

Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – IP&D
Programa de Pós-graduação em Física e Astronomia

Ana Paula Monteiro da Silva

Estudo das Camadas Intermediárias descendentes na região equatorial e de baixa
latitude brasileira

São José dos Campos, SP
2021

Ana Paula Monteiro da Silva

Estudo das Camadas Intermediárias descendentes na região equatorial e de baixa latitude brasileira.

Dissertação de Mestrado apresentado ao programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como parte do processo de avaliação para a obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Tadeu de Assis Honorato Muella

Coorientadores: Dra. Ângela Machado dos Santos Valentim e Prof. Dr. Valdir Gil Pillat.

São José dos Campos, SP
2021

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Silva, Ana Paula Monteiro da

Estudo das Camadas Intermediárias descendentes na região equatorial e de baixa latitude brasileira / Ana Paula Monteiro da Silva; orientador, Prof. Dr. Márcio Tadeu de Assis Honorato Muella; co-orientadora Dra. Ângela Machado dos Santos Valentim. - São José dos Campos, SP, 2021.

1 CD-ROM, 101 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

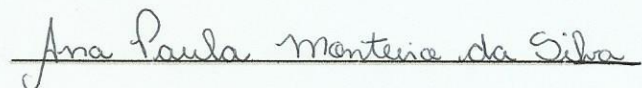
1. Física e Astronomia. 2. Ondas de gravidade. 3. Camada Intermediária. I. Muella, Prof. Dr. Márcio Tadeu de Assis Honorato, orient. II. Valentim, Dra. Ângela Machado dos Santos, co-orient. III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Ana Paula Monteiro da Silva, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 16 de Março de 2022.



Autor(a) da Obra

ANA PAULA MONTEIRO DA SILVA

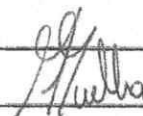
**“ESTUDO DAS CAMADAS INTERMEDIÁRIAS DESCENDENTES NA REGIÃO
EQUATORIAL E DE BAIXA LATITUDE BRASILEIRA”.**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:


PROF. DR. ARIAN OJEDA GONZÁLEZ



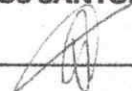
PROF. DR. MARCIO TADEU DE ASSIS HONORATO MUELLA



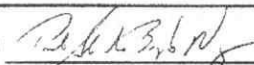
PROF.ª DR.ª ÂNGELA MACHADO DOS SANTOS VALENTIM - INPE



PROF. DR. VALDIR GIL PILLAT



PROF. DR. PAULO ALEXANDRE BRONZATO NOGUEIRA - IFSP



Prof.ª Dr.ª Lúcia vieira

Diretora do IP&D – Univap

São José dos Campos, 10 de dezembro 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à:

Deus por iluminar meu caminho durante toda essa jornada, me dando saúde, sabedoria e paz. Obrigada por me proporcionar a realização de mais um sonho, pois sei que até aqui o Senhor me sustentou.

A minha mãe Nair que com seu carinho, amor e dedicação, sempre me inspirou e tornou possível a realização deste grande sonho em minha vida. Muito obrigada mãe, pelos nossos inumeráveis momentos de amor em nossos numeráveis dias vividos. Para sempre te amarei!

Ao meu irmão Luis Felipe, pelo amor, amizade e cumplicidade, que só me trouxe felicidades.

Ao meu namorado Wesley pela compreensão e apoio em todos os fins de semana e feriados dedicado aos estudos, pelo amor, carinho e ajuda sempre que necessária.

Ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Tadeu de Assis Honorato Muella, por me orientar constantemente e eficientemente, pela paciência, pela confiança, pelo carinho, pelo incentivo a prosseguir na pesquisa. Agradeço também a Dr^a. Ângela Machado dos Santos Valentim que sempre me aconselhou e deu dicas valiosas, sem as quais o caminho teria sido muito mais árduo. Agradeço também ao Prof. Dr. Valdir Gil Pillat que com suas habilidades ajudou a tornar realidade essa pesquisa. Agradeço a vocês por serem além de orientadores, meus amigos.

A Dra. Laysa Resende do State Key Laboratory of Space Weather/INPE, pelas valiosas contribuições com o estudo dos ventos. Obrigada pela paciência em me ensinar mais sobre o modelo.

Aos bons amigos que direta ou indiretamente me ajudaram nesta pesquisa, em especial ao Dr. Paulo Alexandre, o qual incentivou a continuidade dos meus estudos, me ajudou na seleção do Mestrado e apresentou meu orientador.

Agradeço aos professores e funcionários do campus, que me acompanharam no decorrer dessa jornada, me incentivando a prosseguir e auxiliando nos procedimentos internos sempre que necessários.

A Fundação Valeparaibana de Ensino (FVE) pela bolsa de estudos inicial e pela CAPES por dar sequência a essa bolsa de estudo, sem a qual nada disso seria possível.

Por fim, meus agradecimentos aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Arian Ojeda González e Prof. Dr. Paulo Alexandre Bronzato Nogueira, pelas sugestões e críticas concedidas para o aperfeiçoamento deste trabalho.

“A sabedoria é a coisa principal; adquiere, pois, a sabedoria, emprega tudo o que possuis na aquisição de entendimento. Estima-a, e ela te exaltará; se a abraçares, ela te honrará” (Provérbios 4:7,8)

Estudo das Camadas Intermediárias descendentes na região equatorial e de baixa latitude brasileira.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar o comportamento das camadas intermediárias descendentes (CIs) sobre a região equatorial e de baixa latitude brasileira de Palmas-TO (10,12° S; 48,21° O) e São José dos Campos-SP (23,07° S; 45,52° O) respectivamente, durante os períodos de baixa (2008/2009) e alta (2013/2014) atividade solar correspondente ao ciclo 24. Os resultados deste estudo indicam que as camadas intermediárias ocorrem predominantemente durante o dia e apresentam um comportamento típico de descida que pode atingir as alturas da camada E e se fundir com as camadas E-espóricas em desenvolvimento. A probabilidade de ocorrência das camadas intermediárias no setor brasileiro é alta e parece ser independente da sazonalidade e da atividade solar. O comportamento sazonal médio de altura e frequência de topo da CI para o setor de baixa latitude apresenta um comportamento regular entre 09:00 UT (06:00 LT) e 21:00 UT (18:00 LT). Em Palmas, tal característica foi observada somente no solstício de inverno, já que nos demais períodos sazonais um padrão oscilatório foi observado nos valores médios de altura. Com relação a variação sazonal média com a hora local na ocorrência dos eventos de CI durante o mínimo solar, observou-se dois máximos em São José dos Campos para todos os períodos sazonais avaliados, sendo o primeiro no período da manhã (entre 10:00 UT (07:00 LT) e 12:00 UT (09:00LT)) e o segundo no período da tarde (entre 14:00 UT (11:00 LT) e 19:30 UT (16:30LT)). Em Palmas, comportamento similar foi observado mais claramente somente no solstício de inverno. Até o presente momento, nenhuma relação foi encontrada entre a variação da altura virtual da camada intermediária e a variação da altura virtual da base da camada F. Algumas peculiaridades também foram encontradas neste estudo, tais como: camadas intermediárias noturnas, camadas intermediárias simultâneas, ou seja, a ocorrência de mais de uma camada em um mesmo ionograma e camadas intermediárias formadas a partir do desprendimento da base da camada F. Além disso um estudo sobre a influência dos ventos na formação e dinâmica das CIs foi realizado e constatou-se que em setores de baixa latitude brasileira, a inclusão da maré semidiurna foi essencial para modular a descida das CIs para altitudes inferiores. Já para setores equatoriais foi necessário incluir uma correção no modelo de ventos (multiplicando-o por um fator de 1,5), para que resultados mais coerentes fossem encontrados. Mostrou-se que as ondas de gravidade podem ter um papel importante na formação/desenvolvimento da camada intermediária sobre a região de São José dos Campos. O impacto da tempestade magnética no comportamento das CIs também foi brevemente discutido neste trabalho, no entanto, acredita-se que estudos mais detalhados são necessários para que os efeitos dos distúrbios magnéticos sobre as CIs possam ser melhores compreendidos.

Palavras-chaves: Camada Intermediária, ondas de gravidade, ventos de maré.

ABSTRACT

The main purpose of this work is to study the behavior of the intermediate descending layers (ILs) over the equatorial and low latitude Brazilian regions of Palmas-TO (10.12° S; 48.21° W) and São José dos Campos-SP (23.07° S; 45.52° O) respectively, during periods of low (2008/2009) and high (2013/2014) solar activity of cycle 24. The results of this study indicate that the intermediate layers occur predominantly during the day and exhibit a typical descent behavior that can reach the heights of the E-layer and merge with the sporadic E-layers in development. The probability of occurrence of intermediate layers in the Brazilian sector is high and seems to be independent of seasonality and solar activity. The seasonal average height and top frequency behavior of CIs for the low latitude sector shows a regular behavior between 09:00 UT (06:00 LT) and 21:00 UT (18:00 LT). In Palmas, this characteristic was observed only in the winter solstice, since in the other seasonal periods an oscillatory pattern was observed in the mean height values. It is believed that this oscillatory pattern in regions close to the equator is possibly caused by gravity waves propagation. Regarding the average seasonal variation with local time during the solar minimum, two maximums were observed in São José dos Campos for all evaluated seasonal periods, the first in the morning (between 10:00 am UT (07:00 LT) and 12:00 UT (09:00LT)) and the second in the afternoon (between 14:00 UT (11:00 LT) and 19:30 UT (16:30LT)). In Palmas, similar behavior was more clearly observed only in the winter solstice. So far, no relationship has been found between the variation in the virtual height of the intermediate layer and the variation in the virtual height of the base of the F layer. Some peculiarities were also found in this study, such as: nocturnal intermediate layers, simultaneous intermediate layers, that is, the occurrence of more than one layer at the same ionogram and intermediate layers formed from the detachment of the base of the F layer. In addition, a study on the influence of winds on the formation and dynamics of ILs was carried out and it was found that in low latitude sectors in Brazil the inclusion of the semidiurnal tide was essential to modulate the descent of ILs to lower altitudes, whereas for equatorial sectors it was necessary to include a correction in the wind model, multiplying it by a factor of 1.5. This correction was very important in order to find results more consistent with observational data. It was showed that gravity waves can play an important role in the formation/development of the intermediate layer over the São José dos Campos, a low-latitude sector in Brazil. The impacts of magnetic storms on the behavior of ILs were briefly discussed, however additional studies need to be done to a better understanding of the effects of magnetic disturbances on ILs.

Keywords: Intermediate Layer, gravity waves, tidal winds

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ciclo solar.	21
Figura 2: Classificação da atmosfera da Terra	23
Figura 3: Distribuição eletrônica média (diurna) com os principais íons e suas respectivas fontes ionizantes, nas diferentes regiões ionosféricas.	25
Figura 4: Mapa indicando a localização geográfica das duas regiões estudadas: São José dos Campos – SP (SJC) e Palmas – TO (PAL).....	31
Figura 5: Esboço da técnica de sondagem da ionosfera por pulsos de ondas de frequência de rádio.	32
Figura 6: Ionograma de São José dos Campos do dia 7 de junho de 2009 mostrando a componente ordinária e extraordinária de uma CI juntamente com a camada F1 e F2.	33
Figura 7: Sistema de transmissão da ionossonda digital CADI para amplificação dos sinais de rádio do grupo de Física e Astronomia da UNIVAP.....	35
Figura 8: Antena Delta utilizada na transmissão de sinais da ionossonda localizada no campus Urbanova da UNIVAP em São José dos Campos.	35
Figura 9: Antena de recepção e vista do container onde estão instaladas o computador de monitoramento e armazenamento dos dados da ionossonda.	36
Figura 10: CADI sendo utilizada juntamente com um computador para o monitoramento dos dados ionosféricos em São José dos Campos.....	36
Figura 11: Ionograma de São José dos Campos para o dia 1 de julho de 2009 ilustrando os parâmetros utilizados neste estudo.	38
Figura 12: Ilustração do software UDIDA.	38
Figura 13: Exemplo de camada intermediária em São José dos Campos para o dia 3 de julho de 2009.	40
Figura 14: Ilustração das camadas E2, CI e F1 em Palmas às 10:25 UT no dia 10 de junho de 2013.	Erro! Indicador não definido.
Figura 15: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F (h'F, em azul) e altura (h'CI, em vermelho) e frequência de topo (ftCI, em rosa) da camada	

intermediária durante o equinócio para um período de baixa atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.....	44
Figura 16: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o equinócio para um período de baixa atividade solar em Palmas-TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.	45
Figura 17: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de inverno para um período de baixa atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.	46
Figura 18: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de inverno para um período de baixa atividade solar em Palmas-TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.	47
Figura 19: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de verão para um período de baixa atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.	48
Figura 20: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de verão para um período de baixa atividade solar em Palmas-TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.....	49
Figura 21: Diagrama de dispersão entre os parâmetros $h'F$ e $h'CI$ para diferentes períodos sazonais em São José dos Campos para um período de atividade solar mínima.....	51
Figura 22: Diagrama de dispersão entre os parâmetros $h'F$ e $h'CI$ para diferentes períodos sazonais em Palmas para um período de atividade solar mínima.....	51
Figura 23: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada	

intermediária durante o equinócio para um período de alta atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.....	53
Figura 24: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o equinócio para um período de alta atividade solar em Palmas-TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.	54
Figura 25: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de inverno para um período de alta atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.	55
Figura 26: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de inverno para um período de alta atividade solar em Palmas-TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.	56
Figura 27: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de inverno para um período de alta atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.	57
Figura 28: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de verão para um período de alta atividade solar em Palmas-TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.	58
Figura 29: Diagrama de dispersão entre os parâmetros $h'F$ e $h'CI$ para diferentes períodos sazonais em São José dos Campos para um período de atividade solar máxima.....	60
Figura 30: Diagrama de dispersão entre os parâmetros $h'F$ e $h'CI$ para diferentes períodos sazonais em Palmas para um período de atividade solar máxima.....	60
Figura 31: Sequência de ionogramas da região de São José dos Campos mostrando o comportamento da camada intermediária noturna para o dia 25 de outubro de 2008 (parte 1).	62

Figura 32: Sequência de ionogramas da região de São José dos Campos mostrando o comportamento da camada intermediária noturna para o dia 25 de outubro de 2008 (parte 2).	63
Figura 33: Sequência de ionogramas da região de São José dos Campos mostrando o comportamento da camada intermediária noturna para o dia 25 de outubro de 2008 (parte 3).	64
Figura 34: Sequência de ionogramas de São José dos Campos obtidos entre 17:00 UT e 17:25 UT no dia 13 de julho de 2009 mostrando o momento em que uma CI (indicada pela seta preta) se subdivide em duas CIs (uma indicada pela seta preta e outra pela seta vermelha).....	66
Figura 35: Sequência de ionogramas de Palmas durante o dia 16 de junho de 2009 mostrando a formação de uma camada intermediária a partir do desprendimento da base da camada F1...	68
Figura 36:(a) Densidade eletrônica em função do tempo e da altura conforme simulada pelo MIRE para o equinócio do ano de 2008 em SJC considerando o efeito da maré diurna do vento meridional; (b) Perfil da componente do vento meridional em São José dos Campos no período de equinócio em 2008 considerando o modo de maré diurna.	71
Figura 37: (a) Densidade eletrônica em função do tempo e da altura conforme simulada pelo MIRE para o equinócio do ano de 2008 em SJC considerando os efeitos das marés diurna e semidiurna da componente do vento meridional; (b) Perfil da componente meridional do vento em São José dos Campos no período de equinócio em 2008 considerando os modos de maré diurna e semidiurna.	71
Figura 38: (a) Densidade eletrônica em função do tempo e da altura conforme simulada pelo MIRE para o equinócio do ano de 2009 em PAL considerando o efeito da maré diurna do vento meridional; e (b) considerando os efeitos das marés diurna e semidiurna da componente do vento meridional; (c) Perfil da componente meridional do vento em Palmas no período de equinócio em 2009 considerando o modo de maré diurna; e (d) considerando os modos de maré diurna e semidiurna.	73
Figura 39: (a) Densidade eletrônica em função do tempo e da altura conforme simulada pelo MIRE para o solstício de inverno do ano de 2009 em PAL considerando o efeito da maré diurna do vento meridional; e (b) considerando os efeitos das marés diurna e semidiurna da componente do vento meridional; (c) Perfil da componente meridional do vento em Palmas no período do solstício de inverno em 2009 considerando o modo de maré diurna; e (d) considerando os modos de maré diurna e semidiurna.	74

Figura 40: Gráfico de isofrequência para o dia 12 de outubro de 2008 em São José dos Campos.	76
Figura 41: Sequência de ionogramas das CI's (09:20 UT (06:20 LT) às 10:05 UT (07:05 LT)) do dia 12/out/2008 na estação de SJC.	78
Figura 42: Sequência de ionogramas das CI's (10:10 UT (07:20 LT) às 11:05 UT (08:05 LT)) do dia 12/out/2008 na estação de SJC.	79
Figura 43: Sequência de ionogramas das CI's (13:00 UT (10:00 LT) às 13:10 UT (10:10 LT)) do dia 12/out/2008 na estação de SJC.	80
Figura 44: Sequência de ionogramas das CI's (13:55 UT (10:55 LT) às 14:55 UT (11:55 LT)) do dia 12/out/2008 na estação de SJC.	81
Figura 45: Sequência de ionogramas das CI's (16:40 UT (13:40 LT) às 18:10 UT (15:10 LT)) do dia 12/out/2008 na estação de SJC.	82
Figura 46: Imagem exemplificando quais os pontos pegar para calcular a amplitude de oscilação de uma frequência da onda de gravidade.....	83
Figura 47: Imagem exemplificando quais os pontos pegar para calcular o período de oscilação da onda de gravidade.	85
Figura 48: sequência de 4 dias, sendo um dia antes da tempestade (21/07/2009), o dia da tempestade (22/07/2009) e dois dias posteriores representativos da fase de recuperação da tempestade (23/07/2009 e 24/07/2009).	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Disponibilidade dos dados e a ocorrência das CIs durante o mínimo solar (2008-2009).....	43
Tabela 2: Picos de ocorrência de CIs e suas respectivas porcentagens de ocorrência.	50
Tabela 3: Disponibilidade dos dados e a ocorrência das CIs durante o máximo solar (2013-2014).....	52
Tabela 4: Picos de ocorrência de CIs e suas respectivas porcentagens de ocorrência	59
Tabela 5: Principais tipos de ondas atmosféricas	75
Tabela 6: Variação da altura da onda de gravidade para cada pico e suas médias.....	84
Tabela 7: Variação de tempo pico a pico para cada frequência da onda de gravidade.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CADI	<i>Canadian Advanced Digital Ionosonde</i>
CI	Camada Intermediária
CI _s	Camadas Intermediárias
Es	Camada E-esporádica
foE	Frequência Crítica da Camada E
ftCI	Frequência de Topo da Camada Intermediária
h'CI	Altura Virtual da Camada Intermediária
h'F	Altura Virtual da Camada F
UDIDA	Univap <i>Digital Ionosonde Data Analysis</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO.....	17
1.2	OBJETIVO GERAL.....	17
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	FÍSICA SOLAR.....	20
2.2	ATMOSFERA DA TERRA.....	22
2.3	IONOSFERA DA TERRA.....	24
2.4	PROPAGAÇÃO DE ONDAS NA ATMOSFERA.....	26
2.4.1	ONDAS DE GRAVIDADE.....	26
2.4.2	ONDAS PLANETÁRIAS.....	26
2.4.3	MARÉS ATMOSFÉRICAS.....	27
2.5	CAMADAS INTERMEDIÁRIAS DESCENDENTES.....	27
3	METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO	31
3.1	IONOSSONDA.....	32
3.2	COLETA DOS DADOS.....	37
3.3	PARÂMETROS ESTUDADOS.....	39
4	RESULTADOS	43
4.1	COMPORTAMENTO DA CAMADA INTERMEDIÁRIA DURANTE ATIVIDADE SOLAR MÍNIMA.....	43
4.2	COMPORTAMENTO DA CAMADA INTERMEDIÁRIA DURANTE ATIVIDADE SOLAR MÁXIMA.....	52
4.3	CAMADAS INTERMEDIÁRIAS NOTURNAS.....	61
4.4	CAMADAS INTERMEDIÁRIAS SIMULTÂNEAS.....	64
4.5	CAMADAS INTERMEDIÁRIAS FORMADAS A PARTIR DO DESPRENDIMENTO DA BASE DA CAMADA F.....	66
4.6	INVESTIGAÇÃO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS VENTOS NA FORMAÇÃO E NA DINÂMICA DAS CAMADAS INTERMEDIÁRIAS EM REGIÕES EQUATORIAIS E DE BAIXA LATITUDE BRASILEIRAS.....	68
4.7	INVESTIGAÇÃO SOBRE O PAPEL DAS ONDAS DE GRAVIDADE E A FORMAÇÃO DAS CAMADAS INTERMEDIÁRIAS EM REGIÕES EQUATORIAIS E DE BAIXA LATITUDE BRASILEIRA.....	74
4.8	INVESTIGAÇÃO DO IMPACTO DAS TEMPESTADES MAGNÉTICAS NO COMPORTAMENTO DAS CI's.....	86
5	CONCLUSÕES	91

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 94

1 INTRODUÇÃO

Camadas intermediárias descendentes (CIs) são regiões de fraca ionização localizadas no vale ionosférico que se estende entre o topo da região E e a base da região F (aproximadamente de 130 km até 200 km). Entre as suas principais características, destaca-se o movimento descendente que pode perdurar por horas, atingir as alturas da região E ionosférica e se fundir com as camadas esporádicas (Es) em desenvolvimento (NIRANJAN et al., 2010; DOS SANTOS et al., 2019).

Acredita-se que em regiões de médias latitudes, as camadas intermediárias resultam da oscilação da maré semidiurna no modo (2,4) (FUJITAKA; TOHMATSU, 1973) durante o período noturno. Já para as regiões equatorial e de baixa latitude, as quais são o enfoque dessa pesquisa de mestrado, é possível que tais camadas sejam influenciadas pela propagação das ondas de gravidade (KUDEKI; FAWCETT, 1993). Segundo Kudeki e Fawcett (1993), algumas características observadas nas camadas intermediárias sugerem que a velocidade de fase ao longo da linha de visada dessas irregularidades seja primeiramente controlada por efeitos eletrodinâmicos de grande escala como as marés e secundariamente controlada pelos efeitos eletrodinâmicos de curto período como as ondas de gravidade.

Dos Santos et al. (2019) recentemente mostraram que a ocorrência das camadas intermediárias sobre o setor equatorial e de baixa latitude brasileira é alta durante o mínimo solar de 2009. Além disso, os autores observaram que as CIs são predominantemente diurnas sobre ambas as regiões estudadas e apresentam um movimento de descida bem definido. A presença de camadas intermediárias noturnas, simultâneas, ascendentes e CIs que se formam a partir do desprendimento da base da camada F1 também foram observadas.

Embora as camadas intermediárias tenham sido estudadas há muitos anos (APPLETON, 1933; BALSLEY, 1964; SHEN et al., 1976; SZUSZCZEWICZ et al., 1995; DOS SANTOS et al. 2019), algumas características sobre esse fenômeno ionosférico ainda não são bem conhecidas e precisam ser melhores investigadas como, por exemplo, o seu mecanismo de formação, sua composição, e a influência da atividade solar e magnética na geração deste fenômeno. Neste contexto, propõe-se para esta pesquisa de mestrado um estudo sobre o

comportamento das camadas intermediárias descendentes sobre o setor brasileiro de Palmas - TO (10,12° S; 48,21° O, dip -11°) e de São José dos Campos - SP (23,07° S; 45,52° O, dip -32°). Para tanto, serão analisados os dados coletados pela ionossonda CADI durante os períodos de agosto/2008 a julho/2009 e maio/2013 a abril/2014, representativos de baixa e alta atividade solar, respectivamente.

Este trabalho está organizado em 5 Capítulos. O Capítulo 1 se refere a este sumário introdutório. No Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica. A seguir, no Capítulo 3, a metodologia empregada é apresentada juntamente com a descrição do radar ionosférico (ionossonda) utilizado para a detecção das camadas intermediárias. O Capítulo 4, por sua vez, traz os resultados desta pesquisa e, finalmente, no Capítulo 5, as conclusões deste estudo.

1.1 MOTIVAÇÃO

Determinar os processos físicos e químicos que ocorrem na região do vale ionosférico ainda é uma tarefa difícil, já que esta é uma região de menor densidade de elétrons, o que dificulta o seu estudo por meio dos equipamentos ionosféricos convencionais. Apesar de inúmeros trabalhos sobre as camadas intermediárias estarem disponíveis, há poucas informações sobre os processos químicos e físicos que ocorrem nesta região de vale dos setores equatoriais e baixas latitudes. Neste sentido, estudos adicionais precisam ser realizados para que algumas peculiaridades deste fenômeno sejam melhores compreendidas e é neste contexto que o estudo aqui proposto se desenvolve.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é estudar a climatologia das camadas intermediárias descendentes sobre os setores equatorial e de baixa latitude brasileira de Palmas – TO (10,12° S; 48,21° O, dip -11°) e São José dos Campos – SP (23,07° S; 45,52° O, dip -32°),

respectivamente. O comportamento dessas camadas será avaliado para diferentes períodos de atividade solar, utilizando os dados observacionais obtidos pelas ionossonda.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar os ionogramas das estações de Palmas-TO e São José dos Campos-SP registrados nos períodos de agosto/2008 a julho/2009 e maio/2013 a abril/2014;
- b) Reduzir os parâmetros de altura ($h'CI$) e frequência de topo ($ftCI$) das camadas intermediárias descendentes;
- c) Investigar se a formação das CIs para ambos os setores apresenta variabilidade dia a dia, com a hora local, com a atividade solar e magnética e com a estação do ano (sazonalidade);
- d) Examinar os possíveis mecanismos de formação das CIs nos setores equatorial e de baixas latitudes brasileiras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FÍSICA SOLAR

O Sol é a estrela mais próxima da Terra. Como consequência disso o nosso planeta é constantemente afetado pelas reações que acontecem no Sol. O interior do Sol pode ser dividido em três diferentes regiões, conhecidas como: a região do núcleo, a região radioativa e a região convectiva, sendo elas caracterizadas pelos seus valores de densidade, temperatura e pela maneira com que ocorre o transporte de energia (BALMACEDA, 2008). Quanto a atmosfera do Sol esta é formada por três regiões, a fotosfera, a cromosfera e a coroa. A fotosfera é a região visível a olho nu, ou seja, a luz que enxergamos quando olhamos para o Sol. A coroa solar é a parte mais externa do Sol e a mais quente, pois ela se estende por milhões de quilômetros do Sol. Esta região da atmosfera solar é a mais importante para os fenômenos físicos interplanetários (SCHWENN, 2006).

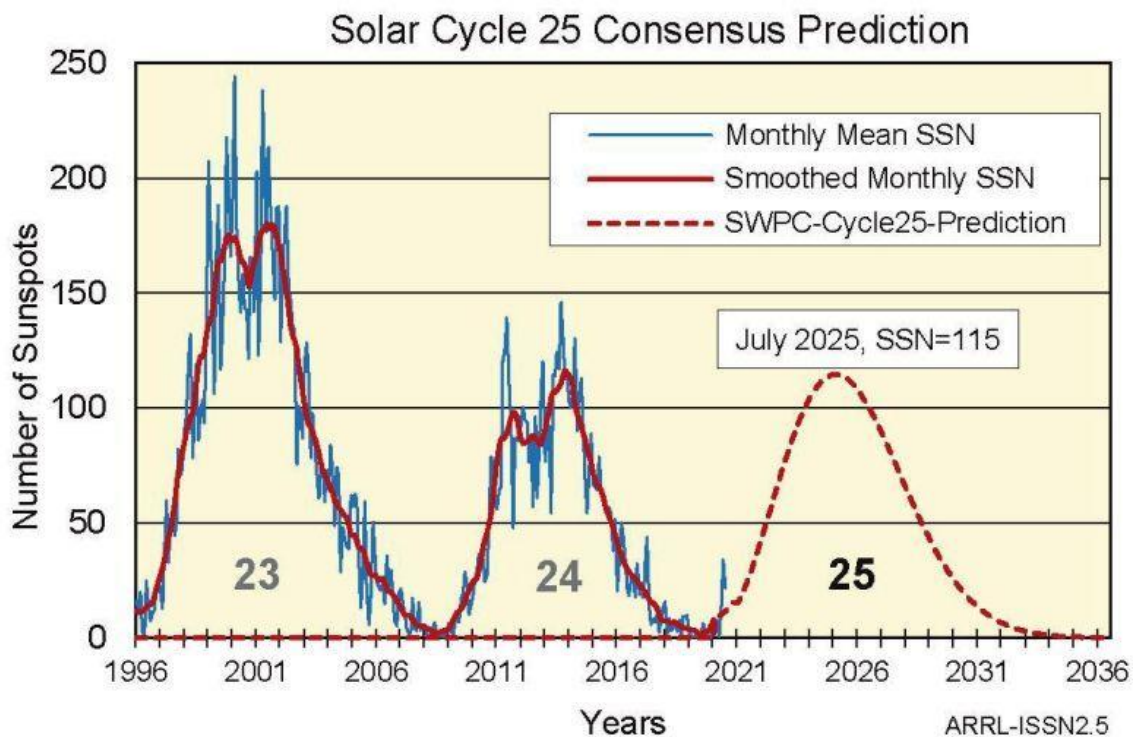
O Sol tem sua atividade variando em ciclo de 11 anos. O ciclo solar está relacionado com o surgimento das manchas solares. O ciclo de atividade solar apresenta 4 fases, denominadas por: mínimo solar, ascendente solar, máximo solar e descendente solar. O mínimo solar é a fase em que se tem a menor quantidade de manchas solares. Na fase ascendente, as atividades solares começam a se intensificar e as manchas solares tendem a aparecer em uma escala crescente. Na fase de máximo solar o Sol está em alta atividade e, neste caso, muitas manchas solares podem ser observadas. Na fase descendente a atividade solar volta a decrescer e o número de manchas solares começam a decair à medida que se aproxima da nova fase de mínimo. Ressalta-se que durante o período de máxima atividade solar o campo magnético do Sol torna-se complexo, favorecendo a ocorrência de eventos extremos, tais como as explosões solares e as ejeções de massa coronal (CMEs).

Durante uma explosão solar a energia armazenada nas linhas retorcidas do campo magnético do Sol resulta em uma grande liberação de energia quando do rompimento dessas linhas de campo. As explosões solares são subdivididas em basicamente três categorias que classificam suas intensidades, denominadas classes X, M e C. As mais drásticas são as explosões de classe X, pois podem causar tempestades de radiação e interrupções nos sistemas

de comunicação de rádio terrestre e via satélite (ASCHWANDEN, 1994; DENARDINI, 2003). Através das explosões solares pode haver uma ejeção de massa coronal. A diferença básica entre uma explosão solar e uma ejeção de massa coronal é que, na primeira há liberação de energia na forma de radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda, enquanto no caso das ejeções de massa coronal tem-se o desprendimento de uma grande quantidade de massa e energia do Sol.

A Figura 1 expõe o ciclo solar 23 (entre 1997 até 2008), o ciclo solar 24 (entre 2009 até 2020) e a projeção do ciclo solar 25 (2021 até 2032). No eixo horizontal apresenta-se a escala de tempo e no eixo vertical a contagem de manchas solares. Nota-se claramente que os anos de 1997, 2009 e 2020 são representativos de baixa atividade solar, visto que as contagens de regiões ativas estão próximas de zero. Entretanto, durante os anos de 2000-2001 e 2013-2014, o Sol se encontrava em máxima atividade, apresentando cerca de 240 e 145 manchas solares, respectivamente.

Figura 1: Ciclo solar.



Fonte: <<https://republicaradio.com/wp-content/uploads/2021/03/Bienvenido-al-ciclo-25-arrrl-1.jpg>>. Acesso em 18 de dezembro de 2021.

2.2 ATMOSFERA DA TERRA

A atmosfera da Terra pode ser classificada de três diferentes formas, sendo elas: em função do gradiente de temperatura, de seu estado de ionização e dos processos físicos ou químicos que nela ocorrem. Em função do gradiente de temperatura, a atmosfera é dividida em quatro regiões, sendo estas denominadas por troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. A troposfera é a região mais próxima da superfície da Terra e tem como limite superior uma altitude de aproximadamente 15 km. A troposfera é a camada onde ocorrem os fenômenos meteorológicos. O limite superior da troposfera é denominado tropopausa. A estratosfera é a região logo acima e está localizada entre aproximadamente 15 e 50 km de altitude. Na estratosfera observa-se um aumento da temperatura em função da altitude devido a presença do ozônio e vapor d'água que se acumula e absorve os raios UV. O limite superior da estratosfera é definido como estratopausa (DE FREITAS, 2007; NOGUEIRA, 2009).

A mesosfera é a região localizada entre a estratopausa e a mesopausa. A mesosfera a temperatura volta a decair em função da altitude até alcançar o valor mínimo de aproximadamente -80°C . A temperatura tende a diminuir na mesosfera devido aos mecanismos que influenciam no relaxamento vibracional das moléculas de CO_2 e pelas emissões de fótons no infravermelho e no espectro do visível. Com relação a termosfera esta não possui um limite superior bem definido e pode se estender de aproximadamente 500 km até os 650 km de altitude. Nesta camada as partículas se movimentam com uma velocidade imensa, obtendo assim temperaturas altíssimas, as quais variam entre 1000 K e 2000 K (DE FREITAS, 2007).

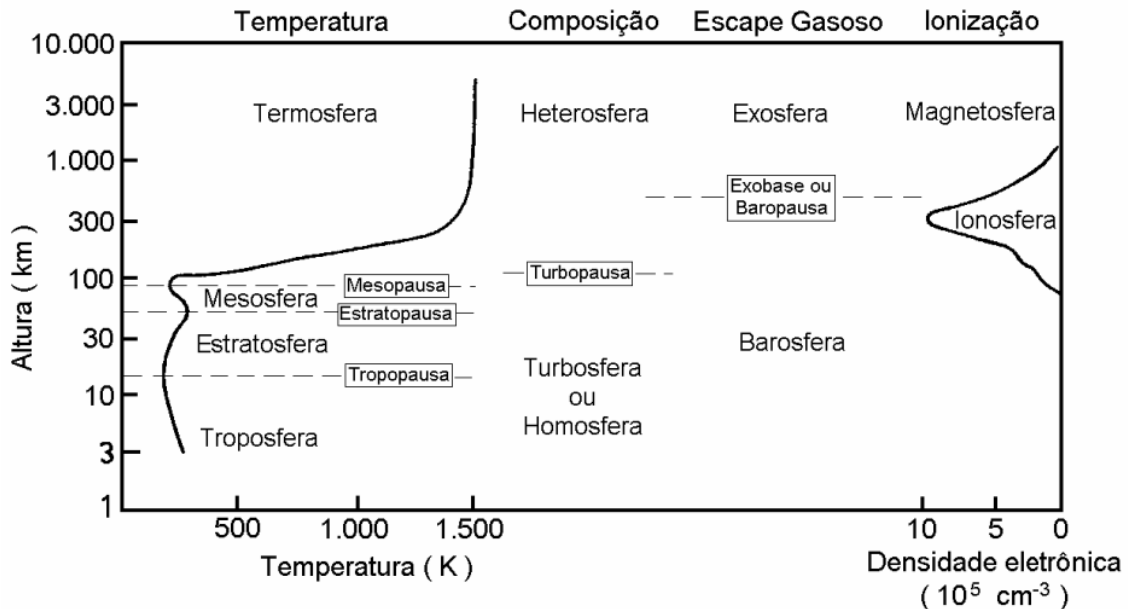
Outra forma de classificar a atmosfera da Terra é pelos processos físicos que nela ocorrem. Desta forma, a atmosfera da Terra pode ser classificada em: homosfera, heterosfera e exosfera. A homosfera vai desde o solo até cerca de 100 km e nesta região predomina o processo de difusão turbulenta, ou seja, um movimento aleatório das moléculas. Próximo aos 100 km de altitude, região que divide a homosfera da heterosfera, ocorre tanto o processo de difusão turbulenta como o processo de difusão molecular, ou seja, tanto o processo de mistura quanto o de separação dos constituintes moleculares.

A partir dos 100 km até aproximadamente 500 km de altitude encontra-se a região denominada por heterosfera, a qual predomina o processo físico de difusão molecular. Por volta dos 500 km de altitude, separando a heterosfera da exosfera, encontra-se exobase. Nesta altitude

os processos físicos predominantes são tanto o de difusão molecular quanto o de órbitas balísticas. Logo acima vem a exosfera, que é a região que se inicia em aproximadamente 500 km até aproximadamente 1000 km de altitude. O processo físico que predomina na exosfera é o de órbitas balísticas, nas quais as moléculas presentes raramente colidem e os constituintes tendem a se perder para fora no espaço (DE FREITAS, 2007).

A atmosfera da terra pode ainda ser classificada quanto ao seu estado de ionização. Nesta classificação, a atmosfera pode ser dividida em duas diferentes regiões, conhecidas como atmosfera neutra (já explicada anteriormente) e a atmosfera ionizada. A atmosfera ionizada, assunto que será discutido na próxima seção, é a porção da atmosfera terrestre onde se encontram a ionosfera e a magnetosfera. A Figura 2 apresenta as distintas classificações da atmosfera neutra e da atmosfera ionizada da Terra. Observa-se os diferentes tipos de classificação da atmosfera terrestre com base na sua temperatura, composição, escape gasoso e ionização (DA SILVA, 2004).

Figura 2: Classificação da atmosfera da Terra



Fonte: DA SILVA, 2004.

2.3 A IONOSFERA DA TERRA

A ionosfera é a região ionizada da atmosfera superior terrestre que está compreendida entre, aproximadamente, 50 km e 2000 km de altitude. Nesta região, a presença de elétrons e íons é suficiente para influenciar a propagação das ondas de rádio que nela se propagam (DENARDINI, 1999). A formação da ionosfera ocorre pela produção de íons a partir da fotoionização oriunda das radiações solares nas faixas do ultravioleta, raios X e por partículas energéticas que são absorvidas por colisões entre os constituintes neutros atmosféricos. Na medida que estas radiações penetram na atmosfera mais densa, a produção de elétrons tende a crescer à um nível máximo. Sabemos que na região da atmosfera neutra que se encontra abaixo deste nível a densidade aumenta e, conseqüentemente, a produção de elétrons decresce. A explicação fisicamente comprovada para isso é a de que, nessa porção da atmosfera neutra a maior parte da radiação ionizante já foi absorvida e a taxa de perda predomina sobre a de produção de elétrons. Devido às diferentes taxas de absorção, aos diferentes constituintes atmosféricos e processos físicos, a ionosfera pode ser classificada em camadas ou regiões, as quais são conhecidas como regiões D, E e F. A região F, por sua vez, pode ser subdividida em camadas F1 e F2 e, em latitudes equatoriais ainda pode surgir a camada F3 (NEGRETI, 2012).

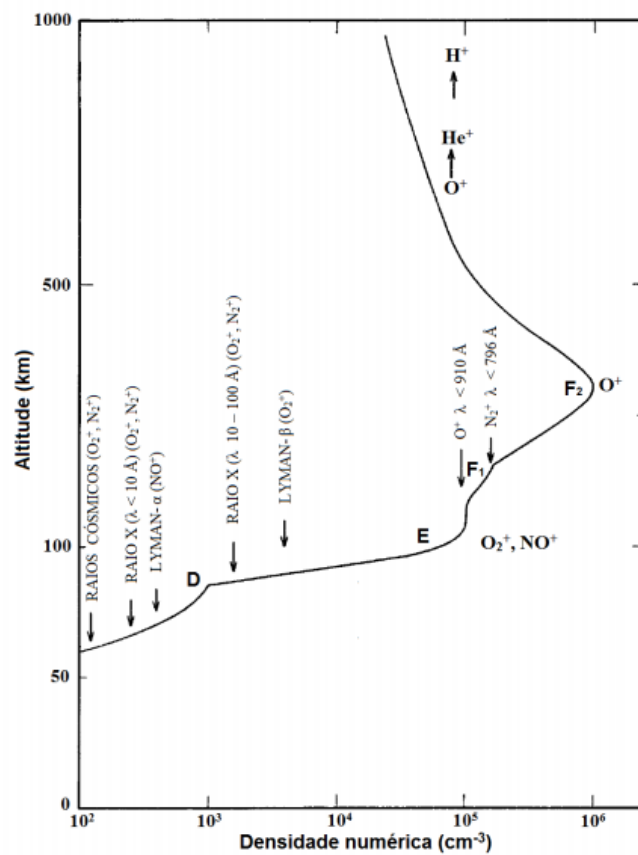
A região D é a mais baixa da ionosfera e abrange uma altitude que se estende aproximadamente 65 km até 90 km de altitude. Esta região é a mais complexa da ionosfera pois sofre ionização por diversas fontes. A região D é a responsável por causar a absorção das ondas de rádio em alta frequência que são refletidas nas camadas superiores (YAMASHITA, 1999; DENARDINI, 2003). A região E está localizada entre 90 e 130 km, aproximadamente. Os principais íons dessa região são o óxido nítrico, o oxigênio molecular, o nitrogênio molecular e o oxigênio atômico (DENARDINI, 1999). Além desses íons, nesta região encontram-se também os íons metálicos que aparecem da ablação dos meteoritos na atmosfera da Terra, e que estão associados a formação das camadas “E esporádicas” (Es). As camadas esporádicas têm espessuras de alguns quilômetros e podem ocorrer em toda extensão de altura da região E.

A região F é caracterizada por apresentar a maior densidade de íons e elétrons livres e está localizada entre 150 km até o limite superior da ionosfera. Durante o dia, essa região se subdivide em F1 e F2 (SILVA, 2003). A camada F1 é observada apenas durante o dia e estende-se de aproximadamente 150 km a 200 km de altitude, podendo ser formada com um pico no perfil ou uma inflexão na curva devido as grandes competições entre os processos de perdas lineares e quadráticas (DA SILVA, 2004). Quanto à camada F2 esta se estende até o topo da

região F. É a região mais importante da ionosfera, pois nela situa-se o pico de densidade eletrônica que ocorre por volta dos 300 km (DA SILVA, 2004). Com a atmosfera terrestre é mais rarefeita nas altitudes da região F, a recombinação de íons ocorre vagarosamente depois do pôr do sol gerando, assim, uma camada de ionização presente durante todo o tempo.

A Figura 3 ilustra a distribuição eletrônica média diurna dos principais íons e suas respectivas fontes ionizantes nas diferentes regiões da ionosfera, conforme mencionado anteriormente.

Figura 3: Distribuição eletrônica média (diurna) com os principais íons e suas respectivas fontes ionizantes, nas diferentes regiões ionosféricas.



Fonte: adaptado BANKS e KOCKARTS (1973)

2.4 PROPAGAÇÃO DE ONDAS NA ATMOSFERA

Além do aquecimento diferencial em altura, a atmosfera está sujeita aos movimentos de rotação e translação da Terra. Tais movimentos geram um acúmulo de energia em ambientes distintos da atmosfera e provocam oscilações complexas nesta região. As oscilações observadas mais importantes são as ondas de gravidade, as ondas planetárias, e as marés atmosféricas. Alguns autores têm relatado, por exemplo, sobre a importância das ondas de gravidade e das marés atmosféricas no comportamento das camadas intermediárias, região esta que é o foco desta presente pesquisa. Assim sendo, uma breve descrição será feita sobre estes tópicos a seguir.

2.4.1 ONDAS DE GRAVIDADE

Ondas de gravidade são perturbações ondulatórias que se propagam horizontalmente e verticalmente na atmosfera e apresentam períodos característicos que podem variar de minutos até horas. Seu comprimento de onda pode variar de alguns metros até milhares de quilômetros (WRASSE et al., 2007). As ondas de gravidade surgem, principalmente, em regiões da baixa atmosfera devido ao balanço entre a força de gravidade e o gradiente de pressão e se propagam até a alta atmosfera (HINES, 1960; TAKAHASHI et al., 1999; TSUDA et al., 2000). Wrasse (2004) apontou que as principais fontes de geração das ondas de gravidade encontram-se na região da troposfera, dentre as quais destacam-se as convecções troposféricas, os fatores meteorológicos e os forçantes orográficos.

2.4.2 ONDAS PLANETÁRIAS

As ondas planetárias são oscilações que possuem uma estrutura horizontal da ordem do diâmetro da Terra e com períodos maiores do que um dia. Portanto, as ondas planetárias

possuem características de uma onda de escala global. A oscilação do efeito da força de Coriolis com a latitude atua sobre a atmosfera terrestre como uma força externa, gerando ondas horizontais transversais com comprimentos de onda de milhares de quilômetros (CAZUZA, 2018). De acordo com a literatura, as principais fontes geradoras das ondas planetárias, são: os processos convectivos, as interações não lineares entre marés atmosféricas e as ondas de gravidade ou modos diferentes das ondas de marés, as variações isoladas na topografia, e o aquecimento diferencial entre continentes e oceanos.

2.4.3 MARÉS ATMOSFÉRICAS

As marés atmosféricas são oscilações em escala global produzidas por uma combinação da ação gravitacional do Sol e da Lua sobre a Terra e pela ação térmica do Sol. Marés lunares são aquelas produzidas pela ação gravitacional da Lua, ao passo que as marés solares são produzidas pela ação térmica do Sol (MONTENEGRO, 2009). A maré solar está associada ao deslocamento do ar provocado pelo aquecimento não isotrópico da atmosfera, o qual provoca colisões entre os constituintes neutros e ionizados. As marés atmosféricas podem apresentar períodos harmônicos de 6, 8, 12 ou 24 horas, as quais passam a ser chamadas, respectivamente, de marés atmosféricas quarterdiurnas, terdiurnas, semidiurnas e diurnas.

2.5 CAMADAS INTERMEDIÁRIAS DESCENDENTES

As primeiras observações sobre a existência das camadas intermediárias descendentes surgiram na década de 1930 (SCHAFER e GOODALL, 1933; APPLETON, 1933; RATCLIFFE e WHITE, 1933). Desde então, essas camadas vêm sendo observadas por diferentes técnicas experimentais e em diferentes setores longitudinais, tais como: ionossondas (MCNICOL e GIPPS, 1951; SZUSZCZEWICZ et al., 1995), radares (SHEN et al., 1976;

EARLE et al., 2000), foguetes (SMITH, 1970; BISHOP e EARLE, 2003) e satélites (MILLER et al., 1993; HEELIS, 1999).

Camadas intermediárias descendentes (CIs) são regiões de densidade eletrônica intensificada no vale ionosférico que se estende da região E superior até a base da região F. Dentre suas principais características, destaca-se o seu movimento de descida que pode perdurar de vários minutos a horas, atingir as alturas da região E da ionosfera e se fundir com as camadas Es-esporádicas em desenvolvimento (NIRANJAN et al., 2010; DOS SANTOS et al., 2019, SANTOS et al., 2020).

Estudos realizados em regiões de médias latitudes indicam que as CIs localizadas em aproximadamente 150 km de altitude apresentam um movimento descendente durante o dia e ascendente ao anoitecer, com uma intensidade variando numa escala de tempo de 5 a 15 minutos (BALSLEY, 1964). Acredita-se que sobre estas regiões, as CIs resultem de uma convergência de ionização impulsionada pelos sistemas de vento neutro (SMITH, 1970; CONSTANTINIDES & BEDINGER, 1971). Fujitaka e Tohmatsu (1973) observaram que a presença das CIs é frequente após a meia-noite e sua causa dominante pode estar associada as marés atmosféricas semidiurna nos modos S2 e S4. Mathews (1998) descreveu a importância do papel das marés diurnas e semidiurnas na formação e descida das camadas intermediárias sobre Arecibo. O papel dos ventos de marés também foi discutidos por Mathews e Bekeny (1979). Tsunoda (1994), por sua vez, relatou que uma instabilidade de ondas gravitacionais impulsionadas pelo vento de marés poderia ser um possível mecanismo de formação das irregularidades do plasma alinhado ao campo responsável pelos ecos recebidos das CIs. Com relação ao pico de densidade eletrônica, Shen et al. (1976) observaram que este pode variar de aproximadamente 3×10^2 a $1 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ na região de média latitude de Arecibo.

Sobre as regiões equatoriais, Kudeki e Fawcett (1993) reportam que as camadas intermediárias podem ser formadas possivelmente pelas ondas gravitacionais. No entanto, algumas características observadas por esses autores indicam que a velocidade de fase ao longo da linha visada das irregularidades observadas deve ser controlada primeiramente pelo efeito eletrodinâmico de grande escala, os quais são impulsionados pelas marés, e secundariamente pelas ondas de gravidade de curtos períodos. MacDougall (1978) percebeu que a periodicidade das CIs nos ionogramas poderia estar associada às oscilações semidiurnas dos ventos de marés.

As primeiras observações acerca das camadas intermediárias sobre a região equatorial brasileira foram feitas por de Paula e Hyssel (2004) utilizando os dados do radar de espalhamento coerente de 30 MHz em São Luís. Observou-se que, por volta das 09:00 LT, os ecos em 150 km estavam localizados em aproximadamente 165 km. Um movimento de descida

foi observado nas horas seguintes, de tal forma que próximo ao meio-dia local, os ecos já estavam localizados em aproximadamente 145 km de altura. Nas horas seguintes, um movimento gradual de subida da camada foi identificado fazendo com que esta ionização atingisse uma altitude de aproximadamente 165 km durante o período da tarde.

As características dos ecos em 150 km sobre a região equatorial de São Luís também foram estudadas por Rodrigues et al. (2011). Verificou-se que a menor taxa de ocorrência desses ecos no Brasil ocorreu durante o equinócio de março, enquanto os ecos mais fortes e mais duradouros foram observados entre junho e setembro. Outra observação relevante feita por Rodrigues et al. (2011) foi de uma aparente variabilidade do deslocamento do Doppler com a altura indicando, assim, que os ecos em 150 km sobre o Brasil poderiam ter mecanismos de formação distintos daqueles conhecidos para outros setores longitudinais.

Utilizando dados das Digissondas instaladas sobre a região equatorial de São Luís (2 °S; 44 °W) e de baixa latitude de Cachoeira Paulista (22.42 °S; 45 °W), dos Santos et al. (2019) mostrou que as camadas intermediárias descendentes durante o mínimo solar de 2009 ocorrem predominantemente durante o dia, com uma taxa de ocorrência superior a 90% no setor de baixa latitude e superior a 60% no equador. Posteriormente, uma análise comparativa realizada por Santos et al. (2020) mostraram que enquanto a ocorrência das CIs é alta tanto durante o mínimo quanto durante o máximo solar em Cachoeira Paulista. Em São Luís, a ocorrência é maior durante atividade solar mínima (2009, $I = -3,8^\circ$) quando comparada a atividade solar máxima (2003, $I = -1,6^\circ$) indicando, assim, que as CIs apresentam uma possível dependência com o ângulo de inclinação magnética. Os resultados para a região brasileira indicam que a dinâmica das CIs pode estar associada as marés atmosféricas, as ondas gravitacionais e aos campos elétricos.

Com relação a duração das CIs, Santos et al. (2020) observaram que o tempo de vida dessas camadas é maior durante o período de mínimo solar (tanto em São Luís quanto em Cachoeira Paulista) e menor sobre a região equatorial, independentemente do nível de atividade solar. Ademais, algumas peculiaridades foram encontradas sobre a região brasileira, tais como a presença de camadas noturnas, camadas ascendentes e camadas intermediárias formadas a partir de um desprendimento na base da camada F1 ionosférica. Com relação a frequência de topo das CIs, observou-se que o comportamento deste parâmetro é muito similar a frequência crítica da camada E indicando, dessa forma, uma possível influência do dínamo da camada E na formação/dinâmica das camadas intermediárias (DOS SANTOS et al., 2019).

Utilizando dados de radares para região de Jicamarca, Kudeki e Fawcett (1993) destacaram que a irregularidade ionosférica localizada em aproximadamente 150 km pode ser

gerada pelas ondas de gravidade ou pelos campos elétricos de polarização gerados em regiões fora do equador por uma instabilidade nas camadas esporádicas (Tsunoda, 1994). A variabilidade diária observada nos parâmetros de altura, frequência de ocorrência e velocidade de descida das CIs também foram observadas e sugerem uma possível influência das ondas com periodicidade de alguns dias, dos campos elétricos de perturbação, dos íons metálicos e das ondas gravitacionais (NYGRÉN et al., 1990; WILKINSON et al., 1992).

Conforme mencionado por Osterman et al. (1995), o vento meridional é um dos principais fatores que contribuem para a formação das camadas intermediárias. Wilkinson et al. (1992), por sua vez, reportaram que em altitudes acima de 150 km, a influência do vento zonal nas CIs é insignificante e que o campo elétrico é o parâmetro que desempenha um papel importante na efetividade dos processos de convergência iônica e transporte descendente em altitudes acima de 125 km.

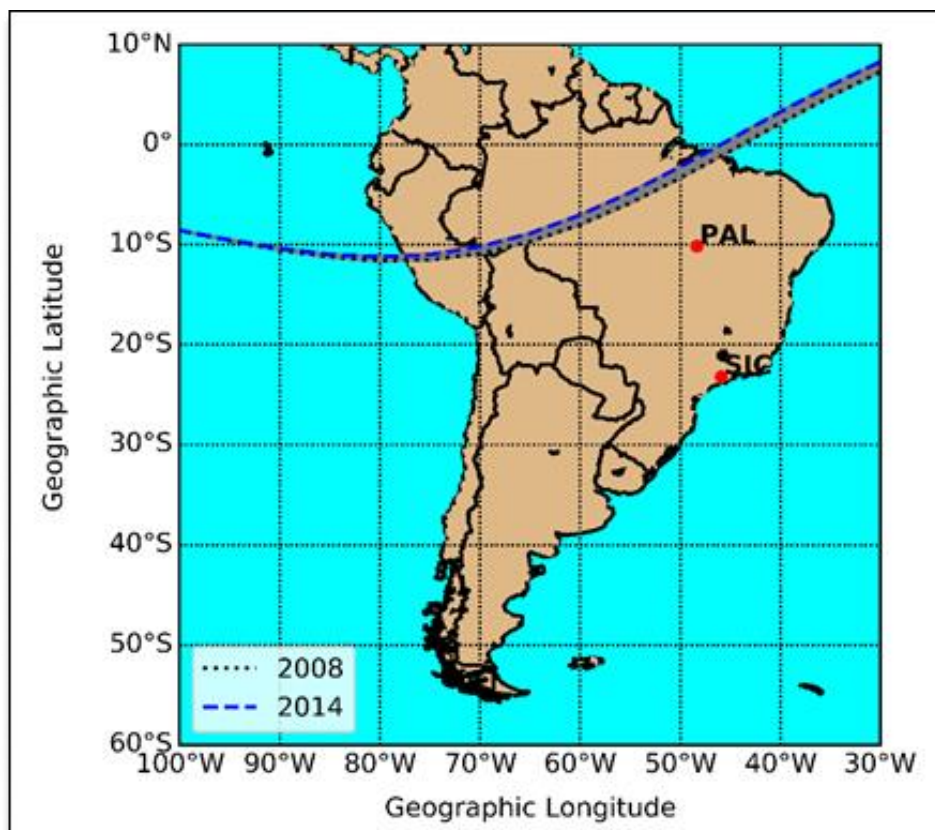
Niranjan et al. (2010) mostrou que a probabilidade de ocorrência da camada intermediária na região subtropical de Waltair é maior no solstício de inverno, moderada durante o equinócio e menor durante o solstício de verão. Os autores relataram também que a ocorrência da camada intermediária apresenta dois máximos durante o dia. Verificou-se ainda a presença da maré quaterdiurna (6 horas) e que as velocidades de descidas mais elevadas poderiam estar associadas a modulação da ionização da camada intermediária por ondas de gravidade juntamente com as marés.

Embora a região do vale ionosférico seja frequentemente investigada, ela ainda se configura como uma das regiões menos conhecidas do sistema atmosfera-ionosfera. Devido a sua baixa densidade de elétrons, o estudo desta região torna-se difícil através dos equipamentos ionosféricos convencionais (SANTOS et al., 2020). Isso porque as regiões de menor densidade entre as camadas ionosféricas não refletem as ondas de rádio, e devido a esta descontinuidade, o cálculo da altura real na região do vale é incerto (CHEN et al., 1991). Diferente dos radares de espalhamento incoerente que fornecem com precisão a densidade dos elétrons com resoluções espaciais e temporais na região do vale (ver por exemplo, TROST, 1979; RAIZADA et al., 2015, 2018), as medições feitas pelas ionossonda são mais limitadas, porém, ainda assim, permitem que as características essenciais das camadas intermediárias sejam estudadas (DENISENKO & SOTSKY, 1978; MAHAJAN et al., 1994).

3 METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO

Nesta seção, serão apresentados os materiais necessários e a metodologia utilizada para o estudo das camadas intermediárias descendentes sobre a região equatorial e de baixa latitude brasileira. Para o desenvolvimento deste trabalho, foram analisados os dados obtidos pelas ionossondas instaladas em Palmas – TO (10,12° S; 48,21 O, dip -11°) e São José dos Campos – SP (23,07° S; 45,52° O, dip -32°), para diferentes períodos de atividade solar. Para o período de atividade solar máxima (mínima), os meses de outubro de 2013 (2008) e abril de 2014 (2009) foram selecionados para representar o equinócio, junho e julho de 2013 (2009) o solstício de inverno e dezembro de 2013 (2008) e janeiro de 2014 (2009) o solstício de verão. A Figura 4 apresenta a localização geográfica das regiões estudadas indicada pelas siglas PAL e SJC.

Figura 4: Mapa indicando a localização geográfica das duas regiões estudadas: São José dos Campos – SP (SJC) e Palmas – TO (PAL).



Fonte: O autor

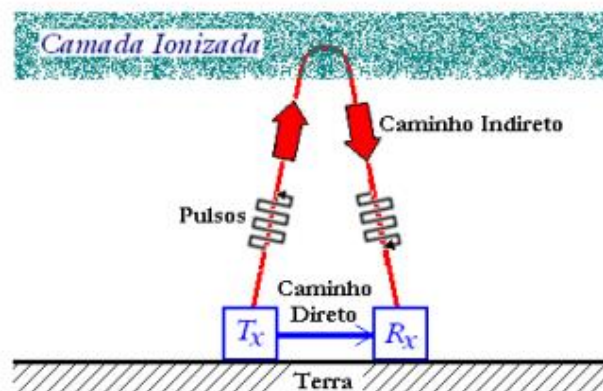
A seguir, apresenta-se uma descrição sobre o instrumento utilizado para investigar as camadas intermediárias.

3.1 A IONOSSONDA

De acordo com a teoria que descreve o comportamento das ondas de rádio na ionosfera, para que um sinal com um determinado comprimento de onda emitido por uma antena transmissora localizada em solo seja refletido pela camada ionosférica, é necessário que a densidade eletrônica da região de reflexão seja proporcional à raiz quadrada da frequência do sinal emitido. Com isso, a partir da recepção do sinal refletido pela ionosfera é possível estimar a densidade eletrônica na altura do ponto de reflexão, medindo-se o intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do eco (RESENDE, 2006).

Os rádios sondadores, ou ionossondas, são exemplos de equipamentos que detectam os sinais de rádio refletidos pela ionosfera. O princípio de funcionamento da ionossonda baseia-se no tempo que um pulso eletromagnético leva para se propagar a partir de um transmissor em solo e ser refletido pela ionosfera em uma altura onde a frequência do plasma se iguala à frequência do pulso. As ionossondas geralmente operam na faixa de alta frequência (*HF*) e executam uma varredura entre 1 e 20 MHz. A Figura 5 ilustra o método de sondagem da ionosfera por meio de uma ionossonda, exibindo como a onda eletromagnética transmitida pelo transmissor (T_x) se propaga até chegar ao receptor (R_x).

Figura 5: Esboço da técnica de sondagem da ionosfera por pulsos de ondas de frequência de rádio.

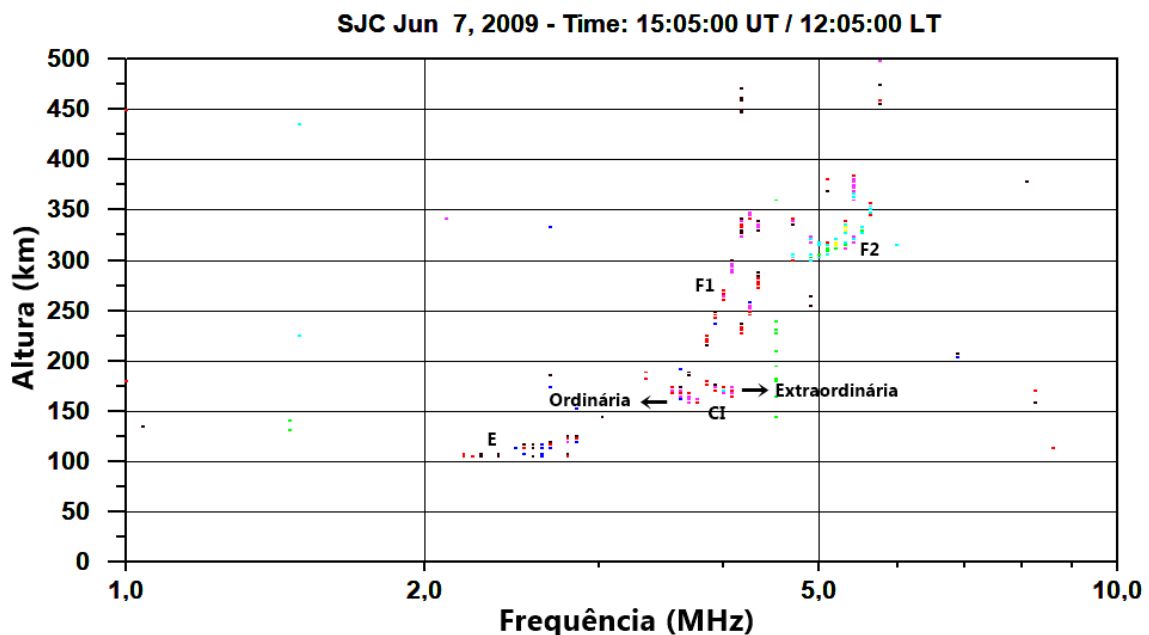


Fonte: Monteiro (2012), adaptado de Mitra (1952).

A coleta de dados feita por uma ionossonda é, essencialmente, realizada pelos sinais dos ecos refletidos pelas camadas ionosféricas. A sequência de ecos refletidos detectados pela antena receptora de uma ionossonda e processada pelo equipamento e fornecem um gráfico denominado ionograma. O ionograma apresenta a frequência do sinal refletido em comparação às alturas das camadas de reflexão (KIRCHHOFF, 1981; HUNSUCKER, 1991; SCHUNK; NAGY, 2000).

A Figura 6 apresenta um ionograma de São José dos Campos registrado às 15:05 UT (12:05 LT) do dia 7 de junho de 2009 em que é possível observar os traços das componentes ordinária e extraordinária da camada intermediária localizada em aproximadamente 156 km de altitude. Os traços ordinário e extraordinário estão relacionados à polarização da onda refletida pela ionosfera. As componentes ordinárias referem-se à polarização linear e as componentes extraordinárias à polarização não linear. Observa-se também na Figura 6 a presença das camadas F1 e F2 em ~214 km e ~298 km de altitude, respectivamente.

Figura 6: Ionograma de São José dos Campos do dia 7 de junho de 2009 mostrando a componente ordinária e extraordinária de uma CI juntamente com a camada F1 e F2.



Fonte: O autor.

Conforme mencionado anteriormente, o estudo das camadas intermediárias neste trabalho será realizado a partir dos dados coletados pela ionossonda do tipo CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*) desenvolvida pela Rede Canadense de Pesquisa Espacial. A CADI é uma ionossonda digital avançada que consiste em um equipamento de baixo custo e

compacto, o que é ideal para o monitoramento frequente da ionosfera (MACDOUGALL et al., 1994; PILLAT, 2006; JESUS, 2008).

As ionossondas digitais CADI são muito versáteis e possibilitam realizar observações em dois modos distintos. Um deles faz a varredura de 180 frequências que variam de 1 a 20 MHz, com resolução temporal de 5 minutos. A partir dessas medidas são gerados os gráficos conhecidos como ionogramas. O outro modo se refere a uma operação realizada por meio de seis frequências pré-estabelecidas, o qual fornece um ionograma com uma menor resolução espectral, porém com uma resolução temporal de 100 segundos (PILLAT, 2006).

De acordo com Monteiro (2012), a CADI é constituída pelos seguintes elementos funcionais básicos:

- um cartão de Síntese Digital Direta (SDD), que gera o sinal de rádio;
- um transmissor, o qual amplifica a potência do sinal de rádio antes de enviá-lo as antenas transmissoras;
- um sistema de antenas, o qual transmite o sinal amplificado e detecta os sinais refletidos pela ionosfera;
- cartões receptores, os quais amplificam e demodulam os sinais refletidos pela ionosfera e que são detectados pelas antenas;
- um microcomputador, que processa o programa para a análise dos dados, gerencia o processo de transmissão e recepção dos dados e exibe e armazena os dados adquiridos.

A Figura 7 ilustra o transmissor da ionossonda digital CADI. Este transmissor produz 600 W de potência de pico do pulso transmitido em uma faixa de 1 – 20 MHz. A transmissão e a recepção dos sinais são feitas através de uma antena do tipo duplo delta (Figura 8), em que um delta é empregado para a transmissão e o outro para a recepção, ambos utilizando um mastro de aproximadamente 20 metros de altura. Na Figura 9 é mostrado o contêiner na UNIVAP onde está instalado a ionossonda CADI.

A Figura 10 apresenta a CADI em funcionamento com um computador para o monitoramento e armazenamento dos dados ionosféricos em São José dos Campos. No módulo superior encontra-se o monitor e o computador. No segundo módulo abaixo do computador

encontra-se o receptor, e por fim, o terceiro módulo na base do sistema localiza-se o transmissor da CADI.

Figura 7: Sistema de transmissão da ionossonda digital CADI para amplificação dos sinais de rádio do grupo de Física e Astronomia da UNIVAP.



Fonte: MONTEIRO, 2012.

Figura 8: Antena Delta utilizada na transmissão de sinais da ionossonda localizada no campus Urbanova da UNIVAP em São José dos Campos.



Fonte: site UNIVAP.

Figura 9: Antena de recepção e vista do container onde estão instaladas o computador de monitoramento e armazenamento dos dados da ionossonda.



Fonte: site UNIVAP.

Figura 10: CADI sendo utilizada juntamente com um computador para o monitoramento dos dados ionosféricos em São José dos Campos.



Fonte: site da UNIVAP.

3.2 COLETA DOS DADOS

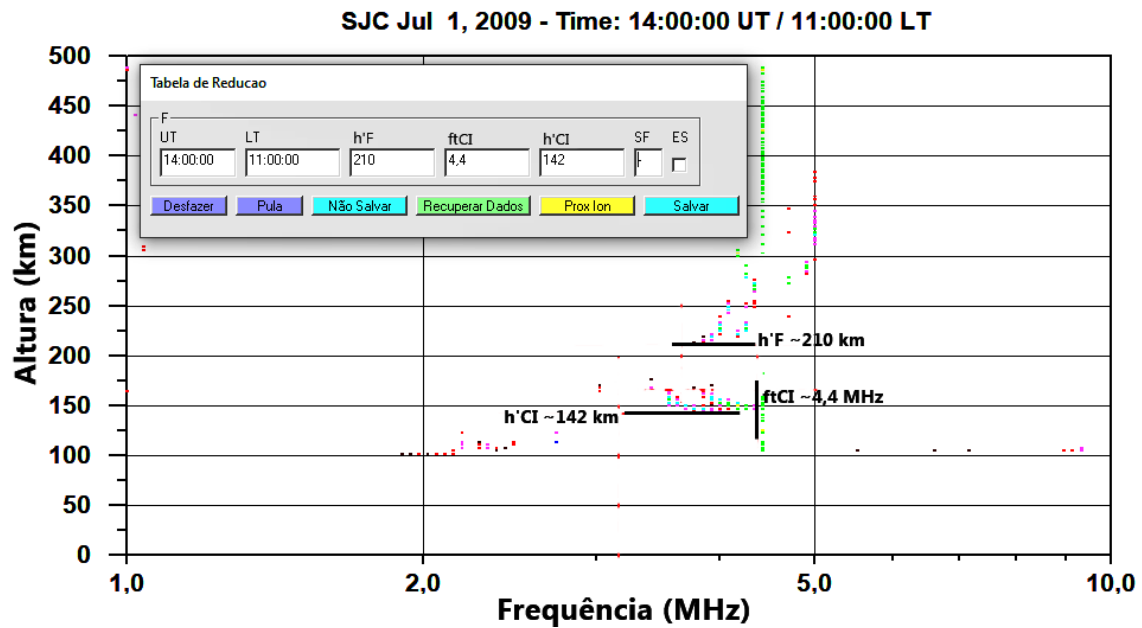
A coleta de dados realizadas pela CADI é armazenada em uma estrutura de fácil identificação como, por exemplo, aMhhmm.md4 ou aMhhmm.md3, em que a=ano, M=mês, hh=hora e mm=minuto seguido pela extensão do arquivo (md4 ou md3). Os arquivos que correspondem ao tipo md4 agregam 12 ionogramas completos com 180 frequências, já os arquivos do tipo md3 agregam 36 ionogramas com apenas 6 frequências (PILLAT, 2006). Para cada dia finalizado existem 24 arquivos do tipo md4 e 24 do tipo md3, no qual cada arquivo está relacionado a uma hora completa de observação. A CADI

coleta os dados e os armazena em arquivos identificados pelo ano, mês e dia em que a obtenção foi realizada. Isto permite a criação de um banco de dados de acordo com o observatório e a data de observação.

Para visualização dos ionogramas e redução dos parâmetros ionosféricos foi utilizado neste trabalho o programa computacional identificado por UDIDA (*Univap Digital Ionosonde Data Analysis*) (PILLAT e FAGUNDES, 2004). Assim, foi possível obter alguns parâmetros essenciais para realizar o estudo aqui proposto, tais como, a altura virtual e a frequência de topo da camada intermediária ($h'CI$ e $ftCI$, respectivamente) e a altura virtual da base da camada F ($h'F$).

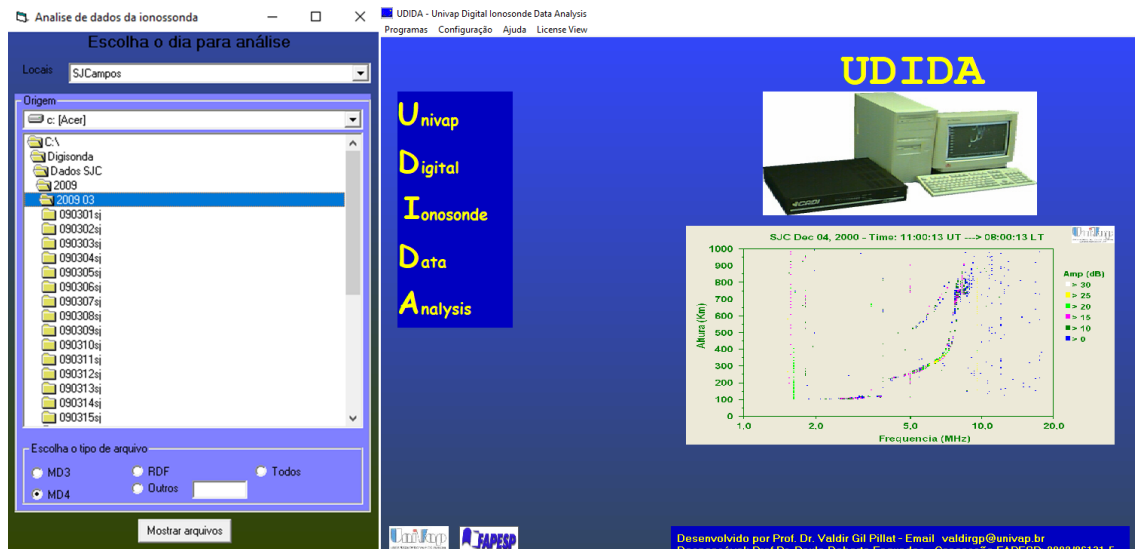
A Figura 11 ilustra os três parâmetros citados anteriormente. Observa-se que no dia 1 de julho de 2009, a CI foi registrada em uma altura de 142 km com uma frequência de topo igual a 4,4 MHz. Neste caso, a camada F esteve localizada em aproximadamente 210 km.

Figura 11: Ionograma de São José dos Campos para o dia 1 de julho de 2009 ilustrando os parâmetros utilizados neste estudo.



Após a redução e análise de um dia de dados brutos, o software registra os parâmetros em um arquivo de texto. A Figura 12 ilustra a interface do programa UDIDA.

Figura 12: Ilustração do software UDIDA.



3.3 PARÂMETROS ESTUDADOS

Neste estudo, o software UDIDA configurou-se como uma ferramenta fundamental para que os ionogramas dos setores equatorial e de baixa latitude brasileira pudesse ser processada. Os períodos selecionados para este estudo são representativos de atividade solar mínima (2008-2009) e alta (2013-2014).

O processamento dos ionogramas foi realizado, primeiramente, para o setor de São José dos Campos - SP durante os períodos de 2008 e 2009. Em seguida, avaliou-se os períodos de 2013 e 2014. Posteriormente, o mesmo procedimento foi utilizado para Palmas – TO.

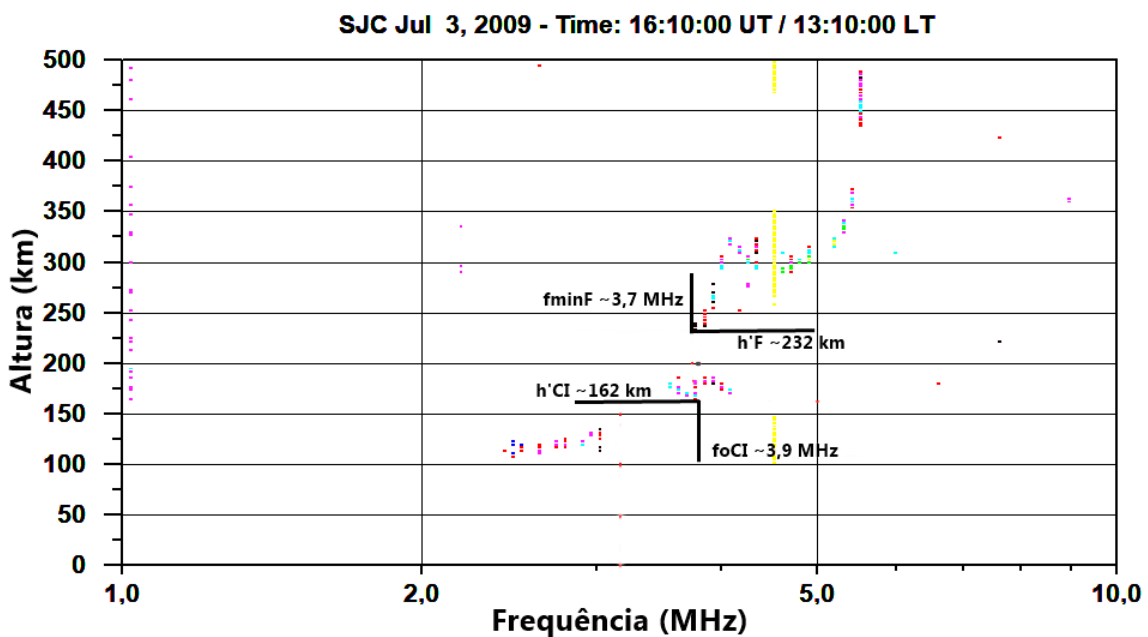
Dos Santos et al. (2019) definiu alguns critérios para que os parâmetros de interesse como altura virtual e a frequência de topo das camadas intermediárias pudessem ser extraídas dos ionogramas com confiabilidade. Tais critérios, os quais estão listados a seguir, foram em sua maioria utilizados no processamento dos dados deste presente trabalho. São eles:

- a) Quando a frequência crítica do traço ordinário da camada inferior ultrapassar a frequência mínima do traço ordinário da camada F, considerou-se a camada em questão como sendo uma CI (Figura 13). Caso não, considerou-se como sendo uma camada E2 regular (Figura 14). Dependendo da altura desta camada, avaliou-se cuidadosamente caso a caso;
- b) Nos ionogramas em que tais características descritas no item (a) não estivessem muito claras, considerou-se a sequência de ionogramas para definir o tipo da camada que estava sendo observada;
- c) Nos casos em que uma camada aparentou se formar a partir de um desprendimento da camada F1, considerou-se como sendo uma CI somente quando tal desprendimento fosse total;
- d) A altura mínima para se considerar uma camada como sendo uma CI foi de 130 km;
- e) Os parâmetros de altura e frequência foram extraídos a partir do traço extraordinário.

As camadas intermediárias foram processadas até o momento em que elas atingissem uma altura de aproximadamente 130 km de altura. Isto porque abaixo desta altura, as camadas intermediárias podem se fundir com as camadas E-espóradas em desenvolvimento. Além disso, é importante mencionar que as camadas consideradas como intermediárias formadas em altitudes superiores podem ter evoluído para uma camada E-espórada normal como a do tipo “c”, por exemplo.

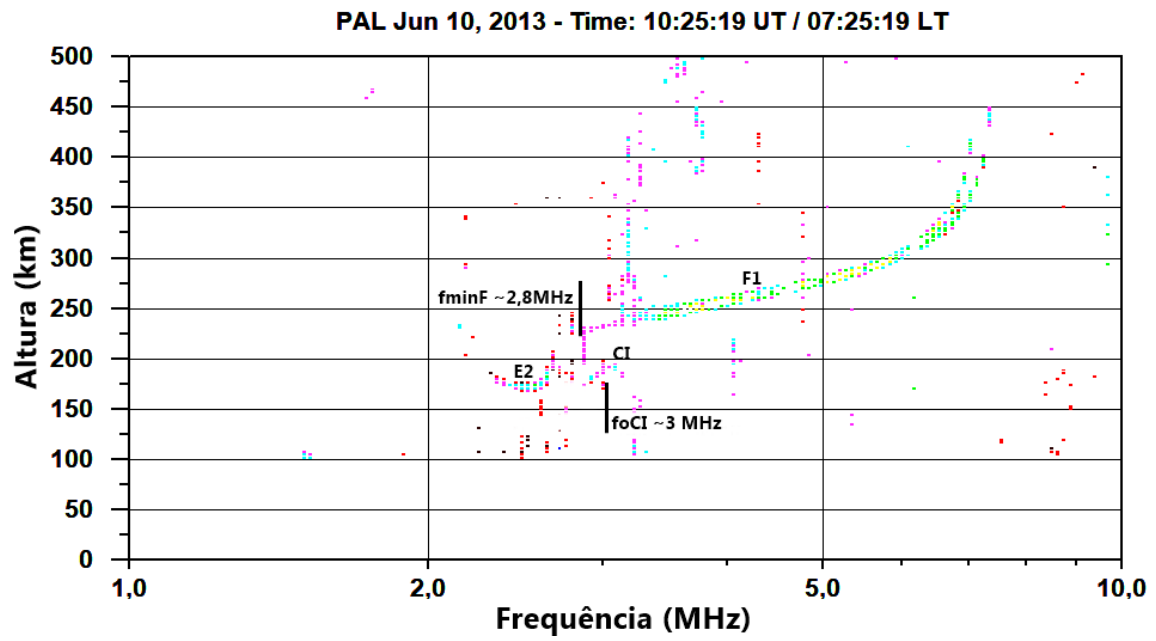
A Figura 13 apresenta um exemplo de uma camada intermediária em São José dos Campos localizada em aproximadamente 162 km de altura e com uma frequência de topo de aproximadamente 4,1 MHz. Neste caso, é possível notar que a frequência mínima da camada F ($f_{\min F} \sim 3,7$ MHz) foi inferior a frequência crítica da camada intermediária ($f_{oCI} \sim 3,9$ MHz), satisfazendo, assim, o critério descrito no item (a). Ressalta-se que a análise da sequência dos ionogramas foi fundamental para a classificação de uma camada como sendo intermediária.

Figura 13: Exemplo de camada intermediária em São José dos Campos para o dia 3 de julho de 2009.



A Figura 14 mostra o exemplo de um registro da camada E2 juntamente com uma camada intermediária no setor de Palmas-TO em 10 de junho de 2013 às 10:25 UT (07:25 LT). Observa-se que, neste caso, a frequência crítica da camada intermediária ($f_{oCI} \sim 3$ MHz) foi superior a frequência mínima da camada F ($f_{\min F} \sim 2,8$ MHz). Ressalta-se que casos como mostrado na Figura 14 não foram encontrados com tanta clareza. Sendo assim, o critério descrito no item (a) foi importante para que fosse excluído a possibilidade de se considerar a camada E2 como a camada intermediária.

Figura 14: Ilustração das camadas E2, CI e F1 em Palmas às 10:25 UT no dia 10 de junho de 2013.



Fonte: O autor.

4 RESULTADOS

Nesta seção discute-se os resultados encontrados sobre os setores de São José dos Campos – SP e Palmas - TO durante um período de atividade solar mínima (2008-2009) e máxima (2013-2014).

4.1 COMPORTAMENTO DA CAMADA INTERMEDIÁRIA DURANTE ATIVIDADE SOLAR MÍNIMA

O estudo das camadas intermediárias durante o período de mínimo solar considerou os dados obtidos pela ionossonda para os anos de 2008 e 2009. Mais especificamente, os dados foram agrupados em equinócio (outubro de 2008 e abril de 2009), solstício de inverno (junho e julho de 2008) e solstício de verão (dezembro de 2008 e janeiro de 2009). A disponibilidade dos dados e a ocorrência das CIs para estes períodos estão resumidas na Tabela 1. Observa-se que, de modo geral, as CIs foram observadas em quase todos os dias com dados disponíveis. É importante destacar que os dados de Palmas apresentaram inúmeras falhas como ruídos e falta de dados e, com isso, o estudo das CIs sobre este setor ficou prejudicada.

Tabela 1: Disponibilidade dos dados e a ocorrência das CIs durante o mínimo solar (2008-2009).

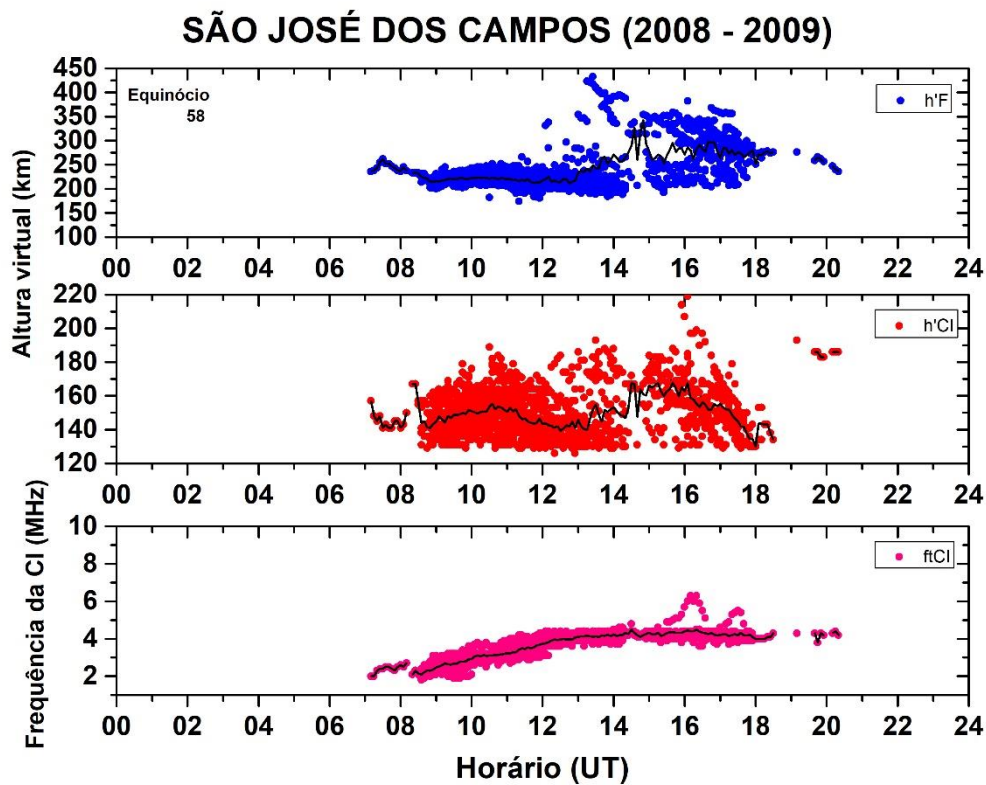
Mínimo Solar						
<u>São José dos Campos - SP</u>	2009	2009	2008	2008	2008	2008
	JAN	ABR	JUN	JUL	OUT	DEZ
	Número de dias com dados	31	30	30	31	31
Número de dias com CIs	26	28	29	31	30	26
<u>Palmas - TO</u>	2009	2009	2008	2008	2008	2008
	JAN	ABR	JUN	JUL	OUT	DEZ
	Número de dias com dados	8	24	30	27	15
Número de dias com CIs	8	19	25	21	13	4

Fonte: O autor.

As Figuras 15, 16, 17, 18, 19 e 20 mostram o comportamento sazonal e com a hora universal dos seguintes parâmetros: altura virtual da camada F (h'F, representada pelos pontos em azul) e a altura virtual (h'CI, pontos em vermelho) e frequência de topo (ftCI, pontos em rosa) da camada intermediária. Os valores médios de h'F, h'CI e ftCI também são apresentados

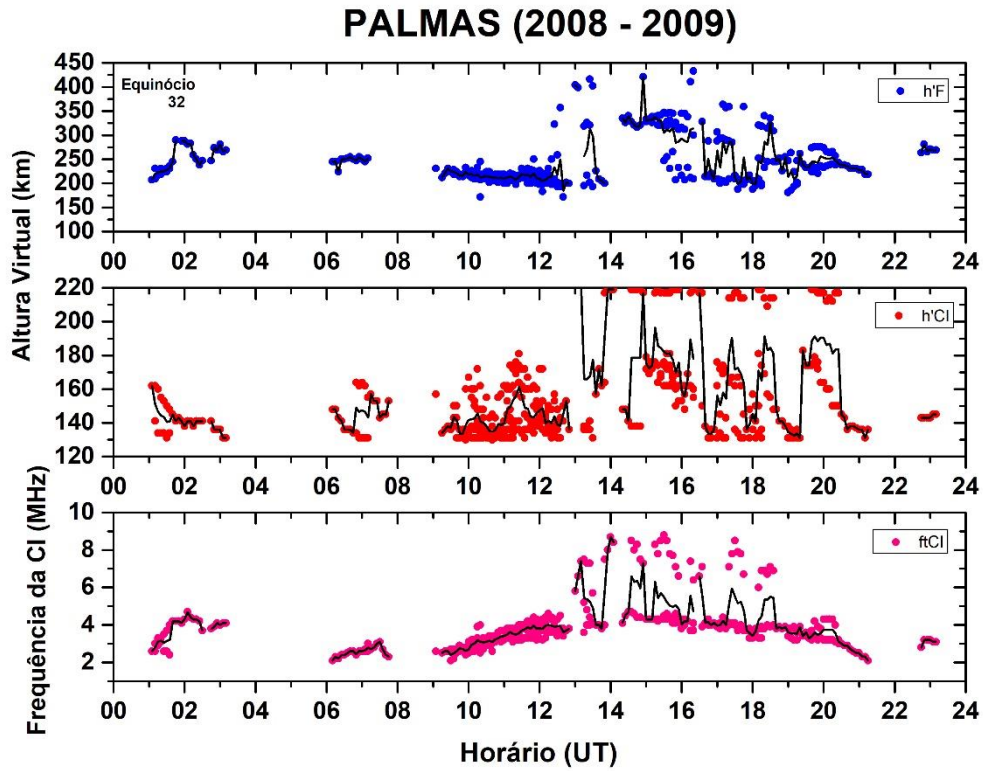
e estão representados pela curva na cor preta. O número de dias considerado nas análises é exibido no canto superior esquerdo do primeiro painel de cada figura.

Figura 15: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o equinócio para um período de baixa atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.



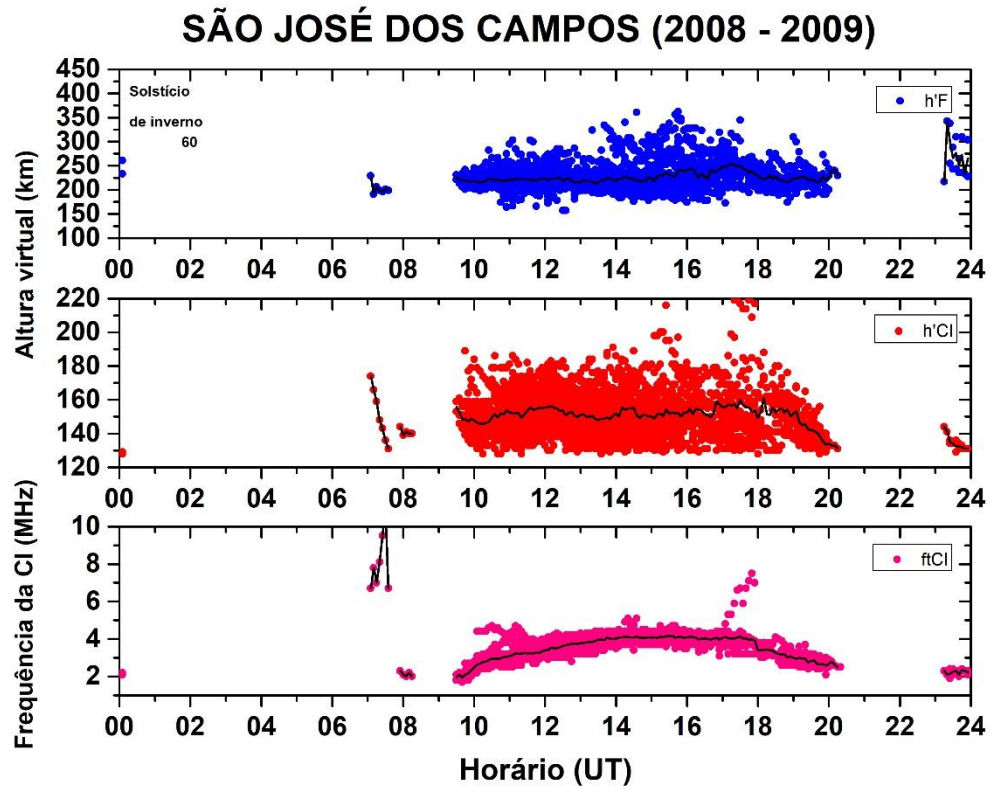
Fonte: O autor

Figura 16: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o equinócio para um período de baixa atividade solar em Palmas- TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.



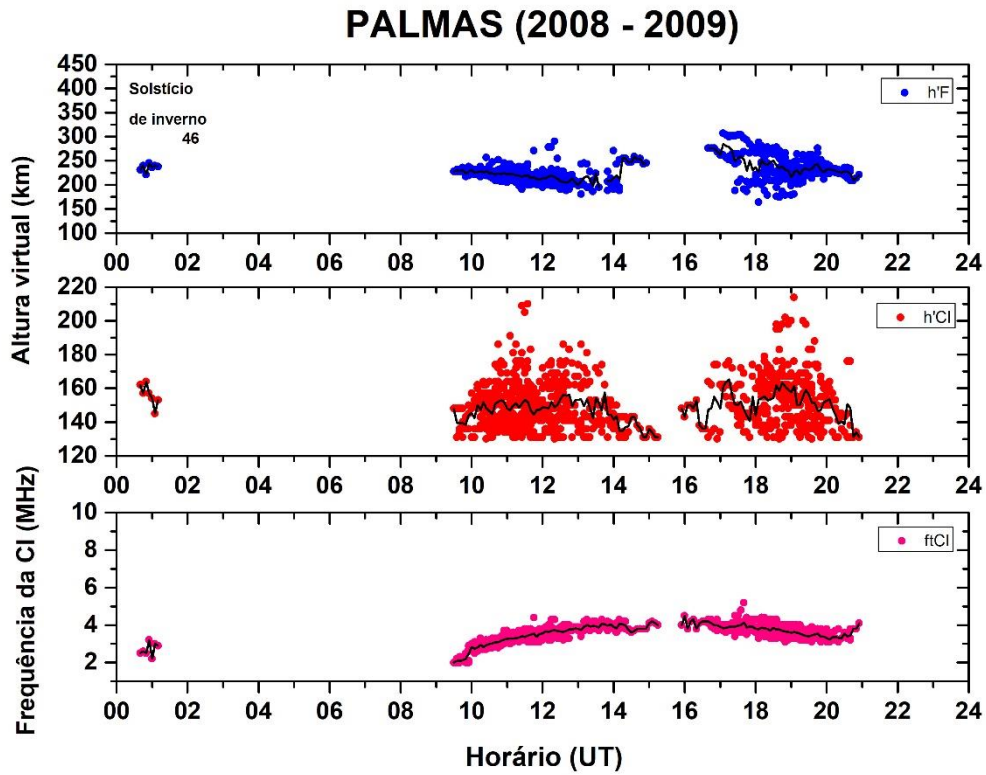
Fonte: O autor

Figura 17: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo (f_oCI , em rosa) da camada intermediária durante o solstício de inverno para um período de baixa atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.



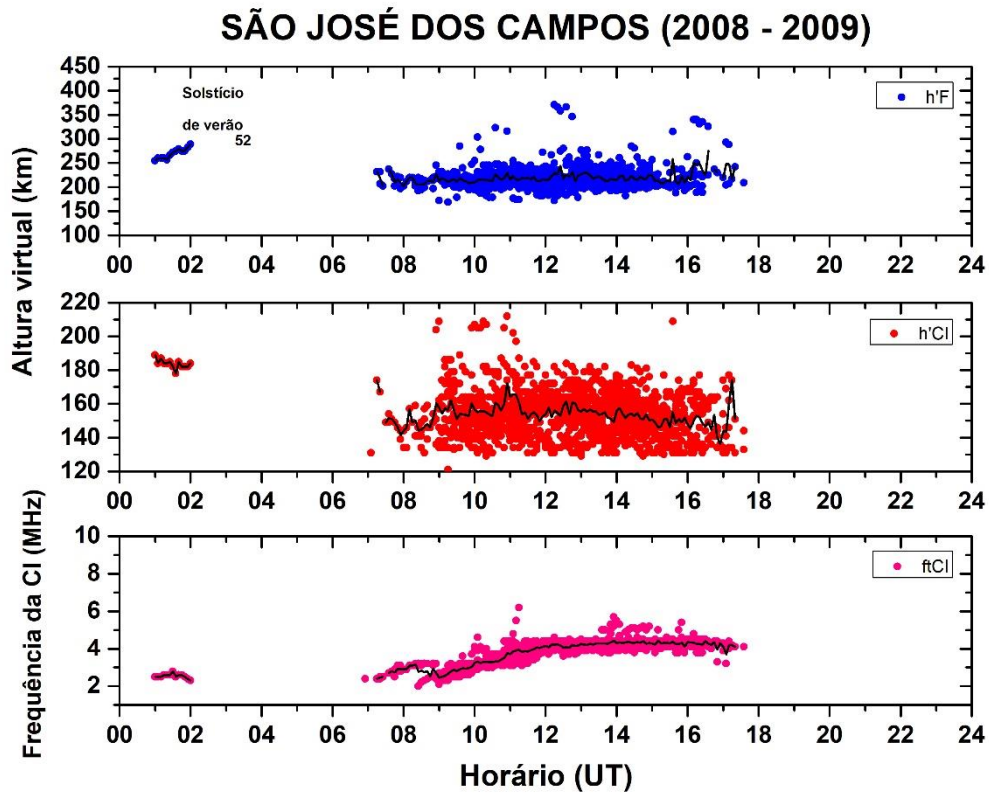
Fonte: O autor.

Figura 18: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência (f_{CI} , em rosa) da camada intermediária durante o solstício de inverno para um período de baixa atividade solar em Palmas-TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.



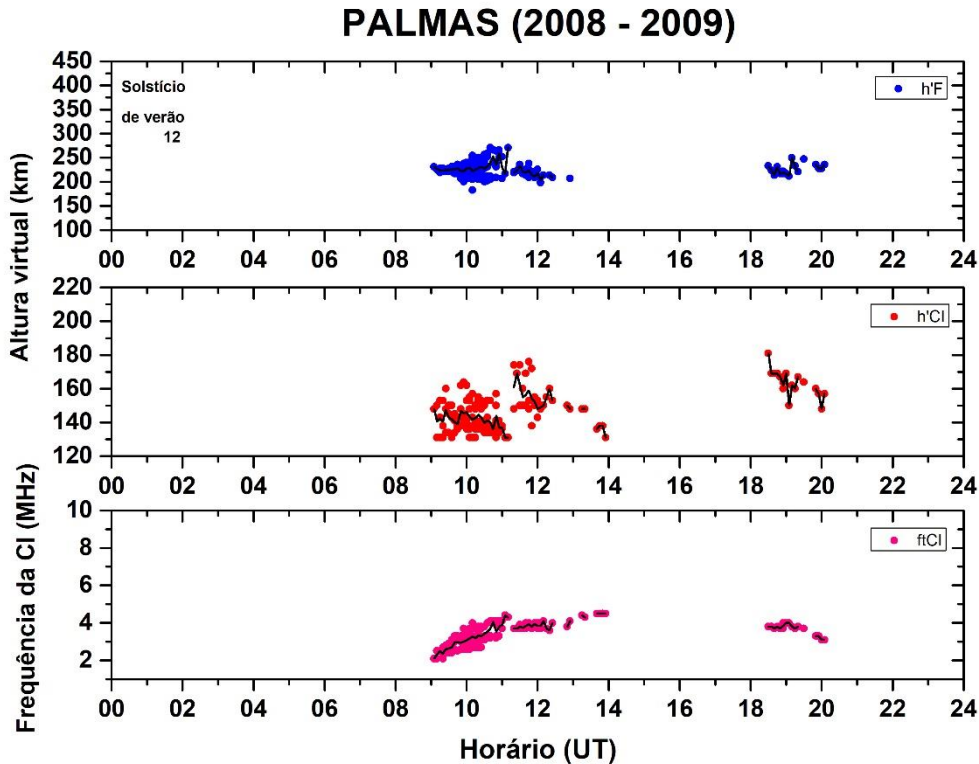
Fonte: O autor.

Figura 19: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de verão para um período de baixa atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.



Fonte: O autor.

Figura 20: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de verão para um período de baixa atividade solar em Palmas- TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta



Fonte: O autor.

Em geral, observa-se que a camada intermediária é um fenômeno diurno, com poucos casos sendo observados durante a noite. Dos Santos et al. (2019) ressalta que esse resultado pode ser influenciado por uma limitação da ionossonda em detectar a baixa densidade de ionização após o anoitecer. Além disso, observa-se que o parâmetro $ftCI$ exibe um comportamento bem similar ao da frequência crítica da camada E (foE), apresentando um máximo por volta das 15:00 UT (12:00 LT). Ademais, ao contrário do que se observa em São José dos Campos, os valores médios de altura e frequência da CI entre 09:00 UT (06:00 LT) e 21:00 UT (18:00 LT) apresentaram pouca variabilidade durante o período de mínima solar. Em Palmas, um padrão oscilatório é notório em quase todos os períodos sazonais. Acredita-se que em regiões próximas ao equador magnético, o deslocamento vertical da camada intermediária (semelhante ao que ocorre na camada F) não seja causado pelo vento meridional. Assim, é possível que o padrão oscilatório no parâmetro $h'CI$ encontrado em Palmas seja o resultado de propagação das ondas de gravidade. Com relação à altura da camada intermediária, observa-se que em alguns casos, as CIs estiveram localizadas em altitudes superiores a 180 km, tanto em São José dos Campos quanto em Palmas. Também foi possível identificar eventos em que a

frequência de topo da camada intermediária se distanciou bastante dos valores de frequência da maioria dos dados analisados atingindo, nesses casos, valores superiores a 6 MHz. Esta intensificação na frequência de topo é um indicativo de que as camadas intermediárias desceram e atingiram altitudes próximas a 130 km de altura. Em Palmas, verifica-se no equinócio camadas intermediárias acima de 210 km de altura e frequência de topo maiores do que 8 MHz.

A Tabela 2 mostra os picos de ocorrência das camadas intermediárias e suas respectivas porcentagens para os diferentes períodos sazonais em São José dos Campos e Palmas durante o período de baixa atividade solar em 2008-2009. Observa-se a presença de dois máximos, um no período da manhã, variando entre 10:00 UT/07:00 LT e 12:00 UT/09:00 LT e outro no período da tarde (entre 15:45 UT/12:45 LT e 19:30 UT/16:30 LT) para ambos os períodos sazonais e setores estudados.

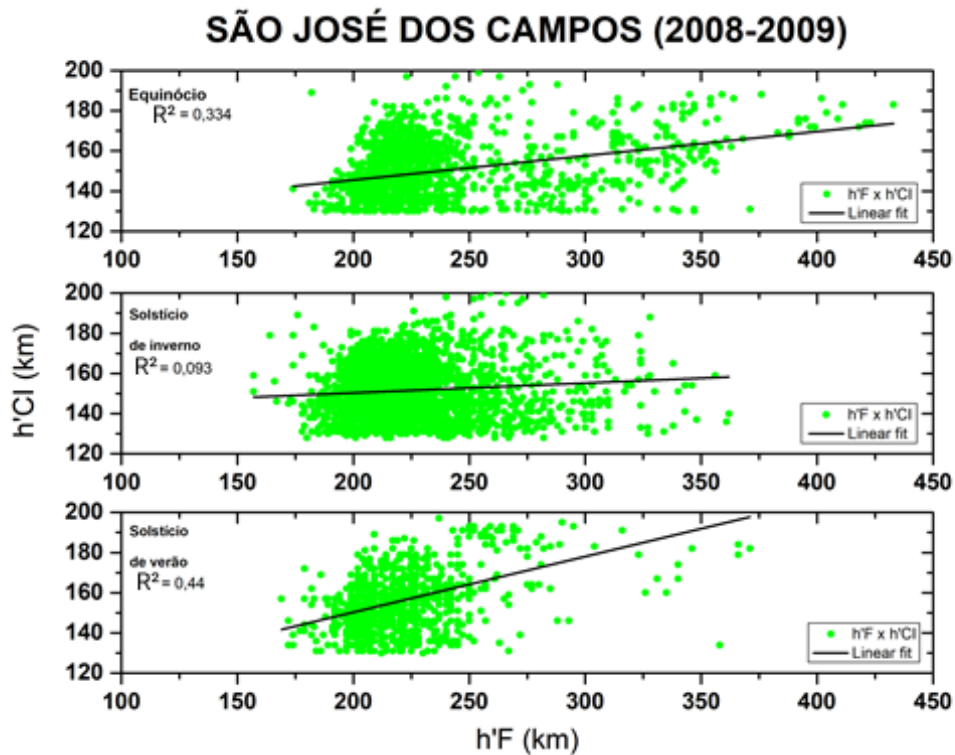
Tabela 2: Picos de ocorrência de CIs e suas respectivas porcentagens de ocorrência.

Mínimo Solar			
<u>Estação</u>	Equinócio	Solstício de inverno	Solstício de verão
São José dos Campos	11:00 UT [~50%] e 17:30 UT [~25%]	12:00 UT [~75%] e 19:30 UT [~25%]	10:15 UT [~23%] e 14:00 UT [~38%]
Palmas	11:15 UT [~20%] e 15:45 UT [~15%]	11:00 UT [~42%] e 18:30 UT [~25%]	10:00 UT [~50%] e 11:50 UT [~25%]

Fonte: O autor

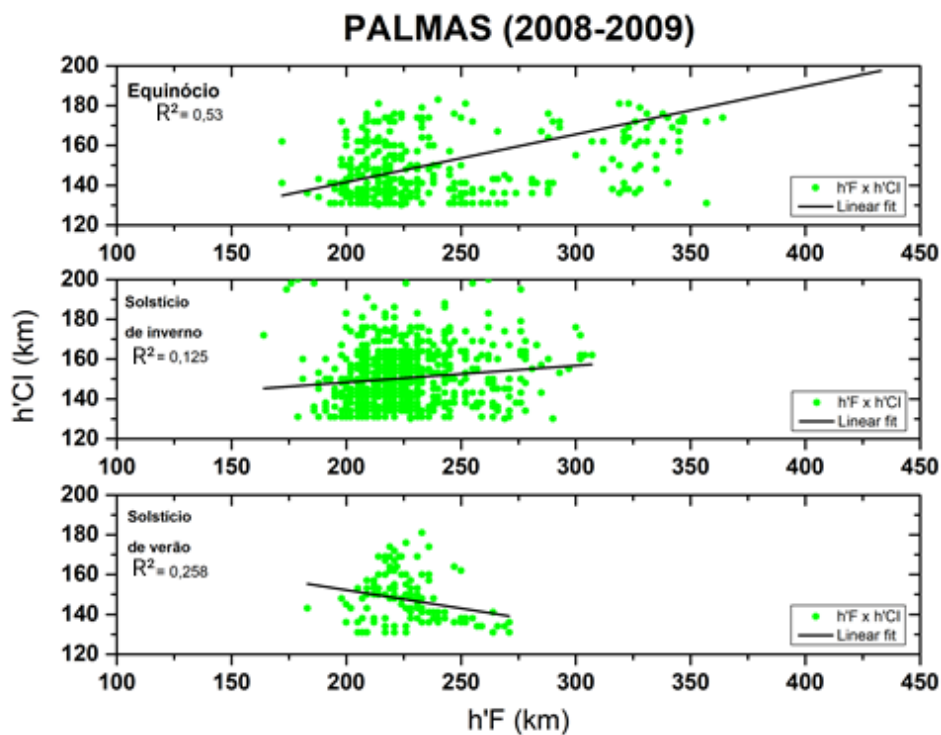
Com o propósito de verificar se existe alguma relação entre a altura virtual da camada F ($h'F$) e altura virtual da camada intermediária ($h'CI$), investigou-se o coeficiente de correlação entre esses parâmetros para os diferentes períodos sazonais, conforme apresentado nas Figuras 21 e 22. O índice de correlação (R^2) é indicado no canto superior em cada painel e o ajuste linear é indicado pela linha na cor preta.

Figura 21: Diagrama de dispersão entre os parâmetros $h'F$ e $h'CI$ para diferentes períodos sazonais em São José dos Campos para um período de atividade solar mínima.



Fonte: O autor.

Figura 22: Diagrama de dispersão entre os parâmetros $h'F$ e $h'CI$ para diferentes períodos sazonais em Palmas para um período de atividade solar mínima.



Fonte: O autor.

Observa-se que durante o equinócio, o índice de correlação (R^2) entre $h'F$ e $h'CI$ foi de 0,33 e 0,53 em São José dos Campos e Palmas, respectivamente. Já no solstício de inverno, o índice de correlação foi de 0,09 em São José dos Campos e 0,13 em Palmas. Por fim, no solstício de verão, o índice de correlação encontrado em São José dos Campos foi de 0,26 e 0,44 em Palmas. De acordo com os baixos valores de R^2 encontrados, conclui-se que não existe uma correlação estabelecida entre a variação da altura virtual da camada F e a variação da altura virtual da camada intermediária durante o período de mínimo solar para ambos os setores analisados.

4.2 COMPORTAMENTO DA CAMADA INTERMEDIÁRIA DURANTE ATIVIDADE SOLAR MÁXIMA

Similar a Tabela 1, a Tabela 3 apresenta as informações sobre o número de dias com dados e o número de dias com camadas intermediárias observadas em Palmas e São José dos Campos para o período de máximo solar. Neste caso, utilizou-se os meses de outubro de 2013 e abril de 2014 para representar o equinócio, os meses de junho e julho (2013) para representar o solstício de inverno e os meses de dezembro de 2013 e janeiro de 2014 para representar o solstício de verão. Novamente observa-se que tanto os dados de Palmas quanto os de São José dos Campos apresentaram inúmeras falhas, prejudicando assim o estudo das camadas intermediárias nesses períodos.

Tabela 3: Disponibilidade dos dados e a ocorrência das CIs durante o máximo solar (2013-2014).

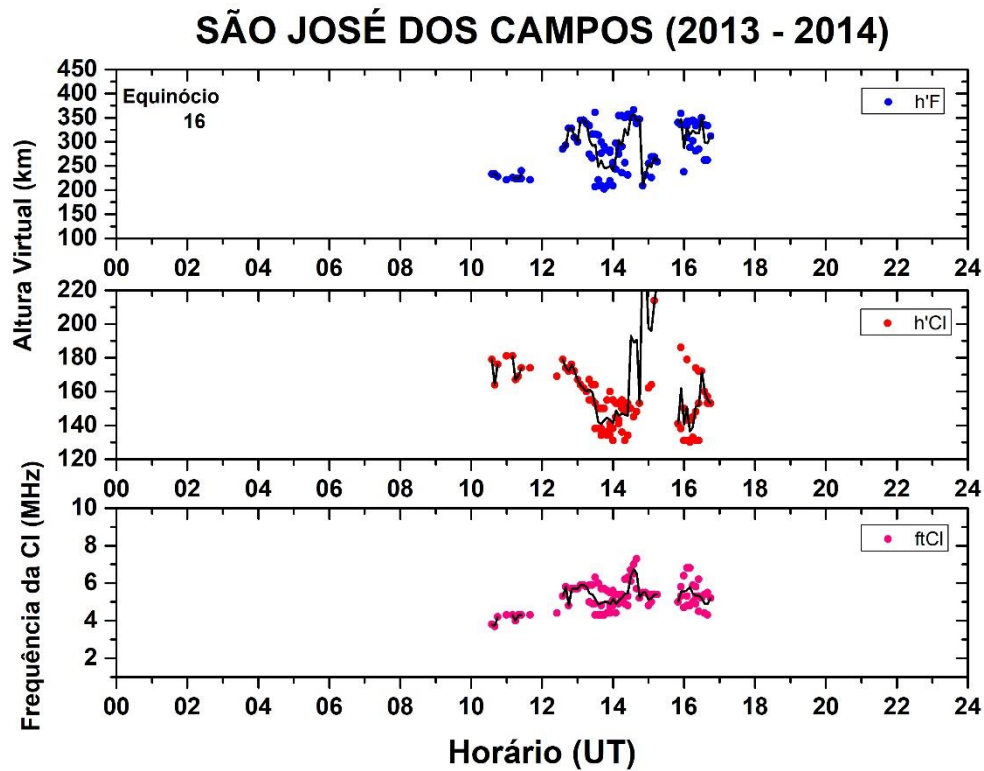
Máximo Solar						
<u>São José Dos Campos - SP</u>	2014	2014	2013	2013	2013	2013
	JAN	ABR	JUN	JUL	OUT	DEZ
Número de dias com Dados	7	3	18	13	16	11
Número de dias com CIs	7	1	14	9	15	7
<u>Palmas - TO</u>	2014	2014	2013	2013	2013	2013
	JAN	ABR	JUN	JUL	OUT	DEZ
Número De Dias Com Dados	4	10	8	9	17	5
Número De Dias Com CIs	2	4	7	8	14	1

Fonte: O autor.

As Figuras 23, 24, 25, 26, 27 e 28 mostram o comportamento sazonal e com a hora universal dos seguintes parâmetros: altura virtual da camada F ($h'F$, representada pelos pontos em azul) e a altura virtual ($h'CI$, pontos em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, pontos em

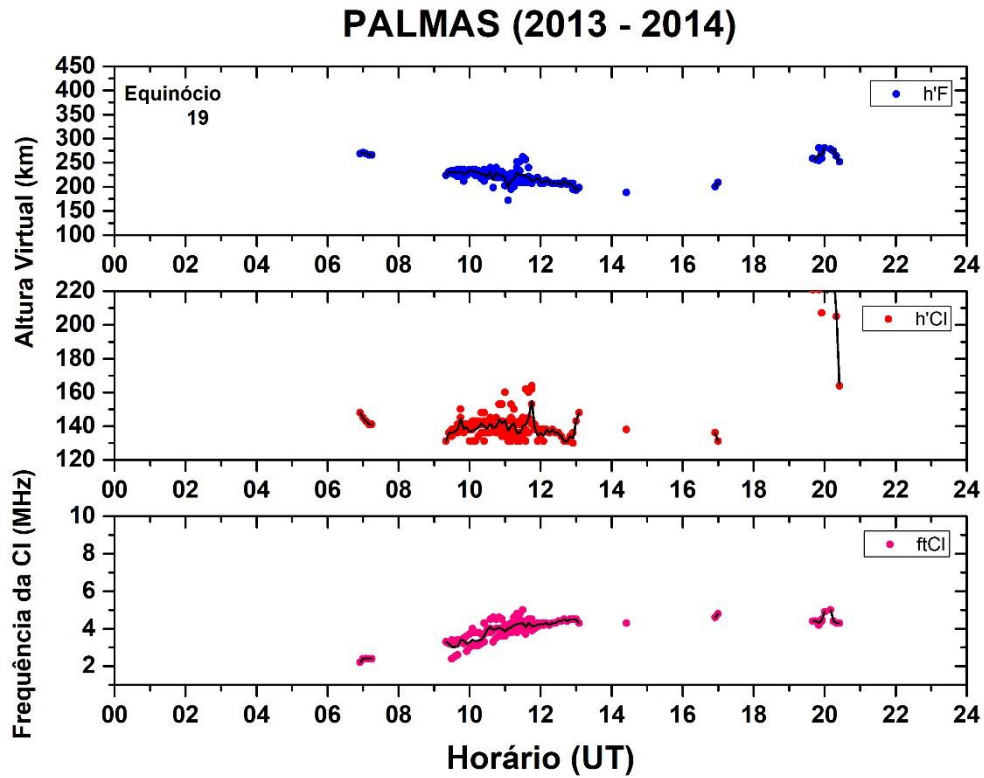
rosa) da camada intermediária. Os valores médios de $h'F$, $h'CI$ e $ftCI$ também são apresentados e estão indicados pela curva na cor preta. O número de dias considerados nas análises é exibido no canto superior esquerdo do primeiro painel de cada figura.

Figura 23: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o equinócio para um período de alta atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.



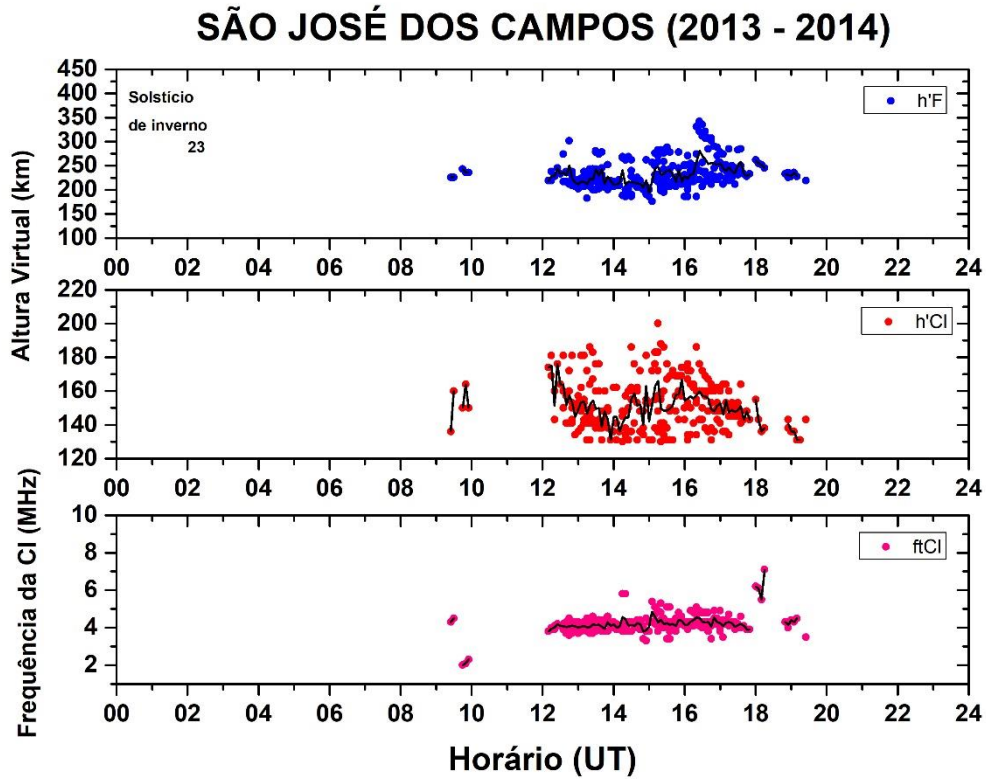
Fonte: O autor.

Figura 24: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o equinócio para um período de alta atividade solar em Palmas-TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.



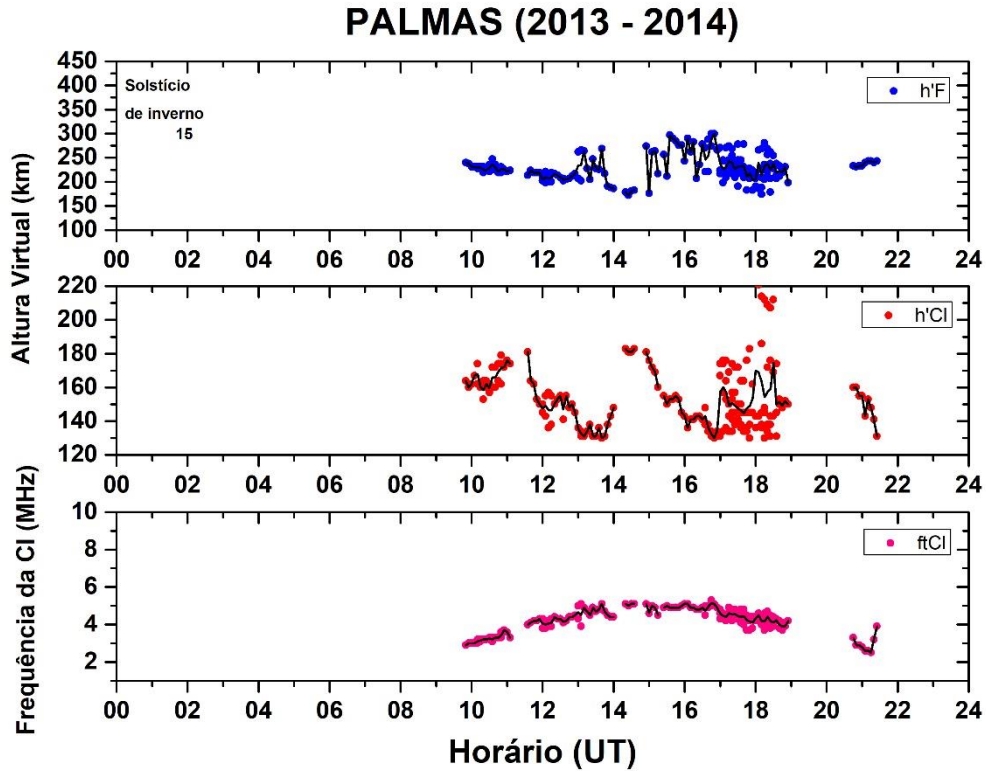
Fonte: O autor.

Figura 25: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de inverno para um período de alta atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.



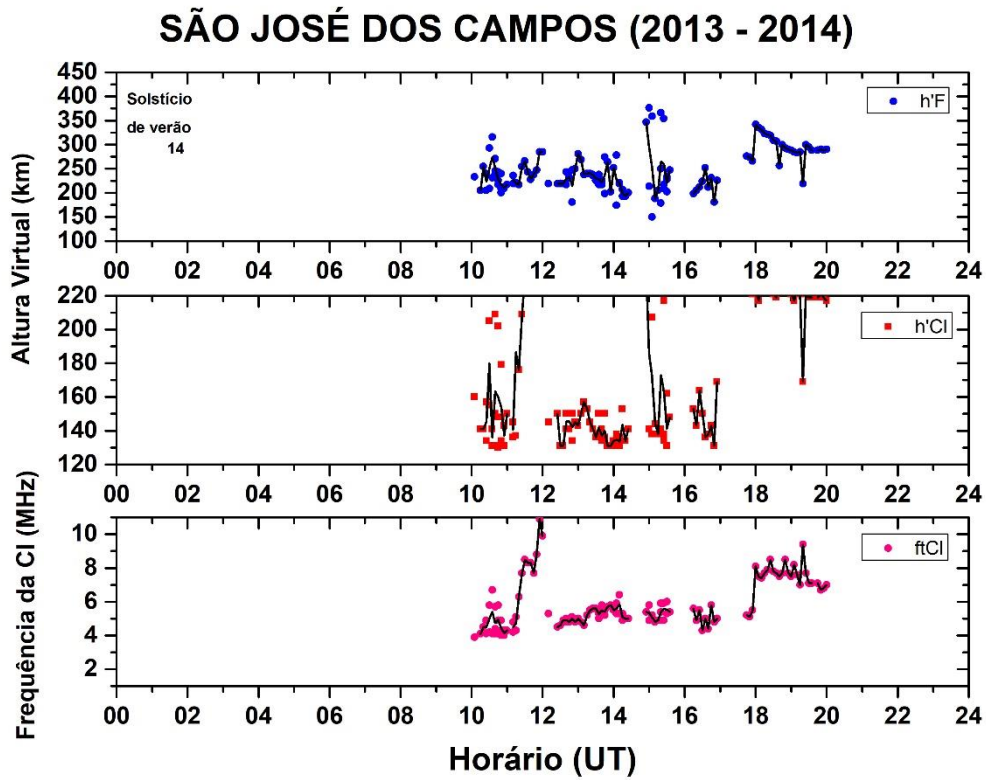
Fonte: O autor.

Figura 26: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de inverno para um período de alta atividade solar em Palmas-TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.



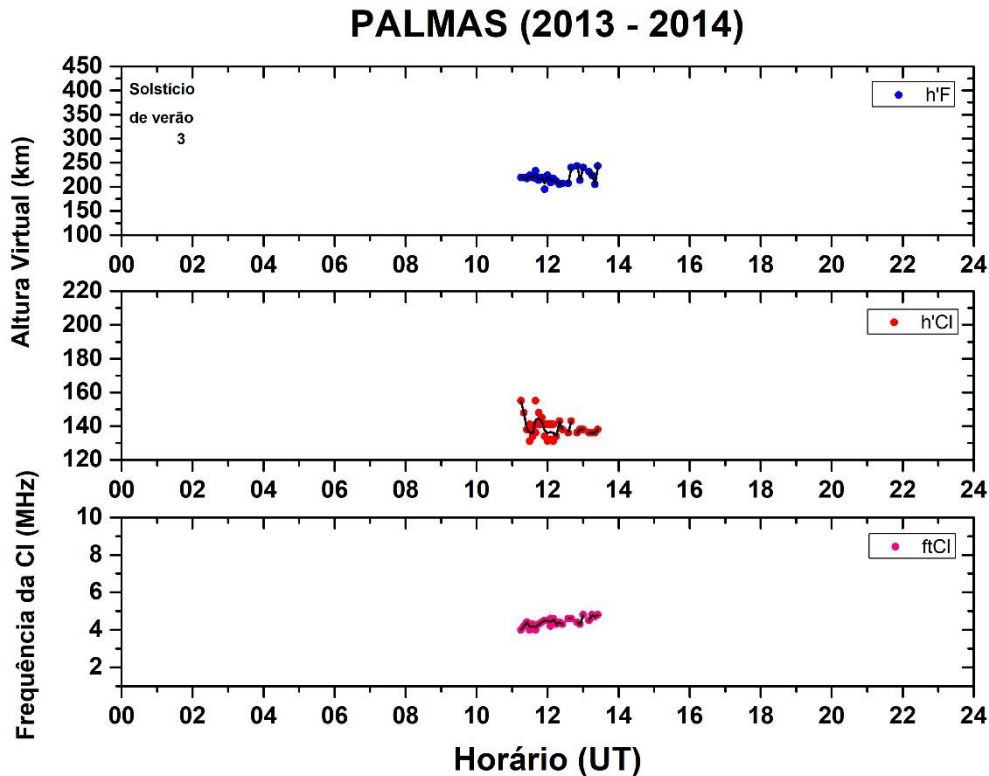
Fonte: O autor.

Figura 27: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de inverno para um período de alta atividade solar em São José dos Campos-SP. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.



Fonte: O autor.

Figura 28: Variação com a hora universal dos parâmetros de altura da base da camada F ($h'F$, em azul) e altura ($h'CI$, em vermelho) e frequência de topo ($ftCI$, em rosa) da camada intermediária durante o solstício de verão para um período de alta atividade solar em Palmas-TO. Os valores médios desses parâmetros são indicados pela curva na cor preta.



Fonte: O autor.

Os resultados acima apresentados mostram que mesmo em períodos de atividade solar máxima, é possível identificar que as camadas intermediárias ocorrem em sua maioria no período diurno. No entanto, casos noturnos também foram observados, porém com uma frequência muito inferior, conforme mostrado nas Figuras 23, 24, 25, 26, 27 e 28. Devido à grande falha de dados encontrada em ambas as regiões avaliadas, o estudo das camadas intermediárias para este período de máximo solar ficou prejudicado, no entanto, mesmo diante de tal dificuldade, características similares aos resultados obtidos para o mínimo solar foram encontradas como, por exemplo, o comportamento da frequência de topo da CI, que apresentou um aumento nas primeiras horas do dia atingindo um máximo por volta das 15:00 UT (12:00 LT), seguido por um decréscimo em ambas as localidades. Além disso, altos valores de frequência foram detectados como, por exemplo, no solstício de verão em São José dos Campos ($ftCI > 10$ MHz) e no equinócio em Palmas ($ftCI > 7$ MHz). Ressalta-se ainda, as camadas intermediárias localizadas em altitudes superiores a 200 km observadas em ambas as regiões.

A Tabela 4 mostra os picos de ocorrência das camadas intermediárias e suas respectivas porcentagens para os diferentes períodos sazonais em São José dos Campos e Palmas durante

o período de alta atividade solar em 2013-2014. Nota-se um pico muito intenso durante o solstício de verão em Palmas, porém vale reforçar que dos 19 dias com ionogramas disponíveis, apenas em 9 dias os ionogramas estavam em condições de redução e destes 9, apenas 3 dias apresentaram camadas intermediárias.

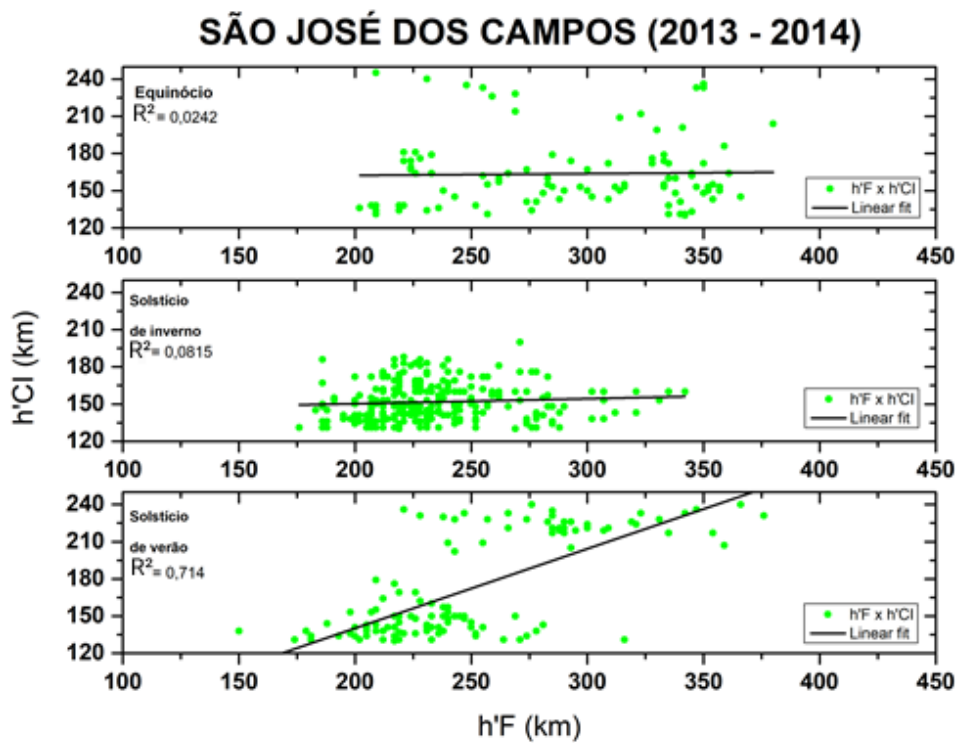
Tabela 4: Picos de ocorrência de CIs e suas respectivas porcentagens de ocorrência

Máximo Solar			
<u>Estação</u>	Equinócio	Solstício de inverno	Solstício de verão
São José dos Campos	14:00 UT [~28%] e 16:30 UT [~23%]	15:30 UT [~32%]	13:00 UT [~23%]
Palmas	11:30 UT [~53%] e 20:30 UT [~28%]	17:30 UT [~42%] e 18:30 UT [~37%]	11:45 UT [~98%]

Fonte: O autor.

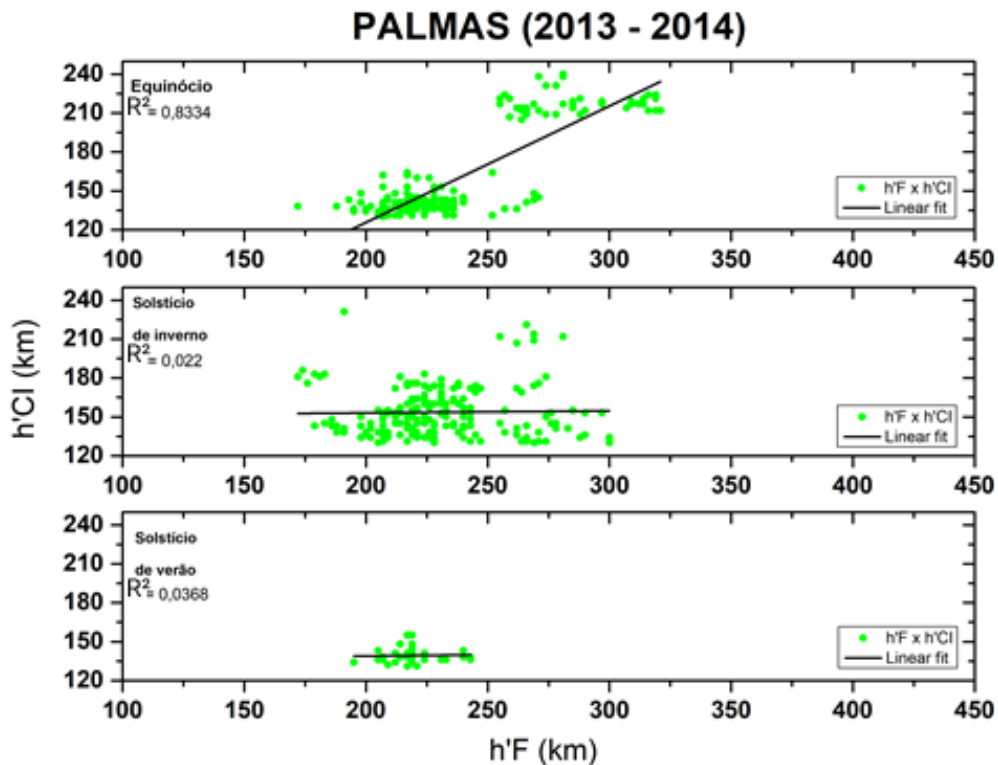
Com o propósito de verificar se existe alguma relação entre a altura virtual da camada F ($h'F$) e altura virtual da camada intermediária ($h'CI$), investigou-se o coeficiente de correlação entre os parâmetros para os diferentes períodos sazonais, conforme apresentado nas Figuras 29 e 30. O índice de correlação (R^2) é indicado no canto superior em cada painel e o ajuste linear é indicado pela linha na cor preta.

Figura 29: Diagrama de dispersão entre os parâmetros $h'F$ e $h'CI$ para diferentes períodos sazonais em São José dos Campos para um período de atividade solar máxima.



Fonte: O autor.

Figura 30: Diagrama de dispersão entre os parâmetros $h'F$ e $h'CI$ para diferentes períodos sazonais em Palmas para um período de atividade solar máxima.



Fonte: O autor.

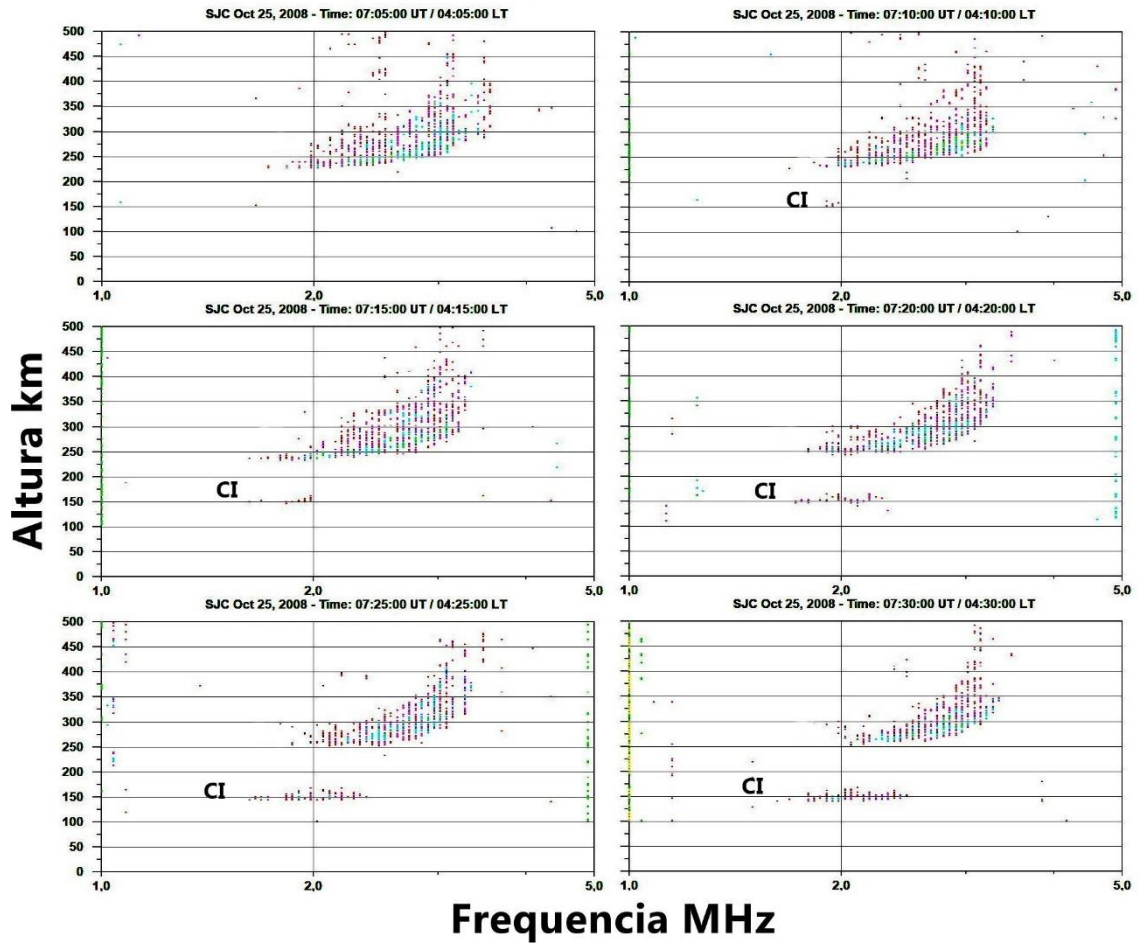
Os índices de correlação encontrados para o máximo solar (2013-2014) foram os seguintes: no equinócio o valor de R^2 foi de 0,02 para São José dos Campos e 0,83 para Palmas; no solstício de inverno o índice de correlação foi 0,08 em São José dos Campos e 0,02 em Palmas; no solstício de verão, encontrou-se um índice de correlação de 0,71 em São José dos Campos e 0,04 em Palmas. Exceto durante o equinócio em Palmas, não foi encontrado uma boa correlação entre os parâmetros $h'F$ e $h'CI$.

4.3 CAMADAS INTERMEDIÁRIAS NOTURNAS

Uma das peculiaridades encontradas nesta pesquisa foi a ocorrência das camadas intermediárias noturnas que, em sua grande maioria, foi observada durante o mínimo solar no equinócio, para ambos os setores estudados. Para o período de máximo solar, nenhum caso de CI noturna foi registrado em São José dos Campos. Em Palmas, a CI noturna foi identificada em apenas duas noites, uma no mês de abril e outra no mês de julho. As Figuras 31, 32 e 33 apresentam um exemplo de camada intermediária noturna que ocorreu em São José dos Campos no dia 25 de outubro de 2008, entre 07:10 UT (04:10 LT) e 08:15 UT (05:15 LT). Verifica-se que o desaparecimento desta camada foi observado às 08:20 UT (05:20 LT) conforme pode ser visto na Figura 33. Observa-se que neste dia, a camada intermediária noturna apresentou um formato com base reta e espalhada em quase todo o período avaliado. Semelhante as camadas intermediárias diurnas, as CIs noturnas também apresentam características descendentes e ascendentes, conforme pode ser observado pela variação da altura virtual entre aproximadamente 141 km e aproximadamente 153 km. Com relação a frequência de topo desta CI, observa-se uma variação de aproximadamente 2,0 MHz a aproximadamente 2,8 MHz.

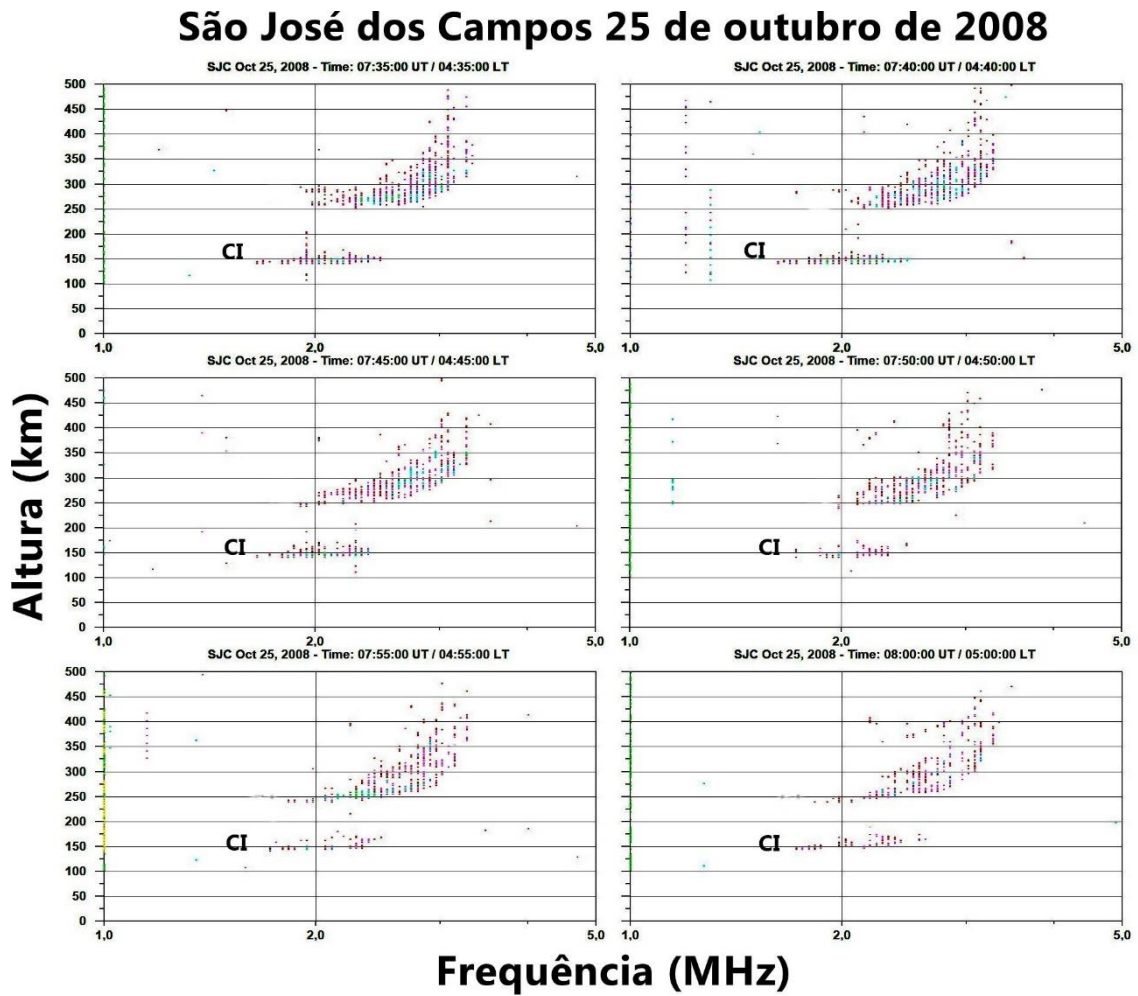
Figura 31: Sequência de ionogramas da região de São José dos Campos mostrando o comportamento da camada intermediária noturna para o dia 25 de outubro de 2008 (parte 1).

São José dos Campos 25 de outubro de 2008



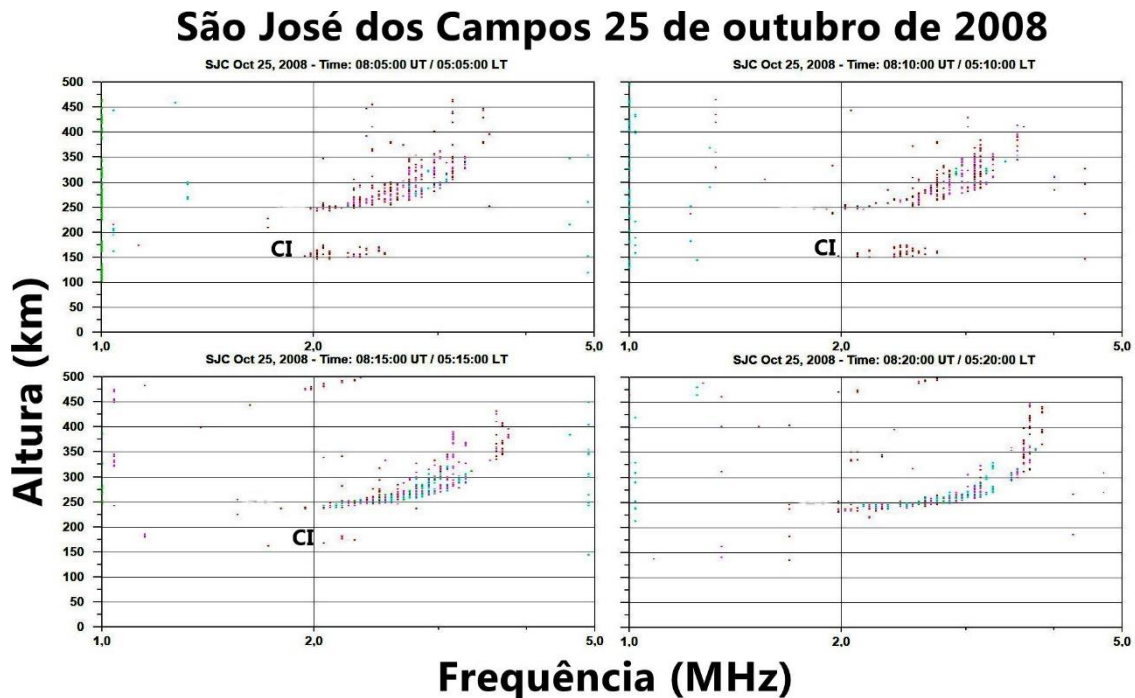
Fonte; O autor.

Figura 32: Sequência de ionogramas da região de São José dos Campos mostrando o comportamento da camada intermediária noturna para o dia 25 de outubro de 2008 (parte 2).



Fonte: O autor.

Figura 33: Sequência de ionogramas da região de São José dos Campos mostrando o comportamento da camada intermediária noturna para o dia 25 de outubro de 2008 (parte 3).



Fonte: O autor.

Nas regiões equatoriais e de baixa latitude brasileira aqui analisadas, encontrou-se poucos casos de camadas intermediárias noturnas em ambos os períodos de atividade solar estudados. Em Arecibo, por exemplo, região de média latitude, as camadas intermediárias noturnas são eventos comuns (SHEN et al., 1976; OSTERMAN et al., 1994). Lee et al. (2003) mencionam que a detecção das camadas intermediárias noturnas pode ser influenciada por uma limitação na ionosonda, casos em que a frequência do plasma da camada intermediária se torna menor que a frequência mínima de sondagem (1 MHz), ou quando um bloqueio é causado pela camada Es-esporádica subjacente.

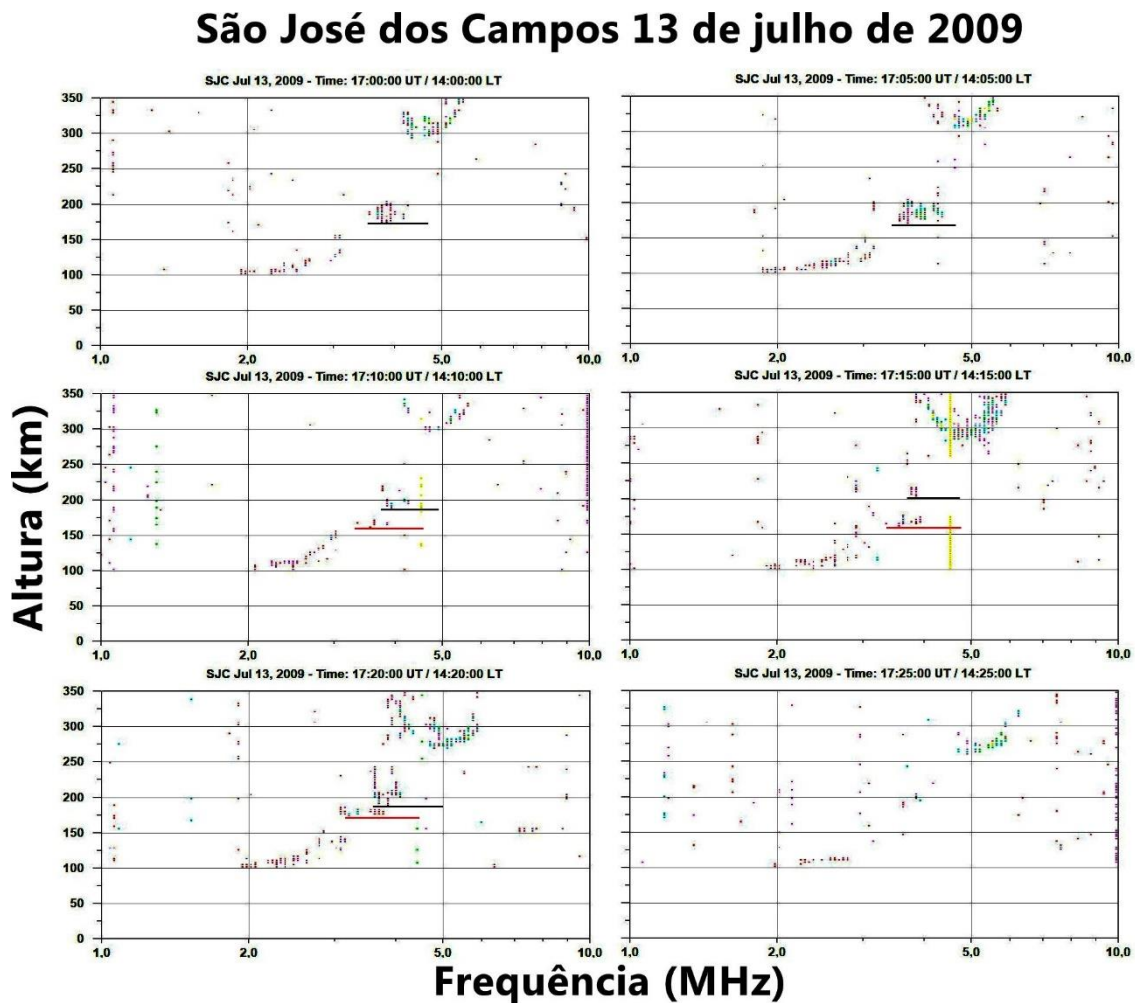
4.4 CAMADAS INTERMEDIÁRIAS SIMULTÂNEAS

Durante o processamento dos ionogramas, observou-se casos em que duas camadas intermediárias foram registradas simultaneamente, apresentando um movimento de descida e oscilando entre momentos de intensificação e enfraquecimento.

A Figura 34 mostra um exemplo de uma camada intermediária que se subdividiu em duas. Às 17:00 UT (14:00 LT) observa-se apenas uma camada intermediária (indicada pela seta

preta) localizada em aproximadamente 173 km com uma frequência de topo de aproximadamente 4,2 MHz. À 17:05 UT (14:05 LT) essa camada apresentou um movimento de descida atingindo uma altura de aproximadamente 169 km e frequência de topo de aproximadamente 4,4 MHz. A partir das 17:10 UT (14:10 LT) a CI se subdividiu em duas, sendo que a camada superior ficou localizada em aproximadamente 187 km (linha preta) com uma frequência de topo de aproximadamente 4,3 MHz e a camada inferior em aproximadamente 160 km (linha vermelha) com uma frequência de topo um pouco menor (~3,9 MHz). Às 17:15 UT (14:15 LT), a camada intermediária superior apresentou um leve movimento de subida que foi acompanhado por uma redução no parâmetro de frequência. Às 17:20 UT (14:20 LT), a CI superior pode ser visualizada em aproximadamente 187 km com uma frequência de aproximadamente 4,1 MHz e a camada intermediária inferior em aproximadamente 175 km com uma frequência de topo de aproximadamente 3,8 MHz. Conforme indicado no ionograma das 17:25 UT (14:25 LT), ambas as camadas foram interrompidas simultaneamente.

Figura 34: Sequência de ionogramas de São José dos Campos obtidos entre 17:00 UT e 17:25 UT no dia 13 de julho de 2009 mostrando o momento em que uma CI (indicada pela seta preta) se subdivide em duas CIs (uma indicada pela seta preta e outra pela seta vermelha).



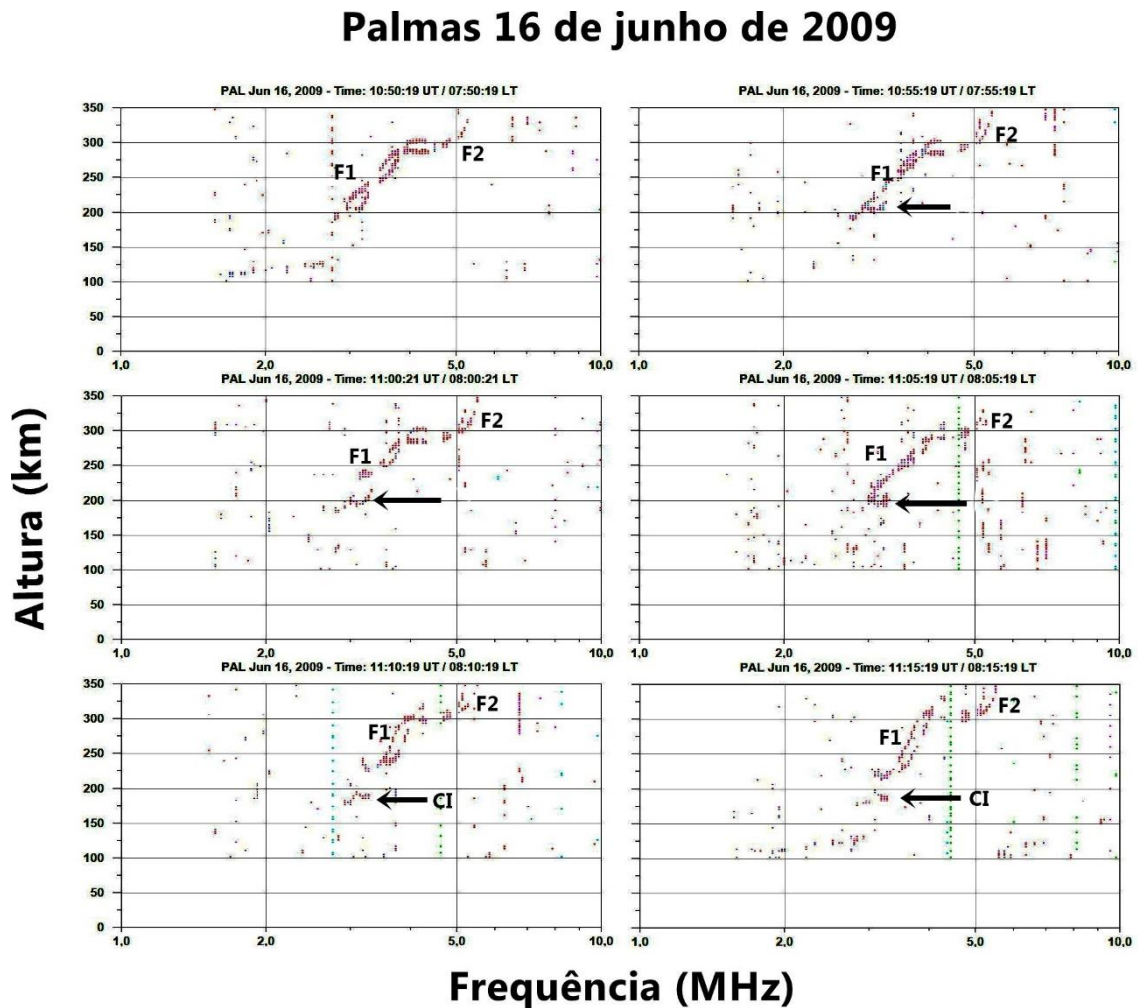
Fonte: O autor.

4.5 CAMADAS INTERMEDIÁRIAS FORMADAS A PARTIR DO DESPRENDIMENTO DA BASE DA CAMADA F

Outra peculiaridade encontrada neste estudo foi as camadas intermediárias que são formadas a partir de um desprendimento da base da camada F. Conforme pode ser visto na sequência dos ionogramas de Palmas na Figura 35, a base da camada F1 às 10:55 UT (07:55 LT) apresentou uma deformação que continuou presente nos ionogramas seguintes. Nota-se que às 11:10 UT (08:10 LT), uma camada intermediária foi claramente formada em aproximadamente 175 km de altura a partir de um desprendimento da base da camada F1. Esta característica é confirmada pelo comportamento da frequência mínima da camada F1, que neste caso, apresentou um aumento de aproximadamente 2,7 MHz às 10:55 UT (07:55 LT) para

aproximadamente 3 MHz às 11:05 UT (08:05 LT). É importante mencionar que foram registrados alguns casos em que a base da camada F1 apresentou uma deformação, porém não houve um desprendimento total como observado no exemplo da Figura 35. Além disso, em alguns casos a camada formada apresentou um movimento de descida atingindo altitudes abaixo de 130 km. Destaca-se que tais observações estão de acordo com os estudos de Dos Santos et al. (2019).

Figura 35: Sequência de ionogramas de Palmas durante o dia 16 de junho de 2009 mostrando a formação de uma camada intermediária a partir do desprendimento da base da camada F1.



Fonte: O autor.

4.6 INVESTIGAÇÃO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS VENTOS NA FORMAÇÃO E NA DINÂMICA DAS CAMADAS INTERMEDIÁRIAS EM REGIÕES EQUATORIAIS E DE BAIXA LATITUDE BRASILEIRAS.

Com o objetivo de investigar a influência dos ventos na formação e dinâmica das camadas intermediárias nos setores equatorial (PAL) e de baixa latitude brasileira (SJC), realizou-se um estudo sobre os ventos utilizando o modelo ionosférico da região E, conhecido como MIRE. A utilização do modelo MIRE neste trabalho foi feito em colaboração com a Dra. Laysa Resende do State Key Laboratory of Space Weather/INPE. O MIRE inicialmente foi um modelo desenvolvido por Carrasco et al. (2007), tendo sido modificado em seguida por Resende et al. (2017a, 2017b, 2018a) e mais recentemente por Conceição-Santos et al. (2019). Resende

et al. (2017a, 2017b, 2018a) fizeram algumas modificações que foram implementadas na versão original deste modelo, tais como um novo perfil do vento de maré com base em dados obtidos por radar de meteoros, e a inclusão de uma variabilidade sazonal dos íons metálicos, os quais são importantes para a formação das camadas esporádicas. Posteriormente, Conceição-Santos et al. (2019) incluíram um comprimento de onda vertical dos ventos de maré variável acima dos 120 km. Todas as modificações acima mencionadas foram importantes para se encontrar resultados mais confiáveis para o setor brasileiro, melhorando assim a precisão e correção do modelo MIRE.

O modelo MIRE basicamente calcula a densidade eletrônica entre 86 e 140 km de altura e gera como resultados os perfis verticais dessa densidade. O modelo utiliza a equação da continuidade para calcular a variação temporal da densidade iônica dos principais constituintes presentes nesta faixa de altura, tais como, NO^+ , O_2^+ , O^+ , N_2^+ , e os íons metálicos Fe^+ e Mg^+ . Como entrada no modelo também pode ser empregado dados de ventos obtidos a partir de medidas de radar meteorológico. Com isso, parâmetros de amplitude, comprimento de onda e fase das marés atmosféricas inferidas das medidas do radar são inseridas nas equações de cisalhamento das componentes zonal e meridional dos ventos. Uma descrição detalhada das principais equações que descrevem o modelo MIRE podem ser encontradas no trabalho de tese de doutorado de Santos (2019).

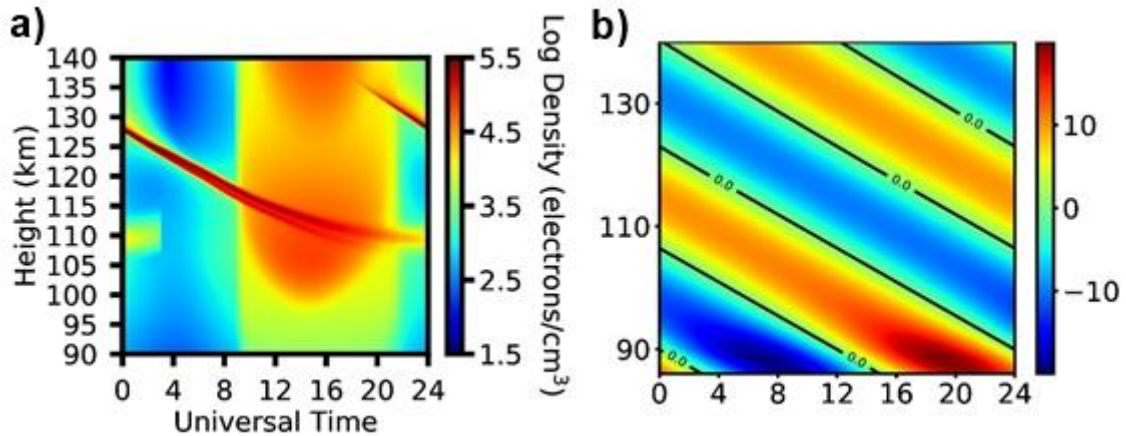
Para realizar esta investigação, escolheu-se o período de equinócio (2008) para São José dos Campos e o período de equinócio e solstício de inverno (2009) para Palmas. Para tanto foi utilizado ventos representativos obtidos de medidas com radar meteorológico. No caso de São José dos Campos, utilizou-se os ventos de Cachoeira Paulista (2008) como representativos para esta região e, para Palmas, os ventos de São João do Cariri (2009). Ainda que o MIRE seja um modelo da região E, neste trabalho ele foi utilizado para simular as camadas intermediárias descendentes que migraram da camada F1 até alturas menores.

Através de perfis dos ventos e das extrapolações realizadas no modelo, foi possível obter o perfil da densidade eletrônica da camada intermediária e verificar o seu movimento de descida, bem como a sua durabilidade. Os dados das CIs observadas em SJC para o mês de outubro de 2008 foram utilizados como referência para as simulações através do MIRE. A Figura 1a (gráfico da esquerda) mostra o perfil de densidade eletrônica em função do tempo e da altura referente ao período do equinócio 2008 considerando somente à maré diurna do vento meridional para SJC. Observa-se que nesse caso, o modelo MIRE simulou a presença de três camadas localizadas em aproximadamente 110 km, 128 km e 136 km. Observa-se que esta

última, que foi formada próximo às 17 UT e que aqui representa a camada intermediária estudada por estar localizada numa faixa de altitude mais próxima daquela em que as CIs são geradas, apresenta um movimento de descida bem definido e uma durabilidade bastante inferior (aproximadamente 6 horas) quando comparada a camada inicialmente localizada em aproximadamente 128 km (observada durante o dia todo). Os resultados obtidos com a simulação concordam com os dados observacionais para este período, conforme mostrado na Figura 31, 32 e 33 da Seção 4.3.

Na Figura 36b é apresentado o perfil do vento meridional representativo para o período de equinócio de 2008 utilizado como dado de entrada no modelo. Primeiramente, considerou-se somente a componente diurna do vento meridional para simular a camada intermediária sobre o setor de baixa latitude (SJC) durante o equinócio. Como os estudos têm demonstrado que o vento meridional tem um impacto mais relevante nas camadas esporádicas mais altas (Conceição-Santos et al., 2020), considerou-se nas simulações somente esta componente para a formação das CIs. Como já mencionado, para esta região utilizou-se os ventos coletados pelo radar de Cachoeira Paulista de 2008 (radar mais próximo de São José dos Campos). Devido à proximidade entre essas duas localidades, não foi necessário realizar nenhum ajuste nos ventos. Pontos em que a velocidade do vento é igual a 0 m/s indicam a presença de cisalhamento de ventos. As cores nos contornos dos gráficos da Figura 36a e 36b indicam, respectivamente, a intensidade da densidade eletrônica e a amplitude dos ventos.

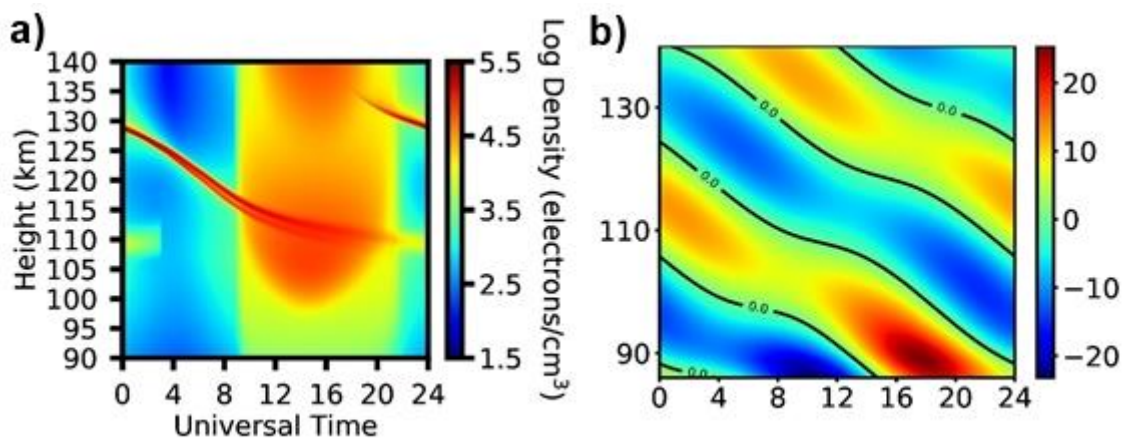
Figura 36:(a) Densidade eletrônica em função do tempo e da altura conforme simulada pelo MIRE para o equinócio do ano de 2008 em SJC considerando o efeito da maré diurna do vento meridional; (b) Perfil da componente do vento meridional em São José dos Campos no período de equinócio em 2008 considerando o modo de maré diurna.



Fonte: O autor

A Figura 37 apresenta o resultado da simulação para o mesmo período e localidade da Figura 36, porém agora incluindo a maré semidiurna. Observa-se novamente a presença das camadas acima relatadas, em especial a camada intermediária em 136 km às 17 UT, porém agora com um perfil de densidade um pouco inferior quando comparado a Figura 36a. Verifica-se que, neste caso, a inclusão da maré semidiurna foi importante para modular o movimento de descida tanto da camada intermediária como da camada mais inferior. O perfil de vento utilizado nessa simulação considerando a maré diurna e a maré semidiurna é apresentado no painel (b) da Figura 37.

Figura 37: (a) Densidade eletrônica em função do tempo e da altura conforme simulada pelo MIRE para o equinócio do ano de 2008 em SJC considerando os efeitos das marés diurna e semidiurna da componente do vento meridional; (b) Perfil da componente meridional do vento em São José dos Campos no período de equinócio em 2008 considerando os modos de maré diurna e semidiurna.

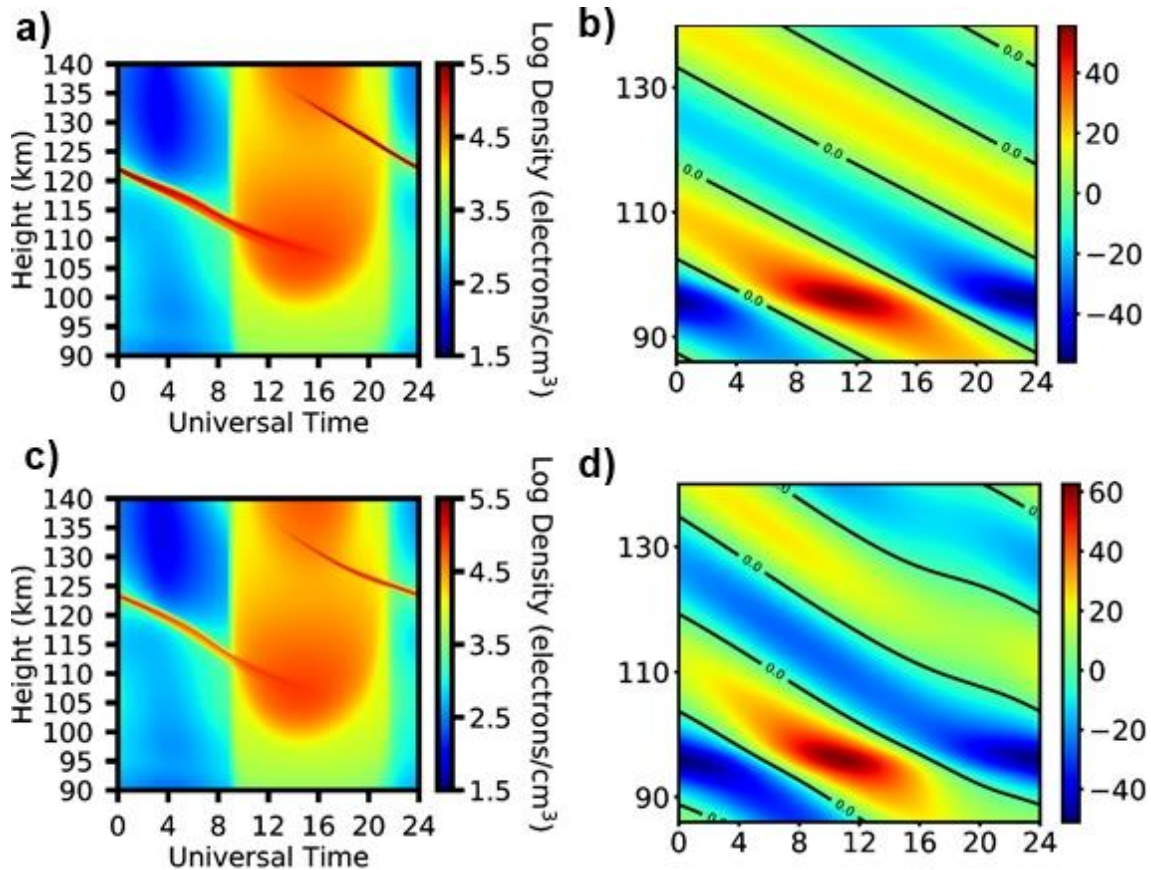


Fonte: O autor

As Figuras 36 e 37 indicam a forte influência dos ventos no surgimento das camadas intermediárias e na intensificação da descida apresentada pelas CIs em regiões de baixa latitude brasileira.

O mesmo procedimento realizado para a região de baixa latitude também foi utilizado para a região de PAL para o equinócio de 2009. No entanto, alguns testes foram realizados com o modelo até se obter uma resposta que fosse mais coerente com os dados observacionais. Foram utilizados os dados coletados durante o mês de abril de 2009 como referência para as simulações através do MIRE durante o equinócio em PAL. Ressalta-se que para o estudo das CIs sobre esta região, utilizou-se os ventos obtidos para o setor de São João do Cariri (radar mais próximo da região de Palmas). Por este motivo, foram necessários ajustes na amplitude dos ventos para todas as faixas de altura entre 86-140 km. A Figura 38 a seguir mostra ambos os gráficos de densidade e da componente meridional dos ventos ajustados para os casos em que as marés diurnas e semidiurna são consideradas no modelo. Ao considerar somente a componente diurna do vento meridional, observa-se uma intensificação da densidade (painel a) em aproximadamente 140 km de altura. Esta camada apresenta um longo período de duração e um movimento de descida durante todo o período em que esteve presente. Ao incluir também a componente semidiurna (painel b), observa-se que o período de ocorrência da camada não se altera, no entanto, observa-se que similar ao que ocorreu para a região de SJC, uma modulação no movimento de descida dessa camada foi observada. Mais especificamente, observa-se por volta das 00:00 UT (21:00 LT) uma intensificação na densidade eletrônica da camada localizada em aproximadamente 140 km de altura que vai descendo em altura até aproximadamente 12:00 UT (09:00 LT). A descida da camada não é monotônica e apresenta flutuações, comportamento frequentemente notado nas camadas intermediárias, dado que elas costumam nascer em altitudes mais altas e tendem a descer para altitudes menores, porém no meio deste percurso, por diversas vezes, nota-se algumas flutuações neste movimento. Importante ressaltar, que para ambos os modos de maré diurna e semidiurna, a amplitude dos ventos foi ajustado em 1,5 vezes em relação ao vento original inferido pelo radar meteorológico.

Figura 38: (a) Densidade eletrônica em função do tempo e da altura conforme simulada pelo MIRE para o equinócio do ano de 2009 em PAL considerando o efeito da maré diurna do vento meridional; e (b) considerando os efeitos das marés diurna e semidiurna da componente do vento meridional; (c) Perfil da componente meridional do vento em Palmas no período de equinócio em 2009 considerando o modo de maré diurna; e (d) considerando os modos de maré diurna e semidiurna.

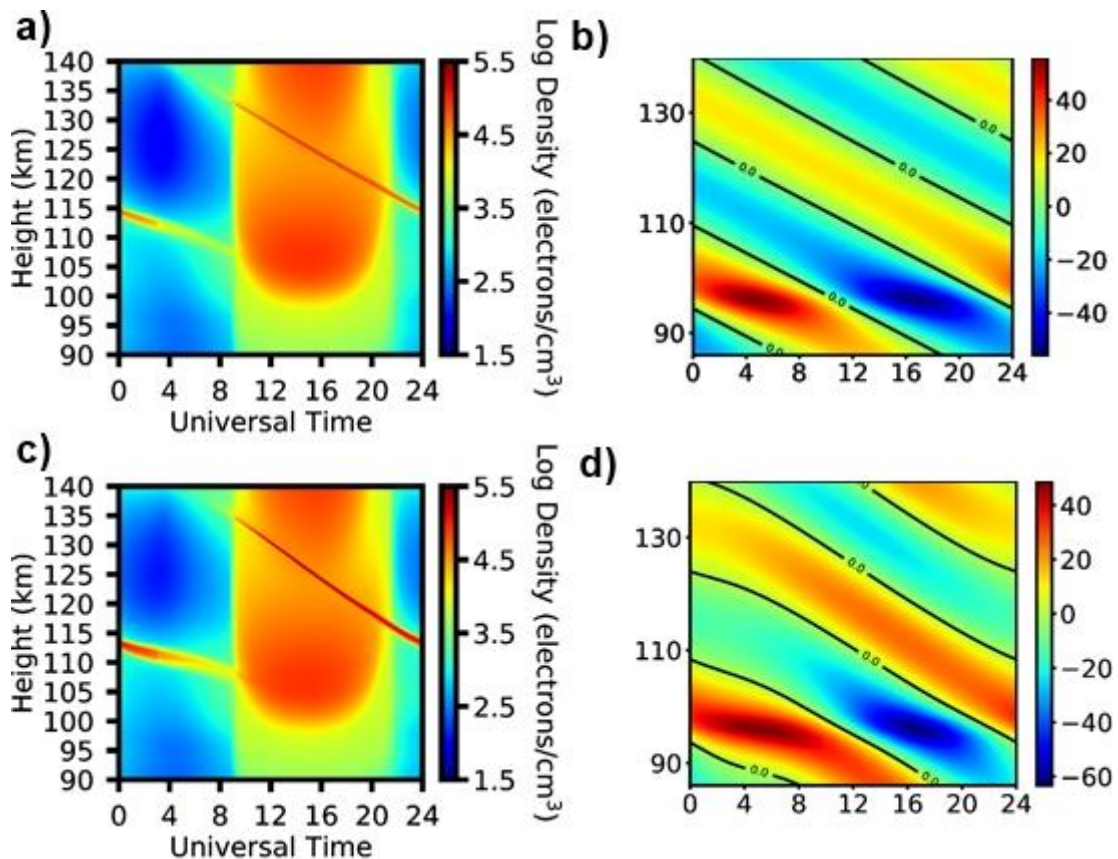


Fonte: O autor

Para o setor de Palmas, fez-se também uma análise da influência dos ventos na formação e dinâmica das CIs durante o período de solstício de inverno. Neste caso foram utilizados os dados observacionais de junho de 2009 como referência ao modelo MIRE. Os resultados desta análise são apresentados na Figura 39. Similar ao que se apresentou para o período do equinócio, os painéis (a) e (c) mostram, respectivamente, o comportamento das camadas formadas e do perfil de vento utilizado considerando somente a maré diurna. Para o solstício de inverno a amplitude do vento original inferido das medidas do radar meteorológico também foi multiplicada por um fator de 1,5. É interessante observar que para este período do ano, o modelo MIRE simulou uma camada intermediária descendente em torno de 140 km às 04 UT, ou seja, surgindo mais cedo do que o simulado para o equinócio. Os resultados do modelo mostraram um período longo de duração, o que não representa muito bem o comportamento das camadas intermediárias para o setor brasileiro, exceto nos casos em que essas camadas descem e se fundem com as camadas mais inferiores perdurando, assim, por um longo período de tempo. É

interessante observar que diferente do que se observou anteriormente, a inclusão da maré semidiurna não gerou nenhuma modificação significativa na descida das CIs, exceto pelo perfil dos ventos meridionais.

Figura 39: (a) Densidade eletrônica em função do tempo e da altura conforme simulada pelo MIRE para o solstício de inverno do ano de 2009 em PAL considerando o efeito da maré diurna do vento meridional; e (b) considerando os efeitos das marés diurna e semidiurna da componente do vento meridional; (c) Perfil da componente meridional do vento em Palmas no período do solstício de inverno em 2009 considerando o modo de maré diurna; e (d) considerando os modos de maré diurna e semidiurna.



Fonte: O autor

4.7 INVESTIGAÇÃO SOBRE O PAPEL DAS ONDAS DE GRAVIDADE E A FORMAÇÃO DAS CAMADAS INTERMEDIÁRIAS EM REGIÕES EQUATORIAIS E DE BAIXA LATITUDE BRASILEIRA.

De acordo com a literatura (DE MEDEIROS, 2001; WRASSE, 2004), as ondas de gravidade surgem na baixa atmosfera a partir do desequilíbrio entre a força de gravidade e o gradiente de pressão, e tendem a se propagar em direção a parte superior da atmosfera. Sabe-se que ambas as forças se encontram em equilíbrio na atmosfera terrestre logo quando uma parcela

de ar é deslocada, surge uma força reparadora que age no sentido de retornar essa parcela de ar para a sua posição inicial. De acordo com Nappo (2002), esta parcela de ar oscila em torno da sua posição inicial com uma frequência característica, a qual é denominada por frequência de Brunt-Väisälä.

As ondas de gravidade internas ou ondas acústicas de gravidade possuem períodos maiores que as frequências de Brunt-Väisälä, com períodos que variam de 30 a 300 minutos, conforme a classificação apresentada na Tabela 5. Quando formadas, as ondas de gravidade propagam-se horizontalmente e verticalmente, interagindo com a atmosfera de diversas formas dependendo do seu comprimento de onda e frequência (BEER, 1974; DE OLIVEIRA, 2008).

Tabela 5: Principais tipos de ondas atmosféricas

<u>Tipo de ondas</u>	<u>Período</u>
Acústicas	< 270 s
Gravidade	270 s – 3 h
Planetárias	> 12 h
Marés Atmosféricas	24 / m onde: m = 1, 2...

Fonte: Modificada de DE OLIVEIRA, 2008.

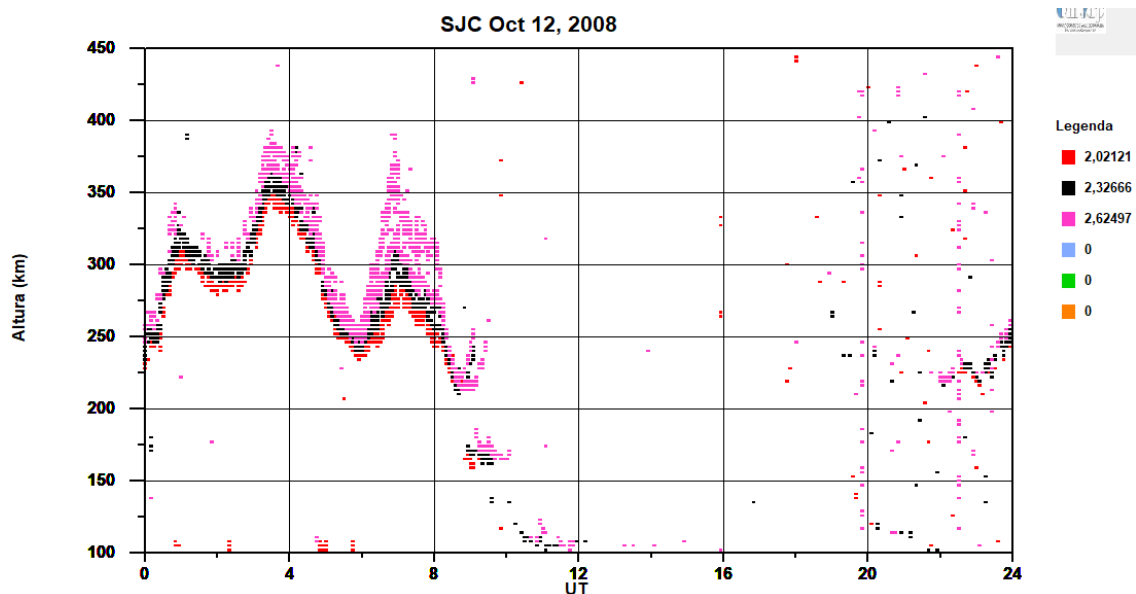
A fim de averiguar uma possível influência das ondas de gravidade na formação das camadas intermediárias sobre as regiões equatoriais e de baixa latitude brasileira, realizou-se uma extensa busca por sinais de ondas de gravidades nos dados avaliados para ambos os setores estudados. Para tanto, utilizou-se uma função do programa UDIDA que gera os gráficos de isofrequência, gráficos estes que são gerados através de ionogramas do tipo de baixa resolução espectral e alta resolução temporal. Utilizou-se ionogramas com extensões .md3, na qual foi possível selecionar até 6 frequências (em MHz) de amostragem distintas.

Apenas 3 dias com assinaturas claras de ondas de gravidade foram identificados, porém nas alturas da camada F e em períodos que antecederam a formação anterior da camada intermediária. É importante ressaltar que o número pequeno de casos encontrados pode estar associado a uma limitação imposta pela configuração atual do equipamento. Ademais, os casos

encontrados não se referem a faixa de altitude em que as camadas intermediárias são geralmente observadas, no entanto, conforme citado por dos Santos et al. (2019), as camadas intermediárias podem ser formadas a partir do desprendimento da camada F1. Então, os eventos selecionados aqui são apropriados para investigar uma possível influência das ondas de gravidade na formação das CIs. Ademais, as ondas de gravidades surgem especialmente na baixa atmosfera e se propagam para a alta atmosfera. Desta forma, é razoável considerar que apesar de não terem sido detectadas pela ionossonda na faixa de altitude esperada, a onda de gravidade pode ter se iniciado em alturas inferiores e se propagado para altitudes em que o equipamento utilizado pudesse detectá-la.

A Figura 40 apresenta o gráfico de isofrequência para o dia 12 de outubro de 2008 em São José dos Campos. Neste caso, utilizou-se como referência as frequências em 2,02 MHz (pontos vermelhos), 2,32 MHz (pontos pretos) e 2,62 MHz (pontos rosas). Nota-se que o início de uma perturbação oscilatória foi registrado às 00:00 UT do dia 12 de outubro (21:00 LT do dia 11 de outubro) e seu término ocorreu por volta das 08:30 UT (05:30 LT). Tal perturbação pode ser atribuída a uma propagação de onda de gravidade.

Figura 40: Gráfico de isofrequência para o dia 12 de outubro de 2008 em São José dos Campos.

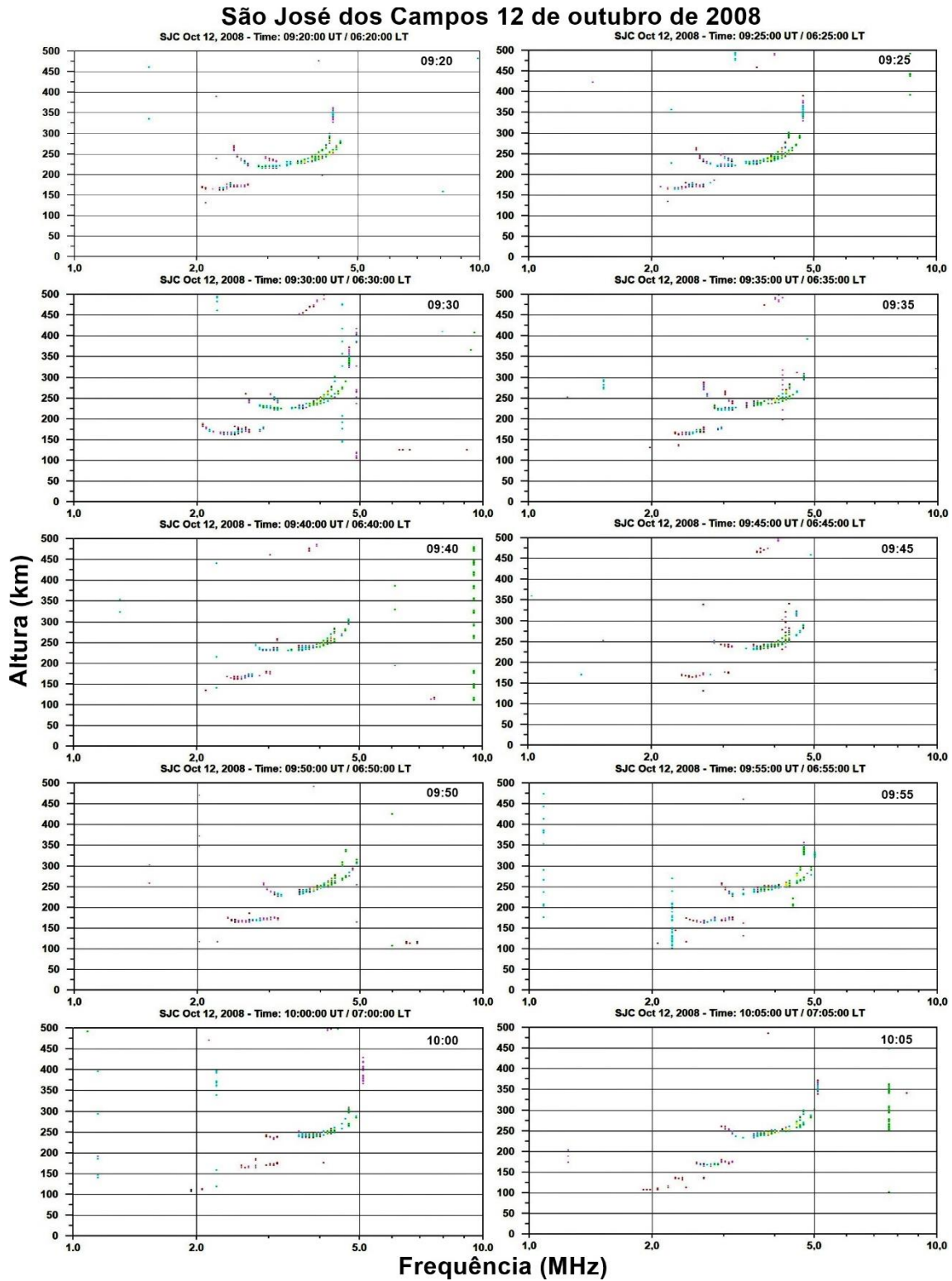


Fonte: O autor.

Neste dia, os ionogramas de São José dos Campos mostraram que a formação da camada intermediária pode ter sido decorrente de uma variação no traço da camada E2, que neste caso esteve localizada em aproximadamente 150 km. A sequência de ionogramas da Figura 41 mostrou às 09:20 UT (06:20 LT) a camada E2 e a camada F bem definidas em aproximadamente

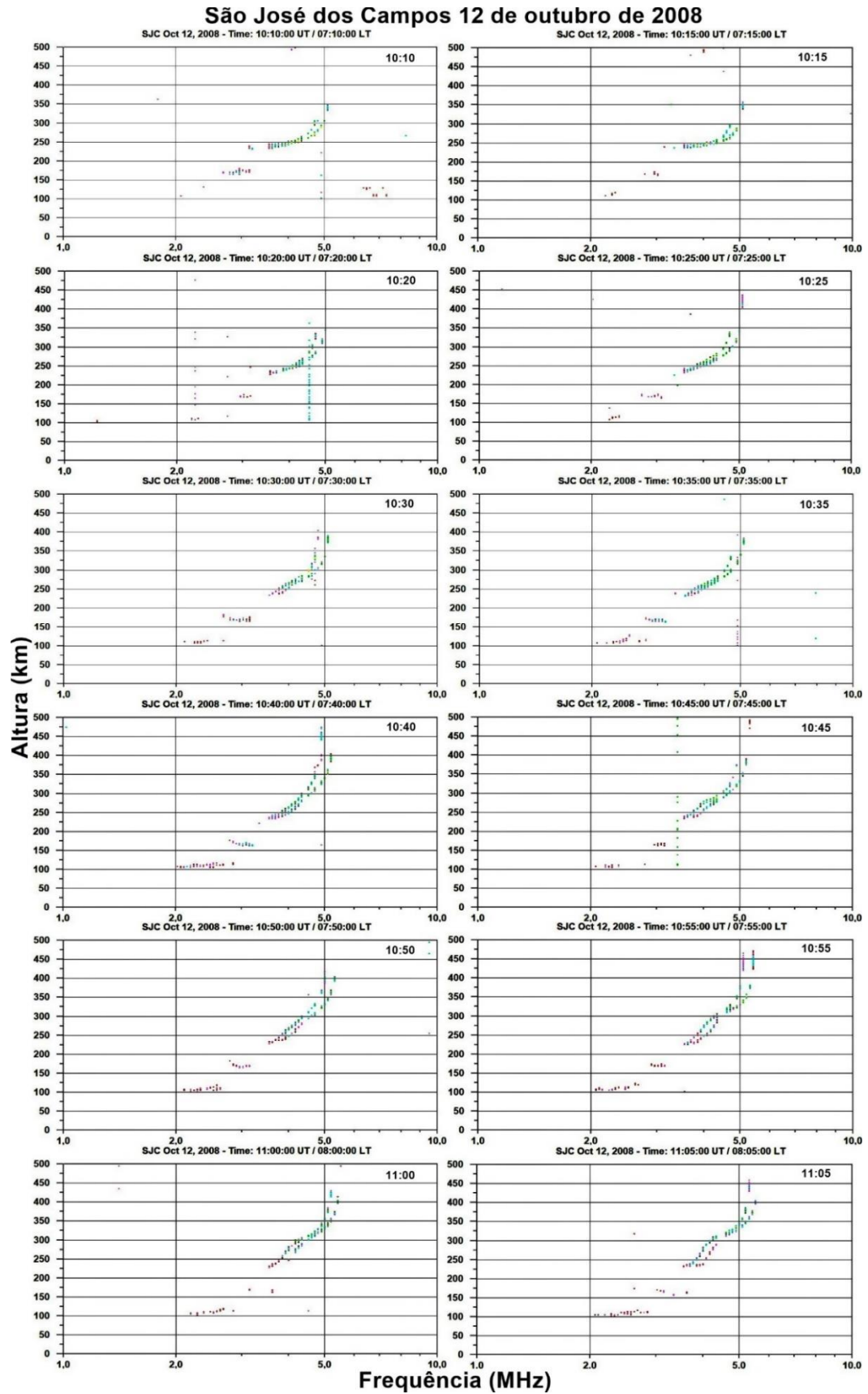
150 km e 220 km, respectivamente. Neste horário, observa-se que a camada inferior apresentou um encurvamento tanto na baixa quanto na alta frequência. A partir das 09:50 UT (06:50 LT), uma modificação no traço desta camada começa a ficar evidente, conforme pode ser visto pelo aumento na frequência de topo, que neste caso atingiu um valor de 3,2 MHz. Deste horário em diante, a camada intermediária parece ter se estabelecido e apresentou momentos de intensificação e enfraquecimento, chegando a ser interrompida temporariamente em alguns horários. Sua interrupção total foi observada somente às 18:15 UT (15:15 LT). Ressalta-se que a interpretação aqui descrita pode ter sido prejudicada pela qualidade dos ionogramas na região de interesse.

Figura 41: Sequência de ionogramas das CI's (09:20 UT (06:20 LT) às 10:05 UT (07:05 LT)) do dia 12/out/2008 na estação de SJC.



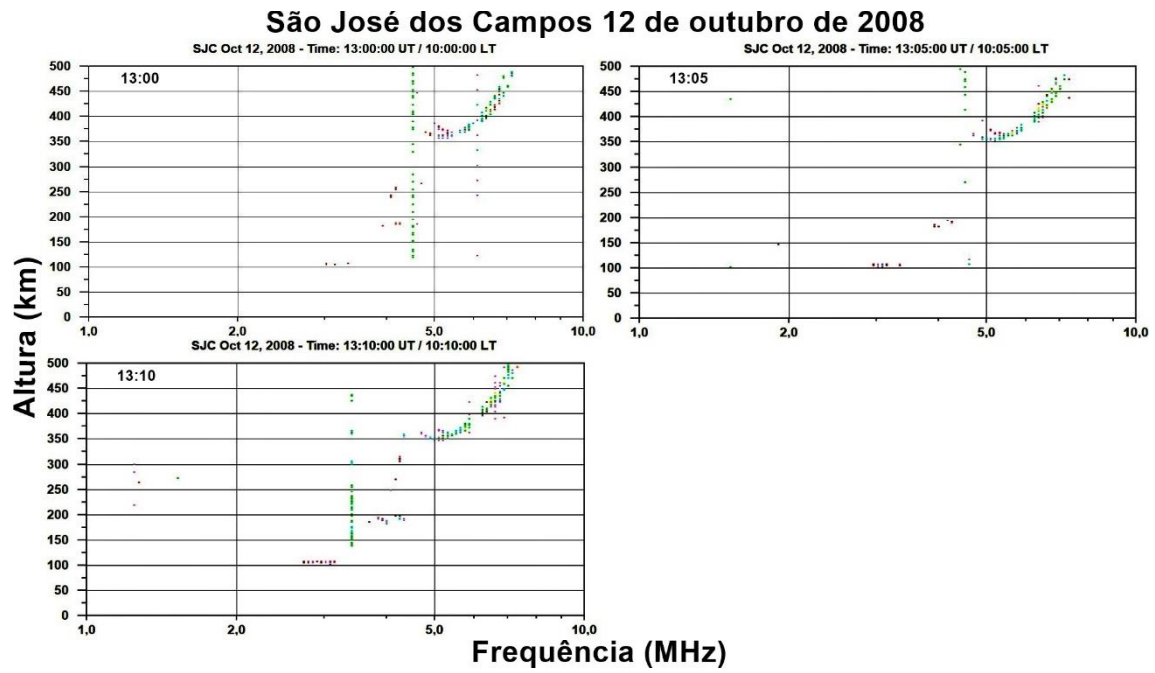
Fonte: o autor.

Figura 42: Sequência de ionogramas das CI's (10:10 UT (07:20 LT) às 11:05 UT (08:05 LT)) do dia 12/out/2008 na estação de SJC.



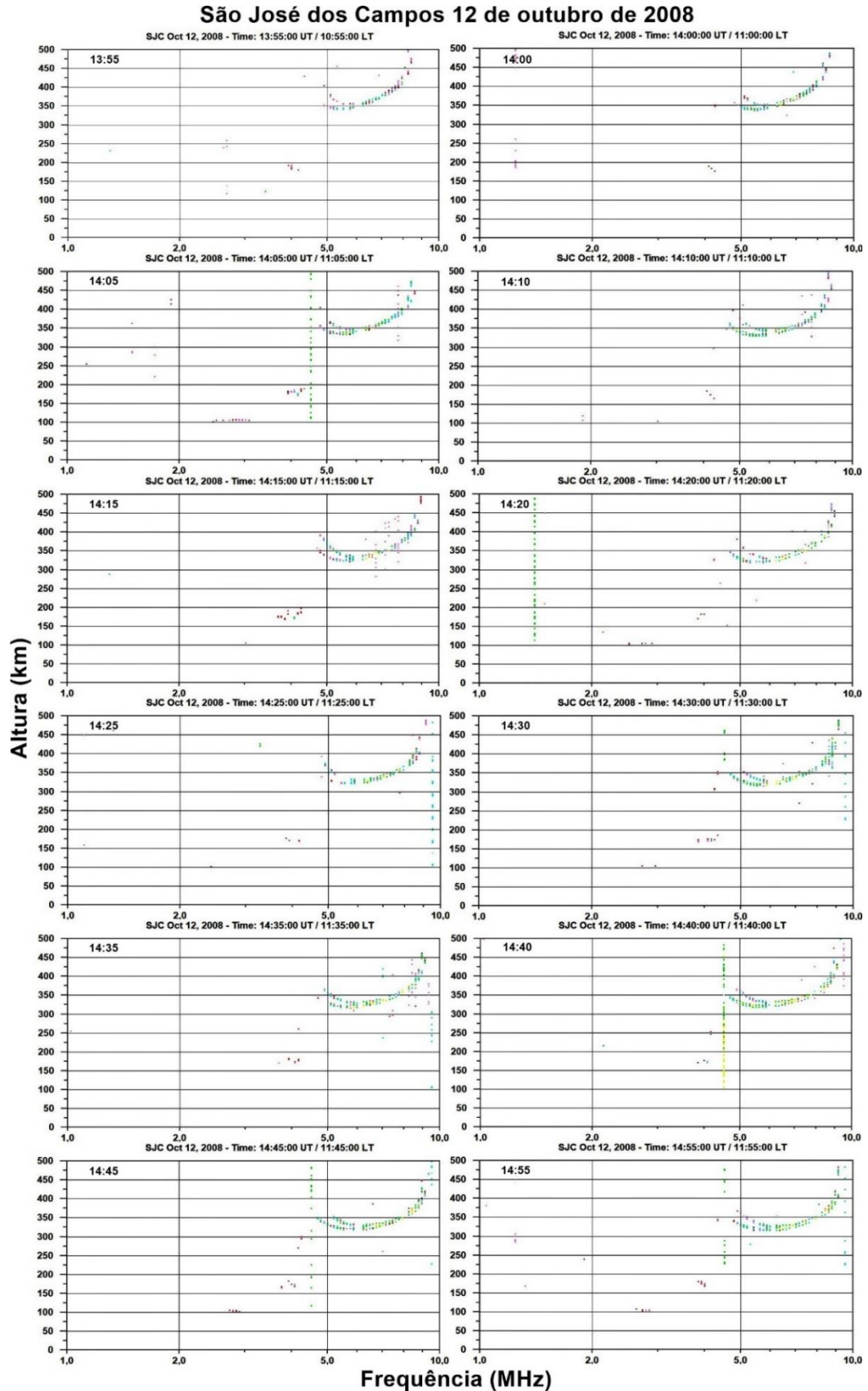
Fonte: o autor.

Figura 43: Sequência de ionogramas das CI's (13:00 UT (10:00 LT) às 13:10 UT (10:10 LT)) do dia 12/out/2008 na estação de SJC.



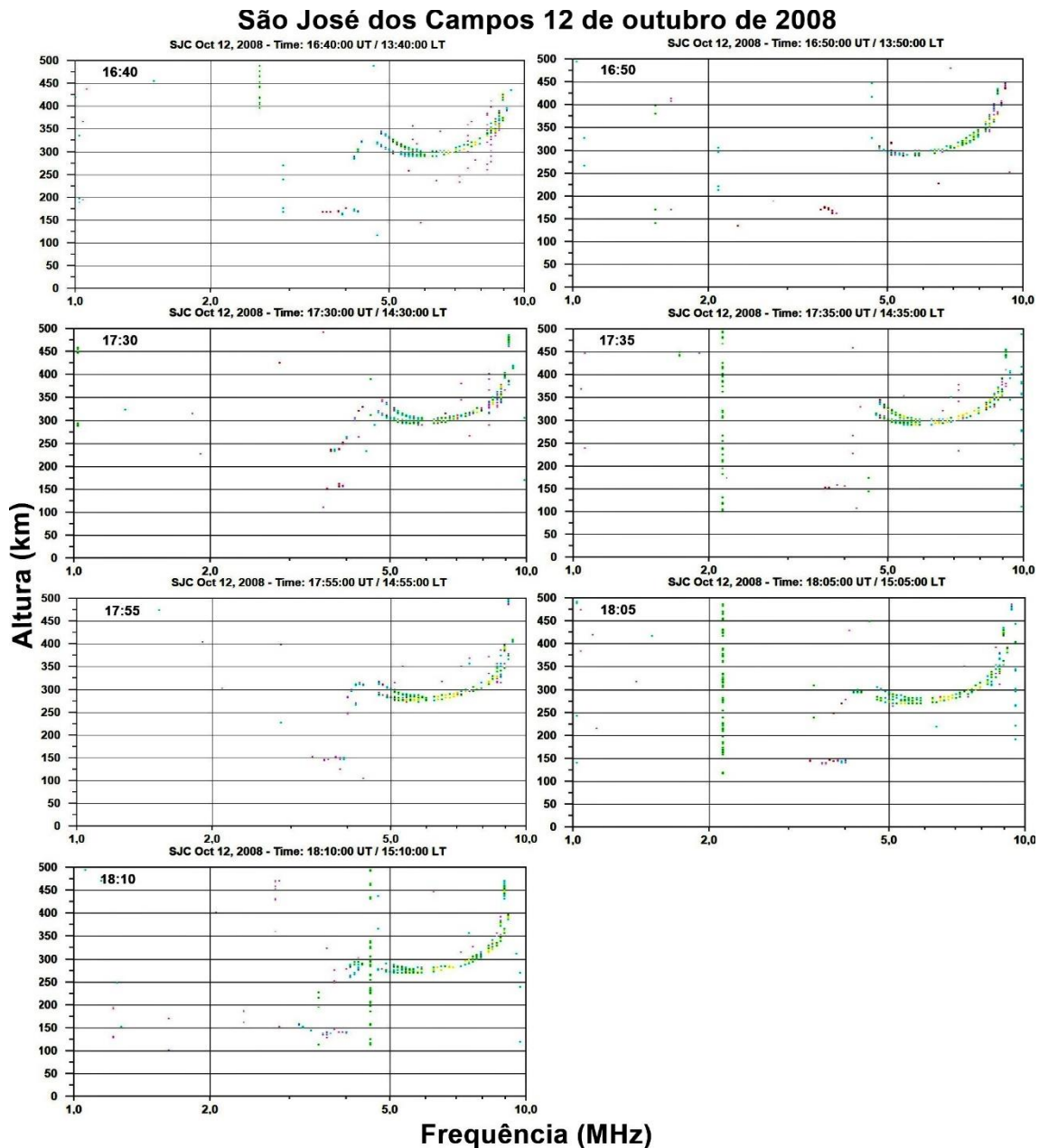
Fonte: o autor.

Figura 44: Sequência de ionogramas das CI's (13:55 UT (10:55 LT) às 14:55 UT (11:55 LT)) do dia 12/out/2008 na estação de SJC.



Fonte: o autor.

Figura 45: Sequência de ionogramas das CI's (16:40 UT (13:40 LT) às 18:10 UT (15:10 LT)) do dia 12/out/2008 na estação de SJC

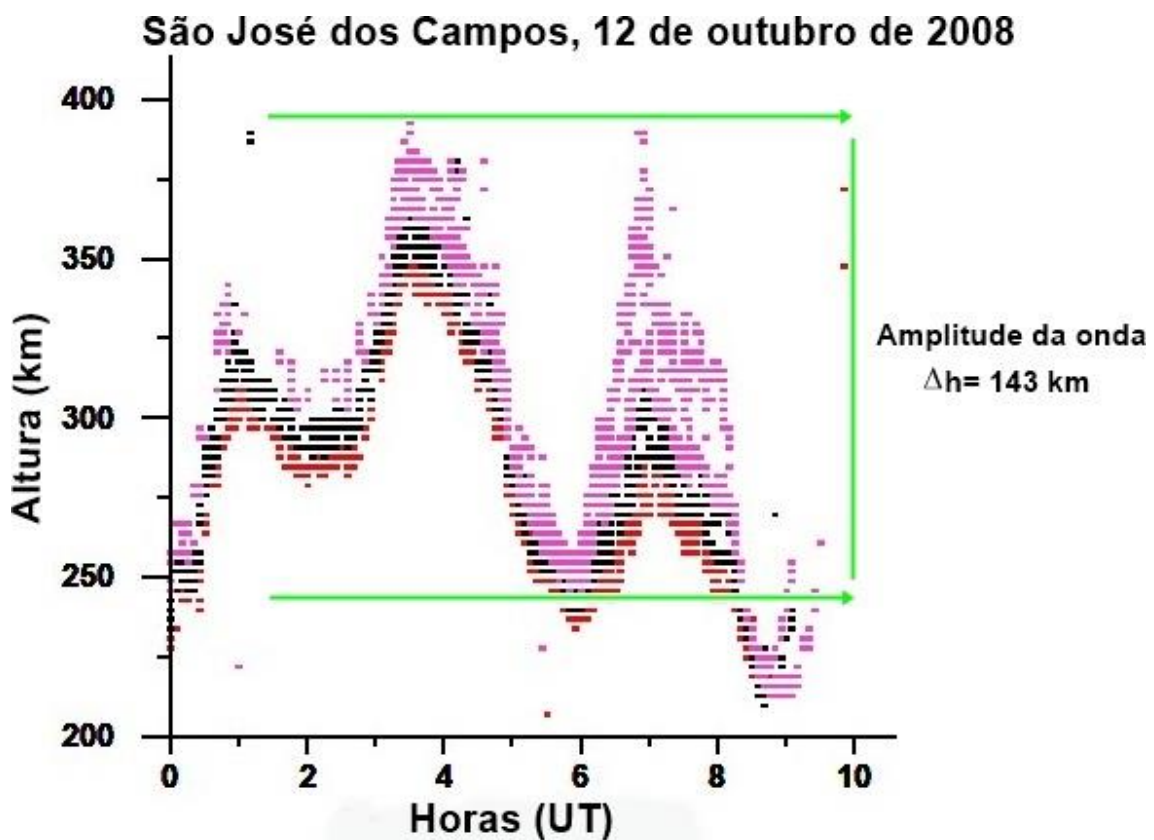


Fonte: o autor.

De acordo com a Figura 41, observa-se que a formação da camada intermediária ocorreu após as 09:50 UT, portanto muito próximo do período em que a camada F esteve bastante perturbada pela ação das ondas de gravidade (Figura 40). Após o fim do registro das oscilações na base da camada F, verificou-se ainda a presença da CI por mais duas horas contínuas de CI, como pode-se visualizar nas Figuras 41 e 42. A medida que o tempo foi passando, as CI's foram identificadas em horários específicos e sem sequência nos ionogramas, como apresentado nas Figuras 43, 44 e 45.

A análise do gráfico de isofrequência permite que alguns parâmetros acerca das ondas de gravidade possam ser extraídos como, por exemplo, a amplitude da oscilação. Observe a Figura 46 e considere apenas a frequência 2,62497 (pontilhados em rosa). Para obtermos os valores da amplitude de oscilação toma-se o ponto mais alto que a frequência atingiu (x_i) (386 km) e o ponto mais baixo (x_f) (243 km). Então faz-se: $x_i - x_f = \Delta h$, neste caso, $368 \text{ km} - 243 \text{ km} = 143 \text{ km}$. Logo, temos que o Δh desta frequência é de 143 km.

Figura 46: Imagem exemplificando quais os pontos pegar para calcular a amplitude de oscilação de uma frequência da onda de gravidade.



Fonte: o autor.

É possível classificar uma onda de gravidade de acordo com a variação vertical da altura virtual das amplitudes pico a pico. Aqui consideramos o mesmo critério de De Oliveira (2008), sendo as variações verticais da altura virtual de até 40 km como sendo ondas de gravidade fracas, as de 40 até 60 km como sendo ondas de gravidade moderadas e as acima de 60 km como sendo ondas de gravidade fortes. Com o objetivo de classificar a onda de gravidade estudada calculamos a variação da altura da onda de gravidade (Δh), de acordo com a Figura 46 e os cálculos apresentados, do dia 12 de outubro de 2008 em São José dos Campos, obtendo os valores apresentados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6: Variação da altura da onda de gravidade para cada pico e suas médias.

<i>Frequências</i>	1^a pico	2^a pico	3^a pico
2,62	343 km	386 km	378 km
	299 km	243 km	211 km
	$\Delta h_1 = 44$ km	$\Delta h_2 = 143$ km	$\Delta h_3 = 167$ km
2,32	328 km	361 km	310 km
	287 km	238 km	208 km
	$\Delta h_1 = 41$ km	$\Delta h_2 = 123$ km	$\Delta h_3 = 102$ km
2,02	310 km	350 km	286 km
	277 km	231 km	217 km
	$\Delta h_1 = 33$ km	$\Delta h_2 = 119$ km	$\Delta h_3 = 69$ km
<i>Média</i>	$\Delta h_{1m} 39,333$ km	$\Delta h_{2m} 128,333$ km	$\Delta h_{3m} 112,667$ km

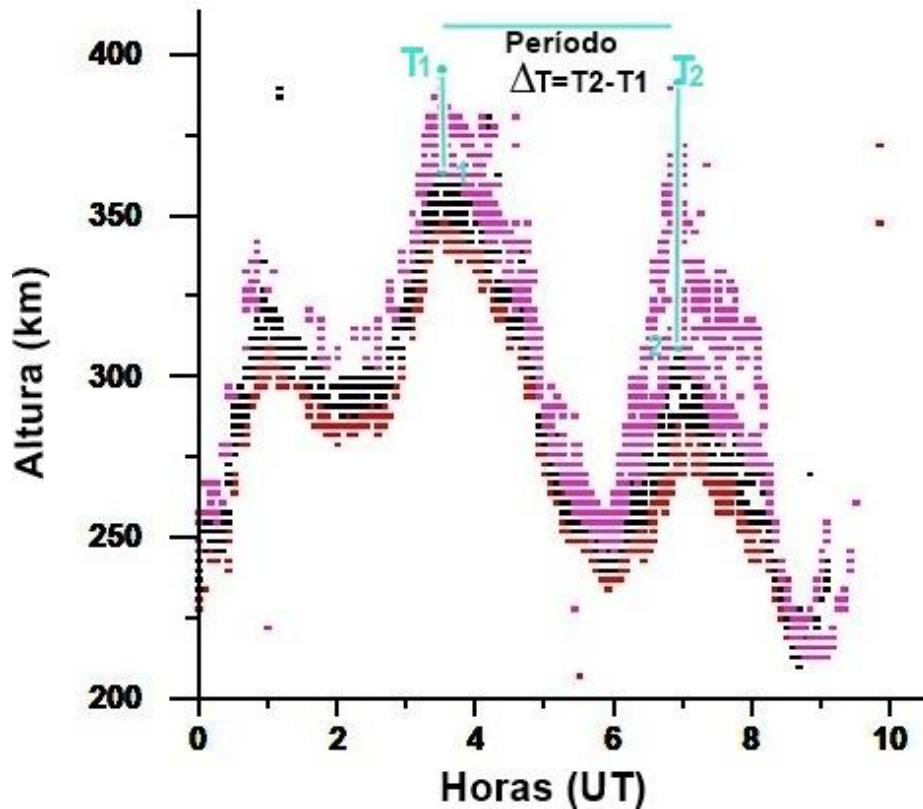
Fonte: o autor.

Logo, para calcularmos o valor médio do deslocamento virtual vertical desta onda de gravidade faz-se $\frac{\Delta h_{1m} + \Delta h_{2m} + \Delta h_{3m} + \dots}{\text{número de } \Delta h} = \Delta h_m$, isto é, $\frac{39,333 + 128,333 + 112,667}{3} \cong 93,444$ km. Indicando assim que a onda de gravidade aqui estudada é uma onda de gravidade forte.

Após a identificação da variação em altura virtual da onda de gravidade é possível caracterizar o período de oscilação da onda de gravidade (ΔT), o qual é definido como sendo o tempo total de uma oscilação completa. A Figura 47 mostra como os valores do período de oscilação para esta onda de gravidade pode ser determinado.

Figura 47: Imagem exemplificando quais os pontos pegar para calcular o período de oscilação da onda de gravidade.

São José dos Campos, 12 de outubro de 2008



Fonte: o autor.

A Tabela 7 apresenta as variações de tempo de pico a pico para cada frequência da onda de gravidade estudada e o período médio de cada frequência desta onda de gravidade.

Tabela 7: Variação de tempo pico a pico para cada frequência da onda de gravidade.

<i>Frequências</i>	2,62	2,32	2,02	<i>Média ΔT</i>
<i>Pico 1 ao pico 2</i>	3,51 h	3,54 h	3,56 h	
	0,86 h	0,95 h	1,03 h	
	ΔT = 159 min	ΔT = 155 min	ΔT = 152 min	ΔT = 155 min
<i>Pico 2 ao pico 3</i>	6,95 h	6,95 h	7,07 h	
	3,51 h	3,54 h	3,56 h	
	ΔT = 206 min	ΔT = 205 min	ΔT = 211 min	ΔT = 207 min

Fonte: o autor.

Neste caso, a onda de gravidade em questão teve uma média de deslocamento do tempo em $\Delta T_m = 181 \text{ min}$.

Realizou-se também um estudo da velocidade de fase vertical, que é definido pelo deslocamento em altura dos máximos das ondas (Δh) dividido pelo respectivo deslocamento em tempo entre esses máximos (ΔT), ou seja:

$$V_m = \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{93443 \text{ metros}}{10860 \text{ segundos}} = 8,60 \text{ m/s}$$

Com base nos valores de velocidade e período, pode-se calcular o comprimento de onda vertical da onda em questão de acordo com a seguinte expressão: $\lambda = V_m \cdot T_m$

$$\lambda = 0,0086 \cdot 12420 = 106,812 \text{ km}$$

Então, de acordo com os resultados obtidos, verificou-se que no dia 12 de outubro uma onda de gravidade de comprimento 106,812 km, velocidade 8,60 m/s, período 181 min, pode ter influenciado a geração/desenvolvimento da camada intermediária sobre a região de São José dos Campos. De acordo com alguns autores, a variabilidade diária nos parâmetros da CI podem ser o resultado de variações nas marés, campos elétricos, ions metálicos e também devido as ondas de gravidade (ver por exemplo Nygrén et al., 1990; Wilkinson et al., 1992). Os impactos da onda de gravidade nas CIs também foram discutidos por Niranjana et al. (2010). Foi relatado que os altos valores de velocidade de descida das CIs podem ser devido a modulação dessa camada ionizada pelas ondas de gravidade juntamente com as marés.

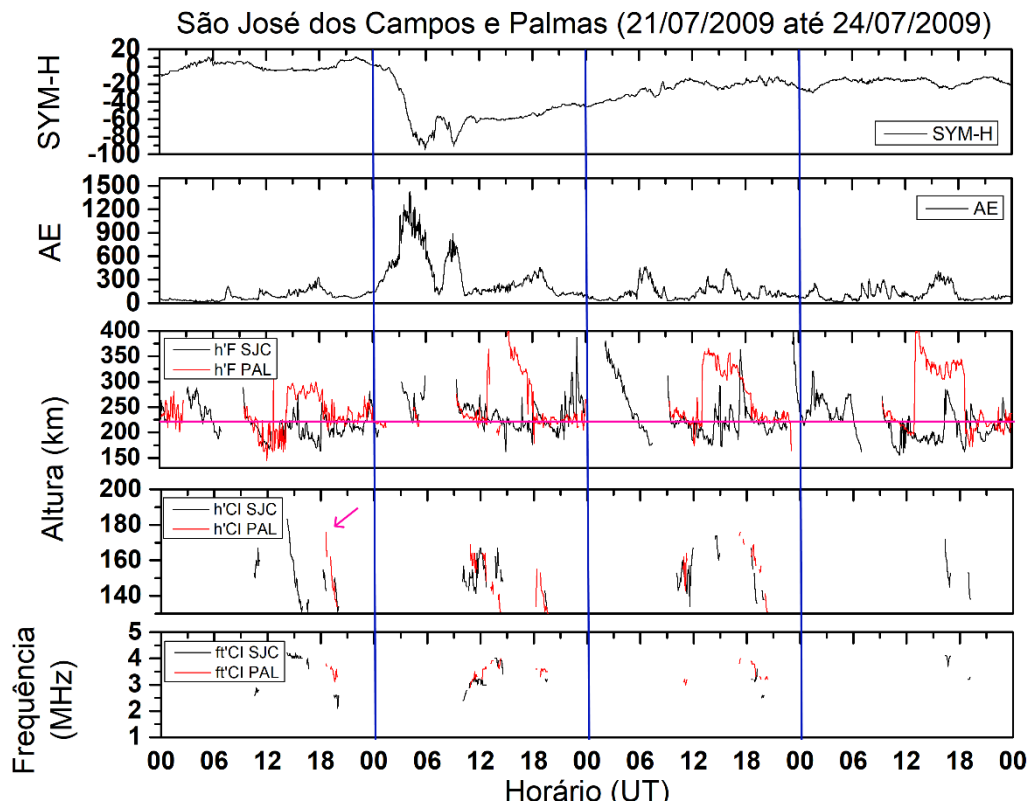
4.8 INVESTIGAÇÃO DO IMPACTO DAS TEMPESTADES MAGNÉTICAS NO COMPORTAMENTO DAS CI's.

O banco de dados avaliados para as regiões de Palmas – TO e São José dos Campos – SP durante o período de baixa (2008/2009) e alta (2013/2014) atividade solar mostraram alguns casos em que as CI's foram detectadas em alturas superior ao esperado, em aproximadamente 170-200 km. Sabe-se que durante a ocorrência de tempestades magnéticas, essa faixa de altitude pode ser fortemente afetada pelos campos elétricos de origem magnetosférica (SOBRAL et al., 1997, 2001; BATISTA et al. 1991; ABDU et al., 2003, 2009; SANTOS et al., 2012) e pelo campo elétrico oriundo do dínamo perturbado (BLANC and RICHMOND, 1980; ABDU, 1997). Com o intuito de investigar se o comportamento da camada intermediária pode ou não ter sido afetado pela tempestade magnética, fez-se uma varredura nos dados já analisados para encontrar dias em que ocorreram tempestades magnéticas consideráveis e que a presença de

camadas intermediárias tivesse sido detectada. Foram encontrados 4 eventos de tempestades magnéticas em que se observou a ocorrência das CI's, porém, em apenas um destes eventos, observou-se a presença das CI's em ambas as regiões estudadas. Isto posto, escolheu-se a tempestade magnética ocorrida entre os dias 21 e 24 de julho de 2009, na qual o índice Sym-H atingiu um valor de aproximadamente $-83 nT$. Neste caso, avaliou-se o comportamento dos parâmetros de altura virtual da camada F ($h'F$), altura virtual da camada intermediária ($h'CI$), frequência de topo da camada intermediária ($ftIL$), bem como os índices magnéticos AE e Sym-H.

A Figura 48 ilustra uma sequência de 4 dias, sendo um dia antes da tempestade (21/07/2009), o dia da tempestade (22/07/2009) e dois dias posteriores representativos da fase de recuperação da tempestade (23/07/2009 e 24/07/2009). De cima para baixo tem-se: o índice magnético Sym-H, o índice de atividade auroral AE, as alturas virtuais da camada F ($h'F$) de Palmas (em vermelho) e São José dos Campos (em preto), as alturas virtuais da camada intermediária ($h'CI$) de Palmas (em vermelho) e São José dos Campos (em preto) e a frequência de topo da camada intermediária ($ftIL$) de Palmas (em vermelho) e São José dos Campos (em preto). Observa-se que em ambas as regiões, a presença das camadas intermediárias foi identificada algumas horas antes do início da tempestade (no dia 21 de julho de 2009) porém, no exato momento da intensificação da perturbação magnética, ambos os setores estudados não registraram a presença das CIs. No entanto, logo após um período de forte intensificação de AE (que atingiu um máximo em torno de $1200 nT$ às 04:00 UT (01:00 LT), identificou-se a formação das CI's em São José dos Campos e Palmas. Ademais, conforme identificado pela seta na cor rosa, observa-se que na região equatorial a CI apresentou uma elevação às 18:00 UT (15:00 LT), atingindo uma altura de aproximadamente 170 km. Neste horário, nenhuma variação significativa foi identificada na frequência de topo das CIs, a qual permaneceu em torno de 4 MHz. Por outro lado, as CI's de São José dos Campos apresentaram comportamento oposto, isto é, surgiram em alturas próximas a 170 km e descenderam para altitudes mais baixas até se fundirem com as camadas esporádicas que já estavam em desenvolvimento. De modo geral, observa-se que o comportamento da região F em termos do parâmetro $h'F$ foi bastante modificado após o período de intensificação da atividade auroral, tanto na região mais próxima ao equador, quanto na região de baixa latitude. No entanto, tais variações na altura virtual podem ter sido decorrentes do bloqueio causado pelas camadas esporádicas. Em relação ao parâmetro de frequência, nenhuma mudança significativa foi observada nos períodos discutidos.

Figura 48: sequência de 4 dias, sendo um dia antes da tempestade (21/07/2009), o dia da tempestade (22/07/2009) e dois dias posteriores representativos da fase de recuperação da tempestade (23/07/2009 e 24/07/2009).



Fonte: o autor.

A influência das tempestades magnéticas no comportamento das camadas intermediárias é algo que ainda vem sendo estudado. Por exemplo, em um estudo estatístico recente, Santos et al. (2021) mostrou que uma pequena variação na atividade magnética durante um período de baixa atividade solar pode afetar tanto os parâmetros de altura como de frequência das CIs para a região de baixa latitude de Cachoeira Paulista. Os autores verificaram que a altura da camada intermediária sofreu um significativo decréscimo com o aumento da atividade magnética (em termos do índice K_p) nas primeiras horas do dia. Tal característica pode estar associada ao campo elétrico do tipo *overshielding*, que é direcionada para oeste durante o dia e leste durante a noite. Utilizando dados de ionossonda, Rodger et al. (1981), mostraram que a probabilidade de formação de uma camada intermediária é muito baixa quando a altura virtual mínima da camada F2 é superior a 220 km, mas pode aumentar em períodos de perturbação magnética. Fazendo um comparativo com os resultados apresentados na Figura anterior observa-se que, em alguns horários, verificou-se a formação da CI em momentos em que a camada F estava muito próxima ou superior a este limiar mencionado por Rodger et al.

(1981). Sendo assim, acredita-se que estudos mais aprofundados precisam ser realizados para que os possíveis efeitos da tempestade magnética nas CIs sejam melhores compreendidos.

5 CONCLUSÕES

O comportamento das camadas intermediárias sobre a região equatorial e de baixa latitude brasileira durante os períodos de baixa (2008/2009) e alta (2013/2014) atividade solar foi aqui investigado com base nos dados coletados pela ionossonda CADI instalada sobre as regiões de São José dos Campos e Palmas.

Verificou-se que camadas intermediárias ocorrem predominantemente durante o dia (Figuras 15-20 e 23-28) em ambos os setores estudados e apresentam um comportamento descendente típico que pode durar de minutos a horas. A ocorrência das CIs sobre a região brasileira é alta (Tabelas 1 e 3) e parece ser independente da sazonalidade e da atividade solar. Além disso, destaca-se que a frequência de topo da camada intermediária (ftCI) apresentou um comportamento similar ao da frequência crítica da camada E (foE), com um máximo por volta das 15:00 UT (12:00 LT) em ambos os setores nos diferentes períodos sazonais.

Observou-se que os valores médios dos parâmetros $h'CI$ e ftCI para São José dos Campos apresentam pouca variabilidade entre 09:00 UT (06:00 LT) e 21:00 UT (18:00 LT) durante o mínimo solar. Em Palmas, esta característica foi vista somente no solstício de inverno, já que nos demais períodos sazonais um padrão oscilatório foi observado nos valores médios de altura. Acredita-se que este comportamento oscilatório em regiões próximas ao equador seja possivelmente causado pelas ondas de gravidade. Identificou-se picos de ocorrência das camadas intermediárias tanto no período de baixa como alta atividade solar (Tabelas 2 e 4). No período de mínimo solar, tanto em Palmas quanto em São José dos Campos, dois picos de ocorrência foram observados ao longo do dia, em todos os períodos sazonais, com porcentagens de ocorrências variando de aproximadamente 15% e 75%. Para o período de máximo solar, enquanto em São José dos Campos foi observado dois picos de ocorrência apenas no equinócio, em Palmas tal comportamento foi observado no equinócio e no solstício de inverno.

Em relação à altura da camada intermediária durante o período de baixa e alta atividade solar, observou-se casos em que as CIs estiveram localizadas em altitudes superiores a 180 km, tanto em São José dos Campos como em Palmas. Também verificou-se que em alguns horários, a frequência de topo da camada intermediária foi bastante superior ($ftCI > 8$ MHz) aos valores médios. Esta intensificação na frequência de topo indica que as camadas intermediárias desceram e atingiram altitudes próximas a 130 km de altura. Adicionalmente, investigou-se

uma possível relação entre $h'F$ e $h'IC$, porém de acordo com os índices de correlação encontrados para ambos os setores e períodos sazonais, conclui-se que não existe uma correlação estabelecida entre a variação da altura virtual da camada F e a variação da altura virtual da camada intermediária.

Algumas peculiaridades foram encontradas no decorrer deste estudo, como, por exemplo, camadas intermediárias noturnas, camadas intermediárias simultâneas e camadas intermediárias formadas a partir do desprendimento da base da camada F. Com relação as camadas noturnas, destaca-se que poucos eventos foram observados em ambas regiões e períodos avaliados. Os ionogramas revelaram que as camadas observadas durante o período noturno apresentam características similares as camadas diurnas como, por exemplo, o movimento ascendente e descendente com o passar das horas. No entanto, no que diz respeito ao formato com que essas camadas aparecem, algumas diferenças foram observadas. No caso das camadas diurnas, as CIs geralmente apresentam um formato encurvado, já as camadas noturnas, em sua grande maioria, apresentaram um formato reto e espalhado.

Embora o modelo MIRE não cubra toda a faixa de altura na qual as CIs são formadas, as análises aqui apresentadas evidenciam de modo geral a importância do vento meridional na dinâmica das camadas intermediárias. Para o setor de baixa latitude, observou-se que a inclusão da maré semidiurna foi fundamental para modular a descidas das CIs para altitudes inferiores. Para a região mais próxima do equador, foi necessário realizar um ajuste no modelo de ventos, já que os primeiros resultados mostraram uma camada superior de longa duração, o que não condiz com os dados observacionais. Na tentativa de melhorar esse resultado, e considerando que se utilizou um modelo de ventos para Palmas com base nos dados de São João do Cariri, incluiu-se uma correção neste parâmetro, multiplicando-o por 1,5. Esta correção foi fundamental para que se encontrassem resultados mais coerentes com o que de fato se observa como, por exemplo, o tempo de duração das CIs, principalmente para o equinócio. Para o solstício de inverno, foi interessante observar que tanto a correção do vento como a inclusão da maré semidiurna teve-se pouco impacto no comportamento da CI que, neste caso, mostrou uma variação mais significativa na densidade eletrônica da camada.

A possível influência das ondas de gravidade na formação/desenvolvimento das camadas intermediárias também foi investigada. Em um estudo de caso realizado, verificou-se que uma onda de gravidade de comprimento de 106,812 km, velocidade de 8,60 m/s e período de 181 min, pode ter influenciado a geração/desenvolvimento da camada intermediária sobre a região de São José dos Campos. Embora este estudo tenha sido realizado considerando altitudes

superiores as quais as CIs são formadas, sabe-se que essas camadas podem ser formadas a partir do desprendimento da camada F1. Então, acredita-se que os eventos selecionados foram apropriados para investigar uma possível influência das ondas de gravidade na formação das CIs.

Com relação as tempestades magnéticas, observou-se a presença das CIs em ambas as regiões estudadas nos períodos que antecederam a tempestade, no entanto, durante a fase principal da tempestade, não foi observada a presença das CIs. Isso pode estar relacionado ao fato da CI ser menos frequente durante o período noturno, uma vez que esta fase da tempestade foi identificada ente 0 e 6 UT. Ademais, observou-se também que a medida que a tempestade foi caminhando para a sua fase de recuperação, uns decréscimos na atividade das CIs foram identificados.

Destaca-se que os objetivos propostos para esta pesquisa de mestrado foram atingidos, no entanto, estudos adicionais precisam ser realizados para que a influência das ondas de gravidade e das tempestades magnéticas possam ser mais bem compreendidos.

Em função dos resultados obtidos nesta pesquisa recomenda-se que para trabalhos futuros:

- Utilize-se instrumentos distintos para a obtenção dos dados, tal como radares de espalhamento coerentes, estes que, fornecem com precisão a densidade dos elétrons com resolução espacial e temporal na região do vale, favorecendo o estudo das CIs;
- Propõe-se que utilizando de instrumentação distinta faça-se um estudo com o mesmo período e regiões aqui realizados, para comparações científicas;
- Recomenda-se um estudo comparativo de dias com tempestades magnéticas e dias sem a presença de tempestades magnéticas que apresentem CIs, para um melhor entendimento da influência das tempestades magnéticas na formação e no comportamento das CIs.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDU, M. A. Major phenomena of the equatorial ionosphere-thermosphere system under disturbed conditions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 59, n. 13, p. 1505-1519, 1997. Doi:10.1016/S1364-6826(96)00152-6.
- ABDU, M. A. et al. Equatorial electrojet irregularities investigations using a 50MHz back-scatter radar and a digisonde at São Luís: some initial results. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 12-14, p. 1425-1434, 2002. Doi:10.1016/j.jastp.2003.08.011.
- ABDU, M. A. et al. Equatorial evening prereversal vertical drift and spread F suppression by disturbance penetration electric fields. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 19, 2009. Doi:10.1029/2009GL039919.
- APPLETON, Edward V.; BUILDER, Geoffrey. The ionosphere as a doubly-refracting medium. **Proceedings of the Physical Society (1926-1948)**, v. 45, n. 2, p. 208, 1933.
- ASCHWANDEN, M. J. Irradiance observations of the 1-8 A soft X-ray flux from GOES. **Solar Physics**, v. 152, 53-59, 1994.
- BALMACEDA, Laura Antônia. **Estudos das possíveis causas solares de tempestades geomagnéticas**. 2008. 170p.; Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. (INPE – 14486 – TDI/1167).
- BALSLEY, B. B. Evidence of a stratified echoing region at 150 kilometers in the vicinity of the magnetic equator during daylight hours. **Journal of Geophysical Research**, v. 69, n. 9, p. 1925-1930, 1964. DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ069i009p01925>.
- BANKS, P. M.; KOCKARTS, G. **Aeronomy**. New York: Academic Press, 1973. Part A-B,
- BATISTA, Inez S. et al. Ionospheric effects of the March 13, 1989, magnetic storm at low and equatorial latitudes. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 96, n. A8, p. 13943-13952, 1991. doi:10.1029/91JA01263.
- BEER, T. **Atmospheric waves**, Londres: Wiley, 1974.
- BISHOP, R. L.; EARLE, G. D. Metallic ion transport associated with midlatitude intermediate layer development. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 108, n. A1, p. SIA 3-1-SIA 3-8, 2003. Doi:10.1029/2002JA009411
- BLANC, M.; RICHMOND, A. D. The ionospheric disturbance dynamo. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 85, n. A4, p. 1669-1686, 1980. Doi:10.1029/JA085iA04p01669.
- CARRASCO, A. J.; BATISTA, I. S.; ABDU, M. A. Simulation of the sporadic E layer response to prereversal associated evening vertical electric field enhancement near dip equator. **Journal of Geophysical Research**, v. 12, n. A6, p. 1-10, 2007. Doi: <https://doi.org/10.1029/2006JA012143>.

CAZUZA, Elio Pessoa. **Um estudo das ondas de gravidade estratosféricas na região equatorial brasileira**. 89f. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/26954>, 2018.

CHEN, C. F. et al. Observations of ionosondes from the E-F valley and comparison with incoherent dispersion radar profiles. ções de ionossondas do vale E-F e comparação com perfis de radar de dispersão incoerentes. **Advances in Space Research**, v. 11, n. 10, p. 89-92, 1991.

CONCEIÇÃO-SANTOS, Fredson. et al. On the role of tidal winds in the descending of the high type of sporadic layer (Es). **Advances in space research**, v. 65, p. 2131-2147, 2020.

CONCEIÇÃO-SANTOS, Fredson et al. Occurrence and Modeling Examination of Sporadic-E Layers in the Region of the South America (Atlantic) Magnetic Anomaly. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 124, n. 11, p. 9676-9694, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1029/2018JA026397>.

CONSTANTINIDES, E.; BEDINGER, J. F. Observed redistribution of E-region ionization by neutral winds. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 33, n. 3, p. 461-472, 1971.

DA SILVA, C. P.; BATISTA, I. S. A ionosfera sobre a região sul do brasil-caracterização em Santa Maria, RS. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INPE (SICINPE), 2005, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1 - 66 (INPE-12981-PRE/8258). Disponível em: <http://urlib.net/ibi/6qtX3pFwXQZ3r59YDa/HDRdf>. Acesso em 15 de nov. de 2019.

DE FREITAS, Tomas Ferreira. **Determinação da Densidade Eletrônica no Pico da Camada F Ionosférica Utilizando as Imagens na Emissão do OI-777.4 nm**. 2007. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2007.

DE MEDEIROS, A. F. **Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência**. 2001. 187 p. IBI: 6qtX3pFwXQZ3P8SECKy/BMpk8. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2001. (INPE-10478-TDI/932). Disponível em: <http://urlib.net/ibi/6qtX3pFwXQZ3P8SECKy/BMpk8>.

DE OLIVEIRA, Virgínia Klausner. **Estudo da propagação de ondas de gravidade na ionosfera usando técnicas de rádio sondagem**. 2007. Dissertação (mestrado) Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2007.

DE PAULA, Eurico R.; HYSELL, David L. The São Luís 30 MHz coherent scatter ionospheric radar: System description and initial results. **Radio Science**, v. 39, n. 1, p. 1-14, 2004. <https://doi.org/10.1029/2003RS002914>, 2004.

DENARDINI, C.M. **Desenvolvimento de um sistema de correção de fase para o radar ionosférico de São Luís do Maranhão**. 1999. 137p. Dissertação (mestrado em ciência espacial/geofísica espacial) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999. (INPE-7174-TDI/676),

- DENARDINI, C.M. **Estudo da eletrodinâmica durante o período de máxima atividade solar (1999-2002)**. 2003. 271p Tese (doutorado em ciência espacial/geofísica espacial)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003. (INPE-10554-TDI/941),
- DENISENKO, P. F.; SOTSKII, V. V. Possibility of establishing the existence of a valley from ionograms. **Geomagnetism and aeronomy**, v. 18, p. 1045-1050, 1978.
- DOS SANTOS, Â. M. et al. Climatology of intermediate descending layers (or 150 km echoes) over the equatorial and low-latitude regions of Brazil during the deep solar minimum of 2009. **Annales Geophysicae**, v. 37, n. 6), p. 1005-1024, 2019. <https://doi.org/10.5194/angeo-37-1005-2019>.
- EARLE, G. D. et al. Descending layer variability over Arecibo. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 105, n. A11, p. 24951-24961, 2000.
- FUJITAKA, K.; TOHMATSU, T. A tidal theory of the ionospheric intermediate layer. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 35, n. 3, p. 425-438, 1973. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(73\)90034-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(73)90034-2).
- HEELIS, R. A. Ionization layers observed at Middle latitudes by atmosphere Explorer-C. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, v. 61, p. 407-414, 1999.
- HINES, C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. **Canadian Journal of Physics**, v.38, p. 1441-1481, 1960.
- HUNSUCKER, R. D. **Radio techniques top robe thr terrestrial ionosphere**. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- JESUS, Rodolfo. **Estudos de eventos do tempo espacial (“space weather”) e a Ocorrência de Bolhas de Plasma Ionosféricas no Setor Brasileiro e japonês usando Sondagem Ionosférica**. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, São José dos Campos, 2008.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. Campos elétricos na região ionizada da atmosfera. *Revista Brasileira de Física*, v. 11, n. 3, p. 711-725, 1981.
- KUDEKI, E.; FAWCETT, C. D. High resolution observations of 150 km echoes at Jicamarca. **Geophys. Res. Lett.**, v.20, p. 1987-1990, 1993.
- LEE, C.-C. et al. The intermediate layers and associated tidal motions observed by a Digisonde in the equatorial anomaly region, **Annales Geophysicae**, v.. 21, n. 4, p. 1039-1045, 2003. <https://doi.org/10.5194/angeo-21-1039-2003>
- MACDOUGALL, J. W. Seasonal variation of semidiurnal winds in the dynamo region. **Planetary and Space Science**, v. 26, n. 8, p. 705-714, 1978. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(78\)90001-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(78)90001-6)
- MACDOUGALL, J.W.; GRANT, I.F.; SHEN, X. The Canadian advanced digital ion probe: Design and results. (Report UAG-104). In: WORLD DATA CENTER A FOR SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS. **National Geophysical Data Center**. Boulder, CO: P. Wilkinson, 1994. p. 21-27.

- MAHAJAN, K. K. et al. Incoherent-scatter measurements of EF valley and comparisons with theoretical and empirical models. **Advances in space research**, v. 14, n. 12, p. 75-78, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)90243-7](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)90243-7)
- MATHEWS, J. D. Sporadic E: current views and recent progress. **Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics**, v. 60, n. 4, p. 413-435, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(97\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00043-6)
- MATHEWS, John David; BEKENY, F. S. Upper atmosphere tides and the vertical motion of ionospheric sporadic layers at Arecibo. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 84, n. A6, p. 2743-2750, 1979. <https://doi.org/10.1029/JA084iA06p02743>
- MCNICOL, R. W. E.; GIPPS, G. de V. Characteristics of the E s region at Brisbane. **Journal of Geophysical Research**, v. 56, n. 1, p. 17-31, 1951.
- MILLER, N. J. et al. Equatorial ion composition, 140-200 km, based on Atmosphere Explorer E data. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 98, n. A9, p. 15685-15692, 1993.
- MITRA, S. K. **The upper atmosphere**. Institute of Radio Physics and Electronics. Calcutta: University College of Science, 1952.
- MONTEIRO, A. A. **Estudo do acoplamento mesosfera-ionosfera por meio de ondas de gravidade**. 2012. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, 2012.
- MONTENEGRO, S. O. et al. Estrutura das marés atmosféricas na região meteórica sobre o Cariri paraibano. **Physicae**, v. 8, n. 1, p. 27-32, 2009. DOI: 10.5196/physicae.8.4
- NAPPO, C. J. **An Introduction to Atmospheric Gravity Waver**. San Diego, Calif.: Academic, 2002. (International Geophysics Series, v. 85).
- NEGRETI, P. M. S. **Estudo do conteúdo total na região brasileira em períodos magneticamente perturbados**. 2012. 291 p. Tese (doutorado em geofísica espacial/ciências do ambiente solar-terrestre). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/05.10.21.43-TDI).
- NIRANJAN, K.; SRIVANI, B.; NAIDU, V. V. S. Daytime Descending Intermediate Layers Observed over a Sub-Tropical Indian Station Waltair during Low-Solar Activity Period. **Annales Geophysicae, Copernicus GmbH**, v. 28, n. 3, p. 807–815, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-28-807-2010>.
- NOGUEIRA, P. A. B. **Estudo da Anomalia de ionização equatorial e dos ventos termosféricos meridionais durante períodos calmos e perturbados na região de baixas latitudes brasileira**. 2009.146p.Dissertação (mestrado em geofísica espacial): Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos; 2009. (INPE-15774-TDI/1517).
- NYGRÉN, T. et al. Interference of tidal and gravity waves in the ionosphere and an associated sporadic E-layer. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 52, n. 6-8, p. 609-623, 1990..

- OSTERMAN, G. B., Heelis, R. A., and Bailey, G. J.: Modeling the formation of intermediate layers at Arecibo latitudes. **J. Geophys. Res.**, v. 99, 11357–11365, <https://doi.org/10.1029/94JA00519>, 1994.
- OSTERMAN, G. B.; HEELIS, R. A.; BAILEY, G. J. Effects of zonal winds and metallic ions in the behavior of intermediate layers. **J. Geophys. Res.**, v. 100, p. 7829–7838, 1995.
- PILLAT, V. G.; FAGUNDES, P. R. Uidada Univap digital ionosonde data analysis. In: VII Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica, 7., 2004. São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: Univap, 2004. p. 1178-1184.
- PILLAT, V. G. **Estudo da ionosfera em baixas latitudes através do modelo computacional lion e comparação com parâmetros ionosféricos observados**. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2006.
- RAIZADA, S. et al. Characteristics of nighttime E-region over Arecibo: Dependence on solar flux and geomagnetic variations. **Advances in space Research**, v. 61, n. 7, p. 1850 – 1857, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.07.006>
- RAIZADA, S. et al. First simultaneous measurements of the Na and K thermospheric layers together with the Arecibo TILs. **Geophysical Research Letters**, v.42, p.10.106-10.112, 2015.
- RATCLIFFE, J. A.; WHITE: Fine-Structure of the Ionosphere, **Nature**, v. 131, p. 872–873 1933. <https://doi.org/10.1038/131872a0>
- RESENDE, L. C. A. **Estudo Comparativo dos Parâmetros Ionosféricos Obtidos por Sondadores Digitais nas Estações de São Luís (MA) e Cachoeira Paulista (SP)**. Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica PIBIC/INPE – CNPq/MCT. São José dos Campos: INPE, 2006.
- RESENDE, L. C. A. et al. Simulations of blanketing sporadic E-layer over the Brazilian sector driven by tidal winds. **J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.**, v. 154, p. 104–114, 2017a <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.12.012>
- RESENDE, L. C. A. et al. The influence of tidal winds in the formation of blanketing sporadic e-layer over equatorial Brazilian region, **J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.**, v. 171, p. 64–71, 2017b <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.009>,.
- RESENDE, L.C.A. et al. The influence of tidal winds in the formation of blanketing sporadic E-layer over equatorial Brazilian region. **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, v. 171, p. 64–71. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.009>.
- RODRIGUES, F.S.; DE PAULA, E. R.; CHAU, J.L. On the characteristics of 150-km echoes observed in the Brazilian longitude sector by the 30 MHz São Luís radar. **Annales Geophysicae**, v. 29, n. 10, 1905-1916, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-29-1905-2011>
- ROGER, A. S., Fitzgerald, P. H., and Broom, S. M.: The nocturnal intermediate layer over South Georgia. **J. Atmos. Terr. Phys.**, v. 43, p. 1043-1050, 1981.

SANTOS, A. M. et al. Strong longitudinal difference in ionospheric responses over Fortaleza (Brazil) and Jicamarca (Peru) during the January 2005 magnetic storm, dominated by northward IMF. **J. Geophys. Res.**, v. 117, p. A08333, 2012. DOI:10.1029/2012JA017604.

SANTOS, Â. M. et al. Some differences in the dynamics of the intermediate descending layers observed during periods of maximum and minimum solar flux. **Journal of Geophysical Research; Space Physics**, v. 125, n. 10, p. e2019JA027682, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JA027682>.

SANTOS, A. M. et al. F region electric field effects on the intermediate layer dynamics during the evening prereversal enhancement at equatorial region over Brazil. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 126, p. e2020JA028429, 2021. DOI: 10.1029/2020JA028429.

SANTOS, A. M. et al. Intermediate Layers responses to Geomagnetic Activity During the 2009 Deep Solar Minimum Over the Brazilian Low Latitude Sector. **Annales Geophysicae**, 2021. <https://doi.org/10.5194/angeo-2021-52>

SCHAFFER, J. P.; GOODALL, W. M.: Characteristics of the Ionosphere, **Nature**, v. 131, p. 804, 1933. <https://doi.org/10.1038/131804a0>

SCHWENN, Rainer. Special climate: the solar perspective. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 3, n. 1, p. 2, 2006.

SCHUNK, R. W.; NAGY, A. F. **Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

SHEN, J. S., SWARTZ, W. S.; FARLEY, D.T. Ionization layers in the nighttime E-region valley above Arecibo. **Journal of Geophysical Research**, v.81, n. 31, p. 5517-5526, 1976. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA081i031p05517>

SILVA, A.M. **Estudo do efeito da maré lunar e das atividades solar e magnética na formação da camada F3 sobre Fortaleza**. 2003. 89 p. Dissertação (mestrado em geofísica espacial) –Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003. (INPE-10552-TDI/940).

SMITH, L. G. A sequence of rocket observations from E-sporadic night. **Journal of atmospheric and terrestrial Physics**, v. 32, n. 7, p. 1247-1257, 1970. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(70\)90055-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(70)90055-3)

SOBRAL, J. H. A., M. A. et al., Effects of intense storms and substorms on the equatorial ionosphere/thermosphere system in the American sector from ground-based and satellite data. **J. Geophys. Res.**, v. 102, n. A7, p. 14,305–14,313, 1997. DOI:10.1029/97JA00576.

SOBRAL, J. H. A. et al. Responses of the low-latitude ionosphere to very intense geomagnetic storms. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, v. 63, p. 965–974, 2001. DOI:10.1016/S1364-6826(00)00197-8.

SZUSZCZEWICZ, E. P. et al. Coupling mechanisms in the lower ionospheric-thermospheric system and manifestations in the formation and dynamics of intermediate descending layers. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 57, n. 12, p. 1483–1496, 1995. DOI: [https://doi.org/101016/0021-9169\(94\)00145-E1995](https://doi.org/101016/0021-9169(94)00145-E1995).

TAKAHASHI, H. et al. Response of OH emission from airglow, temperature and mesopause wind to the propagation of the atmospheric wave in Shigaraki. **Japan. Earth Planets and Space**, v.51, n.7-8, 1999.

TROST, T. F. Electron concentrations in the Upper E and D region in Arecibo. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, n. A6, p. 2736-2742, 1979. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA084iA06p02736>

TSUDA, T. et al. A global morphology of the gravitational wave activity in the stratosphere revealed by the GPS hiding data (GPS/MET). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** (1984–2012), v. 105, n. D6, p. 7257-7273, 2000.

TSUNODA, R. T. Enhanced velocities and a shear in daytime E_{sq} over Kwajalein and their relationship to 150km echoes over the dip equator. **Geophys. Res. Lett.**, v. 21, p. 2741-2744, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1029/94GL02507>.

WILKINSON, P. J.; SZUSZCZEWICZ, E. P.; ROBLE, R. G. Measurements, and modeling of intermediate, descending, and sporadic layers in the lower ionosphere: Results and implications for global-scale ionospheric-thermospheric studies. **Investigador Geofísico Letter**, v. 19, n. 2, p. 95-98, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1029/91GL02774>.

WRASSE, Cristiano Max. **Estudo de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas**. 2004. 253p. Tese (doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2004.

WRASSE, C. M. et al. Ondas de gravidade na estratosfera terrestre inferida através da técnica de rádio ocultação de GPS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, p. 59-68, 2007..

YAMASHITA, Cristina Sayuri. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 1999. 75p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, . São José dos Campos. 1999.