



ESTUDO DA BAIXA IONOSFERA EQUATORIAL UTILIZANDO DADOS DE RADARES

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)

Lais Maria Guizelli (UNITAU, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: lais@dae.inpe.br

Dr. Clezio Marcos De Nardin (DAE /INPE, Orientador)

E-mail: clezio.denardin@inpe.br

COLABORADORES

Aluno de Doutorado Juliano Moro (DAE/INPE)

Aluna de Doutorado Laysa Cristina Araújo Resende (DAE/INPE)

Aluno de Iniciação Científica Sony Su Chen (DAE/INPE)

Julho de 2012

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPCIAIS
Relatório Final de Atividades

Dados de Identificação

Bolsista:

Laís Maria Guizelli Morais
Curso: 5º ano de Engenharia Elétrica
UNITAU: Universidade de Taubaté

Orientador:

Dr. Clezio Marcos De Nardin
Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – /MCT
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT
São José dos Campos - SP

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

O projeto foi desenvolvido na Divisão de Aeronomia (DAE) da Área de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), sob a orientação do Dr. Clezio Marcos De Nardin, pesquisador da divisão.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPCIAIS
Relatório Final de Atividades

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPECIAIS
Relatório Final de Atividades

*"O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim terás o que colher."
(Cora Coralina)*

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPCIAIS
Relatório Final de Atividades

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPECIAIS
Relatório Final de Atividades

*Aos meus pais,
Elisabeth Guizelli e
José Joaquim de Moraes,
e ao meu orientador
Dr. Clezio Marcos De Nardin.*

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPCIAIS
Relatório Final de Atividades

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro.

A Deus, pela vida.

Ao meu orientador Dr. Clezio Marcos De Nardin, pelo apoio, a fim de realizar um bom trabalho.

A minha família, pelo carinho e presença de todos os dias.

Aos meus amigos de trabalho, Laysa, Juliano, Sony e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Em especial, a minha mãe Elisabeth Guizelli, pelo amor, esforço, atenção e por estar sempre ao meu lado.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPCIAIS
Relatório Final de Atividades

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO	13
1.1	Introdução.....	13
1.2	Objetivo Científico.....	13
2	IONOSFERA TERRESTRE, TEORIA DO DÍNAMO ATMOSFÉRICO E ELETROJATO EQUATORIAL	15
2.1	Ionosfera Terrestre.....	15
2.1.1	Região D.....	16
2.1.2	Região E.....	17
2.1.3	Região F.....	17
2.2	Condutividades Ionosféricas.....	18
2.2.1	Condutividade Longitudinal.....	18
2.2.2	Condutividade Pedersen.....	19
2.2.3	Condutividade Hall.....	19
2.3	Teoria do Dínamo Atmosférico na Região E	20
2.4	Eletrojato Equatorial.....	21
2.4.1	Irregularidades de 3-m do EEJ	21
3	Instrumentação e Metodologia de Análise	23
4	Resultados e Discussões	26
4.1	Resultados das Análises dos Dados do Radar de Jicamarca	26
4.2	Discussão dos Resultados	29
5	Atividades Realizadas	33
5.1	Trabalhos Completos Publicados em Anais de Congressos.....	33
5.1.1	Congresso Internacional da SBGf (CISBGF)	33
5.2	Resumos Publicados em Anais de Congressos.....	33
5.2.1	Simpósio de Iniciação Científica do INPE (SICINPE)	33
5.2.2	13 th International Symposium on Equatorial Aeronomy.....	33
5.3	Artigo Submetido em Revista Internacional.....	34
5.4	Participação em Escola Internacional.....	34
6	Conclusões.....	36
	APÊNDICE A – Artigo Submetido para a revista <i>Earth Planets and Space</i>	38

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1: Exemplos de perfis diurnos dos principais constituintes da atmosfera neutra (linhas tracejadas) e da ionosfera (linhas sólidas).....	15
Figura 2: À esquerda a localização das três camadas ionosféricas conhecidas no perfil ionosférico, com sua nomenclatura. E à direita, a dimensão aproximada da ionosfera em relação a Terra.	16
Figura 3: Ilustração da formação da camada F1 de acordo com o comportamento das perdas linear (curva a) e quadráticas (curva b)	17
Figura 4: Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal (σ_0), Pedersen (σ_1) e Hall (σ_2) com a altura. Para conversão 1 e.m.u. (cgs) = 10^{11} S/m (SI).....	19
Figura 5: Esquema das correntes ionosféricas e campos elétricos baseado na teoria do dínamo ionosférico.....	21
Figura 6: Espectros de irregularidades Tipo 1, à esquerda, e irregularidades Tipo 2, à direita, dos dados do Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz, no dia 24 de janeiro de 2001, às 14 horas, para a altura de 105,2 km, medidas no Observatório Espacial de São Luís do Maranhão/INPE - MCT.....	22
Figura 7: Radar instalado no Rádio Observatório de Jicamarca, Lima-Peru.	23
Figura 8: Rotina desenvolvida em IDL para a realização de estatísticas das irregularidades do EEJ.....	25
Figura 9: Mapa RTI estatístico da ocorrência de irregularidades de do EEJ para os meses D (verão)	26
Figura 10: Mapa RTI estatístico da ocorrência de irregularidades de do EEJ para os meses E (equinócios).....	26
Figura 11: Mapa RTI estatístico da ocorrência de irregularidades de do EEJ para os meses J (inverno)	27
Figura 12: Evolução temporal do EJC (painel superior) para os meses D (bolas vermelhas), meses E (bolas verdes) e meses J (bolas azuis), com suas correspondentes espessuras em relação ao centro; e a evolução temporal do EJC (painel inferior) da ocorrência das irregularidades nas alturas do EJC para as diferentes estações do ano.....	28
Figura 13: Média da deriva de plasma vertical em Jicamarca durante os equinócios, inverno e verão.....	32
Figura 14: Um esboço da circulação das correntes na ionosfera no período próximo ao final do dia.....	32
Figura 15: Foto do <i>Incoherent Scatter Radar</i> – radar ionosférico instalado na cidade de Kangerlussuaq.....	35
Tabela 1: Dias dos dados de 2007 e 2008 selecionados para análise	245

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1 Introdução

Neste relatório serão apresentadas as atividades desenvolvidas no período de agosto de 2011 até julho de 2012. Neste período desenvolvemos atividades teóricas e práticas relacionadas com o tema do projeto. Como atividade teórica realizamos uma revisão bibliográfica sobre ionosfera terrestre, eletrojato equatorial e funcionamento de radares. Como atividades práticas, analisamos dados de um radar que está instalado no Rádio Observatório de Jicamarca, no Peru, cujas coordenadas são 11.57°S, 76.52°O, dip: 2°N. Com os resultados desta análise elaboramos trabalhos que foram apresentados em congressos nacionais e internacionais. Além disso, elaboramos um artigo que foi submetido para a revista *Earth, Planets and Space*, o qual encontra-se em situação *In Press*. Neste artigo desenvolvemos um estudo estatístico da ocorrência das irregularidades de plasma do eletrojato equatorial (EEJ) naquele setor.

No capítulo 2 deste relatório serão apresentados trabalhos de revisão teórica, cuja finalidade é suprir parte do primeiro objetivo deste projeto (formação acadêmica), bem como de desenvolver os conceitos sobre a ionosfera terrestre e o eletrojato equatorial. No capítulo 3 serão apresentadas as instrumentações e as metodologias utilizadas para o desenvolvimento do trabalho. No capítulo 4 serão sumarizadas as discussões sobre os resultados observados nessa pesquisa, as quais cumprem os dois objetivos do projeto (formação acadêmica e o estudo e monitoramento da ionosfera na região equatorial). No 5º capítulo listaremos os trabalhos publicados em anais de eventos e submetidos para publicação, nos quais temos a primeira autoria ou contribuímos para o trabalho. Por fim, no capítulo 6, apresentamos as conclusões deste relatório.

1.2 Objetivo Científico

O principal objetivo científico deste projeto é caracterizar estatisticamente e analisar o comportamento da ionosfera equatorial, com atenção voltada para a presença do eletrojato equatorial. O interesse nesta região tropical é devido a ela apresentar uma grande diversidade de fenômenos de interesse científico, os quais também são capazes de interferir nas comunicações transionosféricas. A outra motivação é a possibilidade dos resultados deste estudo levar ao desenvolvimento de ferramentas eficientes de Previsão do Clima Espacial Local, ou seja, ferramentas que nos permitam antever possíveis efeitos das atividades “eruptivas” solares no ambiente ionosférico. No ambiente espacial brasileiro, os efeitos do Clima Espacial são particularmente mais intensos devido à grande extensão territorial do país, sua localização geográfica na região equatorial e à ocorrência de anomalias regionais no campo magnético e em camadas ionosféricas. Os serviços gerados pelos sistemas estrangeiros não levam em conta os fenômenos típicos das regiões equatoriais. Portanto, é importante mantermos nossos esforços para estabelecer as

bases de um sistema científico brasileiro para pesquisas, monitoramento e previsão do Clima Espacial, capaz de realizar essas atividades de maneira a atender as necessidades regionais de maneira mais eficiente. Neste contexto, estudos comparativos entre setores próximos, mas com características diferentes, podem ajudar na obtenção de explicações para fenomenologia do setor brasileiro.

CAPÍTULO 2

2 IONOSFERA TERRESTRE, TEORIA DO DÍNAMO ATMOSFÉRICO E ELETROJATO EQUATORIAL

2.1 Ionosfera Terrestre

A faixa da atmosfera terrestre situada entre 60 e 2000 km de altitude é chamada Ionosfera. Ela é formada por um plasma originado principalmente pela fotoionização dos átomos e moléculas da atmosfera neutra. Quando os raios solares que são muito energéticos, ao atingem os constituintes neutros fazem com que estes liberem elétrons, formando os íons positivos, resultando no plasma ionosférico. Os principais constituintes iônicos do plasma ionosférico são o oxigênio atômico ionizado (O^+) e a molécula de óxido nítrico ionizada (NO^+). A figura 1 mostra exemplos de perfis diurnos dos principais constituintes da ionosfera (linhas contínuas) e da atmosfera neutra (linhas tracejadas) obtidos de medidas de espectrômetros de massa. Notamos um pico em torno dos 250 km, que é conhecido como pico da região F. A altura onde a máxima densidade eletrônica da ionosfera é encontrada varia com a latitude, nível de atividade solar, hora do dia, dentre outros fatores (Rishbeth e Garriott, 1969; Davies, 1965; Kelley, 1989).

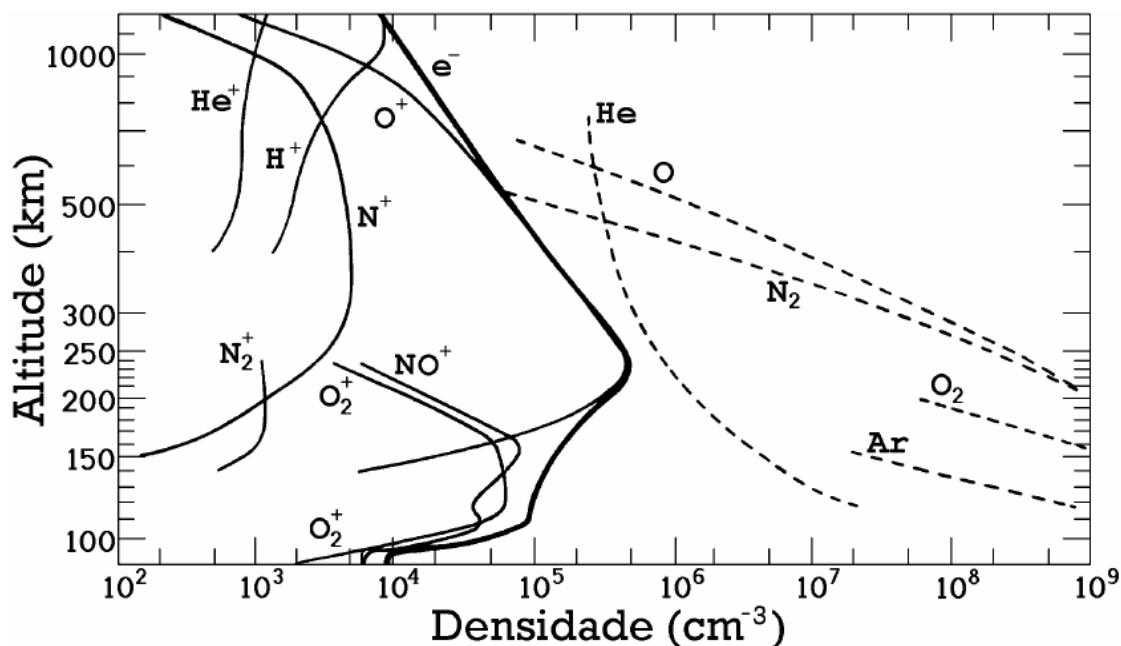


Figura 1: Exemplos de perfis diurnos dos principais constituintes da atmosfera neutra (linhas tracejadas) e da ionosfera (linhas sólidas).

FONTE: Kivelson e Russell (1995, p.196).

Após a ionização começam as reações de recombinação que levam a perda do plasma, fazendo com que seus constituintes ionizados retornem a condição de constituintes da atmosfera neutra. A taxa de troca de densidade eletrônica é expressa pela equação da continuidade (Hargreaves, 1992).

$$\frac{\delta N}{\delta t} = q - L - \nabla \cdot (Nv) \quad (1)$$

onde N é densidade do plasma, q é a taxa de produção, L é a taxa de perda por recombinação, $\nabla \cdot (Nv)$ expressa a perda/ganho de elétrons por transporte, sendo v a velocidade de transporte.

A constante criação e destruição do plasma indica que a estrutura ionosférica varia conforme a quantidade de radiação solar recebida. Os diferentes processos de ionização, a variação da densidade atmosférica e da absorção da quantidade de energia proveniente da radiação solar geram três regiões ionosféricas distintas, que são as regiões D, E e F (subdividida em F1, F2, e algumas vezes F3). A Figura 2 ilustra as três camadas com suas respectivas alturas e densidades eletrônicas.

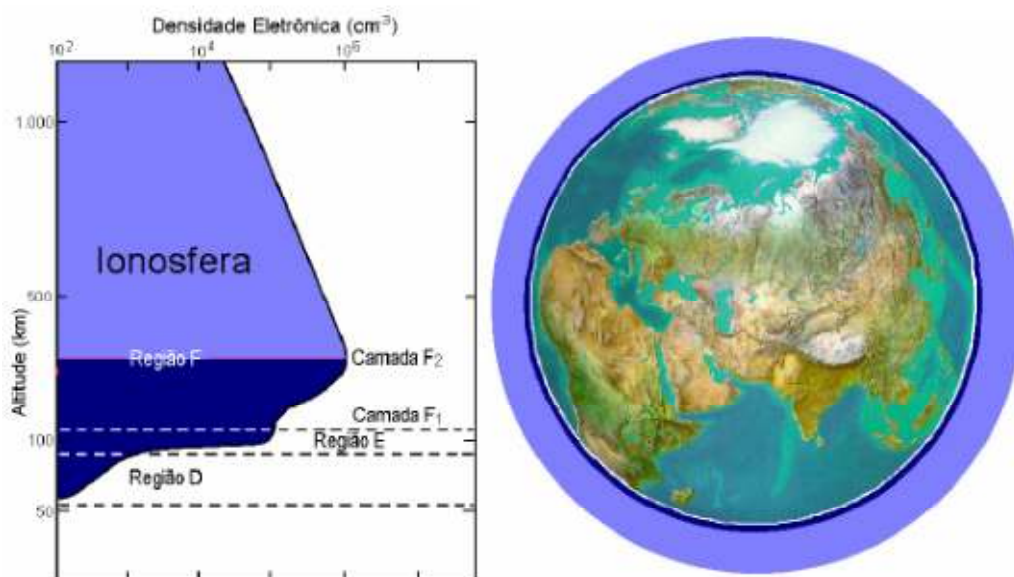


Figura 2: À esquerda a localização das três camadas ionosféricas conhecidas no perfil ionosférico, com sua nomenclatura. E à direita, a dimensão aproximada da ionosfera em relação a Terra.

FONTE: Denardini (1999, p.26).

2.1.1 Região D

A região D está localizada na porção inferior da ionosfera, entre ~ 60 e 90 km acima da superfície terrestre. É a menos densa em elétrons e praticamente desaparece durante a noite. Esta região é formada essencialmente por colisões de partículas energéticas com a atmosfera neutra. Os raios cósmicos afetam toda a baixa atmosfera, tornando-se a principal fonte de ionização em alturas abaixo de 90 km (Denardini, 1999). Esta região possui metais alcalinos (Na, K, Li) e as reações químicas mais importantes envolvem os seguintes elementos: O, O₃, NO₂, CO₂, H₂O. Ela também é responsável pela absorção das ondas de rádio em alta frequência (Rishbeth e Garriott, 1969).

2.1.2 Região E

Essa camada inicia por volta dos 90 km e se estende até ~ 120 km. Durante a noite sua densidade eletrônica diminui significativamente, pois sua principal fonte produtora, o Sol, está ionizando o outro hemisfério. Nesse horário sua densidade eletrônica é da ordem de 5×10^9 elétrons/m³, enquanto que durante o dia ela pode ser da ordem de 10^{11} elétrons/m³. Ela possui dois íons majoritários: NO⁺ e O₂⁺, mas também é caracterizada pela presença de íons metálicos como Mg⁺ e Fe⁺. A presença destes íons metálicos é creditada à ablação meteórica. E deve ser mencionado que estes íons são os responsáveis pela formação das camadas E esporádicas em médias latitudes (Kivelson and Russell, 1995).

2.1.3 Região F

A região F fica acima da região E, iniciando a ~ 120 km da superfície terrestre e estendendo-se até o limite superior da ionosfera (~ 2000 km). Essa região se subdivide em F1 e F2 e em determinados horários e latitudes pode aparecer a F3 (Abdu, 1997).

2.1.3.1 Camada F1

Esta porção da região F está localizada imediatamente acima da região E, e estende-se por aproximadamente 20 - 40 km. A espécie neutra molecular predominante nessa região é o N₂. A espécie atômica predominante nessa região é o O (Hargreaves, 1992). O íon majoritários são o O₂⁺, NO⁺ e O⁺, e sua concentração pode variar de $2,5 \times 10^{11}$ a 4×10^{11} m⁻³. Porém, à noite a densidade eletrônica dessa região se reduz (Kelley, 1989).

A camada F1 é caracterizada por um pequeno pico ou uma simples inflexão na curva do perfil vertical eletrônico/iônico, dependendo da altura máxima da perda quadrática (h_o) na qual a perda linear passa a dominar o processo. A figura 3 ilustra a formação da região, dependendo do processo dominante.

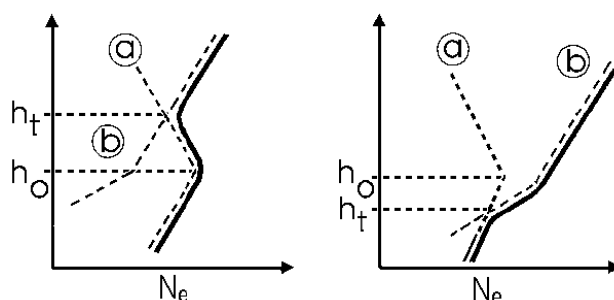


Figura 3: Ilustração da formação da camada F1 de acordo com o comportamento das perdas linear (curva a) e quadráticas (curva b)
FONTE: Denardini (1999)

2.1.3.2 Camada F2

Esta camada localiza-se na parte mais alta da Ionosfera. Ela inicia em torno de 160 km e seu máximo de concentração eletrônica pode atingir aproximadamente 10^{12} elétrons/m³, localizando-se em torno dos 300 km de altitude. Durante a noite a sua densidade eletrônica normalmente decai para cerca de 5×10^{10} elétrons/m³. Dentre todas as regiões, ela é a que apresenta a maior concentração de elétrons da ionosfera terrestre, mesmo durante a noite. Isso ocorre por diversos fatores, entre eles, ela possui íons atômicos como espécie predominante, os quais possuem menor taxa de recombinação (Kelley, 1989).

Há grande interesse no estudo da rádio propagação através desta região, devido ela possuir um grande número de irregularidades ionosféricas, as quais alteram significativamente as características do meio e apresentam um comportamento de difícil previsão.

2.1.3.3 Camada F3

A camada F3 pode ser dividida em dois tipos, dependendo da época, ou seja, tipo 1, mais comum nos meses de verão, e do tipo 2 nos meses de inverno (Abdu, 1997). Esta camada surge em latitudes muito próximas do equador magnético, devido à rápida elevação do plasma ionosférico pelos processos eletrodinâmicos, abrindo espaço para que mais atmosfera neutra continue a ser ionizada abaixo.

2.2 Condutividades Ionosféricas

A condutividade elétrica de um meio qualquer é dada pela equação (2):

$$\sigma = \frac{J}{E} = \left(\frac{Nev}{E} \right), \quad (2)$$

onde " J " é a densidade de corrente, E é o campo elétrico, e é a carga de cada partícula, " ν " é a taxa de colisão com as partículas neutras e N já foi apresentado anteriormente.

Na ionosfera há simultaneamente campos elétricos e magnéticos, o que leva a um comportamento anisotrópico. Por isso as condutividades ionosféricas são apresentadas ao longo das suas 3 componentes: ao longo do campo magnético, ao longo do campo elétrico, perpendicular ao campo magnético, e a condutividade que é perpendicular, simultaneamente, ao campo magnético e elétrico.

2.2.1 Condutividade Longitudinal

Condutividade longitudinal ou direta (σ_0) é a condutividade paralela ao campo geomagnético, \mathbf{B} . Esta quantidade é definida pela seguinte equação:

$$\sigma_0 = N \cdot e^2 \cdot \left[\frac{1}{m_e \cdot \nu_e} + \frac{1}{m_i \cdot \nu_i} \right] \quad (3)$$

2.2.2 Condutividade Pedersen

A condutividade Pedersen ou transversal (σ_1) refere-se a condutividade na direção da componente de \mathbf{E} perpendicular a direção de \mathbf{B} , e é definida por:

$$\sigma_1 = N \cdot e^2 \cdot \left[\frac{\nu_e}{m_e \cdot (\nu_e^2 + \Omega_e^2)} + \frac{\nu_i}{m_i \cdot (\nu_i^2 + \Omega_i^2)} \right] \quad (4)$$

2.2.3 Condutividade Hall

A condutividade Hall (σ_2) refere-se a condutividade na direção perpendicular, simultaneamente, as direções de \mathbf{B} e da componente de \mathbf{E} perpendicular a direção de \mathbf{B} . Esta é definida pela equação:

$$\sigma_2 = N \cdot e^2 \cdot \left[\frac{\Omega_e}{m_e \cdot (\nu_e^2 + \Omega_e^2)} - \frac{\Omega_i}{m_i \cdot (\nu_i^2 + \Omega_i^2)} \right] \quad (5)$$

Nas equações de (3) a (5), ν_e e ν_i são freqüências de colisões, Ω_e e Ω_i são freqüências ciclotrônicas, m_e e m_i são massas. Os índices "e" e "i" referem-se, respectivamente, ao elétron e ao íon. As quantidades e e N já foram definidas anteriormente. A partir deste conjunto de equações, podemos estabelecer sua variação em altura, uma vez todas as quantidades que as define assim variam. A Figura 4 mostra uma distribuição em altura das condutividades expressas pelas equações (3) a (5).

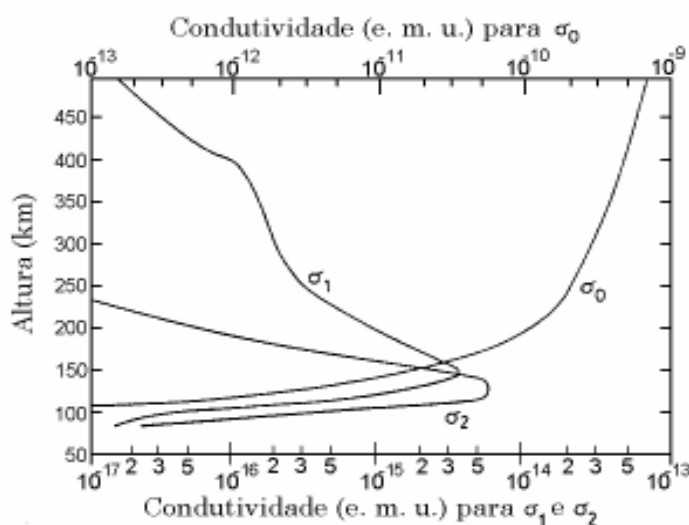


Figura 4: Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal (σ_0), Pedersen (σ_1) e Hall (σ_2) com a altura. Para conversão 1 e.m.u. (cgs) = 10^{11} S/m (SI).

FONTE: Akasofu e Chapman (1972, p. 244).

Nesta figura nota-se que os picos das condutividades Pedersen e Hall ocorrem na região E. No equador magnético este pico fica em torno de 150 km para a condutividade Pedersen e 130 km para a condutividade Hall. Note-se agora que as quantidades σ_0 , σ_1 , σ_2 , foram definidas em relação as direções dos campos elétricos e magnéticos. Ao organizarmos estas quantidades em coordenadas geográficas norte-sul (x), leste-oeste (y) e para cima (z) chegamos ao tensor condutividade elétrica ($\underline{\sigma}$), dado pela equação 6.

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_0 \cdot \cos^2(I) + \sigma_1 \cdot \sin^2(I) & \sigma_2 \cdot \sin(I) & -(\sigma_0 - \sigma_1) \cdot \sin(I) \cdot \cos(I) \\ -\sigma_2 \cdot \sin(I) & \sigma_1 & -\sigma_2 \cdot \cos(I) \\ -(\sigma_0 - \sigma_1) \cdot \sin(I) \cdot \cos(I) & -\sigma_2 \cdot \cos(I) & \sigma_1 \cdot \cos^2(I) + \sigma_0 \cdot \sin^2(I) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Neste caso é introduzido o conceito de ângulo de inclinação de \mathbf{B} , representado pela letra I . Na região do equador magnético a inclinação é nula, logo o tensor condutividade $\underline{\sigma}$ desta região resume-se a:

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_1 & -\sigma_2 \\ 0 & \sigma_2 & \sigma_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

A combinação das correntes Pedersen e Hall formam a corrente total do EEJ. No equador essa corrente é proporcional à condutividade Cowling (σ_c), a qual é representada na forma da equação (8). O máximo desta condutividade fica localizado próximo aos 105 km de altura.

$$\sigma_c = \sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1} \quad (8)$$

2.3 Teoria do Dínamo Atmosférico na Região E

O conceito de eletrojato equatorial (EEJ) é explicado através da teoria do dínamo atmosférico (Forbes, 1981). Segundo esta teoria, os ventos neutros (\mathbf{U}), causados pelo aquecimento e pela diferença de pressão, arrastam as partículas neutras da região equatorial para os pólos. Ao encontrar o campo magnético da Terra, praticamente vertical em altas latitudes, essas partículas são derivadas para o terminador do amanhecer em ambos os hemisférios. Com isso, há uma polarização positiva o lado do amanhecer do terminador e negativa o lado do anoitecer. A diferença de potencial existente em torno do equador gera uma corrente denominada corrente primária do EEJ. Este esquema é mostrado na Figura 5.

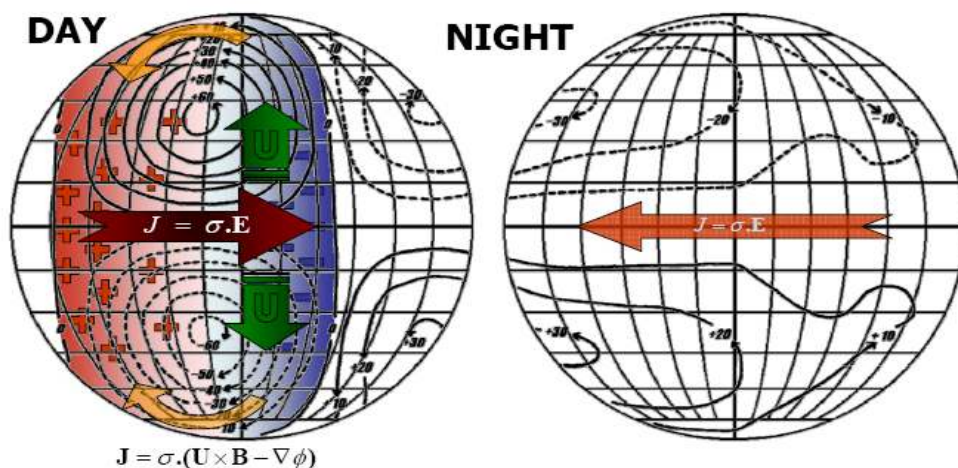


Figura 5: Esquema das correntes ionosféricas e campos elétricos baseado na teoria do dínamo ionosférico.
FONTE: Denardini (2004).

2.4 Eletrojato Equatorial

O eletrojato é definido como sendo uma corrente que flui ao longo do equador magnético na região E da ionosfera. Ela está confinada em uma faixa de 600 km de extensão na direção norte-sul (limitada pela orientação horizontal do campo magnético terrestre), entre aproximadamente 90 e 120 km de altitude (limitada pela alta condutividade Cowling). Ele pode ser considerado como uma resposta da região E equatorial à presença do sistema global do dínamo ionosférico. Por isso o sentido do EEJ segue os campos impostos pelo dínamo, ou seja, para leste durante o dia e para oeste durante a noite. (Denardini, 2004).

A região E apresenta uma diversa gama de irregularidades (alinhadas ao campo magnético) de vários comprimentos de ondas em seu plasma. Algumas delas estão relacionadas com o eletrojato equatorial, as quais são nosso objeto de estudo. Nas seções a seguir apresentamos estas irregularidades e algumas de suas características.

2.4.1 Irregularidades de 3-m do EEJ

Estudos feitos utilizando radares VHF mostram dois tipos distintos de irregularidades de 3-m no eletrojato equatorial. Irregularidades tipo 1 apresentam um pico de potência estreito e centrado sob o deslocamento Doppler, correspondente a velocidade íon acústica, que é em torno de 360 m/s. As irregularidades tipo 2 apresentam um espectro de potência mais espalhado e um deslocamento Doppler menor que o correspondente a velocidade íon acústica (Denardini, 1999). A Figura 6 mostra o espectro de potência obtido pela análise dos dados de radar, os quais possuem assinaturas destes dois tipos de irregularidades.

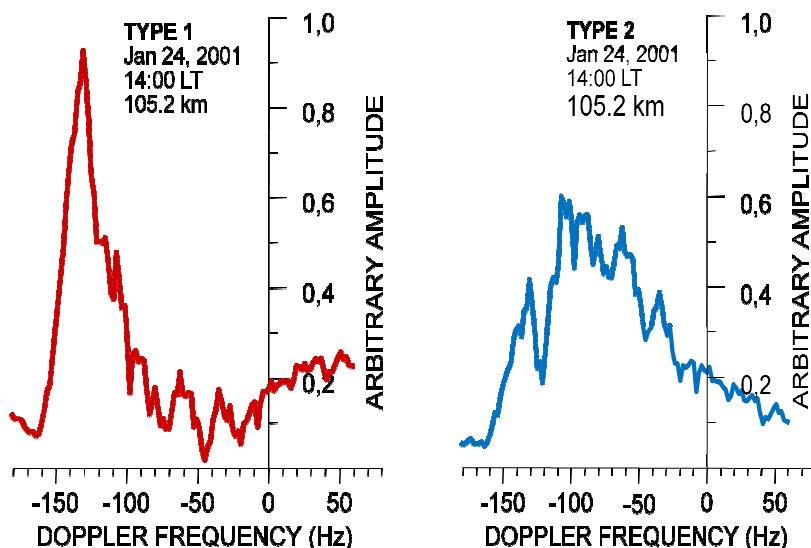


Figura 6: Espectros de irregularidades Tipo 1, à esquerda, e irregularidades Tipo 2, à direita, dos dados do Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz, no dia 24 de janeiro de 2001, às 14 horas, para a altura de 105,2 km, medidas no Observatório Espacial de São Luís do Maranhão/INPE - MCT.
FONTE: Denardini (2004).

Irregularidades tipo 1 ocorrem no plasma quando a força inercial nos íons associadas com uma perturbação de densidade excede a força do gradiente de pressão, a qual tende a destruir a perturbação causando a difusão através da linha de campo magnético, que normalmente ocorre quando a velocidade de deslocamento dos elétrons ultrapassa a velocidade íon acústica (Denardini 1999). Este tipo de irregularidade tende a aparecer em horários entre 10 e 13 (LT), levando em conta dias magneticamente calmos (Forbes, 1981).

Os ecos tipo 2 ocorrem em plasmas não homogêneos se um campo elétrico ambiente gerado pela diferença de densidade tem uma componente muito acentuada na direção paralela ao gradiente de densidade. Estas irregularidades podem aparecer desde os primeiros horários da manhã até o pôr-do-sol, considerando dias magneticamente calmos (Denardini 1999).

CAPÍTULO 3

3 Instrumentação e Metodologia de Análise

Os dados utilizados para realização do projeto foram obtidos com o radar que está instalado em Lima - Peru, no Rádio observatório de Jicamarca (11.57°S , 76.52°W , dip: 2°N). Este radar (figura 7) pode operar em vários modos, um deles é “Jicamarca Unattended Long-term Investigations of the Ionosphere and Atmosphere (JULIA)” que opera com baixa potência (20 kW), que tem como objetivo a detecção das irregularidades de plasma. Este radar utiliza uma frequência de operação de 50 MHz, correspondente a irregularidades com comprimento de onda de 3 m. Os dados foram adquiridos usando os 4 módulos de transmissão. O conjunto de antena gera um feixe principal com $\sim 2^{\circ}$ em relação a vertical.



Figura 7: Radar instalado no Rádio Observatório de Jicamarca, Lima-Peru.

A análise básica dos dados do radar começa com o pré-processamento. Que consiste em ler os valores de voltagem e agrupar por faixa de altura. Um algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*) é empregado para análise da densidade espectral de energia. O resultado da aplicação da FFT a este número complexo é um espectro para uma dada altura e para o tempo correspondente à aquisição do eco recebido. Agrupando vários espectros consecutivos obtemos um espectrograma que é um mapa que mostra a variação do deslocamento Doppler em frequência em função do tempo. A integração em frequência de cada espectro de potência componente dos espectrogramas resulta na variação da potência

total de sinal retro-espalhado ao logo do período de aquisição para a faixa de altura correspondente. Agrupando o resultado de todos os espectrogramas, integrados em frequência, no seu respectivo tempo e altura, obtemos um mapa da variação de intensidade de potência mapa RTI, para o dia de aquisição.

Para analisar as irregularidades no plasma ionosférico nós selecionamos 196 dias de dados dos anos de 2007 e 2008. Esses dados foram agrupados como mostra a Tabela 1, onde: (1) os meses D correspondem ao verão e consistem de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro; (2) os meses E são março, abril, setembro e outubro, referentes aos meses dos equinócios; (3) os meses J referem-se ao inverno, e são formados pelos meses de maio, junho, julho e agosto. Neste projeto nós desenvolvemos rotinas para somar todas as matrizes RTI de cada estação e dividir pelo número de dias analisados.

Tabela 1: Dias dos dados de 2007 e 2008 selecionados para análise

D Months (January, February, November, December)	
November 2007	13,14,15,21,22,23, 24,25,26,27,29,30
December 2007	1,2,3,4,5,20,21,22,23,24, 25,26,27, 28,29,30,31
January 2008	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10, 11,12,13,14,15
February 2008	6,7,8,9,10,11,28,29
E Months (March, April, September, October)	
September 2007	4,5,6,7,8,9,10,20,21, 22,23,24,25,26,27
March 2008	1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13
September 2008	1
J Months (May, June, July, August)	
May 2007	14,15,16,17,18,19,20,21,22, 23,24,25,26,27,28,29,30,31
June 2007	1,2,3,4,5,6, 27, 28,29,30
July 2007	1,2,3,4
August 2007	16,17,18,19,20,21,22, 23,24,25,26,27,28
May 2008	8,9,10,11,12,13,14,15,16,17, 18,19,20,21,22,23,24,25,26,27
June 2008	26,27,28,29,30
July 2008	1,2,3,4,5,6,7,17,18,19,20,21, 22,23,24,25,26,27,28,29,30,31
August 2008	1,2,3,4,5,14,15,16,17,18,19,20,21, 22,23 24,25, 26,27,28,29,30,31

Foi desenvolvida uma rotina em IDL (*Interactive Data Language*), como mostra a figura 8, para a realização da estatística da ocorrência sazonal das irregularidades do EEJ. Essa rotina lê os arquivos “.ncdf” (para cada dia de operação) e guarda em forma de matriz as informações da distribuição temporal e espacial da força de sinal recebido do EEJ (em dB). As informações de potência recebida são lidas e uma nova matriz é criada, chamada de Matriz Diária de Informações do Sinal e é formada de de “zeros” e “uns. Nela, “zero” significa que o sinal em dB é negativo (sem eco, isto é, sem irregularidades do EEJ) e “um” significa que o sinal em dB é positivo (presença de eco, isto é, presença de irregularidades do EEJ). Todas as Matrizes Diárias de Informações de Sinal são somadas levando em consideração as faixas de altura e horários locais de operação de cada célula das matrizes.

O critério de seleção pela potência recebida em dB foi escolhido porque potências em dB negativas significam que a amplitude do sinal é inferior a amplitude do ruído, isto é, a relação sinal ruído é menor que 1 (um). Deste modo, o logaritmo resulta em um número negativo. Assim, o critério de dB maior que 0 (zero) significa consideramos a presença das irregularidades somente quando a relação sinal ruído for superior a unidade, ou seja, somente quando há sinal claramente detectável.

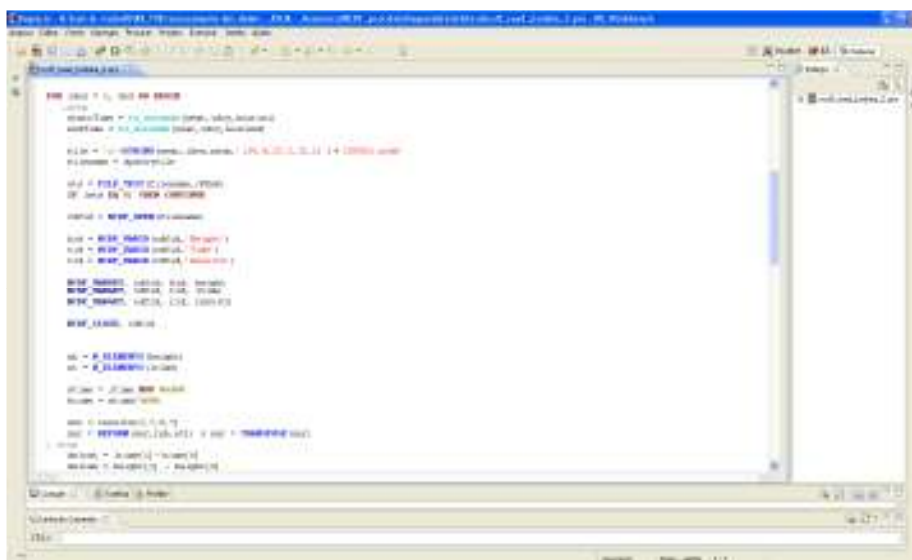


Figura 8: Rotina desenvolvida em IDL para a realização de estatísticas das irregularidades do EEJ.

CAPÍTULO 4

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo apresentamos os resultados das análises realizadas com o conjunto de dados selecionados, mencionado no capítulo anterior.

4.1 Resultados das Análises dos Dados do Radar de Jicamarca

As figuras 9, 10 e 11 mostram mapas RTI estatísticos para os meses D, E e J, respectivamente. A cor vermelha da barra de cor indica a máxima ocorrência de irregularidades de plasma. Por outro lado a cor azul indica a menor ocorrência. Esses mapas mostram a ocorrência diurna das irregularidades (06:00 até 18:00).

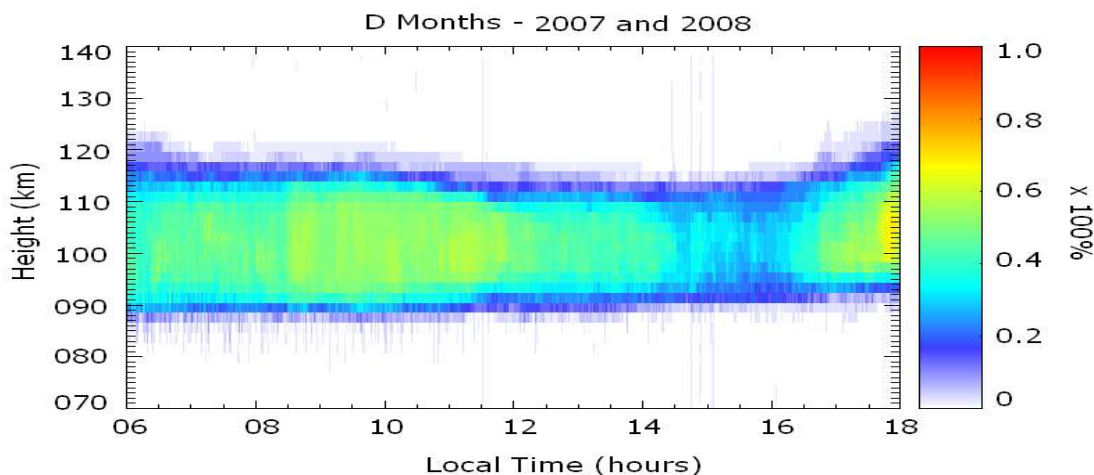


Figura 9: Mapa RTI estatístico da ocorrência de irregularidades de do EEJ para os meses D (verão)

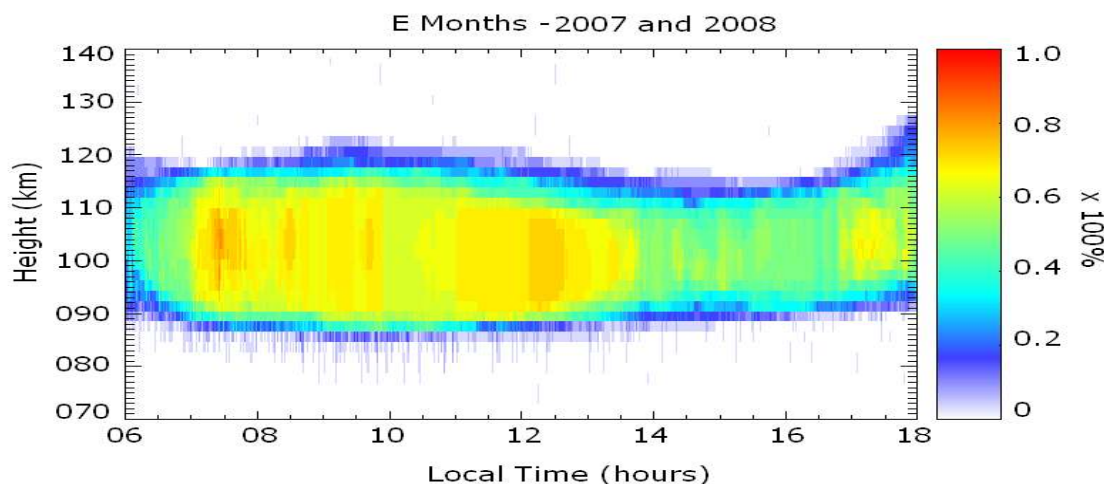


Figura 10: Mapa RTI estatístico da ocorrência de irregularidades de do EEJ para os meses E (equinócios)

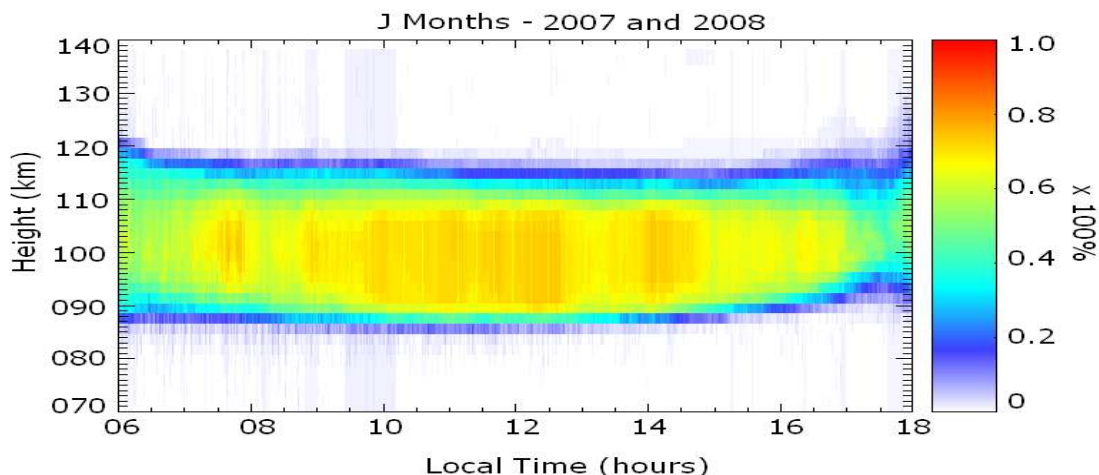


Figura 11: Mapa RTI estatístico da ocorrência de irregularidades de do EEJ para os meses J (inverno)

Os mapas RTI estatísticos sumarizam os principais resultados da estatística sazonal de ocorrência de irregularidades de plasma no EEJ. Nestes mapas podemos notar claramente que as irregularidades de plasma estão confinadas de 90 a 120 km de altura, durante todo o período de observação (das 06:00 às 18:00 LT) e em todas as estações do ano. Porém, existem alguns períodos específicos do dia em que as irregularidades se desenvolvem mais, que é nas horas da manhã e no começo da tarde. Além disso, parece haver um aumento da região de espalhamento no fim da tarde. Existem algumas discrepâncias na ocorrência das irregularidades conforme as diferentes estações do ano, como o enfraquecimento da ocorrência das irregularidades próximo as 15 LT durante os meses D e E.

Com o objetivo de investigar em detalhes os resultados obtidos, foi realizada uma análise dos mapas RTI estatísticos baseado em um ajuste de curvas para obter a evolução temporal da distribuição das ocorrências das irregularidades. O primeiro parâmetro que foi obtido foi o centro da ocorrência das irregularidades em função da altura (EJC). O segundo parâmetro obtido foi a espessura da região (EJT), onde a ocorrência das irregularidades ultrapassaram 20% dos casos. O último parâmetro obtido foi o percentual da ocorrência das irregularidades nas alturas do EJC, isto é, o valor do histograma para cada coluna do mapa RTI estatístico. A figura 12 sumariza esses resultados obtidos.

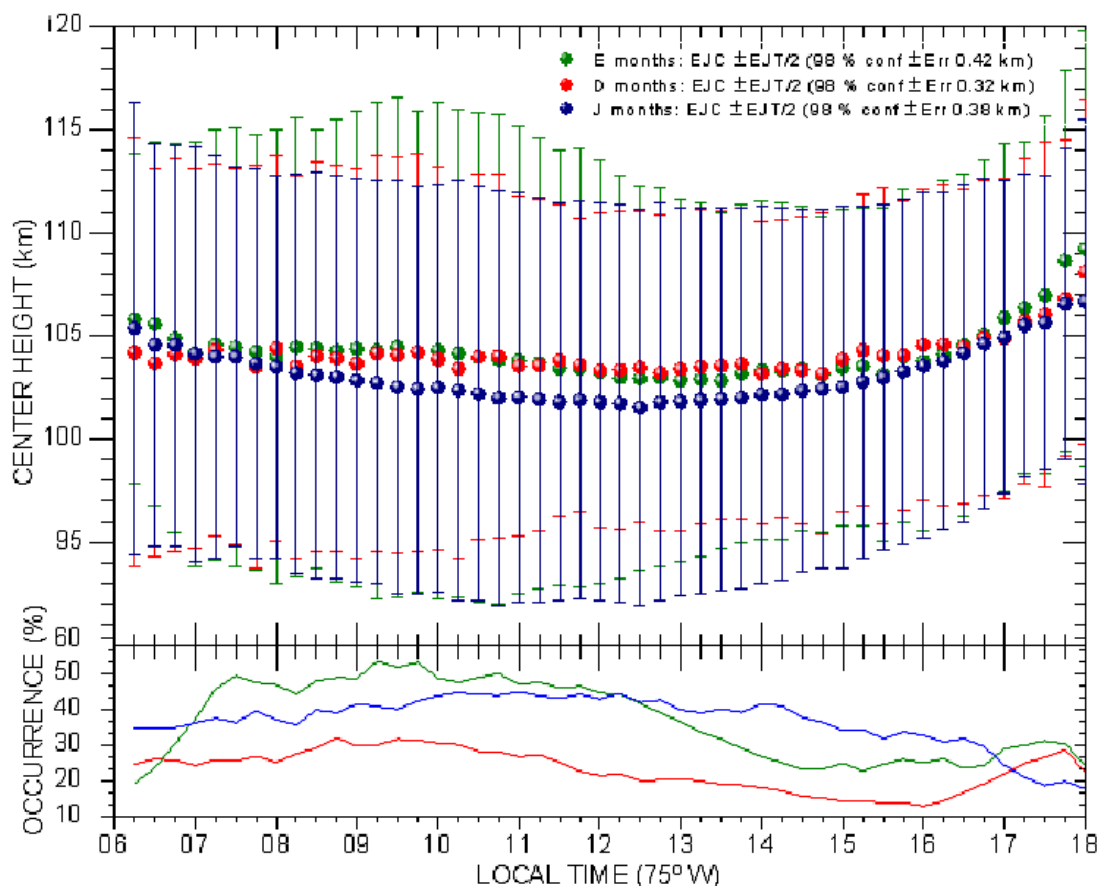


Figura12: Evolução temporal do EJC (painel superior) para os meses D (bolas vermelhas), meses E (bolas verdes) e meses J (bolas azuis), com suas correspondentes espessuras em relação ao centro; e a evolução temporal do EJC (painel inferior) da ocorrência das irregularidades nas alturas do EJC para as diferentes estações do ano.

No painel superior da figura 12 tem-se a evolução temporal do EJC para os meses D (bolas vermelhas), meses E (bolas verdes) e meses J (bolas azuis). As barras verticais não são erros e tão pouco desvios padrões, mas sim a espessura da região (EJT). O valor da incerteza na obtenção do EJC é mostrado no canto superior direito da figura. No painel inferior da figura 12 exibe-se a evolução da ocorrência das irregularidades nas alturas do EJC para os três grupos de meses analisados.

Com os mapas RTI estatísticos das figuras 9, 10, 11 e com a ajuda da figura 12, nós podemos dizer que as características comuns das ocorrências das irregularidades de plasma do EEJ para o setor peruano são:

- o desenvolvimento das irregularidades ocorre durante todo o período diurno, mas com diferentes níveis de incidência dependendo de cada estação, elas são mais frequentes durante os meses E e menos frequentes durante os meses D;
- após as 06:30 existe 25% de possibilidade de desenvolvimento das irregularidades;
- entre as 07:30 e as 11 LT a chance de observação das irregularidades de plasma sobre Jicamarca atinge altos valores, especialmente durante os meses E e D;

- (d) após as 11 LT durante os meses D e E, e após as 14 LT durante os meses J existe uma diminuição na chance de observação das irregularidades do EEJ;
- (e) nos mapas RTI estatísticos observamos que no período das 14 as 16 LT a probabilidade de desenvolvimento das irregularidades atinge os menores valores, em seguida ganha força novamente, exceto nos meses J;
- (f) a probabilidade de sondagem das irregularidades do EEJ próximo as 18 LT não excede 25% ;
- (g) há uma diminuição da área da região de espalhamento que contém as irregularidades do EEJ durante o decorrer do dia;
- (h) essa região aumenta no período da tarde, após as 12:30 LT para os meses J, já para os meses D e E isso ocorre depois das 14 LT;
- (i) a subida da região de espalhamento é mais evidente nos meses E, é bem clara (mas com menor intensidade) nos meses D e é menos evidente nos meses J; e
- (j) a faixa de altura onde as irregularidades são observadas podem atingir 23 km próximo as 10 LT, mas normalmente reduz após as 11 LT chegando a 10-15 km de extensão próximo as 17 LT, principalmente nos meses E.

Com relação as diferenças mais evidentes da presença das irregularidades de plasma conforme as diferentes estações do ano, nós podemos dizer que:

- (a) existe uma diminuição gradual na intensidade da ocorrência das irregularidades de plasma com valores entre 10-20 % depois das 14 LT, exceto para os meses J, quando a chance de observação das irregularidades de plasma é relativamente alta (> 30%) até as 17 LT;
- (b) a probabilidade de observação das irregularidades de plasma cresce para 30 % após as 16 LT para os meses D e após as 16:30 para os meses E, mas esse crescimento não acontece nos meses J; e
- (c) a menor probabilidade de observação das irregularidades de plasma ocorreu entre as 14 e 16 LT nos meses D, onde a ocorrência jamais atingiu 30 %.

4.2 Discussão dos Resultados

Para realizar a discussão dos nossos resultados, foram feitas leituras de artigos que tratam de temas semelhantes aos nossos. Será feita uma breve descrição de cada trabalho encontrado e em seguida será realizada uma comparação dos nossos resultados com os resultados encontrados pelos diferentes autores.

- 1) Chau et. al. (2002) fez uma análise das irregularidades do EEJ utilizando dados do radar de Piura (um radar instalado no setor peruano e que opera numa frequência de 50 MHz) e constatou que os ecos das irregularidades de plasma da região E foram mais fortes no verão (dezembro a março) do que no inverno (maio a junho). No entanto, a maior parte da sua estatística foi feita com ecos noturnos, visto que os autores afirmam que ecos no período diurno não são observados por conta da sensibilidade das antenas do radar.

Além disso, eles investigaram a presença das irregularidades de plasma da região E durante o máximo do ciclo de atividade solar (2000-2001).

- 2) Denardini et al. (2005) também investigou as irregularidades da região E durante o máximo do ciclo solar (2002), porém utilizando dados do radar RESCO (um radar instalado no setor brasileiro e que opera com uma frequência de 50 MHz). Assim como Chau et al. (2002) ele apresentou mapas RTI e constatou que os ecos durante o verão (novembro a janeiro) são mais forte que durante o inverno (maio a julho), mas ele observou também uma presença frequente dos ecos durante os equinócios, como uma relativa presença durante todo o decorrer do dia.
- 3) Patra et al. (2004) fez um estudo das irregularidades da região E utilizando dados do radar Gadanki (um radar instalado no setor indiano e que opera com uma frequência de 53 MHz). Para a realização deste trabalho ele utilizou dados de 1994 até 2000, que é referente ao mínimo do ciclo solar e parte da fase ascendente do ciclo solar 23. No entanto, como o foco do trabalho dele era comparar os ecos do período diurno com os ecos do período noturno, ele não utilizou todas as estações do ano para sua análise, seu estudo se restringe apenas na análise de dados durante o verão e a primavera.

De posse das informações obtidas nestes trabalhos, pudemos observar que há divergências entre os nossos resultados e os resultados encontrados pelos autores citados acima. Os nossos resultados mostraram uma maior ocorrência das irregularidades de plasma durante os meses E (equinócios), já Chau et al. (2002) e Denardini et al. (2005) mostraram uma maior força das irregularidades do EEJ durante o verão. Esta discrepância pode ser cuidadosamente analisada levando em consideração 3 aspectos básicos:

- 1) a técnica utilizada para estabelecer a análise;
- 2) a seleção dos dados com respeito ao período do dia; e
- 3) a seleção dos dados com relação ao período do ciclo solar.

Com relação ao primeiro aspecto, nosso estudo difere do trabalho publicado por Denardini et al. (2005) porque eles consideram a força das irregularidades, enquanto nós consideramos a ocorrência. As análises deles foram baseadas na máxima intensidade da força dos ecos, enquanto nós baseamos nossas análises no limiar do desenvolvimento das irregularidades, isto é, Denardini et al. (2005) afirmou que o verão é a estação onde as irregularidades são mais fortes, enquanto nós afirmamos que nos equinócios as irregularidades têm mais probabilidade de serem observadas. Sendo assim, não é possível dizer que nossos resultados contradizem os de Denardini et al. (2005).

Considerando o segundo aspecto, nosso trabalho difere de Chau et al. (2002) e de Patra et al. (2004) porque as estatísticas desses autores foram baseadas nos ecos noturnos, enquanto nós focamos o nosso estudo utilizando apenas dados com ecos durante o período diurno.

Em relação ao terceiro aspecto, Chau et al. (2002) e Denardini et al. (2005) basearam seus trabalhos utilizando dados coletados durante o período da máxima atividade solar, enquanto as nossas sondagens foram feitas durante o período de mínima atividade solar.

A explicação física para os resultados obtidos será de acordo com nosso atual nível de conhecimento. Chau et al. (2002) afirma que o conhecimento de parâmetros como o gradiente de densidade e a direção do campo elétrico são fatores importantes para explicar parcialmente os resultados. Patra et al. (2004) afirmou que a ionosfera é mais homogênea na direção zonal, permitindo o desenvolvimento das irregularidades do tipo 2. Além disso, o desenvolvimento dessas irregularidades (tipo 2) ocorre quando há um campo elétrico apontado para cima relacionado com um gradiente de densidade também para cima. Portanto, é importante conhecer o gradiente de densidade na base da região E, assim como o sistema de ventos que geram o seu aumento. Como nós não temos informações sobre esses parâmetros, nós não estamos em condições de determinar a origem das diferentes características sazonais observadas. O que podemos dizer é que a polarização do campo elétrico durante os meses E (equinócios) aproxima-se mais do limiar de desenvolvimento das irregularidades sobre Jicamarca.

A descida da região de espalhamento das irregularidades do EEJ durante as horas da manhã, seguida de um aumento durante as horas da tarde também foi reportada por Denardini et al. (2005). Eles observaram que após as 14 LT há uma subida da região que contém as irregularidades de plasma em todas as estações do ano, mas com diferentes níveis de intensidade com relação a cada estação. Eles assumiram a subida como sendo um comportamento característico diário do EEJ e mencionaram que é mais evidente durante o verão, bem claro mas menos intenso durante os equinócios e não tão evidente durante o inverno. No entanto, nossas observações revelaram resultados diferentes.

Nosso estudo revelou uma subida mais evidente da região de espalhamento das irregularidades de plasma durante os meses E (equinócios), uma subida clara mas menos intensa durante os meses D (verão) e uma subida com menor intensidade durante os meses J (inverno). Nós também observamos uma descida da região de espalhamento durante as horas da manhã, característica que não pôde ser claramente visualizada no trabalho de Denardini et al. (2005).

A teoria proposta por Denardini et al. (2005) para explicar, parcialmente, a subida da região de espalhamento das irregularidades de plasma é baseada no comportamento α -Chapman da região E e na variação da frequência de colisão das 14 as 17 LT, levando ao deslocamento da região onde o fator anisotrópico é aproximadamente igual a um terço ($\psi \approx 1/3$). Nós supomos mais uma vez que o campo elétrico vertical durante os meses E deve ser suficientemente forte para ultrapassar o mínimo limiar necessário para o desenvolvimento das irregularidades sobre Jicamarca e isso pode ser resultado de um forte campo primário (zonal) o que pode levar a um aumento dos efeitos devido a eletrodinâmica local, essencialmente por causa da deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. Para relacionarmos essa teoria com outras já propostas, Fejer et al. (1991) obsefvou uma forte deriva

E x B na região F sobre Jicamarca durante os meses E (equinócios), como mostra a figura 13. Estes resultados foram obtidos utilizando dados do radar de Jicamarca, e podemos notar que há uma clara demonstração da presença do pico de pré-reversão (Farley et al., 1986).

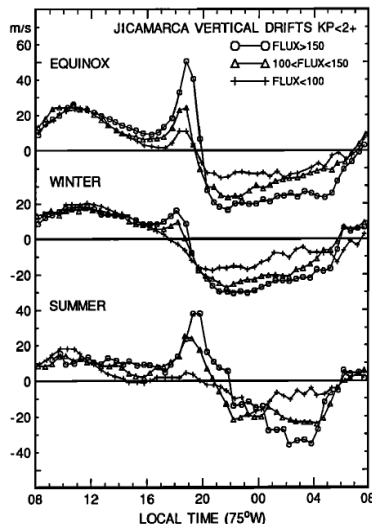


Figura 13: Média da deriva de plasma vertical em Jicamarca durante os equinócios, inverno e verão.
FONTE: Fejer et al.(1991).

Haerendel e Eccles (1992) realizaram um estudo no qual eles relacionaram esta deriva da região F com a possibilidade de geração de campos elétricos na região E da ionosfera (vide Figura 14). Em virtudes das observações de Denardini et al. (2005) relacionadas com a teoria de Haerendel e Eccles (1992) e, em virtude dos resultados de Fejer et al. (1991) juntamente com as nossa observações neste trabalho, podemos afirmar que trata-se da mesma fenomenologia.

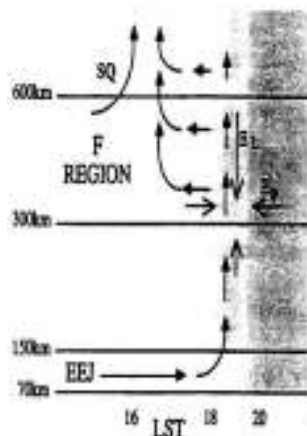


Figura 14: Um esboço da circulação das correntes na ionosfera no período próximo ao final do dia.
FONTE: Haerendel and Eccles, (1992)

CAPÍTULO 5

5 Atividades Realizadas

Neste capítulo, apresentamos os resultados da interação da bolsista com a comunidade científica em nível de iniciação científica e com os pesquisadores presentes nos congressos internacionais de sua área de atuação. Aqui também estão refletidas parte das atividades complementares de formação do bolsista realizadas durante o período de bolsa 2011 - 2012 referentes ao assunto deste relatório. Essas atividades têm como objetivo o desenvolvimento pessoal e profissional da bolsista.

5.1 Trabalhos Completos Publicados em Anais de Congressos

5.1.1 Congresso Internacional da SBGf (CISBGF)

Local: Rio de Janeiro

Período: 14 a 19 de Agosto de 2011

Trabalhos:

- 1) Guizelli, L. M., Denardini, C. M., Resende, L. C. A., Moro, J. Comparison of the Occurrence of Plasma Irregularities in the Equatorial Electrojet over the Brazilian and Peruvian Sectors
- 2) Denardini, C. M., Resende, L. C. A., Moro, J., Guizelli, L. M. A Discussion about some Aspects of the Solar-Terrestrial System Coupling with Regard to Space Weather Effects

5.2 Resumos Publicados em Anais de Congressos

5.2.1 Simpósio de Iniciação Científica do INPE (SICINPE)

Local: São José dos Campos (INPE) – São Paulo

Período: 25 e 26 de Julho de 2011

Trabalho:

- 1) Guizelli, L. M., Denardini, C. M., Resende, L. C. A., Moro, J.
Estudo da Baixa Ionosfera Equatorial Utilizando Dados de Radars.

5.2.2 13th International Symposium on Equatorial Aeronomy

Local: Paracas - Peru

Período: 12 à 16 de Março de 2012

Trabalhos:

- 1) Guizelli, L.M., Denardini, C.M., Moro, Resende, L.C.A. Climatological Study of the Daytime Occurrence of the 3-meter EEJ Plasma Irregularities Observed over the Jicamarca Close to the Solar Minimum (2007 and 2008).
- 2) Resende, L.C.A., Denardini, C.M., Batista, I.S., Moro, J., Guizelli, L.M. A Study of Different Blanketing Es Layer During the Solar Cycle 23
- 3) Denardini, C.M., Abalde, J.R., Chen, S.S., Guizelli, L.M., Resende, L.C.A., Moro, J., Padilha, A.L., Fagundes, P., Correia, E., Schuch, N.J., Domingos, S., Borges, W.S.C., Mesquita, F.P.V., Avicena Filho, A., Cunha-Neto, A., Castilho, C., Gargarela Jr, W., Lima, R.A.A. The New EMBRACE Magnetometer Network in South America.
- 4) Moro, J., Denardini, C.M., Abdu, M.A., Correia, E., Resende, L.C.A., Guizelli, L.M., Chen, S.S., Schuch, N.J., Makita, K. Latitudinal Dependence of Cosmic Noise Absorption in the Ionosphere over the SAMA Region During the September 2008 Magnetic Storm.

5.3 Artigo Submetido em Revista Internacional

Com os resultados obtidos da estatística sazonal da ocorrência das irregularidades de plasma, foi escrito um artigo e submetido para a revista *Earth Planet and Space*. Atualmente o artigo encontra-se na fase *In Press*.

Título: *Climatological Study of the Daytime Occurrence of the 3-meter EEJ Plasma Irregularities over Jicamarca Close to the Solar Minimum (2007 and 2008)*

Autores: Guizelli, L.M., Denardini, C.M., Moro, J., Resende, L.C.A.

5.4 Participação em Escola Internacional

Com a finalidade de desenvolver as habilidades práticas e teóricas sobre radares sondadores ionosféricos participou-se do “*International Incoherent Scatter Radar Workshop*”. Este workshop ocorreu em julho de 2011 na cidade de Kangerlussuaq na Groelândia (Polo Norte). Este evento, que teve participação de 50 alunos de toda parte do mundo, teve duração de uma semana e durante este período teve aulas teóricas e exercícios práticos sobre técnicas de funcionamento de radares. Os alunos foram divididos em grupos e cada grupo pôde acompanhar como se adquire dados do *Incoherent Scatter Radar* (radar instalado na cidade de Kangerlussuaq, ver figura 15), após feita a coleta dos dados, cada grupo se reuniu e desenvolveu um trabalho com seus dados, no último dia do evento todos os grupos apresentaram suas análises e seus resultados.



Figura 15: Foto do *Incoherent Scatter Radar* – radar ionosférico instalado na cidade de Kangerlussuaq

CAPÍTULO 6

6 Conclusões

O estudo dos fenômenos que ocorrem na ionosfera equatorial é de grande importância para que possamos estabelecer mecanismos de previsão. Neste sentido, os esforços para formação de novos cientistas na área de ciência espacial se concentraram, principalmente, no estudo sobre um dos fenômenos que ocorre na camada E ionosférica, o eletrojato equatorial. Contudo, para se estabelecer as leis que governam o EEJ no setor brasileiro é necessário se estabelecer quais são as variáveis mais importantes. Sendo assim, se justifica realizar estudos comparativos com outros setores longitudinais, que é o caso do projeto neste ano de bolsa.

Com os dados adquiridos pelo radar instalado no Rádio Observatório de Jicamarca no Peru, fizemos uma estatística sazonal da ocorrência de irregularidades no plasma ionosférico, utilizando rotinas desenvolvidas em IDL. O estudo mostrou características comuns e diferentes entre as estações do ano. Nossos resultados revelaram a elevação da região de espalhamento no final do dia, que pode ser melhor visualizada nos Equinócios. Observamos a ocorrência de uma intensificação na região de espalhamento após o pôr-do-sol, que ocorreu principalmente no verão e nos equinócios.

Quanto ao desenvolvimento científico de novos pesquisadores, a realização destas atividades permitiu acesso e contato com dados do radar de Jicamarca, desenvolvendo conhecimento sobre o equipamento, aprimorando conhecimento com linguagem de programação e fixando os conceitos estatísticos adquiridos no curso universitário. Como resultados deste estudo elaborou-se e submeteu-se um artigo para revista internacional. Além disso, a participação na escola internacional realizada em Kangerlussuaq - Groelândia, junto ao observatório de *Sondrestrom Research Facility*, o qual foi organizado pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), permitindo a inserção na comunidade de radares científicos mundiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdu, M. A., Sastri, J. H., MacDougall, J., Batista, I. S., Sobral, J. H. A. Equatorial disturbance dynamo electric field longitudinal structure and spread F: a case study from GUARA/EITS campaigns. *Geophysical Research Letters*, v. 24, n. 13, p. 1707-1710, July 1997.
- Akasofu, S.I., Chapman, S. *Solar-Terrestrial physics*. Oxford: Oxford University Press, 1972
- Chau, J.L., R.F. Woodman, and Flores, L.A. Statistical characteristics of low-latitude ionospheric field-aligned irregularities obtained with the Piura VHF radar, *Annales Geophysicae*, 20 (8), 1203--1212, 2002.
- Davies, K. *Ionospheric Radio Propagation*. Washington: National Bureau of Standards Monograph, 1965.
- Denardini, C. M. Dissertação de Mestrado. Desenvolvimento de um Sistema de Correção de Fase para o Radar Ionosférico de São Luís do Maranhão. São José dos Campos, 1999. INPE.
- Denardini, C. M. Tese de Doutorado. Estudo da Eletrodinâmica da Ionosfera Equatorial Durante o período de Máxima Atividade Solar. São José dos Campos, 2004. INPE.
- Denardini, C. M. Seasonal characterization of the equatorial electrojet height rise over Brazil as observed by the RESCO 50 MHz back-scatter radar. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 67, 1665-1673, 2005.
- Farley, D.T., E. Bonelli, B.G. Fejer, and M.F. Larsen, The pre-reversal enhancement of the zonal electric-field in the equatorial ionosphere, *Journal of Geophysical Research*, 91 (A12), 3723-3728, 1986.
- Fejer, B.G. , de Paula, E.R., González, S.A., Woodman, R.F. Average Vertical and Zonal F Region Plasma Drifts over Jicamarca. *Journal of Geophysical Research*, 96 (A8), 13901-13906, 1991.
- Forbes, J. M. *The equatorial electrojet*. *Reviews of Space Geophysics and Space Physics*, v.19, n.3, p. 469 – 504, 1981.
- Haerendel, G., and J.V. Eccles, The Role of the Equatorial Electrojet in the Evening Ionosphere, *Journal of Geophysical Research*, 97 (A2), 1181-1192, 1992.
- Hargreaves, J. K. *The solar-terrestrial environment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- Kelley, M. C. *The Earth's Ionosphere*. San Diego: Academic Press, 1989.
- Kivelson, M. G., Russell, C. T. ed. *Introduction to space physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- Patra, A.K., S. Sripathi, V. Sivakumar, and P.B. Rao, Statistical characteristics of VHF radar observations of low latitude E-region field-aligned irregularities over Gadanki, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66 (17), 1615--1626, 2004.
- Rishbeth, H., Garriott, O. K. *Introduction to ionospheric physics*. New York: Academic, 1969.

Climatological Study of the Daytime Occurrence of the 3-meter EEJ Plasma Irregularities over Jicamarca Close to the Solar Minimum (2007 and 2008)

L. M. Guizzelli^{1,2}, C. M. Denardini¹, J. Moro¹, and L. C. A. Resende¹

¹Aeronomy Division, National Institute for Space Research, P.O. Box 515, S. J. Campos, SP, Brazil

²Department of Electrical Engineering, Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, Brazil

(Received ; Revised April 10, 2012; Accepted May 16, 2012; Online published Xxxxx xx, 2011)

We have developed algorithms for conducting a seasonal statistical study of the occurrence of plasma irregularities in the Peruvian sector as function of height and local time, covering two years of data (2007 and 2008) close to the solar minimum. This study is performed based on radar measurements carried out at the Jicamarca Radio Observatory (JRO), which is located in Lima - Peru (11.57° S, 76.52° W, dip: 2° N), under the magnetic equator. The statistical analysis runs over daily Range Time Intensity (RTI) maps obtained with the radar operating in the Jicamarca Unattended Long-term Investigations of the Ionosphere and Atmosphere (JULIA) mode. Our results revealed relevant features of the diurnal variation of the plasma irregularities embedded in the equatorial electrojet, such as: a more often presence of the 3-m irregularities during equinox, and a descent of the scattering profile in the morning hours, followed by its rising in the afternoon.

Key words: Equatorial Aeronomy, Equatorial Electrojet, Plasma Irregularities, Coherent Radar Observation.

1. Introduction

In the last decades theoretical and experimental research has been carried out to study the intense electric current that flows around the magnetic dip equator at the ionospheric altitudes of about 105 km (E-region), named equatorial electrojet (EEJ). Examples of theoretical considerations on the EEJ and plasma irregularities, like the characteristic of these irregularities to be aligned with the magnetic field, and the backscattered echoes obtained by radio soundings to occur only for radiation propagating nearly perpendicular (within about 1°) to the magnetic field, were discussed by Fejer and Kelley (1980), Forbes (1981) and Kudeki et al. (1985). Experimental investigations of the equatorial plasma irregularities using VHF coherent and incoherent scatter radars were also carried out over Jicamarca by Cohen (1967), Fejer et al. (1975), Farley and Fejer (1975), and many others.

The basic features of the plasma irregularities as seen by VHF radars have been obtained from spectral analyses of the backscattered echoes, labeled as type 1 and type 2, after the plasma instabilities processes. The spectrum related with the type 1 irregularities shows narrow spectral width, with its center of distribution close to ion-acoustic speed (≈ 360 m/s). The spectra of the type 2 irregularities have larger width than the type 1 and smaller Doppler velocities than the ion-acoustic speed. The center of frequency distribution of irregularities type 1 is not sensitive to the beam inclination angle, while type 2 center of distribution has a sinusoidal dependence within the elevation angle of the antenna beam (Cohen and Bowles, 1973). The most prominent type of spectra is the type 1 when sounding over Jicamarca

(Fejer and Kelley, 1980). This may not be the case for other longitudinal sectors (Denardini et al., 2005), however.

Most of the authors referred above have mentioned that the EEJ is mainly a diurnal phenomenon and therefore plasma irregularities shall be mostly often observed during daytime. In order to stipulate the specific local time when such irregularities start to be detected in the morning and stop to be observed in the afternoon, we have performed the present study based on radar measurements that were carried out at the JRO. Also, we aimed to verify seasonal variability for the period covered in the present analysis. Furthermore, we have chosen data acquired during low solar activity period in order to minimize the solar influences through the Sq system in our analyses. We based our statistics on daily Range Time Intensity (RTI) maps obtained with the Jicamarca radar operating in the JULIA mode during the years 2007 and 2008.

2. Radar System, Data Processing and Analysis

2.1 Main Radar System Characteristics

The Jicamarca radar system has been described in some publication, e.g., Cohen (1967) and Woodman (1971). Therefore, we will briefly recall some of its most important features that impact on the data we used. The measurements were made at a frequency of 49.92 MHz, corresponding to an irregularity wavelength of about 3 m. The data were acquired using the original transmitter that consists of four completely independent modules. Two of those modules have been converted into a new design using modern tubes. Each of these new modules can deliver a peak power of ≈ 20 kW with a maximum duty cycle of 6% and pulses as short as 0.8-1.0 μ s. There are four phase-coherent (common oscillators) receivers for collecting the radar echoes, which are mixed to baseband (with two quadrature outputs each) with maximum output bandwidths of about 1 MHz. Filters are available with

nominal impulse response time constants ranging from 1 to 500 s. Eight data channels (four complex pairs) simultaneously samples at 125 m ($0.83 \mu\text{s}$) resolution and fed the signal to a large FIFO buffer/coherent integrator, and from there to the acquisition computer for storage. The antenna configuration used during the present study leded a $2\text{-}3^\circ$ beamwidth (N-S and E-W), since we have used all elements of the main JRO array.

2.2 Data Processing

The basic radar data analysis starts with the pre-processing. It consists of: (1) reading the voltage values and group it per height range; (2) applying Fast Fourier Transform (FFT) over the voltage data set to get the periodogram at each specific height and time; (3) integrating the power spectra to derive the total backscattered power for the corresponding time and height; and (4) grouping all the pre-process data acquired during that specific day. The data analysis consists of building one spectrogram per sample height, each spectrogram being a contour color map of spectral power plotted in a format of Doppler frequency versus local time. The time variation of the total received power from a given height can be obtained by frequency-integrating each spectrum of the corresponding spectrogram. A daily RTI map is then produced by organizing the time variation of the total received power according to the height that they were obtained.

To examine the seasonal variation of occurrence of the EEJ plasma irregularities we have selected the data collected during 196 days from 2007 to 2008. These data were grouped as shown in Table 1, in which: (1) D months group consists of November, December, January, and February representing the local summer season; (2) E months group consists of March, April, September, and October representing the equinoxes; and (3) J months group consists of May, June, July, and August months representing the local winter season (Aveiro *et al.*, 2009). Hence, we have selected 51 days on D months, 34 days on E months, and 111 days on J months. The next step of the data processing is to perform the statistical analysis described in the next section.

2.3 Statistical Analysis

We developed a routine that performs all the statistical analysis over the RTI matrices of each day belonging to the three groups. In the following, we briefly describe some important features of this analysis: (1) a matrix is created with the same dimension of the original matrix that generates the daily RTI maps; (2) binary values are applied to the cell of this new matrix, depending of a single test; (3) the daily RTI matrix is evaluated according to the signal-to-noise power level of every cell; (4) when the ratio (given in dB) is positive (negative), we assume that the irregularities are present (absent) and the binary value “1” (“0”) is applied to the corresponding cell in the daily statistical matrix; (5) this procedure is performed individually to each daily RTI matrix; and finally, (6) a matrix corresponding to the sum of all daily matrices is divided by the number of the days included in the analysis, leading to what we labeled as histogram matrix. In this matrix each line represents the relative distribution of EEJ plasma irregularities occurrences with respect to the local time at a given height range. The columns represent the relative histogram with respect to the height at a given

time. The format chosen for presenting the statistical results is a contour color map as shown in the Figure 1. We named this plot as Range Time Histogram (RTH), and its color scale gives the percentage of occurrence of EEJ plasma irregularities for the specific local time and height of analysis, according to the season.

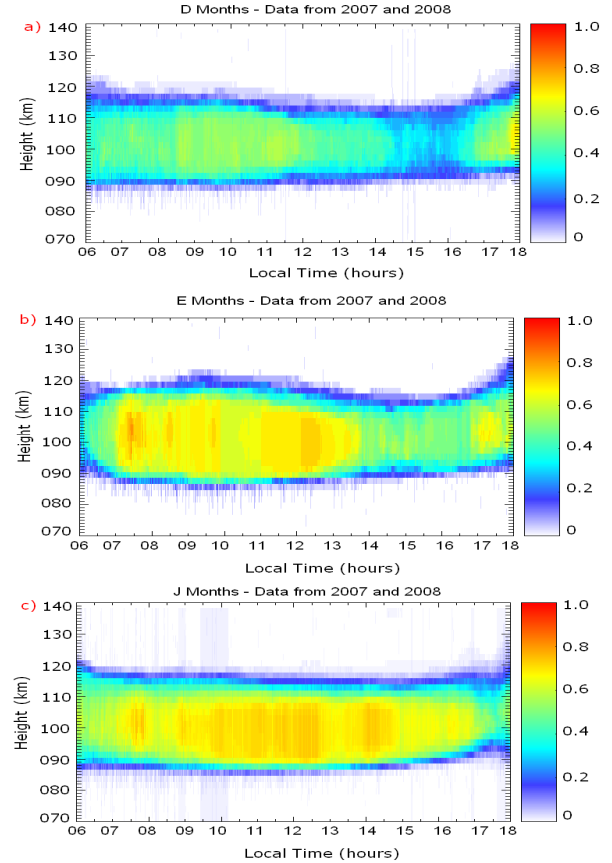


Fig. 1. : RTH maps with the statistical occurrence of plasma irregularities for (a) D months, (b) E months and (c) J months, from 06 to 18 LT (76.52°W), covering the height range from 70 to 140 km.

3. Results

The basic result of this study is presented in the Figure 1 that show the RTH maps for the D months, for the E months and for the J months (from the top to the bottom), from 06 to 18 LT (76.52°W), covering the height range from 70 to 140 km. Observing the maps we can clearly see that the irregularities stay roughly confined to the region limited from 90 to 120 km during the whole day at any season. Also, there is some preferential local time for the EEJ irregularities to develop, which are clearly the morning hours and early afternoon. Moreover, there seems to be a rising of the whole scattering region late in the afternoon. There also are some discrepancies in the EEJ irregularities occurrence depending on the season, like the fading of the occurrence at around 15 LT during D months (summer season) and E months (equinoxes). In order to investigate in detail, we performed an analysis of the RTH maps based on curve fitting to get the time evolution of the irregularities occurrence distributions. The first parameter that we got is the fit center of

Table 1. : List of days with JRO radar data selected for the statistical analyzes.

Data Acquired in 2007					
D Months		E Months		J Months	
November	13-15,	September	04-10,	May	14-31
	21-27,			20-27	June
December	29,30	September	04-10,	July	01-04
	01-05,			20-31	August
20-31					
Data Acquired in 2008					
D Months		E Months		J Months	
January	01-15	March	01-13	May	08-27
				June	26-30
February	06-11,	September	01	July	01-07,
				28,29	August
				14-31	

the irregularities occurrence height distribution (EJC). The second parameter that we analyzed is the thickness of the region where the irregularities occurrence surpassed 20% of the cases (EJT). The third one is the percentual occurrence of irregularities at the EJC height, i.e., the value of the histogram for each column of the RTH map.

In the upper panel of the Figure 2 we present the time evolution of the EJC for the D months (red bullets), E months (green bullets), and J months (blue bullets). The “error bars” are not error, but the EJT. The errors in determining the EJC are presented in the right upper corner of this panel. In the bottom panel of Figure 2, it is placed the time evolution of the irregularities occurrence at the EJC height for the three data sets evaluated in this study.

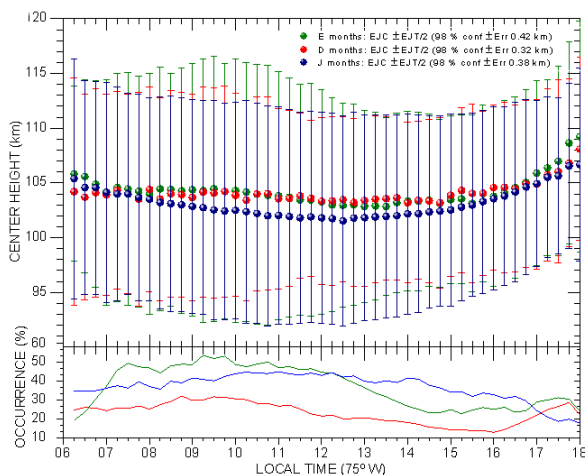


Fig. 2. : The time evolution of (upper panel) the EJC for the D months in red bullets, E months in green bullets, and J months in blue bullets, within the corresponding EJT around the fit center; and the time evolution of (bottom panel) the irregularities occurrence at the EJC height for the three mentioned sets of data.

From the RTH map in the Figure 1 and with the help of the bottom panel of Figure 2, we may say that the common

features of the occurrence of EEJ plasma irregularities in the Peruvian sector are (at least for the present period of analysis): (a) irregularities development is always present during daytime but with different levels of incidence depending the season, they are more often during the E months (equinoxes) and less present during the D months (summer); (b) after about 0630 LT there are 25% possibility of irregularities development; (c) between 0730 and 11 LT the chance of observing plasma irregularities over Jicamarca reaches its highest values, especially during the E months (equinoxes) and the D months (summer); (d) after about 11 LT during the D months (summer) or E months (equinoxes), and after about 14 LT for J months (winter) there is a decreasing chance of observing the EEJ irregularities; (e) by the end of the soundings period (close to 16 LT) the irregularities development probability reaches the lowest values and gains strength again, except in the J month; and (f) the probability of sounding EEJ irregularities at about 18 LT (or even later) do not exceed 25%. Also, from the RTH map in the Figure 1 and with the help of the upper panel of Figure 2, we may state that: (g) the scattering region containing the EEJ irregularities descends during the morning hours, having the clearest example in the J months (winter); (h) this region also rises in the afternoon, after about 1230 LT for J months (winter), but after about 14 LT during the E months (equinoxes) or D months (summer); (i) the rising is more pronounced in E months (equinoxes), very clear but less intense during D months (summer) and even less intense during J months (winter); and (j) the height range where the irregularities are observed may be as broad as 23 km at around 10 LT, but it usually reduces after 11 LT arriving at 10-15 km close to 17 LT, mainly in the E months.

With regard to some of the most evident differences of the EEJ plasma irregularities presence along with the different seasons in our study, we may say that: (a) there is a gradual decrease in the intensity of the occurrence of plasma irregularities to values between 10-20% after 14 LT, except for the J months, when the chance of observing plasma irregularities is quite persistent ($> 30\%$) up to 17 LT; (b) the prob-

ability for observing plasma irregularities grows up to 30% after around 16 LT for D months and after around 1630 LT for E months, but it did not grow up for the J months; and (c) the lowest probability for observing plasma irregularities between 14 and 17 LT was found in the D months, when their occurrence did not surpass 30% ever.

4. Discussions

Such a statistical study of the EEJ plasma irregularities observed with the Jicamarca 50 MHz radar alone is not a new result, since other authors have done similar studies for the American sector (Chau *et al.*, 2002; Denardini *et al.*, 2005); and for the Indian sector (Patra *et al.*, 2004; Kumar *et al.*, 2009) before. However, these previous studies did not cover the same sector during the same solar cycle period and, more importantly, differ in some aspect from our results. Chau *et al.* (2002) have focused their analysis on data from Piura radar (a 50 MHz radar at the Peruvian sector in South America) and have found that the echoes from E region plasma irregularities were stronger in summer (Dec.-Mar.) than in winter (May-Jun.). However, most of their statistics is based on nocturnal echoes since the authors claim daytime echoes are not observed because the antenna at Piura radar has low sensitivity (small antenna and low transmitted power). Also, they have investigated the presence of the E region irregularities observed close to solar maximum (2000-2001). Denardini *et al.* (2005) have also investigated the E region irregularities during solar maximum (2002) based on the RESCO 50 MHz radar, but for the Brazilian sector in South America, which has a significantly different declination (around -20° at the RESCO site). They presented RTI maps like Chau *et al.* (2002) with stronger echoes during summer (Nov.-Jan.), and weaker echoes during winter (May-Jul.). But they also pointed out the frequent presence of echoes during equinoxes, with relatively high strength all over the daytime. Patra *et al.* (2004) based their study in the E region echoes observed by the Gadanki 53 MHz radar and covered the period between 1994 and 2000, during the last solar minimum and most of the ascending phase of the solar cycle 23. However, the focus of their work was the night and day comparison rather than the seasonal statistics. So, they did not cover all the seasons with their observations. They constrained their analysis to data acquired during spring and summer (Apr.-Aug.) together. Kumar *et al.* (2009) focused their work at low latitudes but outside the electrojet belt.

Despite some discrepancies in the data selection assumed for characterizing the seasons in these different studies, most of the periods are coincident in order to allow direct comparison. Therefore, the divergence between our results, which shows that the occurrence of the irregularities is more often in the E months (equinoxes), and the result of Chau *et al.* (2002) and Denardini *et al.* (2005) for the American sector, showing stronger echoes occurrence during summer, may not be explained by the data selection. However, this discrepancy should be carefully analyzed with respect to three basic aspects: (1) the technique used to establish it; (2) the data selection with respect to the period of day; and (3) the data selection with respect to the period of the solar cycle. With respect to the first aspect, our work differs from that published by Denardini *et al.* (2005) because they consider

straight of the echoes instead of occurrence. They based their analysis in the maximum intensity of the echo strength while we based ours in the threshold for irregularities to develop, i.e., Denardini *et al.* (2005) stated that summer is the season where the irregularities are stronger while we state that E months (equinoxes) is the season where the irregularities are most likely to be observed. Indeed, our observations did not contradict those made by Denardini *et al.* (2005). With respect to the second aspect, our work differs from that published by Chau *et al.* (2002) because they based their statistics on nocturnal echoes while we focused our in daytime echoes only. Also, both Chau *et al.* (2002) and Denardini *et al.* (2005) performed their studies using radar data collected during solar maximum while we based our statistics on soundings made during solar minimum. These three basic aspects of difference among the above mentioned studies provide the proper originality of our results, at least with respect to the irregularities occurrence in the American sector.

The explanations for the observations are not easy, however. Chau *et al.* (2002) raised an important point with respect to the need for knowledge about some important variable (density gradients, electric fields, etc.) to properly explain the statistical results. Patra *et al.* (2004) stated that a more homogeneous ionosphere in the zonal direction may imply on the type 2 irregularity developments, which in turn will reduce their observation and the general statistics since this type is expected to be observed even when the electric field is not strong enough to develop type 1 irregularities. Also, it must be noted that the type 2 irregularities development is related to parallel upward electric field and density gradient at the region of study. So, it is desired to know about the background density gradient as well as the wind system capable to build the proper density gradient to allow the type 2 irregularities development. Since we have no such information about the above parameters we are not in position to determine the origin of the observed seasonal characteristics. We may only speculate that the polarization electric field during the E months (equinoxes) should more frequently reach the level to surpass the minimum threshold to develop irregularities over Jicamarca than that threshold reached during the other seasons. Also, we may suggest that future studies (based on magnetometer for instance) confirm our results.

With respect to those items enrolled in the previous section regarding to the height and local time of statistical observation, they are mostly consistent with the current knowledge of the mechanism of generation of the type 1 (modified two stream) and type 2 (gradient drift) irregularities as well as several other observations (Fejer and Kelley (1980), and references therein; Forbes (1981), and references therein). The descent of the scattering region containing the EEJ irregularities during the morning hours, followed by its rising in the afternoon have also been reported before by Denardini *et al.* (2005).

Denardini *et al.* (2005) observed ascents after about 14 LT during all seasons, irrespective of the magnetic condition, and they reported a seasonal dependence of the ascent degree. They assumed the rising to be a characteristic of the daily behavior of the EEJ and mentioned that it is more pronounced during the summer, very clear but less intense during equinoxes and not clearly defined during winter. Our

observation revealed different results, however.

We did not consider the magnetic condition, but we clearly see that there is a more pronounced rising in E months (equinoxes), very clear but less intense rising during D months (summer) and clearly defined but even less intense rising during J months (winter). Also, we observe the descent in the morning hours, which is not clearly identified nor sufficiently discussed in the previous work by Denardini *et al.* (2005). Another difference lays on the time when the rising of the EJC starts. We observe rising as soon as after midday during J months (winter).

We assume that the theory proposed Denardini *et al.* (2005) is right for explaining the rising itself, since it partially explains the rising based on the α -Chapman behavior of the E layer and on the variation of the collision frequencies from 14 to 17 LT, leading to the displacement of the region where the anisotropic factor is approximately equal to one-third ($\psi \approx 1/3$). However, like the case of the discrepancy in the plasma occurrence, an explanation for the seasonal discrepancies is difficult to be achieved since we have no information on the electric field, density gradient, wind system and other important variables measured above the radar site at the moment of the soundings used for present analysis. Again, we may only assume that our previous speculation is right so that the electric field (vertical) during the E months (equinoxes) should be strong enough to surpass the minimum threshold to develop irregularities over Jicamarca and this may result from a stronger primary field (zonal) which may lead to an addition rising effects due to the local electro-dynamics, essentially $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drifts. Indeed, just to bring some probable unrelated fact up, Fejer *et al.* (1991) reported stronger $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drifts at the F region over Jicamarca during E months (equinoxes).

5. Conclusions

This study showed a statistical occurrence of the 3-m plasma irregularities observed by the Jicamarca radar, in the Peruvian sector. We developed a routine that performs the statistical analysis over the RTI matrices of each day of radar data collected during 196 days from 2007 to 2008. The results are shown in plots named as RTH maps, where the color scale gives the percentage of occurrence of EEJ plasma irregularities for the specific period and height of analysis. From the RTH maps we saw that the irregularities stay roughly confined to the region limited from 90 to 120 km during the whole day at any season, despite to be some preferential local time for the EEJ irregularities to develop. Also, the presence of the 3-m irregularities is more often during equinox and we clearly observe a descent of the scattering profile in the morning hours followed by its rising in the afternoon. These results were compared to previous studies, but they did not cover the same sector during the same solar cycle period. Notwithstanding the different data set, the rising of the scattering profile in the afternoon found similarities with that reported by Denardini *et al.* (2005), explained through the α -Chapman behavior of the E layer and the locus of the one-third of the anisotropic factor. Nevertheless, our analysis revealed that the rising is more pronounced in equinoxes while the previous study showed they should be more pronounced during the summer. There also are other

discrepancies among the present results with those published from other studies. The previous work revealed a preference of the 3-m plasma irregularities for summer, in contrast with the often observation during equinox that is observed in the present statistics. Since we have no information on the electric field, density gradient, wind system and other important variables measured above the radar site at the moment of the soundings we are not in position to determine the origin of the observed seasonal characteristics. We may only speculate that the polarization electric field during the equinoxes should more frequently reach the level to surpass the minimum threshold to develop irregularities over Jicamarca that for other seasons. If so, it may also be strong enough to impose an additional rising effects due to the local electro-dynamics, essentially $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drifts.

Acknowledgments. L. M. Guizelli thanks to CNPq/MCT (Grants 108562/2010-7), C. M. Denardini thanks to CNPq/MCT (Grants 305923/2008-0, 470553/2009-0 and 305242/2011-3), J. Moro thanks to Capes and CNPq/MCT (Grant 130497/2009-6), and L. C. A. Resende thanks to Capes and CNPq/MCT (Grant 160089/2011-5). Our thanks to Dr. Marco Milla and all the staff from Jicamarca Radio Observatory for the radar data.

References

- Aveiro, H.C., C.M. Denardini, and M.A. Abdu, Climatology of Gravity Waves - Induced Electric Field in the Equatorial E Region, *Journal Geophysical Research*, **114** (A11308), 1841–1849, 2001.
- Chau, J.L., R.F. Woodman, and L.A. Flores, Statistical characteristics of low-latitude ionospheric field-aligned irregularities obtained with the Piura VHF radar, *Annales Geophysicae*, **20** (8), 1203–1212, 2002.
- Cohen, R., and K.L. Bowles, Secondary Irregularities in the Equatorial Electrojet, *Journal Geophysical Research*, **78** (13), 2222–2231, 1973.
- Cohen, R., Phase Velocities of Irregularities in the Equatorial Electrojet, *Journal Geophysical Research*, **72** (3), 885–894, 1967.
- Denardini, C.M., M.A. Abdu, E.R. de Paula, J.H.A. Sobral, and C.M. Wrasse, Seasonal Characterization of the Equatorial Electrojet height rise over Brazil as observed by the RESCO 50 MHz back-scatter radar, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **61** (17–18), 1665–1673, 2005.
- Farley, D.T., and B.G. Fejer, The Effect of the Gradient Drift Term on Type 1 Electrojet Irregularities, *Journal Geophysical Research*, **80** (22), 3087–3090, 1975.
- Fejer, B.G., E.R. de Paula, S.A. Gonzalez, and R.F. Woodman, Average Vertical and Zonal F Region Plasma Drifts over Jicamarca, *Journal of Geophysical Research*, **96** (A8), 13901–13906, 1991.
- Fejer, B.G., D.T. Farley, B.B. Balsley, and R.F. Woodman, Oblique VHF Radar Spectral Studies of the Equatorial Electrojet, *Journal of Geophysical Research*, **80** (10), 1307–1312, 1975.
- Fejer, B.G., and M.C. Kelley, Ionospheric Irregularities, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **18** (2), 401–454, 1980.
- Forbes, J.M., The Equatorial Electrojet, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **19** (3), 496–504, 1981.
- Kudeki, E., D.T. Farley, and B.G. Fejer, Theory of Spectral Asymmetries and Nonlinear Currents in the Equatorial Electrojet, *Journal of Geophysical Research*, **90** (A1), 429–436, 1985.
- Kumar, D.V.P., A.K. Patra, Y.S. Kwak, K.H. Kim, and G. Yellaiah, Low latitude E-region irregularities studied using Gadanki radar, ionosonde and in situ measured electron density, *Astrophysics and Space Science*, **323** (3), 225–233, 2009.
- Patra, A.K., S. Sripathi, V. Sivakumar, and P.B. Rao, Statistical characteristics of VHF radar observations of low latitude E-region field-aligned irregularities over Gadanki, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **66** (17), 1615–1626, 2004.
- Woodman, R.F., Inclination of the Geomagnetic Field Measured by an Incoherent Scatter Technique, *Journal Geophysical Research*, **76** (1), 178–184, 1971.