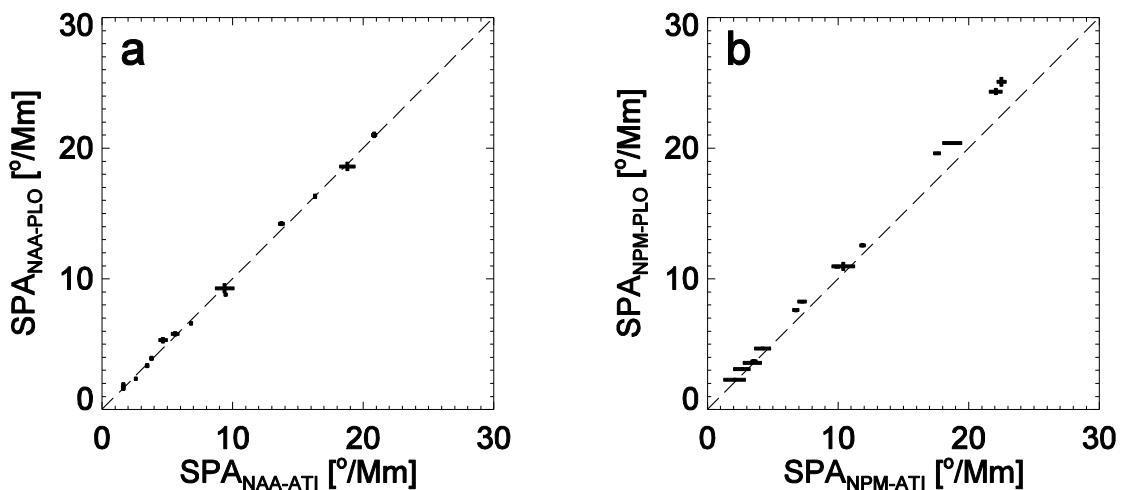


FIGURA 17 – Correção pela distância iluminada dos SPAs observados nos trajetos NAA-ATI e NAA-PLO (a) e NPM-ATI e NPM-PLO (b). As linhas tracejadas representam avanços de fase normalizados, independentes do trajeto utilizado.

A FIGURA 17 mostra que os SPAs normalizados pela distância d_{ilu} são iguais para os dois trajetos com direção norte-sul. Entretanto, para trajetos com direção oeste-leste os resultados não são os mesmos, o que sugere a existência de uma outra dependência influenciando nas medidas dos SPAs. Na FIGURA 17b pode-se observar que a normalização

dos SPAs pela distância iluminada resulta em variações de fase maiores para o trajeto NPM-PLO quando comparada com os valores obtidos para o trajeto NPM-ATI.

A FIGURA 18 mostra a variação de χ ao longo de cada um dos quatro trajetos de propagação para o dia 08 de março de 2011 às 18:29 UT. A figura mostra que a variabilidade de χ é mais importante para os trajetos com direção de propagação oeste-leste. Assim, a seguir será analisada a dependência entre o valor do SPA medido e o ângulo zenital χ . Como o ângulo zenital depende da posição entre o transmissor e o receptor, cada trajeto foi dividido em $N = 500$ partes iguais e em cada porção um ângulo χ_i ($i = 1$ até 500) foi calculado.

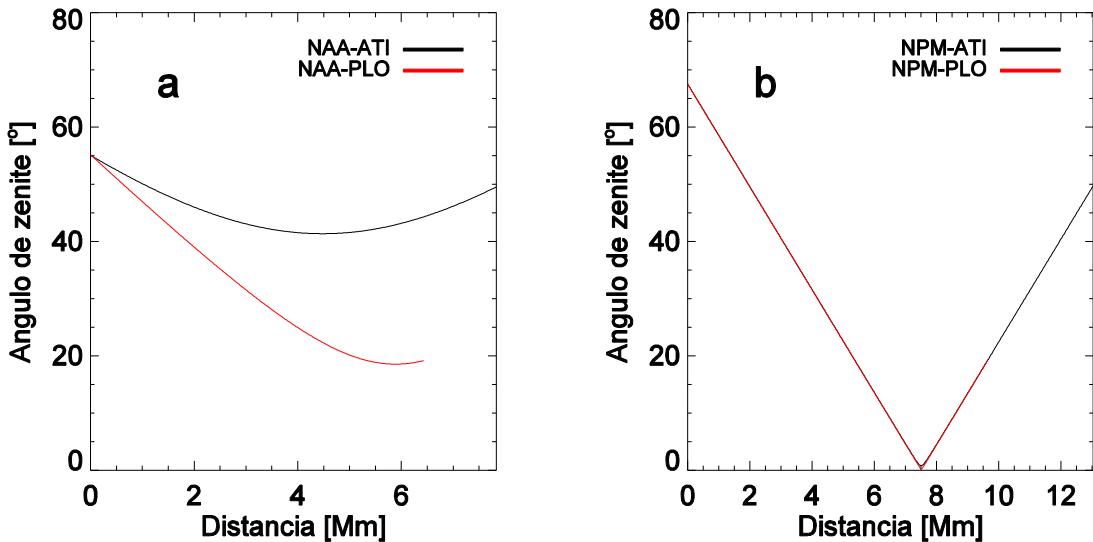


FIGURA 18 – Variação de χ ao longo dos trajetos NAA-ATI (linha preta) e NAA-PLO (linha vermelha) **(a)** e ao longo dos trajetos NPM-ATI (linha preta) e NPM-PLO (linha vermelha) **(b)**.

Assim, para determinar o tipo de dependência do SPA medido com o ângulo zenital χ foram utilizadas as seguintes relações:

$$\Delta\phi_f = \frac{\Delta\phi}{d_{ilu}} (1/\cos(\bar{\chi})) \quad (25)$$

$$\Delta\phi_f = \frac{\Delta\phi}{d_{ilu}} (1/\cos(\chi_{min})) \quad (26)$$

$$\Delta\phi_f = \frac{\Delta\phi}{Nd_{ilu}} \sum_{i=0}^N 1/\cos\chi_i \quad (27)$$

$$\Delta\phi_f = \frac{\Delta\phi}{Nd_{ilu}} \sum_{i=0}^N 1/(1 - k \log(1/\cos\chi_i)) \quad (28)$$

$$\Delta\phi_f = \frac{\Delta\phi}{Nd_{ilu}} \sum_{i=1}^N (h'_i / 70,55) \quad (29)$$

sendo $\Delta\phi_f$ a variação de fase final, $\Delta\phi$ a variação de fase observada, $\bar{\chi}$ e χ_{min} os ângulos zenitais médio e mínimo obtidos a partir das N partes em que foi dividido o trajeto de propagação. k é um coeficiente determinado de forma empírica por Comarmond, (1977), cujo valor é 0,66, e h'_i é a altura de referência do elemento i do trajeto obtido a partir de (adaptado de MCRAE e THOMPSON, 2000):

$$h'_i = 70,55 + 0,045\chi_i + 1,27\chi_i^2 - 0,774\chi_i^3 + 3,115\chi_i^4 + 0,595\chi_i^5 - 1,491\chi_i^6 - 0,122\chi_i^7 + 0,268\chi_i^8 \quad (30)$$

O resultado de cada um desses procedimentos é mostrado na FIGURA 19, onde as curvas contínuas de cor preta representam os ajustes lineares dos valores de $\Delta\phi_f$ utilizando as equações (25), (26) e (27). As curvas de cores verde e vermelho mostram os ajustes lineares dos valores de $\Delta\phi_f$ aplicando as equações (28) e (29), respectivamente. Para os trajetos com direção norte-sul, os resultados mostram valores de $\Delta\phi_f$ diferentes, exceto para a equação 29. Para os trajetos com direção oeste-leste, os valores de $\Delta\phi_f$ obtidos com o trajeto NPM-PLO são sistematicamente maiores que os valores obtidos com o trajeto NPM-ATI. Assim, foi considerado que a melhor normalização dos valores de fase $\Delta\phi_f$ é obtida pela equação (29), embora não seja totalmente satisfatória para os trajetos de propagação com direção oeste-leste como indicado Na FIGURA 19b.

Para uma análise mais detalhada da normalização dos SPAs registrados no sinal propagado em trajetos com direção oeste-leste, foram utilizados SPAs observados simultaneamente em NPM-PLO e NPM-CAS. Dentre os 14 eventos estudados nesta seção, 12 foram observados por estes dois trajetos de VLF. A FIGURA 20a e a FIGURA 20b mostram, respectivamente, os SPAs observados nos trajetos NPM-ATI e NPM-PLO e nos trajetos NPM-CAS e NPM-PLO, já normalizados segundo a equação (29). Pode-se observar que a correlação dos valores de $\Delta\phi_f$ obtidos com a equação (29) é melhor para a comparação do trajeto NPM-PLO com

NPM-CAS do que com NPM-ATI. Este resultado reforça a ideia de que o método pelo qual os SPAs devem de ser normalizados é aquele definido na equação (29). A discrepância notada comparando as FIGURAS 20a e 20b pode ser melhor compreendida lembrando que parte do trajeto de propagação NPM-ATI atravessa a região central da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS¹), enquanto os trajetos NPM-PLO e NPM-CAS não atravessam essa região.

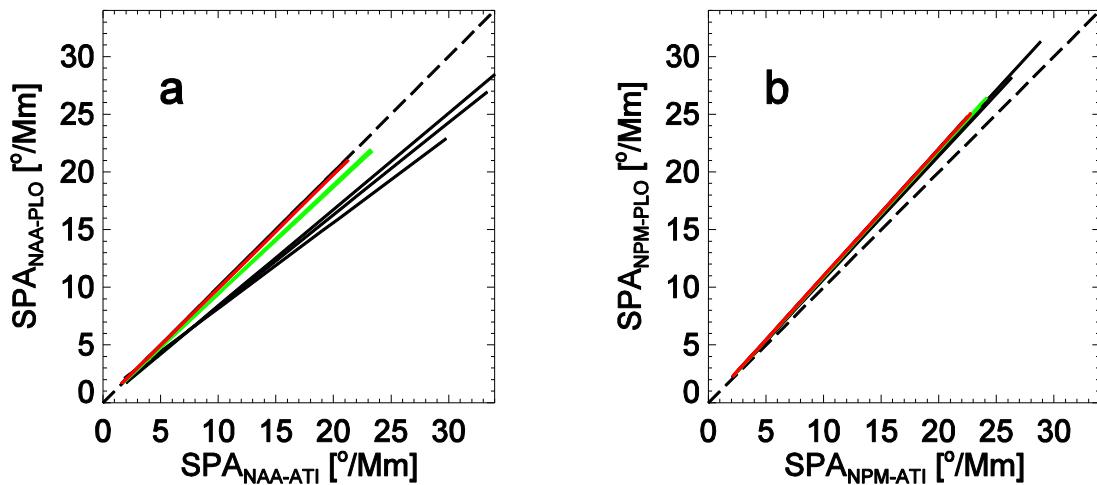


FIGURA 19 – Ajuste linear das correções dos SPAs por $\bar{h}'/70,55/d_{ilu}$ (curva cor vermelha), $1/(1 - k \log(1/\cos\chi))/d_{ilu}$ (curva cor verde) e $1/\cos(\chi)/d_{ilu}$, $\frac{1}{\cos(\chi)d_{ilu}}$ e $\frac{1}{\cos(\chi_{min})d_{ilu}}$ (curvas contínuas cor preta) para os trajetos NAA-ATI e NAA-PLO (a) e NPM-ATI e NPM-PLO (b). As linhas tracejadas representam avanços de fase normalizados independentes do trajeto utilizado.

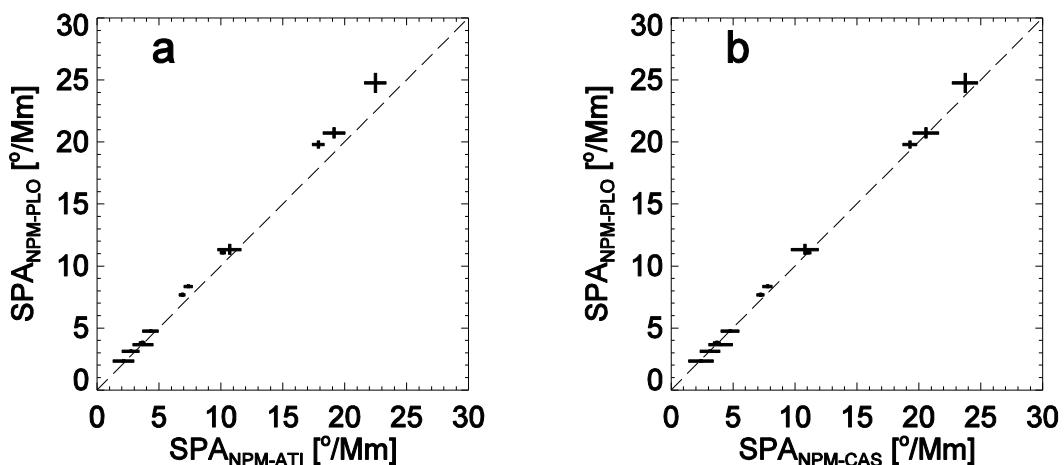


FIGURA 20 – SPAs normalizados por $\bar{h}'/70,55/d_{ilu}$ para os trajetos NPM-ATI e NPM-PLO (a) e para os trajetos NPM-PLO e NPM-CAS (b). As barras de erro horizontais e verticais correspondem a $3\sigma_\theta$ da diferença da fase perturbada e quiescente e as linhas tracejadas representam avanços de fase normalizados independentes do trajeto utilizado.

¹ Região da Terra onde a intensidade do campo geomagnético apresenta valores mais baixos do que os esperados para essa região.

A FIGURA 21 mostra o mapa global da intensidade do campo geomagnético para a época de 2015, onde o contorno de 25000 nT indica os limites da AMAS. A disposição espacial dos cinco trajetos de propagação estudados, também ilustrados no mapa, confirma o comentário do parágrafo anterior. A respeito dos trajetos NPM-ATI e NPM-PLO, o receptor de PLO localiza-se no limite externo da região da AMAS, enquanto que o receptor de ATI localiza-se na parte central desta região. Portanto, a parte do trajeto de VLF localizada entre PLO e ATI pode ter a sua altura de referência alterada devido a uma ionização anômala.

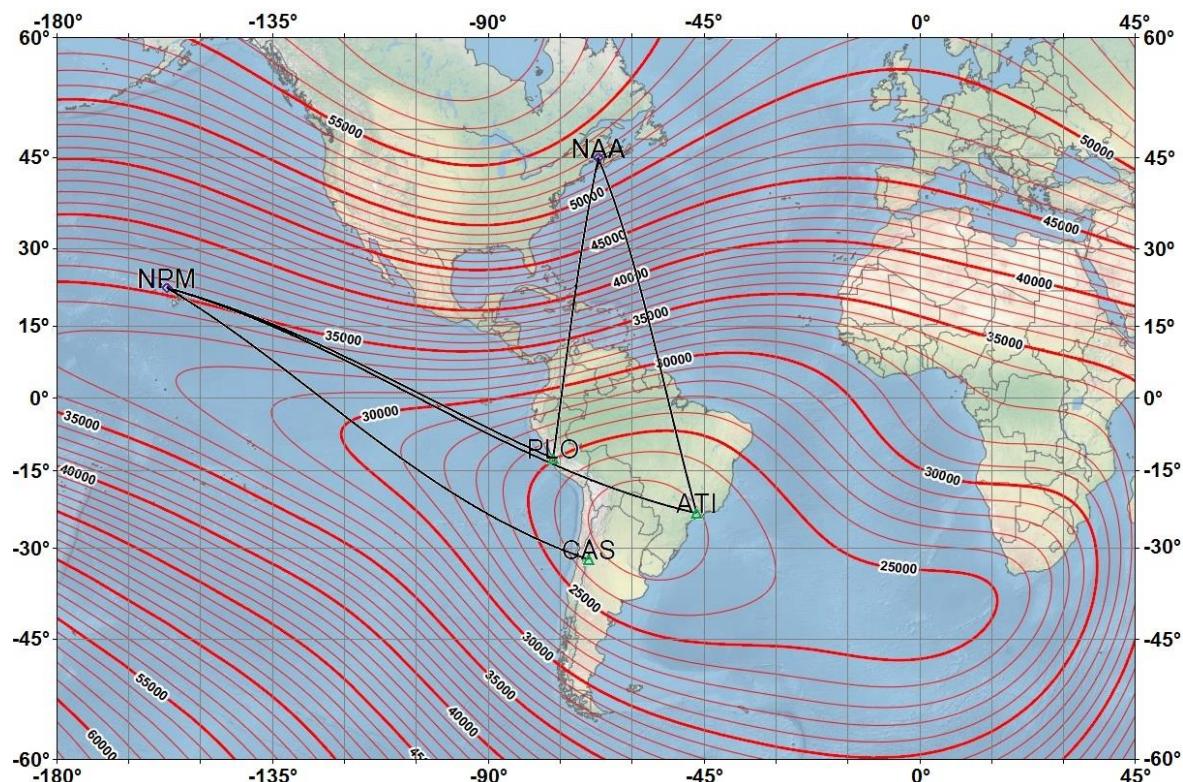


FIGURA 21 – A intensidade do campo geomagnético para o ano 2015, onde o contorno de 25000 nT mostra a região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). A configuração dos trajetos NPM-ATI, NPM-PLO, NPM-CAS, NAA-ATI e NAA-PLO com respeito da AMAS é mostrado pelas linhas contínuas cor preta (**Fonte:** adaptado de http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2015/WMM2015_F_MERC.pdf).

Para estimar quão diferente seria a altura de referência na parte do trajeto entre PLO e ATI com respeito de $h' = 70,55$ km, altura de referência suposta para a região-D ionosférica, foi determinada a diferença entre a variação de fase esperada e a observada no receptor ATI. Esta diferença foi introduzida na equação (21), que relaciona as variações de fase com a variação da altura de referência, para estimar a diferença $\Delta h'$ da altura de referência com respeito a h' para cada um dos 14 eventos. Os valores de $\Delta h'$ são mostrados na FIGURA 22, onde as barras de erro representam $1,5\sigma_\phi$, e σ_ϕ é o RMS do sinal VLF não perturbado. A figura mostra que para 8 eventos os valores de $\Delta h'$ são significativos entre 1 e 3,4 km. Assim,

a altura de referência quiescente na parte do trajeto PLO-ATI é menor do que na parte NPM-PLO. Esses valores obtidos são os esperados para uma influência devida a AMAS. Os maiores valores de $\Delta h'$ correspondem aos eventos 1, 3, 6 e 11, que são os eventos mais intensos (eventos $\geq M1.7$). Finalmente, foi verificado que os resultados mostrados na FIGURA 22 são independentes do valor de h' adotado entre 70 e 75 km.

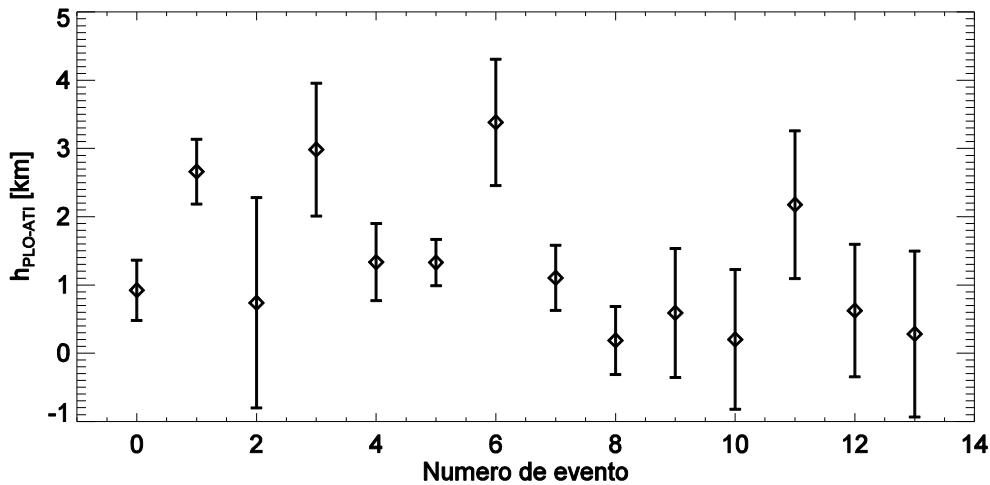


FIGURA 22 – Diferença da altura de referência quiescente para PLO-ATI com respeito à altura de referência de 70,55 de NPM-PLO para cada um dos 14 eventos estudados.

O fluxo de partículas ionizantes que ingressam pela região da AMAS deve afetar todos os trajetos de propagação que atravessam essa região da Terra, em especial o sinal de VLF recebido em ATI. Na FIGURA 21 pode-se observar que parte dos trajetos NPM-CAS e NAA-ATI localiza-se na região da AMAS. Porém, estes trajetos não atravessam o centro da AMAS. Portanto, o efeito de uma ionização anômala é menos significativa nestes trajetos do que no trajeto PLO-ATI. Dos resultados da FIGURA 19a (curva vermelha) e da FIGURA 20b pode-se afirmar que tal efeito encontra-se na incerteza das medições do sinal de VLF. Portanto, com este estudo se observa a possível influência da AMAS na medição dos SPAs.

A FIGURA 23 mostra a comparação dos SPAs normalizados segundo a equação 29 para cada um dos cinco trajetos de propagação estudados. Nesta figura pode-se observar que, embora os SPAs tenham sido normalizados, os valores obtidos para os trajetos norte-sul (NAA-ATI, NAA-PLO) são geralmente menores que para os trajetos oeste-leste (NPM-CAS, NPM-ATI, NPM-PLO). A figura sugere uma dependência do valor do SPA com a direção de propagação, embora o evento número 4 tenha o mesmo valor de SPA normalizado para os cinco trajetos de propagação estudados e o evento número 9 seja menor do valor esperado para trajetos com direção oeste-leste. A figura também mostra que essa dependência é maior quando o

valor do SPA é maior. Sobre os valores obtidos para os eventos número 4 e 9, a figura sugere que é possível que existam anomalias na aeronomia da baixa ionosfera mais próximas ao transmissor, que ainda precisam ser estudadas.

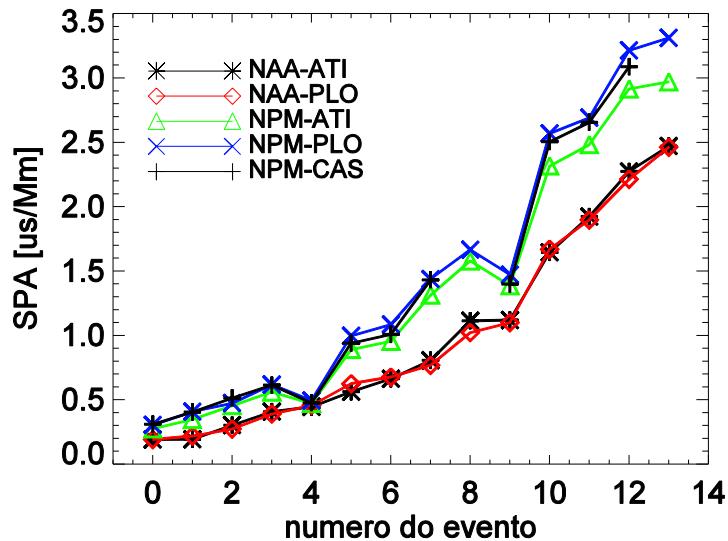


FIGURA 23 – Comparação dos SPAs normalizados segundo a equação 29 para os trajetos NAA-ATI, NAA-PLO, NPM-ATI, NPM-PLO e NPM-CAS.

3.2 Sensibilidade Ionosférica a Distúrbios Produzidos pelo Fluxo Explosivo em Raios-X

Distúrbios ionosféricos causados pelo excesso de ionização devido a explosões em raios-X são observados no sinal de VLF se houver mudanças significativas da condutividade elétrica da baixa ionosfera. Os excessos de ionização que afetam a baixa ionosfera diurna são produzidos pelo fluxo de raios-X com comprimento de onda menor de 2 Å, emitido durante explosões solares (PACINI e RAULIN, 2006), enquanto que, a baixa ionosfera noturna é afetada pela emissão em raios-X emitidos durante surtos de estrelas magnéticas. Nesta parte do trabalho se determinará o fluxo mínimo F_{min} em raios-X capaz de produzir distúrbios na baixa ionosfera. Também se analisará a mudança de F_{min} em curtas e longas escalas temporais. Com este fim, se examinará sua dependência com as condições de iluminação do trajeto monitorado e com o ciclo de atividade solar. Este estudo permitirá conhecer a classe de eventos que podem ser observados tanto no monitoramento ionosférico noturno quanto no diurno.

3.2.1 A ionosfera noturna

Os surtos de estrelas magnéticas liberam energia de até 10^{10} vezes maiores do que a maior explosão solar já registrada. No presente estudo foram utilizados os surtos de estrelas magnéticas detectadas pelo escudo de anti-coincidência do espectrômetro para Integral (ACS/SPI: *Anti-Coincidence Shield of SPectrometer for INTEGRAL*) instalado no satélite INTEGRAL (*INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*). O INTEGRAL iniciou operações no ano 2002 e orbita a uma altitude de 86.000 km. O ACS/SPI mede as contagens acima da energia limiar de ~ 80 keV ($< 0,15 \text{ \AA}$) com uma resolução temporal de 50 ms (VON KIENLIN et al., 2003). Os dados do ACS/SPI foram obtidos do IBAS (*INTEGRAL Burst Alert System*, <http://www.isdc.unige.ch/integral/science/grb#ACS>). O IBAS é um *software* de rápida distribuição das coordenadas de surtos detectados pelo INTEGRAL (MEREGHETTI et al., 2003).

No dia 22 de janeiro de 2009 o objeto celeste SGR-J1550-5418 emitiu uma série de surtos em raios-X que foram detectados pelo ACS/SPI e que iluminou o hemisfério sul da Terra. No estudo foi utilizado o sinal de VLF propagado nos trajetos NPM-EACF e NPM-ROI. Para o dia de observação os trajetos de VLF estiveram totalmente nas condições noturnas após as 04:15 UT; e após as 08:20 UT já não foram detectados mais surtos de longa duração (> 6 segundos) pelo ACS/SPI. Assim, o estudo se concentra nos surtos detectados entre 04:15 e 08:20 UT. Nesta janela temporal, 55 surtos foram detectados pelo ACS/SPI. Para cada um destes surtos a fluênciá foi estimada seguindo os procedimentos descritos por Mereghetti et al. (2009) e Raulin et al. (2014). A fluênciá é a quantidade do fluxo depositada na baixa ionosfera durante a explosão, definida como:

$$F = \int_{t_i}^{t_f} f_x(t) dt \quad (31)$$

onde $f_x(t)$ é a variação temporal do fluxo de raios-X e t_i e t_f é o tempo do início e fim da explosão, respectivamente. Como o ACS/SPI não tem resolução de energia, Mereghetti et al. (2009) adotaram o espetro Bremsstrahlung térmico opticamente fino (OTTB, *Optically Thin Thermal Bremsstrahlung*) com $k_B T = 40$ keV para converter a taxa de contagens do ACS em Fluênciá. Com essa suposição, a fluênciá F_{25} (faixa de energia entre 25 keV e 2 MeV) foi estimada por eles para cada surto. Raulin et al. (2014) determinaram um fator de conversão

k utilizando o valor médio de nove explosões simples, em comum com Mereghetti et al. (2009), a fim de converter o total de contagens C para F_{25} .

Utilizando as amplitudes do sinal emitido por NPM e registradas nas estações receptoras EACF e ROI, para cada surto em raios-X foram medidos os excessos significativos ΔA , ou seja, que excedem o valor de $3\sigma_A$ do nível quiescente A_0 . A FIGURA 24 mostra os trajetos de propagação de VLF NPM-EACF e NPM-ROI (linhas finas brancas). Os círculos amarelo e preto representam a projeção do Sol e do magnetar na superfície da Terra, respectivamente, para o dia do evento, às 05:18 UT. As áreas azul-escura e azul-clara indicam, respectivamente, as regiões em condições noturnas e de iluminação solar. A região da Terra iluminada pela explosão do magnetar está localizada ao sul da linha preta.

Para conhecer a variação temporal das condições de iluminação de cada um dos trajetos de propagação no período de tempo escolhido, foi calculado o fator de iluminação. Este fator é o produto entre o ângulo zenital médio ao longo do trajeto $\bar{\chi}$ e o comprimento da porção do trajeto iluminado pelo surto do magnetar d_{ilu} . A FIGURA 24 mostra a fluênciia F_{25} de cada um dos 55 surtos em raios-X. Estes surtos produziram (losangos verdes) ou não (losangos vermelhos) variações significativas da amplitude do sinal de VLF propagado nos trajetos NPM-EACF (a) e NPM-ROI (b). As curvas pretas mostram a evolução temporal dos fatores de iluminação IEACF e IROI, respectivamente.

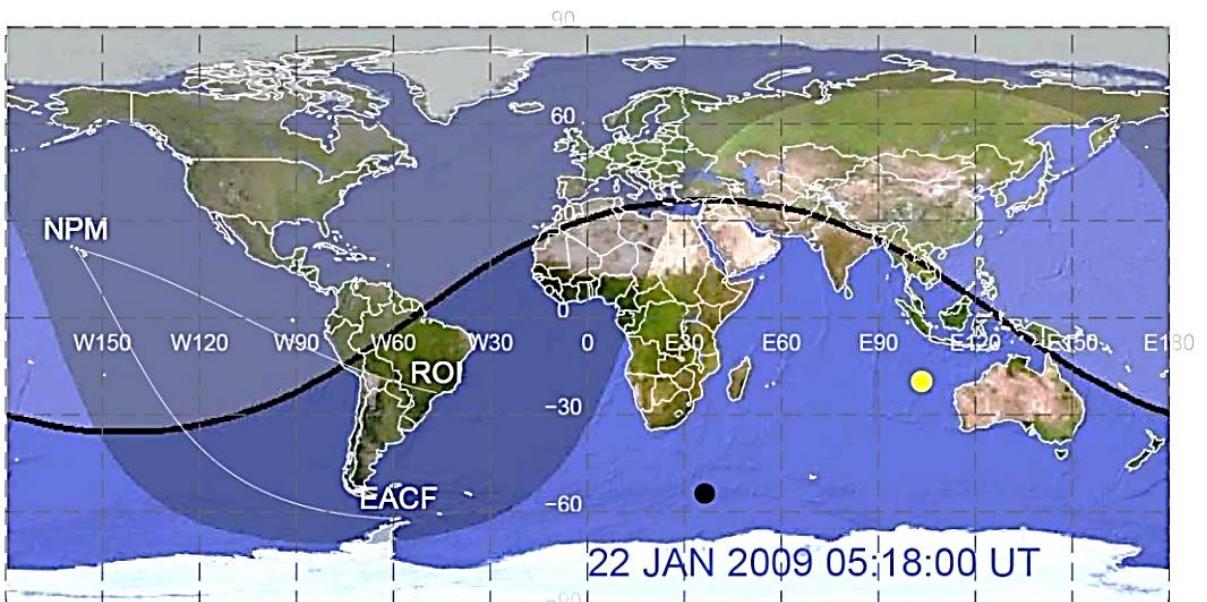


FIGURA 24 – Configuração dos trajetos de propagação, NPM-ROI e NPM-EACF (linhas finas brancas) com respeito às condições de iluminação na Terra do Sol (áreas azuis escuras e claras) e a parte afetada pela explosão do magnetar (ao sul da linha preta) no dia 22 de janeiro de 2009 às 05:18 UT.

A FIGURA 25a indica que o sinal coletado na EACF não mostrou variações significativas para fluências menores do que $\sim 10^{-9} \text{ Jm}^{-2}$, enquanto que IEACF foi sempre maior do que 1,8 Mm. A FIGURA 25b mostra que a fluência mínima que produz uma variação significativa de amplitude diminui com o tempo, enquanto IROI cresce entre 0,2 e 2,6 Mm. Para um fator de iluminação IROI maior do que 1,8 Mm, F_{min} é $\sim 10^{-9} \text{ Jm}^{-2}$, comparável para os dois trajetos estudados. Portanto, da FIGURA 25 conclui-se que: (i) a fluência mínima necessária para produzir variações da condutividade elétrica da baixa ionosfera diminui à medida que o fator de iluminação aumenta, ou seja, quando as condições de iluminação se tornam melhores, e (ii) para fatores de iluminação maiores do que 1,8 Mm, a fluência mínima necessária para produzir uma variação significativa na ionosfera é constante e da ordem de $\sim 10^{-9} \text{ Jm}^{-2}$.

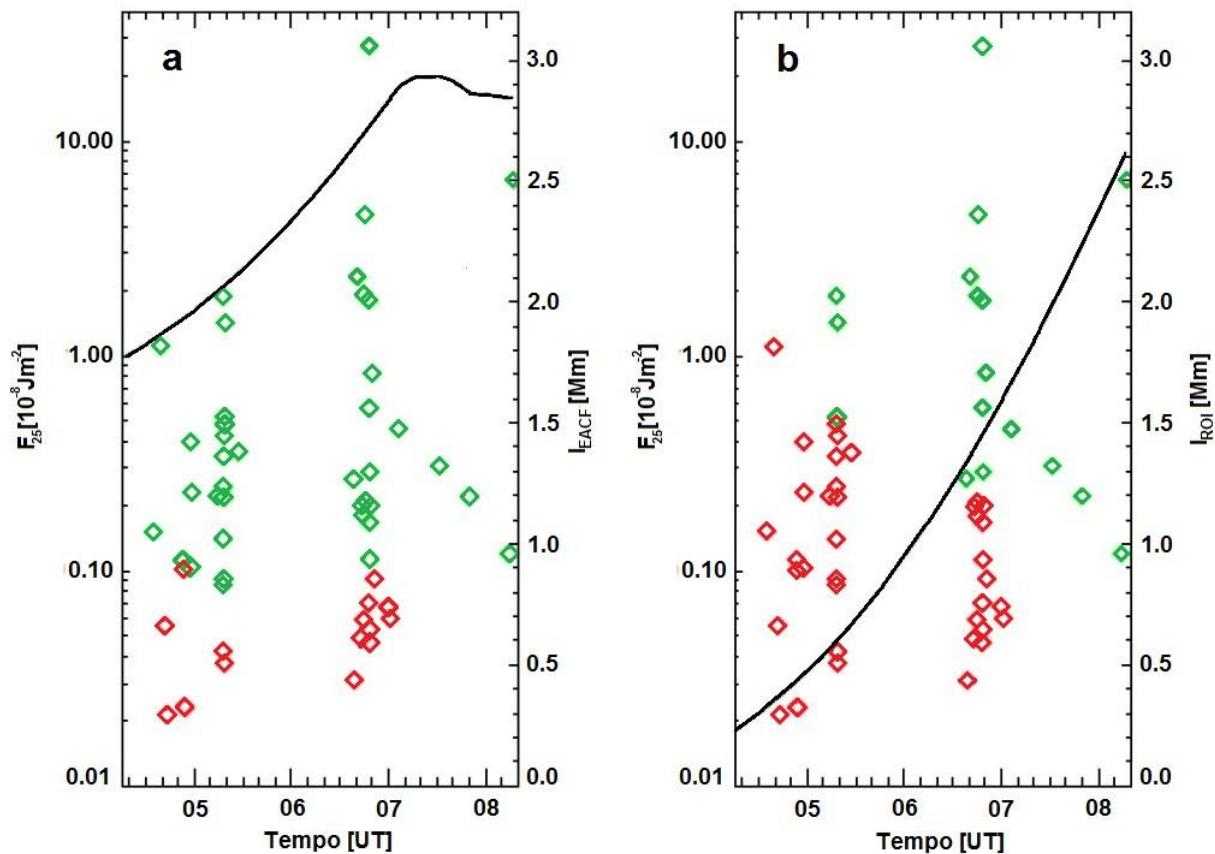


FIGURA 25 – Fluência F_{25} de raios-X das explosões que produziram (losangos verdes) ou não (losangos vermelhos) uma perturbação significativa da amplitude do sinal propagado nos trajetos NPM-EACF (**a**) e NPM-ROI (**b**) no dia 22 de janeiro de 2009. Para cada trajeto, a curva preta representa o fator de iluminação (Fonte: adaptado de Raulin et. al, 2014).

3.2.2 A ionosfera diurna

As explosões solares são monitoradas pelos sensores de raios-X instalados no sistema de satélites GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), que orbitam a 35.000

km de altitude. Os sensores de raios-X medem, desde 1974, o fluxo emitido pelo disco solar completo em duas faixas de energia: 0,5-4 Å e 1-8 Å, com uma resolução temporal de 3 segundos (GARCIA, 1994). Os dados de raios-X foram obtidos do SDAC (*Solar Data Analysis Center*, <http://umbra.nascom.nasa.gov/goes/fits/>).

Para a análise da sensibilidade da ionosfera diurna, foram escolhidos 21 SPAs observados no sinal de VLF se propagando no trajeto NAA-ATI no período entre o ano 2006 e 2014. Estes eventos foram produzidos por explosões solares simples e quando o trajeto de propagação esteve totalmente iluminado pelo Sol no tempo do máximo da emissão solar. As características desses eventos encontram-se resumidos na TABELA 4.

TABELA 4 – Dia, tempo e classe do evento que produziram SPAs medido no sinal propagado em NAA-ATI. O valor de χ foi calculado para o tempo de inicio da variação de fase.

Nº	Data	Tempo [UT]	Classe	χ [°]	Nº	Data	Tempo [UT]	Classe	χ [°]
1	20061115	18:49	C1.8	59,9	12	20110805	12:41	C2.0	62,3
2	20070609	13:33	M1.0	37,8	13	20120329	16:39	C1.6	18,4
3	20080101	15:35	C1.2	34,5	14	20120603	17:51	M3.5	22,1
4	20080325	18:41	M1.7	47,3	15	20130523	14:45	C4.0	24,5
5	20081102	15:04	B7.9	27,6	16	20130531	19:55	M1.1	63,1
6	20091027	17:25	B8.5	41,6	17	20130814	16:53	C3.8	24,6
7	20100213	20:01	C3.1	53,6	18	20131103	16:24	M1.0	33,6
8	20100327	18:26	C4.1	29,2	19	20131228	17:56	C9.4	49,5
9	20110221	15:42	C1.6	35,8	20	20140525	17:49	C2.6	36,6
10	20110308	18:10	M4.5	28,9	21	20140608	16:55	C1.6	26,4
11	20110310	19:02	C4.1	38,1					

Foi mostrado por Pacini e Raulin (2006) que os excessos do fluxo de raios-X de comprimento de onda inferior a 2 Å são importantes para a ionização da ionosfera abaixo da altura de referência. Por conseguinte, o fluxo nessa faixa de energia foi determinado a partir dos dados de raios-X fornecidos pelo GOES. Inicialmente foi suposto que os excessos do fluxo em raios-X são emitidos pelo plasma isotérmico quente associado à região ativa explosiva e, portanto, o nível pré-evento foi subtraído. O nível pré-evento é o fluxo prévio à explosão. A FIGURA 26a mostra o perfil temporal de uma explosão solar observado nas faixas de 0,5-4 Å e 1-8 Å. Nesta figura as linhas horizontais mostram o nível pré-evento para cada faixa de

energia. A subtração deste nível torna-se mais importante para explosões solares pequenas (PACINI e RAULIN, 2006).

Em seguida, com o fim de se obter a temperatura e a medida de emissão do plasma emissor em cada instante de tempo, foi aplicado aos dados da explosão em raios-X o modelo de abundância de Mewe (MEWE et al., 1985). Utilizando a temperatura e a medida de emissão é possível obter o espectro térmico da explosão (FIGURA 26b). Finalmente, foi calculada a integral do espectro térmico entre os limites inferior e superior da faixa de energia requerida, ou seja, $\lambda < 2 \text{ \AA}$, obtendo assim o fluxo F_{0-2} . A FIGURA 27 mostra o fluxo F_{0-2} obtido para a explosão solar do dia 08 de março de 2011 segundo o método explicado nesta seção.

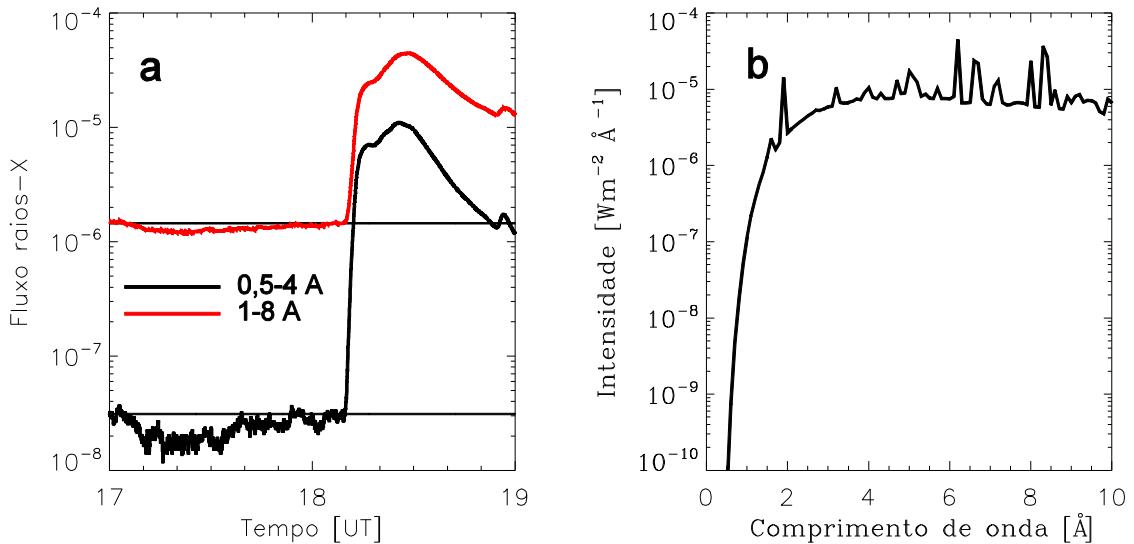


FIGURA 26 – (a) Perfil temporal de uma explosão solar observado nas duas faixas de energia dos sensores de raios-X do GOES e seus respectivos níveis pré-evento (linha horizontal contínua). **(b)** Espectro explosivo segundo o modelo de MEWE (1985) para o tempo da máxima emissão em raios-X.

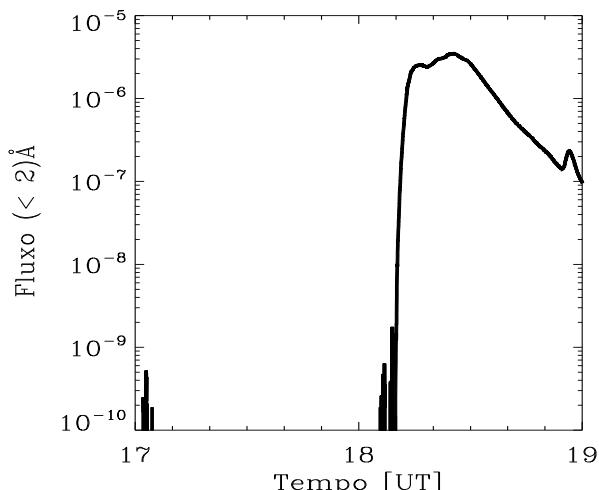


FIGURA 27 – Evolução temporal do fluxo de raios-X na faixa $< 2 \text{ \AA}$.

A partir do perfil temporal de F_{0-2} foi calculada a fluênciá mínima F_{min} necessária para produzir uma resposta significativa na ionosfera. F_{min} é definida como a integral de F_{0-2} até o tempo de início da variação da fase. Embora na região-D o fluxo $< 2\text{\AA}$ é o mais relevante para explicar os excessos de ionização, o cálculo de F_{min} também foi efetuado para as duas faixas do GOES, 0,5-4 e 1-8 Å. A FIGURA 28 mostra F_{min} em função do ângulo zenital médio do trajeto para cada um dos 21 eventos calculados nas faixas $< 2\text{\AA}$ (em azul), 0,5-4 Å (em verde) e 1-8 Å (em vermelho). Na FIGURA 28 as barras de erro representam $3\sigma_X$, onde σ_X é o RMS do fluxo de raios-X. Pode-se observar que, para qualquer das três faixas de energia, não existe uma dependência entre F_{min} e $\bar{\chi}$. Isto sugere que, independentemente do ângulo de indecência dos fótons solares, a sensibilidade da ionosfera é a mesma.

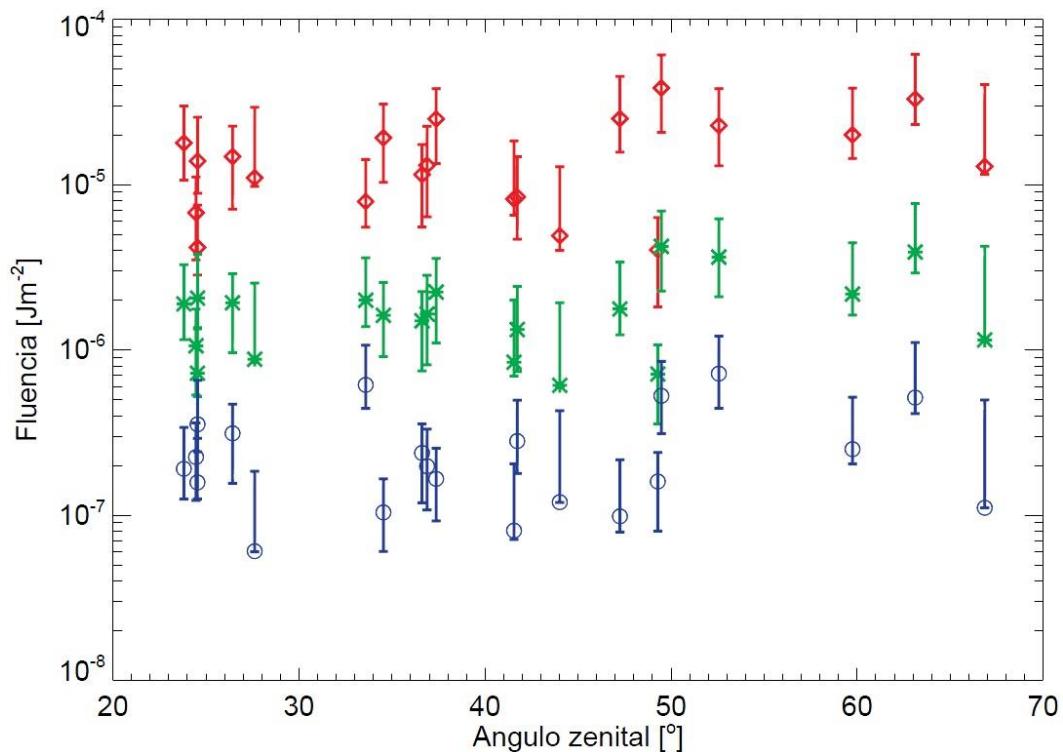


FIGURA 28 – F_{min} em função de $\bar{\chi}$ para as três faixas de energia do fluxo de raios-X escolhidas, $< 2\text{\AA}$ (azul), 0,5-4 Å (verde) e 1-8 Å (vermelho) que produziram SPAs registrados no trajeto NAA-ATI entre os anos 2006 e 2014.

A FIGURA 29 mostra a variação de F_{min} de 2006 a 2014. Pode-se observar que a dispersão de F_{min} é maior entre os anos 2010 e 2014, quando comparada com os valores para os anos 2006 a 2010. Pode-se também observar na FIGURA 29 que os valores de fluências mínimas obtidas a partir de F_{0-2} são em média menores entre os anos 2006 e 2010 (período de mínimo de atividade solar) quando comparada com aqueles valores entre os anos 2011 e 2014 (período de máximo de atividade solar). Isto mostra a dependência com o ciclo de

atividade solar. A partir desses valores, o valor representativo de F_{min} para o período inteiro de análise é em média $2,6 \times 10^{-7} \text{ Jm}^{-2}$, $1,8 \times 10^{-6} \text{ Jm}^{-2}$ e $1,5 \times 10^{-5} \text{ Jm}^{-2}$, para as faixas de energia $< 2 \text{ \AA}$; $0,5\text{-}4 \text{ \AA}$ e $1\text{-}8 \text{ \AA}$, respectivamente.

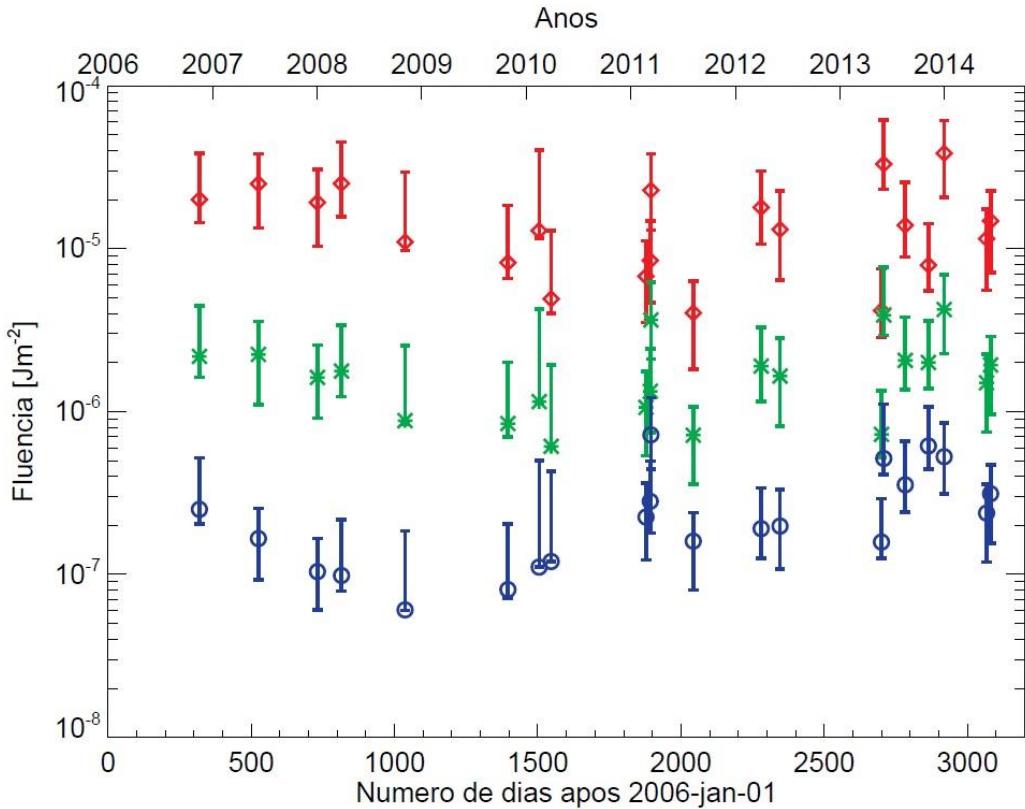


FIGURA 29 – F_{min} em função do número de dias para as três faixas de energia do fluxo de raios-X escolhidas, $< 2 \text{ \AA}$ (azul), $0,5\text{-}4 \text{ \AA}$ (verde) e $1\text{-}8 \text{ \AA}$ (vermelho) que produziram SPAs registrados no trajeto NAA-ATI entre os anos 2006 e 2014.

Para examinar a dependência da sensibilidade da ionosfera diurna com a atividade solar de longo prazo, foi suposto que a baixa ionosfera quiescente é formada e mantida pelo fluxo de Ly- α e que os excessos de ionização são causados pelo fluxo explosivo com comprimento de onda $< 2 \text{\AA}$. Portanto, espera-se encontrar uma dependência entre $F_{min}(\lambda < 2 \text{\AA})$ e a variação do fluxo de Ly- α . A FIGURA 30 mostra a comparação entre esses dois parâmetros, onde a curva vermelha ilustra F_{min} para os 21 eventos escolhidos, a curva fina em cor preta é a variação diária do fluxo de Ly- α e a curva grossa é a média corrida utilizando uma janela temporal de 27 dias.

Na FIGURA 30 pode-se observar que para o período de mínimo de atividade solar F_{min} e a média corrida do fluxo de Ly- α são muito bem correlacionados. Para o período de máximo de atividade solar a correlação entre F_{min} e o fluxo de Ly- α não existe. Foi verificado que para os eventos de 05 de agosto de 2011, 29 de março de 2012, 03 de junho de 2012 e 23 de

maio de 2013 (eventos observados com valores mínimos de F_{min} para o período do máximo solar) não houve variações significativas dos índices Kp^2 e Dst^3 . Isto quer dizer que a atividade geomagnética era baixa. Portanto, o comportamento observado para o período do máximo de atividade solar entre F_{min} e o fluxo de Ly- α pode ser mais bem entendida em termos de uma mudança anômala na densidade de NO ou da fraqueza reportada para o ciclo solar 24.

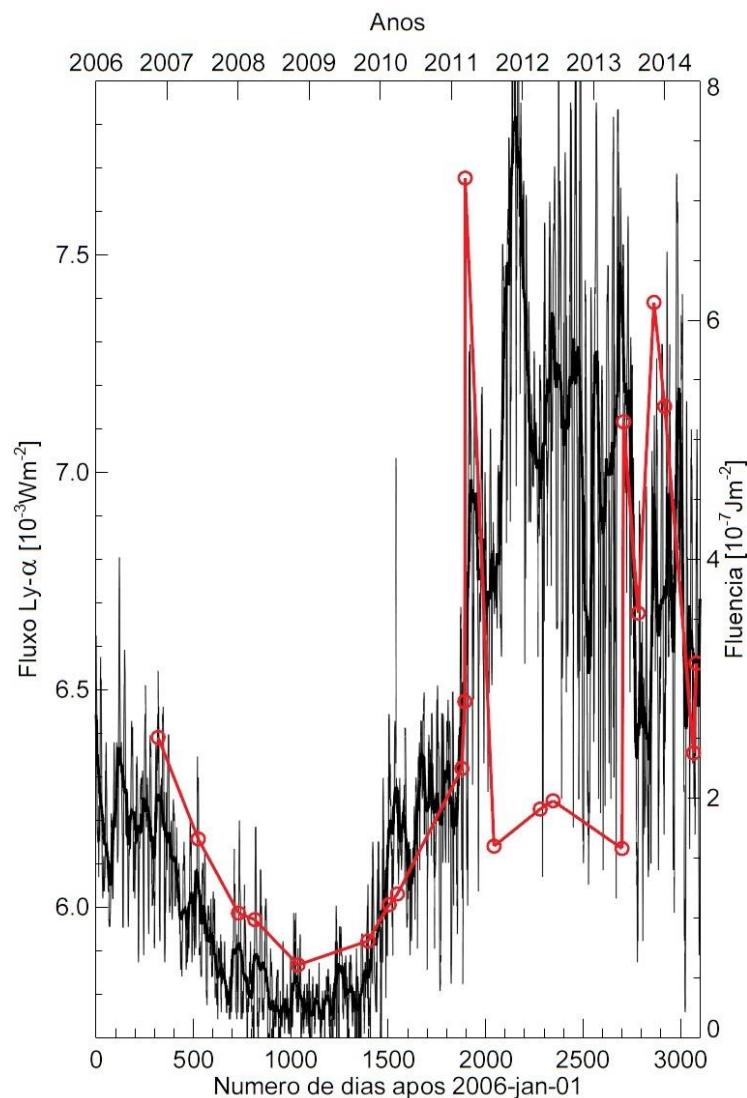


FIGURA 30 – Comparação da variação temporal da fluência mínima (vermelho) com o fluxo de Ly- α .

Sobre a mudança na densidade de NO, que é o constituinte mais importante para a formação da baixa ionosfera diurna, Barth et al. (1988) reportaram que a densidade de NO para baixas latitudes depende do ciclo de atividade solar, como se mostra na FIGURA 31, e

² O índice Kp é um índice planetário com intervalo de três horas da média de 13 observatórios geomagnéticos.

³ O índice Dst (Disturbance Storm Time) é um índice da atividade magnética derivado de uma rede sensores instalados no equador geomagnético.

que os raios-X solares dão origem ao NO. Barth (1992) apresentou um modelo que mostra uma relação quase linear entre o fluxo de raios-X e a densidade de NO para alturas entre 100 e 120 km. A partir desses estudos e lembrando que o NO na região-D provém de duas fontes, uma fonte na estratosfera e a outra na região-E ionosférica, pode-se realizar um estudo para determinar qual das duas fontes de NO contribui mais para a formação da região-D e se a densidade de NO para o período do ciclo solar 24 muda similarmente aos resultados de F_{min} reportados neste estudo.

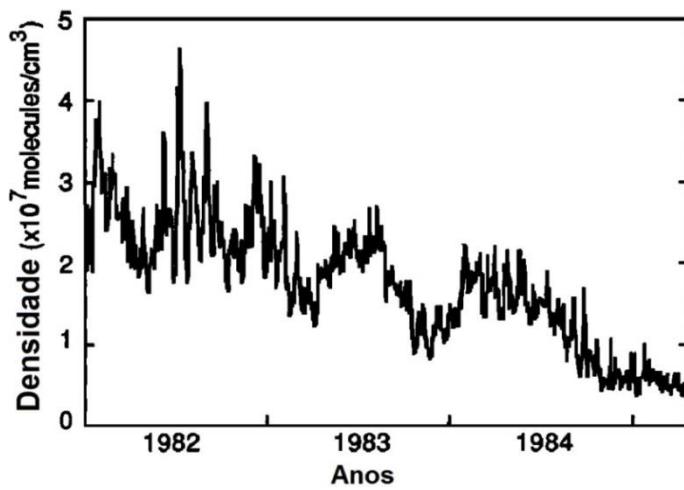


FIGURA 31 – Variação de NO da região-E no caso das baixas latitudes (**Fonte**: adaptado de Bart et al., 1988).

Sobre a influência da fraqueza do ciclo solar 24, a FIGURA 32 mostra a variabilidade do fluxo de Ly- α durante os três últimos ciclos solares, onde a linha horizontal cor vermelha representa a média dos valores durante o período do máximo de atividade. Pode-se observar que o fluxo de Ly- α durante o ciclo solar 24 é muito menor do que a metade do ciclo solar 22. Além disso, a variabilidade do fluxo para o período do máximo de atividade solar é muitas vezes comparável com os valores do fluxo para o período do mínimo de atividade. Portanto, espera-se que alguns valores de F_{min} sejam análogos para esses dois períodos do ciclo solar 24. Efetuando o cálculo de F_{min} para um evento que aconteceu no período do máximo de atividade solar do ciclo 22 foi obtido o valor de $22 \times 10^{-6} \text{ Jm}^{-2}$. Esse valor é oito vezes maior do que o valor médio de F_{min} calculado para o ciclo 24 e é três vezes maior do que o máximo valor de F_{min} para esse mesmo período. Assim, para determinar se realmente existe uma relação entre o fluxo de Ly- α e F_{min} é preciso aplicar o mesmo método de estudo para um período na qual a variação de mínimo para máximo solar do fluxo de Ly- α é significativo.

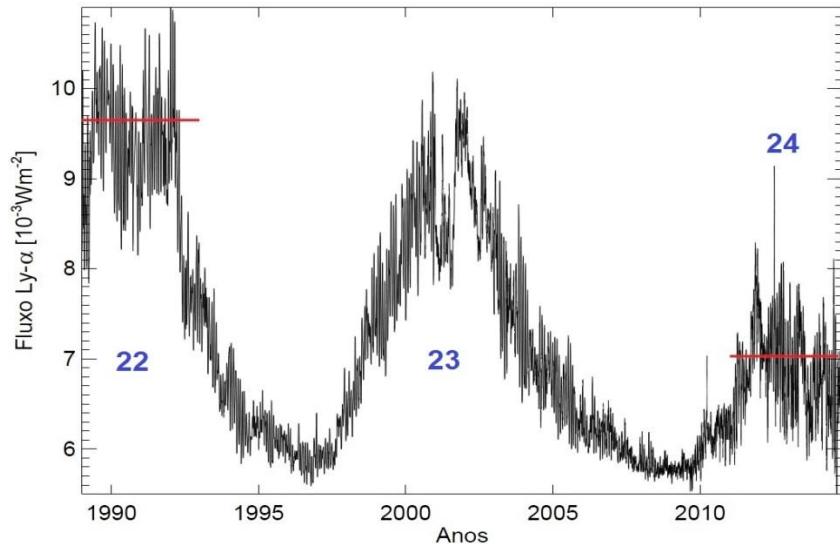


FIGURA 32 – Comparação da variação temporal da fluência mínima (vermelho) com o fluxo de Ly- α .

3.3 Distúrbios ionosféricos que Produzem Alterações das Periodicidades Presentes no Sinal de VLF

O monitoramento contínuo da baixa ionosfera em longas escalas temporais permite observar a variação diurna de forma periódica. Ademais, o sinal de VLF também apresenta estruturas periódicas desde a ordem de segundos até a ordem de horas. A variabilidade destas periodicidades não é constante, portanto é suposto que as perturbações ionosféricas podem se manifestar como mudanças nas periodicidades do sinal de VLF. Assim, nesta seção se analisa a variabilidade das periodicidades da ordem de segundos a minutos para conhecer se existe alguma associação entre as alterações das periodicidades e a atuação de fenômenos geofísicos. A partir da variação diurna do sinal de VLF é constatado que durante a noite o sinal coletado é mais variável e durante o dia o sinal é mais estável. Portanto, foi feita uma análise para a ionosfera noturna e outra para a ionosfera diurna. Na análise noturna as variações podem ser associadas a eventos sísmicos, isto porque a área monitorada pela SAVNET encontra-se em zonas de atividade sísmica. Durante o dia, a radiação solar é a fonte de ionização mais importante da ionosfera, assim as principais variações observadas são de origem solar, por conseguinte, na análise diurna foi utilizada a variação produzida por um eclipse solar total. A importância dos eclipses solares é que são eventos únicos que produzem uma variação dia-noite-dia de curta duração.

Na análise das periodicidades se utilizou a transformada de wavelet (TORRENCE E COMPO, 1998). A transformada de wavelet é uma ferramenta que decompõe o sinal nas suas partes constituintes permitindo analisar os dados em diferentes domínios de períodos (ou frequências). A vantagem da wavelet é que permite conhecer a mudança temporal de uma mesma periodicidade. Portanto, a wavelet é uma ferramenta que ajudará a alcançar os objetivos do estudo.

3.3.1 A ionosfera noturna

Os terremotos são movimentos tectônicos de curta duração que podem afetar dramaticamente a vida na superfície terrestre. O USGS (*U.S. Geological Survey*) é um centro de informação que reporta automaticamente mais de 30.000 terremotos por ano. A informação fornecida pelo USGS depende da qualidade sísmica das estações que conformam a Rede Global Sismográfica (GSN, *Global Seismographic Network*), que tem estações instaladas em mais de 80 países (GEE e LEITH, 2011).

O catálogo de terremotos do USGS (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>) permite fazer pesquisas personalizadas das informações de terremotos, desde 1900 até a atualidade, utilizando uma variedade de parâmetros. Tradicionalmente a magnitude do terremoto é classificada segundo a escala Ritcher (MI, magnitude local), que calcula a magnitude baseando-se no tamanho das ondas detectadas pelo sismógrafo. Porém, esta escala somente é apropriada para calcular magnitudes de sismos menores do que 7 graus, que aconteceram em um raio de até 600 km do sensor. Tendo em conta as limitações desta escala, o catálogo de terremotos fornece a magnitude do terremoto segundo a escala momento (Mw). Esta escala calcula a magnitude da energia total que se libera em uma falha baseada no conceito de momento sísmico e é uniformemente aplicada a terremotos de todas as intensidades. O momento sísmico se fundamenta na área de ruptura da falha, a quantidade média de deslizamento e a força que foi necessária para vencer o átrio juntando as rochas que foram separadas pelas falhas.

Utilizando o buscador de terremotos, foram escolhidos os eventos sísmicos de $Mw \geq 7$ que aconteceram entre $55^\circ N$ e $35^\circ S$ e entre $160^\circ W$ e $35^\circ W$ (área monitorada pela SAVNET) no

período entre abril de 2007 e novembro de 2012. No total, foram escolhidos 17 eventos sísmicos neste período, cujas características são resumidas na TABELA 5.

TABELA 5 – Características dos eventos sísmicos de magnitude $Mw \geq 7$ que ocorreram entre 2007 e 2012 na área monitorada pela SAVNET.

Nº	Data	Mag. Profundidade		Nº	Data	Mag. Profundidade	
		[Mw]	[km]			[Mw]	[km]
1	20070815	8	39	10	20110824	7	147
2	20071114	7,7	40	11	20120320	7,4	20
3	20071129	7,4	156	12	20120412	7	13
4	20090528	7,3	19	13	20120827	7,3	28
5	20100112	7	13	14	20120905	7,6	35
6	20100311	7	18	15	20120930	7,3	170
7	20100404	7,2	4	16	20121028	7,8	14
8	20100812	7,1	207	17	20121107	7,4	24
9	20110101	7	577				

Para a análise foi escolhido o sinal de VLF propagado em NAA-PLO, isto porque o transmissor NAA é um dos mais potentes que existe e porque, para o período de análise, o receptor de PLO teve maior tempo contínuo de observação. Dois eventos sísmicos, cujos epicentros estiveram localizados mais próximos do trajeto NAA-PLO, foram escolhidos. Estes eventos aconteceram no dia 12 de janeiro de 2010 (terremoto do Haiti) e no dia 24 de agosto de 2011 (terremoto do Peru). A distância mínima entre o epicentro e o trajeto de propagação foi de 34 km e 173 km, respectivamente. O trajeto de controle para a análise destes eventos foi NAA-CAS, isto porque se pode analisar o sinal de VLF na mesma direção de propagação e porque o trajeto encontra-se mais afastado dos epicentros. A FIGURA 33 mostra a configuração dos trajetos de propagação NAA-PLO e NAA-CAS e a posição dos 17 eventos sísmicos previamente selecionados. Os eventos sísmicos que foram analisados neste estudo estão ressaltados em cor vermelha.

O tratamento dos dados foi feito como segue. A transformada de wavelet foi aplicada à fase do sinal de VLF noturno (entre 1:00 a 8:00 UT) utilizando a função de Morlet. Em seguida, foi calculado o espectro de potência da transformada, ou seja, o quadrado da amplitude. O procedimento foi aplicado para cada dia de observação ionosférica. Neste estudo, concentrou-se primeiro em conhecer a variabilidade das periodicidades na faixa de

infrassom. Esta faixa apresenta períodos entre 10 e 900 segundos (frequências entre 100 e 1,1 mHz). Analisando a variabilidade dessas periodicidades entre 70 dias antes e 70 dias depois do evento sísmico, foi encontrado que os períodos de 140 a 220 segundos (6,9 - 4,5 mHz) apresentam anomalias prévias aos eventos sísmicos estudados aqui.

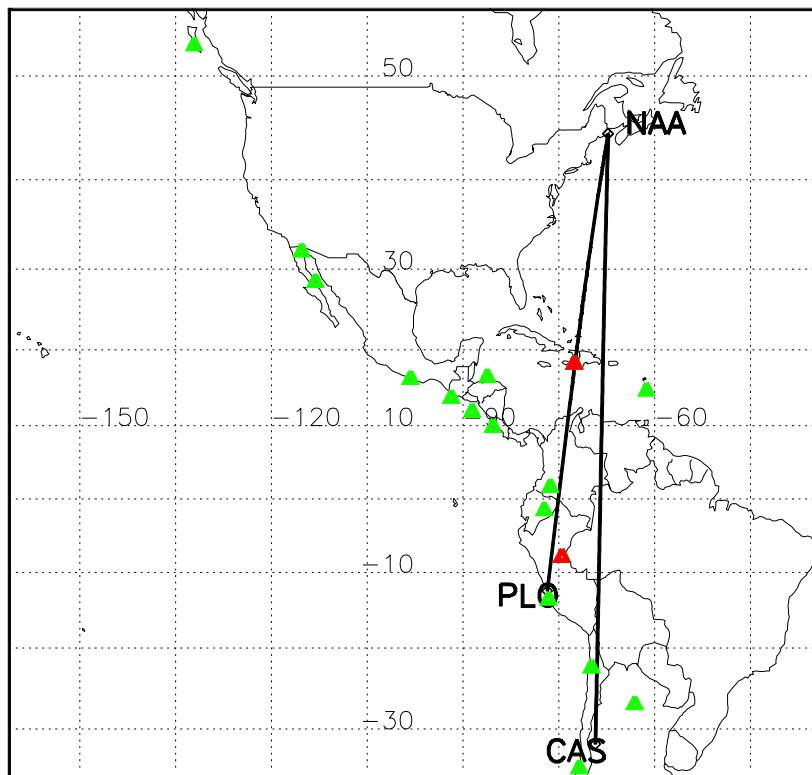


FIGURA 33 – Mapa mostrando os trajetos de propagação NAA-PLO e NAA-CAS (linhas contínuas grossas) e a localização dos 17 eventos sísmicos escolhidos (triângulos) e os dois eventos analisados neste estudo (triângulos em cor vermelha).

A FIGURA 34a mostra a variação da potência diária em 140 dias em torno do dia 12 de janeiro de 2010, para os períodos entre 140 e 220 segundos da fase do sinal emitido pela NAA e recebido em PLO (linha preta) e em CAS (linha vermelha). As linhas horizontais contínua e tracejada indicam, respectivamente, a média e a média mais $3\sigma_P$ da distribuição de potências. O dia do terremoto é indicado com uma linha verde vertical. A FIGURA 34a mostra que um excesso acima do nível de $3\sigma_P$ é observado 13 dias antes do evento sísmico e não após o evento. As variações observadas no trajeto de controle NAA-CAS não superam o nível de $3\sigma_P$ determinado, indicando que o terremoto não afetou o sinal recebido em CAS, semelhantemente ao sinal recebido em PLO.

O mesmo método foi aplicado para o evento sísmico de 24 de agosto de 2011 e seus resultados são mostrados na FIGURA 34b. Pode-se observar nesta figura que os resultados

obtidos para o terremoto do Peru são similares aos obtidos no caso do terremoto do Haiti. A saber, (i) anomalia observada entre seis e 14 dias antes do terremoto; (ii) nenhuma anomalia encontrada após o terremoto; (iii) nenhuma anomalia observada para o trajeto de controle durante todo o período de análise.

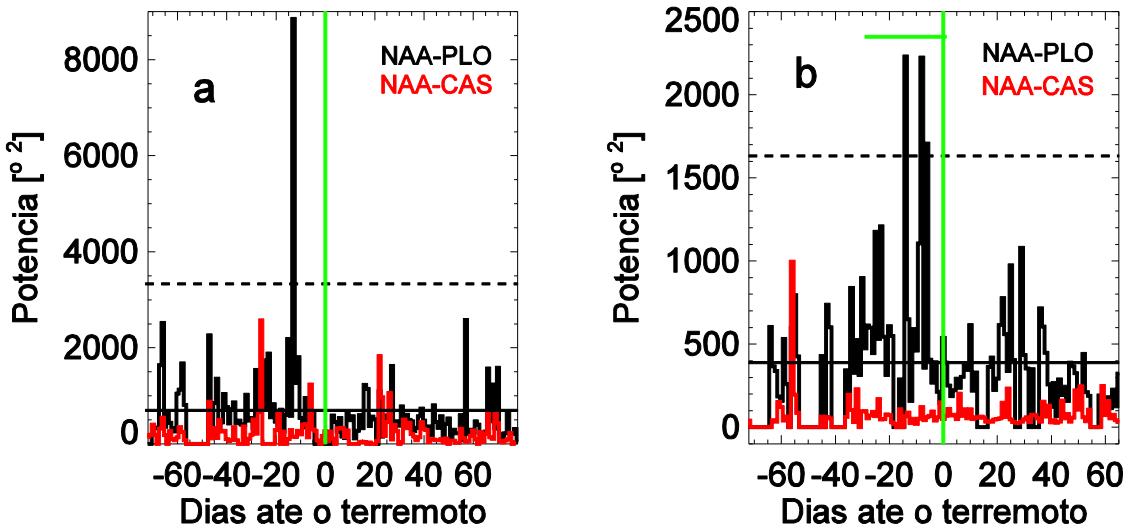


FIGURA 34 – Variação diária do espectro de potência em 140 dias em torno do terremoto de janeiro de 2010 (a) e de agosto de 2011 (b).

Hayakawa et al. (2011) estudaram o evento sísmico que ocorreu em 2010 no Haiti utilizando os mesmos dados de VLF utilizados no presente estudo, mas aplicando um método totalmente diferente (*nighttime fluctuation*). Eles encontraram anomalias na propagação noturna do sinal de VLF 12 dias antes do evento sísmico. Por outro lado, o evento sísmico do Peru forma parte do estudo de Grant et al. (2015). Os autores observaram anomalias no comportamento de animais vertebrados associados ao tempo de ocorrência das anomalias periódicas do sinal de VLF. Estes resultados, obtidos por diagnósticos independentes, confirmam a ocorrência de atividade pré-sísmica que pode ser observada utilizando a técnica de VLF.

Segundo a literatura, as periodicidades de 140 a 220 segundos (2 – 4 minutos) correspondem a AGW de pequena escala (na faixa acústica) que vem principalmente da troposfera (HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 52). A AGW tem sido considerada, nos últimos tempos, como um candidato a precursor sísmico (HAYAKAWA e HOBARA, 2010). Xia e Liu (2011) observaram anormalidades na faixa acústica dos AWG entre um e 30 dias antes de ~85% dos eventos sísmicos de magnitude maior do que 7, que ocorreram entre os anos 2002 e 2008. As anomalias periódicas para os dois eventos sísmicos analisados nesta seção

encontram-se dentro do período indicado por Xia e Liu (2011). Este resultado também confirma que a AWG da faixa acústica (infrassom) são emitidas antes dos eventos sísmicos.

3.3.2 A ionosfera diurna

Os eclipses solares acontecem quando a Lua cobre o disco solar. Estes tipos de fenômenos afetam somente uma porção do setor diurno da Terra, gerando uma diminuição da radiação ionizante que chega até ela. Uma descrição detalhada dos eclipses solares desde 1951 até 2050 encontra-se no catálogo de eclipses solares (<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/solar.html>) administrado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). As circunstâncias locais de qualquer eclipse são conhecidas utilizando um calculador *online* (http://xjubier.free.fr/en/site_pages/SolarEclipseCalc_Diagram.html).

O eclipse solar total do dia 11 de julho de 2010 teve seu início às 17:09 UT e finalizou às 21:57 UT. Este evento astronômico foi observado da parte sul do Oceano Pacífico e do extremo meridional da América do Sul. Foi verificado que durante o período do eclipse não houve explosões solares e nem variações significativas dos índices Kp e Dst. Assim, podemos afirmar que as condições do clima espacial foram quietas e não tiveram influência nos distúrbios ionosféricos durante o eclipse. No dia do evento, os receptores de VLF de PLO, ICA, CAS e EACF monitoraram o sinal emitido pelo transmissor NPM. A FIGURA 35 mostra os quatro trajetos de propagação (linhas grossas) e a área afetada pela penumbra (linha tracejada) e a umbra (linhas paralelas finas) do eclipse. A penumbra é a área onde o eclipse é observado de forma parcial e a umbra é a área onde a totalidade do eclipse acontece. Pode-se observar na FIGURA 35 que a totalidade do eclipse interceptou somente o trajeto NPM-EACF.

As alterações produzidas pelo eclipse na baixa ionosfera foram identificadas como variações da amplitude e da fase do sinal de VLF observados nos trajetos NPM-PLO, NPM-ICA, NPM-CAS e NPM-EACF. As variações de amplitude são mostradas na FIGURA 36. Nessa figura, as barras de erro correspondem a um desvio padrão ($1\sigma_A$) da diferença da amplitude entre o dia do evento e o nível quiescente. As linhas verticais, com seus respectivos números, indicam os instantes em que a penumbra e a umbra afetaram pela primeira (1 e 2) e última vez (3 e 4) o trajeto de VLF. Os instantes nos quais o eclipse atingiu o máximo são indicados

com setas. Na FIGURA 36 pode-se observar que somente o sinal propagado nos trajetos NPM-CAS e NPM-EACF experimentaram variações de amplitude, sendo que o receptor de CAS observou um decréscimo da amplitude, enquanto um aumento foi observado em EACF. Finalmente, ambas as amplitudes experimentaram oscilações temporais.

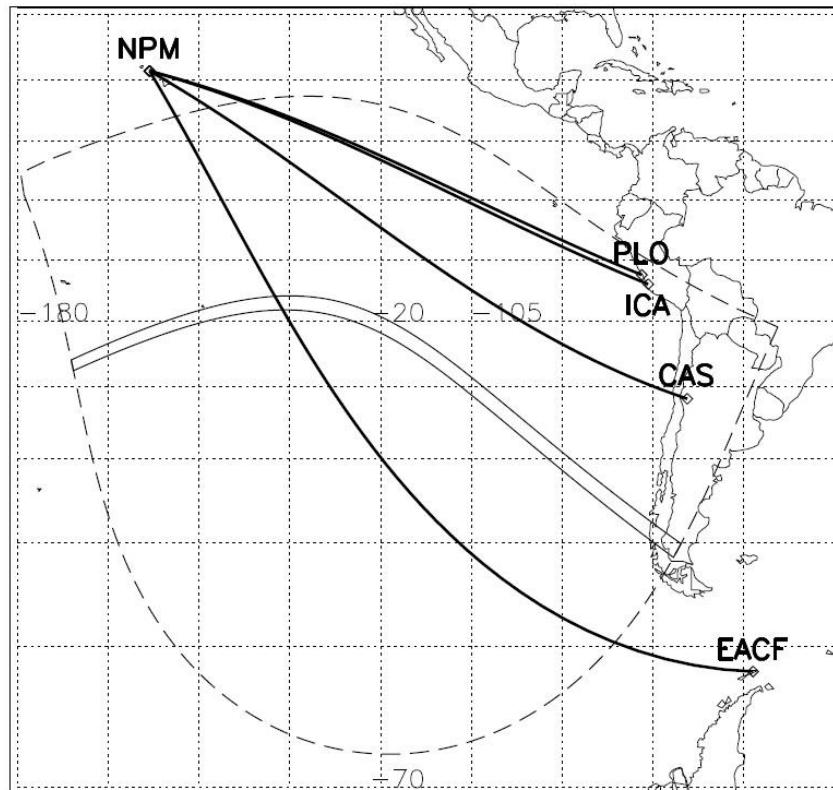


FIGURA 35 – Mapa mostrando os trajetos de propagação de VLF monitorados (linhas grossas), o limite de influência do eclipse (linha tracejada) e a totalidade do eclipse (linhas paralelas finas).

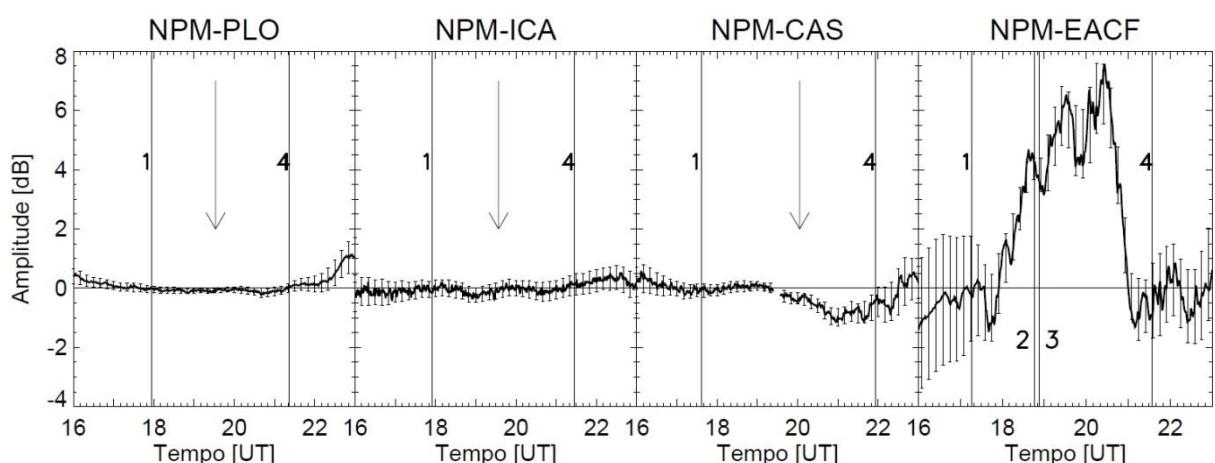


FIGURA 36 – Efeitos do eclipse solar observado na amplitude do sinal de VLF coletado em PLO, ICA, CAS e EACF, respectivamente. As linhas verticais, com seus respectivos números, indicam os instantes em que a penumbras e a umbra afetaram pela primeira (1 e 2) e última vez (3 e 4) o trajeto de VLF. Os instantes nos quais o eclipse foi máximo são indicados com setas. As barras de erro correspondem a um desvio padrão (1σ) da diferença entre o dia do evento e o nível quiescente.

O aumento e a diminuição da amplitude observada durante o eclipse podem ser explicados em termos da interferência de modos da propagação do sinal de VLF. Durante o dia e em trajetos de propagação longos o modo 1 é o mais significativo. O eclipse solar produz um aumento da altura de referência e, portanto, modos de ordem superior são gerados. Esses modos interferem entre si, produzindo incrementos ou decréscimos na intensidade dos campos medidos pelos receptores de VLF. Sugestões similares foram propostas por diferentes autores, entre eles Clilverd et al. (2001), Chakrabarti et al. (2012) e Maurya et al. (2014).

A FIGURA 37 mostra a variação na amplitude normalizada a um para NPM-CAS (linha preta) e NPM-EACF (linha vermelha). Pode-se observar, na figura, que existem periodicidades significativas que aparecem somente durante o eclipse. Para determinar o tipo de periodicidades associado ao eclipse, foi aplicada a transformada wavelet de Morlet aos dados entre 15:00 e 24:00 UT do dia em que o eclipse aconteceu, assim como aos dados de dois dias quiescentes próximos ao dia do eclipse (06 e 12 de julho de 2010).

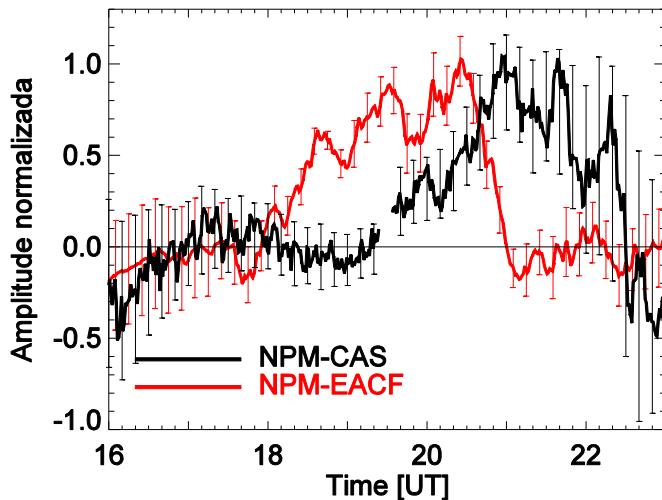


FIGURA 37 – Oscilações observadas na amplitude do sinal de VLF propagado no trajeto NPM-CAS e NPM-EACF para o dia do eclipse de 2010. As barras de erro correspondem a um desvio padrão ($1\sigma_A$) da diferença entre o dia do evento e o nível quiescente.

A evolução temporal da variação absoluta normalizada a um (paineis superiores) dos dados de amplitude recebidos em EACF para os dias 01, 11 e 12 de julho de 2010, juntamente com o espectro de potência local (paineis inferiores) são mostrados na FIGURA 38. Nesta figura as cores dos contornos representam a amplitude dos períodos, sendo menos intenso em cor preta e mais intenso em cor vermelha. Na FIGURA 38 pode-se observar que períodos entre 20 e 100 minutos (delimitados pelas linhas tracejadas) são mais intensos no dia do eclipse do

que aqueles nos dias quiescentes. A mesma análise foi realizada para o sinal propagado em NPM-CAS e o resultado encontrado foi similar a aquele obtido para NPM-EACF.

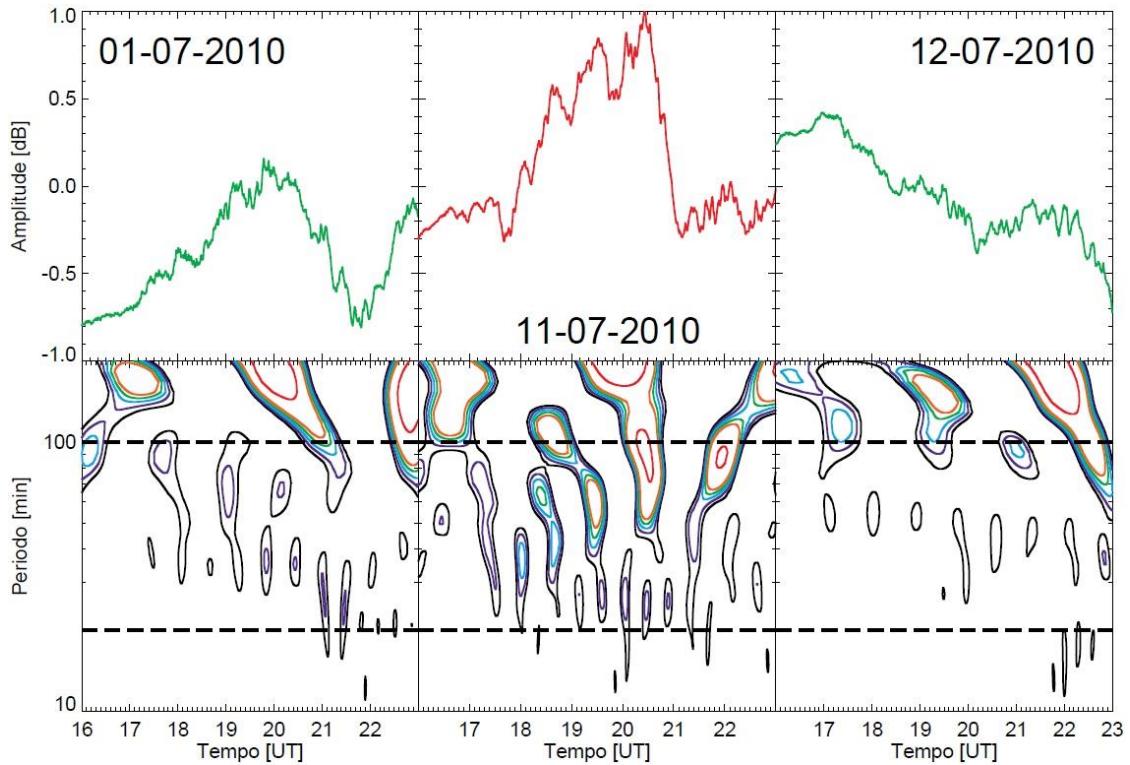


FIGURA 38 – Variação temporal normalizada da amplitude do sinal propagado no trajeto NPM-EACF (paineis superiores) e o espectro de potência local (paineis inferiores) para os dias 01, 11 e 12 de julho de 2010. A intensidade dos períodos é indicada pelas cores das curvas de contorno, sendo a cor preta menos intensa e a vermelha, mais intensa. As linhas tracejadas mostram as periodicidades a analisar.

A FIGURA 39 mostra o espectro de potência global do sinal de VLF propagado no dia do eclipse nos trajetos NPM-CAS (linha cor preta) e NPM-EACF (linha cor vermelha), comparados com os dias quiescentes de observação (linhas cor verde). Na figura, pode-se observar que no dia do eclipse o sinal propagado em NPM-CAS e NPM-EACF experimentou mudanças significativas nos períodos de dezenas minutos. Segundo a literatura, períodos da ordem de minutos correspondem a ondas de gravidade de escala média (HUNSUCKER e HARGREAVES (2003), p. 52). O mecanismo de geração de AGW é aceitável desde que a fronteira entre as regiões escura e iluminada, que apresentam fortes gradientes de temperatura, pressão e fluxo de ionização, experimente um estado de não equilíbrio. Ao se deslocar, a coluna de sombra produzida pelo eclipse, a flutuação da temperatura e as mudanças de N_e se propagam como ondas da baixa atmosfera à alta atmosfera. Maurya et al. (2014) estudaram as anomalias observadas na amplitude do sinal de VLF durante o eclipse solar total de 22 de julho de 2009. Eles concluíram que, quando o trajeto de propagação de VLF é afetado pelo eclipse parcial, são observadas periodicidades entre 30 e

80 minutos de duração. O resultado deles é análogo ao resultado encontrado para o sinal propagado no trajeto NPM-CAS, que também foi afetado pela parcialidade do eclipse.

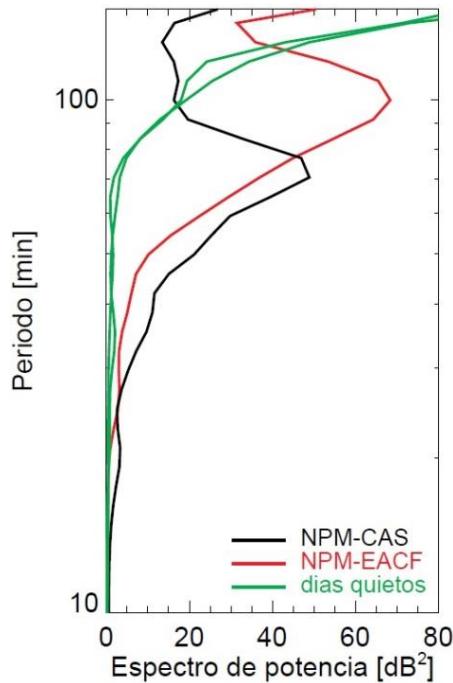


FIGURA 39 – Espectro de potência global no dia do eclipse solar para NPM-EACF (linha cor vermelha) e NPM-CAS (linha cor preta) comparado com os dias quiescentes (linhas cor verde).

3.4 Mudança de Alguns Parâmetros Ionosféricos Associados ao Distúrbio Produzido pelo Eclipse Solar de 2010

As condições geofísicas para cada eclipse solar são diferentes e únicas, portanto este tipo de eventos fornece uma oportunidade genuína para estudar o comportamento da região-D ionosférica sujeita a alguma situação que modifica o meio ambiente da Terra. Quando acontece um eclipse solar, a incidência da radiação Ly- α na ionosfera é reduzida. Esta redução resulta em uma diminuição da densidade eletrônica e um incremento da altura de referência do guia de onda. Nesta parte do estudo, uma análise da fase do sinal de VLF durante o período em que o eclipse solar total de 2010 aconteceu é realizada e a variação de alguns parâmetros ionosféricos, como N_e , h' e α_{eff} , é determinada. A FIGURA 40 mostra a variação da fase observada no sinal emitido no Havaí e coletado em PLO, ICA, CAS e EACF. Para comparar as variações de fase observadas, estas foram corrigidas pelo comprimento d_o

do trajeto que foi afetado pelo eclipse no instante da máxima variação de fase. Nesta figura, as barras de erro representam um desvio padrão (σ_ϕ) da diferença da fase do sinal do dia do evento e do nível quiescente. As linhas verticais e as setas são as mesmas que na FIGURA 36. A FIGURA 40 mostra que o trajeto afetado pela totalidade do eclipse, NPM-EACF, registrou a maior variação na fase. Portanto, espera-se que as maiores variações dos parâmetros ionosféricos possam ser obtidas a partir do sinal propagado neste trajeto de VLF.

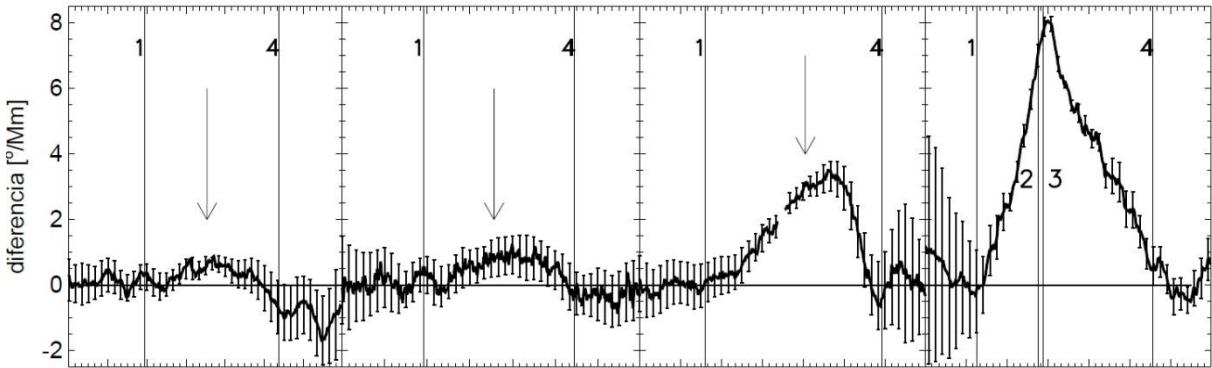


FIGURA 40 – Efeitos do eclipse solar observado na fase do sinal de VLF coletado em PLO, ICA, CAS e EACF, respectivamente. As linhas verticais com seus respectivos números indicam os instantes em que a penumbra e a umbra afetaram pela primeira (1 e 2) e a última vez (3 e 4) o trajeto de VLF. Os instantes nos quais o eclipse foi máximo são indicados com setas. As barras de erro são um desvio padrão ($1\sigma_\phi$) da diferença entre o dia do evento e o nível quiescente.

A altura de referência h' da região-D foi obtida a partir do ângulo zenital médio $\bar{\chi}$ do trajeto (equação 30), onde $\bar{\chi}$ foi calculado para o instante da máxima variação da fase observada em cada trajetória de propagação. A variação da altura de referência $\Delta h'$ foi calculada introduzindo a variação de fase na equação de (21). Finalmente, utilizando as equações do parâmetro de condutividade (equação 17) e da frequência de colisão (equação 15) derivou-se a expressão exponencial de N_e em função da altura h :

$$N(h) = 1,43 \times 10^7 \exp(-0,15h') \exp((\beta - 0,15)(h - h')) \quad (32)$$

Na equação (32) será suposto que β não muda, sendo h' a única variável. Esta suposição é motivada pelos resultados obtidos por Sen Gupta et al. (1980). Os principais efeitos do eclipse para cada trajeto de propagação utilizado no presente estudo estão resumidos na TABELA 6, sendo t_{Om} o instante em que ocorre o máximo de obscurecimento O_m para o trajeto de VLF, $t_{\Delta\phi}$ o instante em que a máxima variação da fase $\Delta\phi$ é observada e N_{ep}/N_{eq} é o decréscimo da densidade eletrônica para a altitude de 74 km no instante $t_{\Delta\phi}$. Nesta Tabela pode-se observar que NPM-EACF, o único trajeto interceptado pela totalidade do

eclipse, experimenta as maiores variações devido ao eclipse quando comparada com as outras trajetórias de propagação. Essas variações são um aumento da altura de referência de $\Delta h' \approx 3$ km e um decréscimo da densidade eletrônica de 60% do nível quiescente N_{eq} .

TABELA 6 - Principais efeitos do eclipse solar total de 2010 para cada trajeto de propagação estudado.

Trajeto	O_m [%]	t_{0m} [UT]	$\Delta\phi$ [º]	$t_{\Delta\phi}$ [UT]	d_o [km]	$\bar{\chi}$ [º]	$\Delta h'$ [km]	N_{ep}/N_{eq} [%]
NPM-PLO	19	19:32	$3 \pm 0,5$	19:38	4434	28	$0,2 \pm 0,1$	8
NPM-ICA	21	19:34	$5 \pm 2,0$	20:03	4905	28	$0,4 \pm 0,1$	13
NPM-CAS	62	20:03	$21 \pm 2,0$	20:40	6460	38	$1,1 \pm 0,1$	34
NPM-EACF	100	18:48	$57 \pm 1,0$	19:00	7184	61	$2,8 \pm 0,1$	60

Resultados análogos sobre $\Delta h'$ foram relatados por Sen Gupta et al. (1980), De et al. (2011) e Chakrabarti et al. (2012). Estes autores utilizaram dados de fase e de amplitude dos sinais de VLF de 12,3; 19,8 e 18,2 kHz propagados em trajetos com comprimento de 6; 5,7 e 2,2 Mm, respectivamente. Como no presente trabalho, a análise das variações ionosféricas foi realizada por esses autores quando o obscurecimento causado pelo eclipse solar foi maior do que 90%. A respeito do decréscimo da densidade eletrônica, o resultado obtido para o trajeto NPM-EACF concorda com o resultado relatado por Chernogor (2010). O autor utilizou um sinal de 25 kHz, propagado em um trajeto de 1,6 Mm de comprimento, para inferir a mudança de N_e produzida durante um eclipse em 2008. A concordância dos resultados de variação de altura de referência e densidade eletrônica sugere que trajetos de propagação com distâncias entre dois e 13 Mm retratam os mesmos efeitos do eclipse e que estes efeitos são independentes da frequência monitorada.

Utilizando o raciocínio da curva de decaimento da variação de fase, Mitra (1974) derivou o coeficiente de recombinação efetiva, definida como:

$$\alpha_{eff} = \frac{1 - \phi_2/\phi_1}{N_e(t_2 - t_1)} \quad (33)$$

onde ϕ_1 e ϕ_2 são as fases nos instantes t_1 e t_2 , respectivamente, e N_e é a densidade eletrônica no instante t_2 . Supondo que o tempo de resposta da ionosfera é independente da altura de referência (LYNN, 1981), pode-se calcular α_{eff} para diferentes alturas. Portanto, o

perfil de N_e a ser utilizado foi obtido introduzindo-se a altura de referência perturbada na equação (32). A FIGURA 41 mostra os valores de N_e obtidos (curva vermelha) para o eclipse solar de 2010. Estes valores podem ser comparados com os valores estimados por Belrose et al. (1972). Os autores estimaram, a partir de dados de foguetes, o perfil de densidade eletrônica para a condição de noite e para um instante antes do eclipse e para três diferentes tempos durante um eclipse solar em 1970. Portanto, os valores de N_e obtidos para o eclipse de 2010 encontram-se entre as condições diurnas e noturnas, que são os valores esperados para as condições de eclipse.

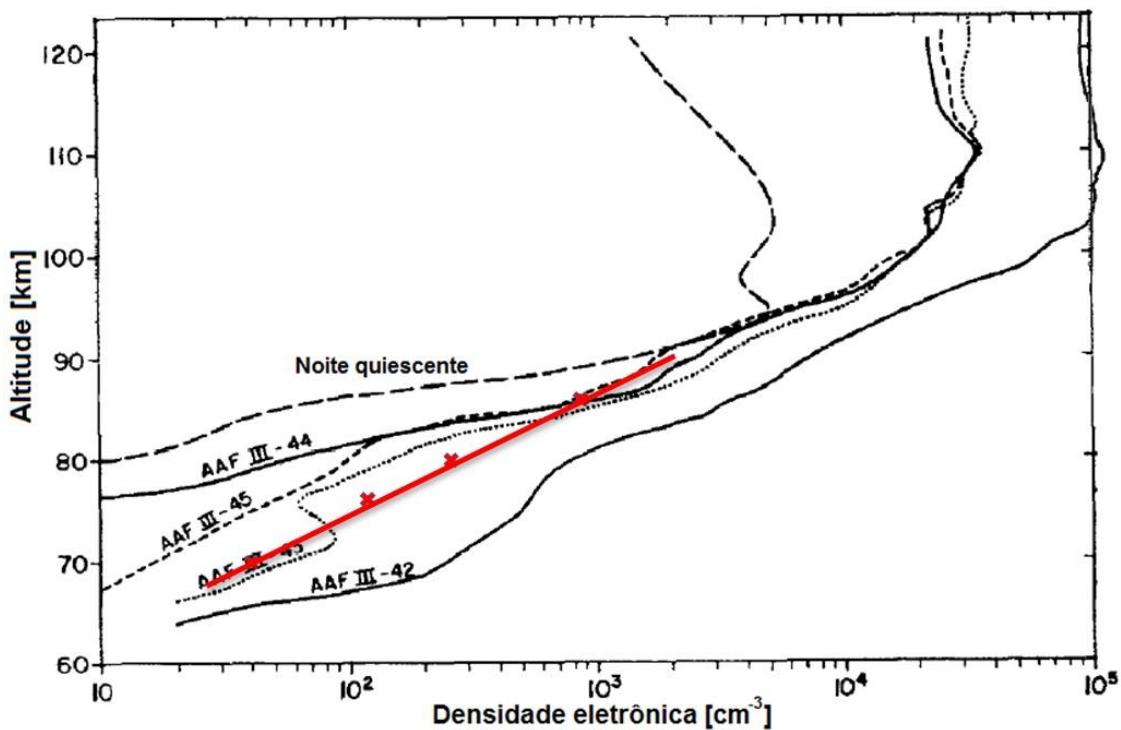


FIGURA 41 – Perfil de densidade eletrônica sintetizado para a ionosfera quiescente noturna e para diferentes tempos durante um eclipse em 1970 (**Fonte:** Belrose et al., 1972). O perfil de densidade eletrônica obtido para o eclipse de 2010 também é mostrado (linha de cor vermelha).

A FIGURA 42 mostra o perfil vertical de α_{eff} para o instante em que 98% totalidade do eclipse de 2010 intercepta o trajeto de VLF, onde as barras de erro representam 1σ da variação de fase do sinal monitorado. Pode-se observar que para o dia do eclipse α_{eff} decresce de 6×10^{-5} a $1 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ entre as altitudes de 70 a 94 km, respectivamente. A tendência decrescente de α_{eff} em função da altura é anuente com os resultados experimentais obtidos por diferentes métodos e resumidos no trabalho de Gledhill (1986).

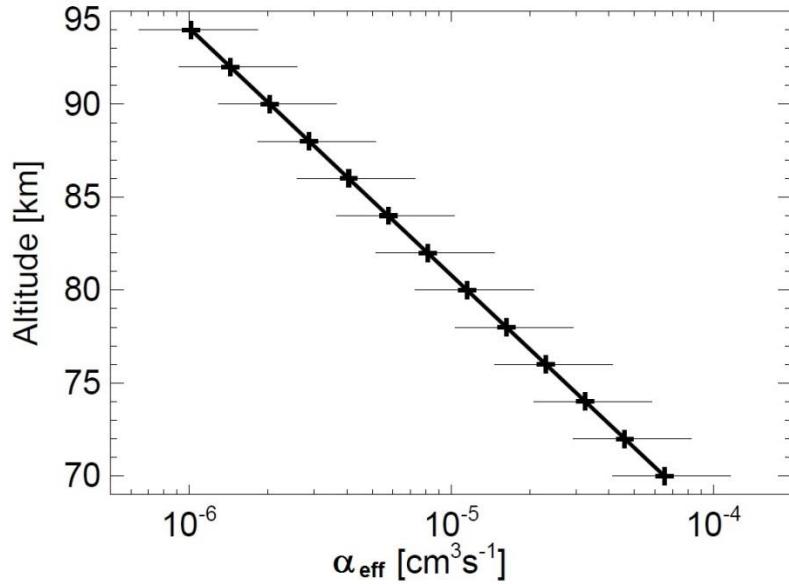


FIGURA 42 – Perfil vertical do coeficiente de recombinação efetiva para o dia do eclipse de 2010 às 18:54 UT.

Restringindo a análise para a altitude de 80 km, foi encontrado que $\alpha_{eff} = 1,1 \times 10^{-5}$ cm⁻³s⁻¹ concorda com o resultado obtido por Crary e Schneible (1965), $\alpha_{eff} \approx 1,4 \times 10^{-5}$ cm⁻³s⁻¹. Estes autores analisaram os efeitos do eclipse solar total de 1963 utilizando o sinal de 22,3 kHz propagado em um trajeto de 633 km de comprimento. Essa concordância confirma que a técnica de VLF permite derivar valores de coeficiente de recombinação efetiva para a baixa ionosfera. Sendo esta região ionosférica pouco estudada devido à altitude em que está localizada, essa técnica permite, portanto, conhecer o comportamento da região-D em condições de eclipse.

Durante o eclipse solar a ionosfera experimenta um anoitecer virtual, portanto, é esperada a obtenção de valores de α_{eff} entre os valores diurnos e noturnos. Para uma altitude de 80 km, Belrose et al. (1964) reportaram, para condições de ionosfera noturna quiescente, um valor de α_{eff} de 6×10^{-5} cm⁻³s⁻¹. Por outro lado, para essa mesma altitude, para as condições de ionosfera diurna quiescente, foi reportada um valor de α_{eff} de $4,5 \times 10^{-7}$ cm⁻³s⁻¹ (MITRA, 1968). Portanto, o resultado do presente estudo confirma que o valor de α_{eff} em condições de eclipse encontra-se entre os valores de condições diurnas e noturnas.

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No estudo foram utilizados dados de VLF fornecidos pela rede SAVNET para analisar os distúrbios ionosféricos causados por distúrbios de diferentes origens. Ao determinar um método que permita conhecer o efeito das explosões solares de forma independente das características da trajetória de propagação, foi achado que a correção pela distância iluminada e o coeficiente de altura de referência permite normalizar os SPAs medidos em trajetos de propagação com direção norte-sul ou oeste-leste. Para trajetos com direção oeste-leste os resultados sugerem que na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul a altura de referência é mais baixa. Assim, o efeito das explosões solares, medido como variação de fase, é menor do que o esperado para trajetos que atravessam essa região. Por último, foi observado que o método de normalização não é satisfatório quando se compararam os resultados para trajetos com diferentes direções, o que sugere uma possível dependência da variação de fase com a direção de propagação.

Sobre a sensibilidade ionosférica a excessos de raios-X foi encontrado que, para um fator de iluminação maior do que 1,8 Mm, a fluênciá mínima necessária para produzir uma variação significativa da condutividade elétrica da ionosfera noturna é de $1,8 \times 10^{-9} \text{ Jm}^{-2}$. Na mesma análise durante períodos diurnos, a fluênciá mínima média é de $2,6 \times 10^{-7} \text{ Jm}^{-2}$. Estes resultados demonstram que a sensibilidade da ionosfera noturna é maior, em duas ordens de grandeza, do que a sensibilidade da ionosfera diurna. A partir deste fato, pode-se sugerir que um dos surtos do magnetar SGR J1550-5418, observado no dia 22 de janeiro de 2009, poderia ter sido também observado em condições diurnas. Também foi mostrada que a sensibilidade da ionosfera é a mesma, independentemente do ângulo de incidência dos fôtons solares, para ângulos $< 70^\circ$. Por último, a dependência da fluênciá mínima com o ciclo de atividade solar, representada pela variação do fluxo de Ly- α , ainda não é conclusiva, sendo que para o período de mínimo de atividade solar ambas as curvas são bem correlacionadas e não para o período de máximo de atividade solar. Para verificar se existe uma dependência entre esses dois parâmetros precisa-se estudar a mudança na concentração ionosférica de NO para o ciclo solar 24. Isto porque NO é também responsável

pela formação da região-D. Assim mesmo, verificar a influência devido à fraqueza do ciclo solar 24 realizando o mesmo estudo para um período em que o ciclo solar foi mais significativo.

No estudo das periodicidades observadas no sinal de VLF foi encontrado que a potência nos períodos entre 140 e 220 segundos apresenta forte aumento entre 6 e 14 dias antes dos eventos sísmicos de 12 de janeiro de 2010 (Haiti) e 24 de agosto de 2011 (Peru). Os resultados obtidos aqui concordam com os resultados encontrados por outros diagnósticos independentes desenvolvidos por Hayakawa et al. (2011) e Grant et al. (2013). Portanto, o estudo confirma a importância da técnica de VLF na procura de precursores sísmicos. Por outro lado, a análise das periodicidades durante o eclipse solar total de 2010 mostra que o sinal VLF experimentou mudanças significativas nos períodos da ordem de dezenas de minutos. Estes períodos correspondem a ondas de gravidade atmosférica de mediana e grande escala, geradas devido ao deslocamento da coluna de sombra produzida pelo eclipse. Assim, a fronteira entre as regiões escura e iluminada, que apresentam fortes gradientes de temperatura e fluxo de ionização, experimenta um estado de não equilíbrio que se propaga como ondas. Portanto, se confirma que os eclipses solares podem atuar como fontes de ondas de gravidade atmosférica.

Uma análise para o tempo em que a totalidade do eclipse solar de 2010 interceptou o trajeto de propagação NPM-EACF mostra que a altura de referência aumentou em ~ 3 km e que a densidade eletrônica diminuiu 60% do seu nível quiescente. Esses resultados concordam com os resultados relatados por Sen Gupta et al. (1980), De et al. (2011), Chakrabarti et al. (2012) e Chernogor (2010), o que sugere que trajetos de propagação com distâncias entre dois e 13 Mm retratam os mesmos efeitos do eclipse. O coeficiente de recombinação durante o eclipse decresce de 6×10^{-5} a $1 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ entre as altitudes de 70 a 94 km, respectivamente. O coeficiente de recombinação obtido para a altitude de 80 km concorda com os resultados de Cary e Schneible (1965). Por último, se confirma que o valor do coeficiente de recombinação em condições de eclipse para a altitude de 80 km encontra-se entre os valores quiescentes de noite e de dia.

Perspectivas

Analisar SPAs medidos simultaneamente por trajetos de propagação de diferentes orientações para aprimorar um método de normalização independente desta característica de propagação. Tal ferramenta permitirá determinar o efeito de distúrbios na ionosfera.

Determinar a relação entre a fluência mínima e o fluxo de Lyman- α para um ciclo solar onde a variação de Lyman- α entre o período de mínimo e de máximo de atividade solar é muito mais significativo do que o ciclo solar 24. Tal estudo permitirá confirmar e melhor caracterizar a dependência da sensibilidade da ionosfera diurna com a atividade solar de longo prazo. Para isso, será relevante também investigar a influência da concentração ionosférica de NO com a fluência mínima.

Precisa-se estender a análise da variabilidade de ocorrência de periodicidades para tempos em que não ocorreu atividade sísmica, assim como para outros eventos sísmicos; isto para reforçar o papel das variabilidades das periodicidades encontradas como precursor sísmico fidedigno. Também é preciso considerar no estudo a dependência das anomalias pré-sísmicas detectadas com a profundidade do epicentro e com a distância mínima do epicentro à trajetória de propagação.

REFERÊNCIAS

- BARR, R; JONES, D. e RODGER, C. **ELF and VLF radio waves.** *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, v. 62, p. 1689–1718, 2000. doi: 10.1016/S1364-6826(00)00121-8.
- BARTH C., TOBISKA K., SISKIND, E. e CLEARY D. **Solar-terrestrial coupling: low-latitude thermospheric nitric oxide.** *J. of Geophysical Res.*, v. 15, n. 1, p. 92-94, 1988.
- BARTH C. **Nitric oxide in the lower thermosphere.** *Planet. Space Sci.*, v. 40, n. 2/3 p. 315-336, 1992.
- BASAK, T e CHAKRABARTI, S. **Effective recombination coefficient and solar zenith angle effects on low-latitude D-region ionosphere evaluated from VLF signal amplitude and its time delay during X-ray solar flares.** *Astrophys. & Space Sci.*, v. 348, p. 315–326, 2013. doi: 10.1007/s10509-013-1597-9.
- BELROSE, J. e BURKE, M. **Study of the lower ionosphere using partial reflection.** *J. of Geophysical Res.*, v. 69, n. 13, p. 2799-2818, 1964.
- BELROSE, J.; BODÉ, L.; HEWITT, L. **Physical properties of the polar winter mesosphere obtained from low-frequency propagation and partial reflection studies.** *Radio Sci.*, v. 68D, n. 12, p. 1319–1323, 1964.
- BELROSE, J.; ROSS, D.; MCNAMARIA, A. **Ionization changes in the lower ionosphere during the solar eclipse of 7 March 1970.** *J. of Geophysical Res.*, v. 34, p. 627-640, 1970.
- BRACEWELL, R. **Theory of formation of an ionospheric layer below E layer based on eclipse and solar flare effects at 16 kc/sec.** *J. Atmos. Terr. Phys.*, v. 2, n. 4, p. 226–235, 1952.
- CHAKRABARTI, S.; PAL, S.; SASMAL, S. et al. **VLF campaign during the total solar eclipse of July 22nd, 2009: observational results and experiments.** *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, v. 86, p. 65-70, 2012. doi: 10.1016/j.jastp.2012.06.006.
- CHERGOGOR, L. **Variations in the amplitude and phase of VLF radiowaves in the ionosphere during the August 1, 2008, solar eclipse.** *Geomagnetism and Aeronomy*, v. 50, n. 1, p. 96–106, 2010. ISSN 0016-7932.
- CLARK, R. **Visual astronomy of the deep sky.** Cambridge University Press and Sky Publishing, 1990.
- CLILVERD, M. A; RODGER, C. J; THOMSON, N. R et al. **Total solar eclipse effects on VLF signals: Observations and modeling.** *Radio Sci.*, v. 36, n. 4, p. 773–788, 2001.
- COHEN, M; INAN, U e PASCHAL, E. **Sensitive broadband ELF/VLF radio reception with the AWESOME instrument.** *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, v. 48, n. 1, p. 3–17, 2010.

- COMARMOND, J.-M. **Contribution a l'étude de la basse ionosphère par des mesures de phase et D'Amplitude D'ondes électromagétiques a tres basse fréquence.** Tese (doutorado em ciências), Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, 1977.
- CRARY, J. H. e SCHNEIBLE, D. E. **Effect of the eclipse of 20 July 1963 on VLF signals propagating over short paths.** *Radio Sci.*, v. 69D, n. 7, 1965.
- DAVIES, K. **Ionospheric radio propagation.** Dover, NY, EUA, Dover Publications, 1966.
- DE, S.; DE, B.; BANDYOPADHYAY, B. et al. **Effects of solar eclipse on long path VLF transmission.** *Bulg. J. Phys.*, v. 38, p. 206-215. 2011.
- DOWDEN, R. L. e ADAMS C. D. **SoftPAL, Proceedings of the 3rd VERSIM Workshop,** Hungary, 15-20 Sept., 2008.
- FISHMAN, G. J e INAN, U. S. **Observation of an ionospheric disturbance caused by a gamma-ray burst.** *Nature*, v. 331, p. 418 – 420, 1988.
- GARCIA, H.A. **Temperature and emission measure from GOES soft X-ray measurements.** *Solar Physics*, v.154, n.2, p.275-308, 1994.
- GEE, L.S. e LEITH, W.S. **The Global Seismographic Network.** U.S. Geological Survey Fact Sheet 2011–3021, 2 p., 2011.
- GELLER M., SMITH, L. e VOSS, H. **Analysis of nighttime E-region winds and ionization production.** *Radio Sci.*, v. 10, n. 3, p. 335-345, 1975
- GLEDHILL, J. **The effective recombination coefficient of electrons in the ionosphere between 50 and 150 km.** *Radio Sci.*, v. 21, n. 3, p. 399-408, 1965.
- GRANT, R. A.; RAULIN, J. P. e FREUND, F. T. **Camera trap records of animal activity prior to a M=7 earthquake in Northern Peru.** *J. of phy. and Chemistry of the Earth*, v. , 2015.
- GUHA, A.; DE, B. K.; ROY, R. et al. **Response of the equatorial lower ionosphere to the total solar eclipse of 22 July 2009 during sunrise transition period studied using VLF signal.** *J. of Geophysical Res.: Space Physics*, v. 115, n. A11, 2010.
- HAYAKAWA, M.; MOLCHANOV, O.; ONDOH, T. et al. **The precursory signature effect of the Kobe earthquake in VLF subionospheric signal.** *J. Comm. Res. Lab.*, v. 43, p. 169–180, 1996.
- HAYAKAWA, M. e HOBARA, Y. **Current status of seismo-electromagnetics for short-term earthquake Prediction.** *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, v. 1, n. 2, p. 115–155, 2010.
- HAYAKAWA, M.; RAULIN, J. P; KASAHARA, Y. et al. **Ionospheric perturbations in possible association with the 2010 Haiti earthquake, as based on mediumdistance subionospheric VLF propagation data.** *Natural Hazards and Earth System Sci.*, v. 11, n. 2, p. 513–518, 2011.
- HOY, R. **The effect of a total solar eclipse on the phase of long path VLF transmissions.** *J. Atmos. Terr. Phys.*, v. 31, n. 7, p. 1027– 1028, 1969.
- HUNSUCKER, R. D. e HARGREAVES, J. K. **The hight-latitude ionosphere and its effects on radio propagation.** Cambridge University Press, 2003.

- INAN, U. S; LEHTINEN, N. G; LEV-TOV, S. J et al. **Ionization of the lower ionosphere by γ -rays from a magnetar: detection of a low energy (3-10 keV) component.** *Geophys. Res. Lett.*, v. 26, p. 3357–3360, 1999. doi: 10.1029/1999GL010690.
- INAN, U. S; LEHTINEN, N. G; MOORE, R. C et al. **Massive disturbance of the daytime lower ionosphere by the giant γ -ray flare from magnetar SGR 1806-20.** *Geophys. Res. Lett.*, 34:L08103, 2007. doi: 10.1029/2006GL029145.
- KALADZE, T.D.; POKHOTELOV, O.A.; SHAH, H.A.; et al. **Acoustic-gravity waves in the Earth's ionosphere.** *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, v. 70, p. 1607 – 1616, 2008.
- KAUFMANN, P e SCHAAAL, R. **The effect of a total solar eclipse on long path VLF transmission.** *J. Atmos. Terr. Phys.*, v. 30, n. 3, p. 469 – 471, 1968.
- KIVELSON, M. e RUSSELL C. **Introduction to space physics.** Cambridge University Press, 1995.
- KRAUS, J. D. **Radio astronomy,** Cygnus-Quasar Books, 1986.
- LYNN, K. J. **The total solar eclipse of 23 October 1976 observed at VLF.** *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, v. 43, n. 12, p. 1309 – 1316, 1981.
- MAURYA, A.; PHANIKUMAR, D.; SINGH, R.; et al. **Low-mid latitude D region ionospheric perturbations associated with 22 July 2009 total solar eclipse: Wave-like signatures inferred from VLF observations,** *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 119, 8512–8523, 2014. doi:10.1002/2013JA019521.
- MCRAE, W. M. e THOMSON, N. R. **VLF phase and amplitude: daytime ionospheric parameters.** *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, v. 62, n. 7, p. 609 – 618, 2000.
- MEREGHETTI, S.; GOTZ, D.; BORKOWSKI, J.; et al. **The INTEGRAL Burst Alert System.** *A&A*, 411, L291–L297, 2003, doi: 10.1051/0004-6361:20031289.
- MEREGHETTI, S; GÖTZ, D; WEIDENSPONTNER, G. et al. **Strong bursts from the anomalous X-ray pulsar 1E 1547.0-5408 observed with the INTEGRAL/SPI Anti-Coincidence Shield.** *The Astrophys. J. Lett.*, v. 696, p. L74–L78, 2009. doi: 10.1088/0004-637X/696/1/L74.
- MEWE, R; GRONENSCHILD, E. e VAN DEN OORD, G. **Calculated X-radiation from optically thin plasmas.** *V. A & AS.*, v. 62, p. 197–254, 1985.
- MITRA, A. P. e JONES, R. E. **Recombination in the lower ionosphere.** *J. of Geophysical Research*, v. 59, n. 3, p. 391 – 406, 1954.
- MITRA, A. P. **A review of D-region processes in non-polar latitudes.** *J. Atmos. Terr. Phys.*, v. 30, p. 1065 – 1114, 1968.
- MITRA, A. P. **Ionospheric Effects of Solar Flares.** *Astrophysics and Space Science Library*, v. 46, 1974.
- MOHINO, E. **Análisis y mitigación del error ionosférico en los sistemas globales de navegación por satélite con receptores de una frecuencia.** Tese (Doutorado em ciências), *Universidad Complutense de Madrid*, 2005.

MOLCHANOV, O. A e HAYAKAWA, M. **Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes.** *J. of Geophysical Res.*, v. 103, p. 17489–17504, 1998. doi: 10.1029/98JA00999.

MORFITT, D.G. e SHELLMAN, C.H. **MODESRCH. An improved computer program for obtaining ELF/VLF/LF mode constants in an Earth-ionosphere waveguide.** *Naval Electronics Laboratory Center Interim Report 77T*, NTIS Accession No. ADA032573, National Technical Information Service, USA, 1976.

NICOLET, M. e AIKIN, A. C. **The formation of the D region of the ionosphere.** *J. of Geophysical Res.*, v. 65, n. 5, p. 1469–1483, 1960. doi: 10.1029/JZ065i005p01469.

PACINI, A. A e RAULIN, J.-P. **Solar X-ray flares and ionospheric sudden phase anomalies relationship: A solar cycle phase dependence.** *J. of Geophysical Res.: Space Physics*, v. 111, n. A9, 2006. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/2006JA011613.

RATCHLIFFE, J. A. **Sun, Earth and Radio: An Introduction to the Ionosphere and Magnetosphere,** World University Library, 1970 (Tradução: Dr. Elías Ovalle M., Dgeo, Univ. Concepción, Chile).

RAULIN, J.-P; MATOS, P. CDE; HADANO, R et al. **The South America VLF NETwork (SAVNET).** *Earth, Moon, and Planets*, v. 104, n. 1-4, p. 247–261, 2009. ISSN 0167-9295.

RAULIN, J.-P; TROTTET, G; KRETZSCHMAR, M et al. **Response of the low ionosphere to X-ray and Lyman- α solar flare emissions.** *J. of Geophysical Res.: Space Physics*, v. 118, p. 570–575, 2013. doi: 10.1029/2012JA017916.

RAULIN, J.-P; TROTTET, G; GUILLERMO GIMÉNEZ DE CASTRO, C et al. **Nighttime sensitivity of ionospheric VLF measurements to X-ray bursts from a remote cosmic source.** *J. of Geophysical Res.: Space Physics*, 2014.

SAMANES, J.; Raulin, J.P.; Macotela, E. et al. **Estimating the VLF interference distance using the South America VLF Network (SAVNET).** *Radio Sci.*, v. 50, 2015. doi:10.1002/2014RS005582.

SCHAAL, R. E; MENDES, A. M; ANANTHAKRISHNAN, S et al. **VLF Propagation effects produced by the eclipse.** *Nature*, v. 226, n. 5251, p. 1127–1129, 1970.

SCHUNK, R. **Solar-terrestrial energy program: handbook of ionospheric models.** Utah State Univ., Logan, Utah, 1996.

SEARS, R. D. **Cosmic noise absorption and VLF phase measurements on the eclipse of May 30, 1965.** *J. of Geophysical Res.*, v. 70, n. 23, p. 5967–5969, 1965.

SEN GUPTA, A.; GOEL, G. e MATHUR, B. **Effect of the 16 February 1980 solar eclipse of VLF propagation.** *J. Atmos. Terr. Phys.*, v. 42, p. 907-909, 1980.

TANAKA, Y. T; TERASAWA, T; YOSHIDA, M et al. **Ionospheric disturbances caused by SGR 1900+14 giant gamma ray flare in 1998: Constraints on the energy spectrum of the flare.** *J. of Geophysical Res.: Space Physics*, v. 113, n. A7, 2008. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/2008JA013119.

TANAKA, Y. T; RAULIN, J.-P; BERTONI, F. C. P et al. **First very low frequency detection of short repeated bursts from magnetar SGR J15505418.** *The Astrophys. J. Lett.*, v. 721, n. 1, p. L24, 2010.

TERASAWA, T; TANAKA, Y. T; TAKEI, Y et al. **Repeated injections of energy in the first 600ms of the giant flare of SGR1806-20.** *Nature*, v. 434, p. 1110–1111, 2005. doi: 10.1038/nature03573.

TORRENCE, C e COMPO, G. **A practical guide to wavelet analysis.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, n. 1, 1998.

VON KIENLIN, A.; AREND, N.; LICHTI, G.; et al. **Gamma-Ray Burst Detection with INTEGRAL/SPI.** *Proceedings of SPIE*, v. 4851, 2003.

WATT, A.D. **VLF radio engineering**, Pergamon press, 1967.

WAIT, J. R. e MURPHY, A. **The geometrical optics of VLF sky wave propagation.** *Proceedings of the IRE*, p. 754-760, 1957.

WAIT, J. R. **Diurnal changes of ionospheric deduced from phase velocity measurements at VLF.** *Proceedings of the IRE*, p. 998-1005, 1959.

WAIT, J. R e SPIES, K. P. **Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves.** *Volume NBS Technical Note 300. NIST Research Library*, 1964.

XIA, Y.; LIU, J.; Cui, X.; et al. **Abnormal infrasound signals before 92 $M \geq 7.0$ worldwide earthquakes during 2002–2008,** *J. of Asian Earth Sciences*, v. 41, p. 434-441, 2011, ISSN 1367-9120, doi:10.1016/j.jseaes.2010.04.015.

ŽIGMAN, V.; GRUBOR, D. e ŠULIC, D. **D-region electron density evaluated from VLF amplitude time delay during X-ray solar flares.** *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, v. 69, n. 7, p. 775 – 792, 2007. ISSN 1364-6826.