



*Instituto de Pesquisa
e Desenvolvimento*

Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento
Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia

MAUKERS ALEM LIMA DIAS

**ESTUDO DAS VARIAÇÕES DIÁRIA E MENSAL DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO
EQUATORIAL (EIA) SOBRE O SETOR BRASILEIRO DURANTE 2016 (FASE
DECRESCENTE DO CICLO SOLAR 24)**

São José dos Campos - SP

2020

MAUKERS ALEM LIMA DIAS

**ESTUDO DAS VARIAÇÕES DIÁRIA E MENSAL DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO
EQUATORIAL (EIA) SOBRE O SETOR BRASILEIRO DURANTE 2016 (FASE
DECRESCENTE DO CICLO SOLAR 24)**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do grau de Doutor em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes

São José dos Campos - SP

2020

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Dias, Maukers Alem Lima

Estudo das variações diária e mensal da anomalia de ionização equatorial (EIA) sobre o setor brasileiro durante 2016 (fase decrescente do ciclo solar 24) / Maukers Alem Lima Dias; orientador, Paulo Roberto Fagundes. - São José dos Campos, SP, 2020.

1 CD-ROM, 129 p.

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

Inclui referências

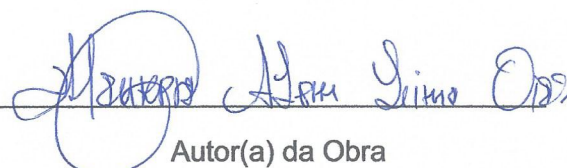
1. Física e Astronomia. 2. Anomalia de Ionização Equatorial . 3. Variabilidade diária e mensal. 4. IRI-2016. I. Fagundes, Paulo Roberto, orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. III. Título.

Eu, Maukers Alem Lima Dias, 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, 1 de Março de 2021.


Autor(a) da Obra

Data da defesa: 29, 09, 2020

MAUKERS ALEM LIMA DIAS

“ESTUDO DAS VARIAÇÕES DIÁRIA E MENSAL DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL (EIA) SOBRE O SETOR BRASILEIRO DURANTE 2016 (FASE DECRESCENTE DO CICLO SOLAR 24).”

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor, 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. ALEXANDRE TARDELLI _____

PROF. DR. PAULO ROBERTO FAGUNDES _____

PROF. DR. MARCIO TADEU DE ASSIS HONORATO MUELLA _____

PROF. DR. CLEZIO MARCOS DE NARDIN - INPE _____

PROF. DR. MAURÍCIO JOSÉ ALVES BOLZAM - UFJ _____

Prof.ª Dr.ª Lúcia Vieira

Diretora do IP&D – Univap

São José dos Campos, 29 de setembro de 2020.

Aos meus pais por me ensinarem, desde criança,
O respeito, a educação, a humildade e a bondade;
Aos meus familiares e amigos pelo incentivo;
À minha querida esposa e aos meus amados filhos pelo amor e compreensão.

Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less.

Marie Curie

AGRADECIMENTO

Ao Professor Dr. Paulo Roberto Fagundes, meu orientador, pelos conhecimentos e experiências transmitidas, nas reuniões de trabalho e nos momentos de café, os quais me propiciaram crescimento profissional, pessoal e humano.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Maurício José Alves Bolzan (UFJ), Dr. Clézio Marcos de Nardin (INPE), Dr. Márcio Tadeu de Assis Honorato Muella (UNIVAP) e ao presidente da banca, Dr. Alexandre Tardelli (UNIVAP) pela disponibilidade e pelas sugestões, que foram relevantes para melhorar este trabalho. À UNIVAP pela estrutura física e a todos os professores-pesquisadores pela elevada qualidade do ensino oferecido. Instituição que me orgulho de ter cursado o doutorado e especialmente, ao IP&D lugar que ficará marcado na minha história, lugar em que sempre fui muito bem recebido desde o porteiro Tião, secretária Miriam, Coordenadores do Doutorado, o Prof. Dr. Francisco (o Guga) e hoje o Prof. O Dr. Oli, até a Direção Profa. Dra. Sandra, o Prof. O Dr. Raniero e hoje a Profa. Dra. Lúcia. Sempre muito dispostos a ajudar em tudo que foi preciso.

Agradeço a todos os alunos do PPGFA que tive contato, pois fui bem acolhido desde o primeiro dia. Todos sempre dispostos a ajudar com conhecimento e experiências e essa disponibilidade contribuiu para que crescêssemos juntos através dessas trocas de conhecimentos e experiências, especialmente, durante os cafés (vou sentir muitas saudades dos cafés). Logo, esse é um espaço onde crescemos, amadurecemos, construímos e fortalecemos laços de amizade e companheirismo. Agradeço especialmente aos amigos: Brunno, Antônio Nilson, Eduardo e Alexandre (vulgo mineiro), porque foram parceiros em todos os momentos de ânimo e, principalmente, nos momentos de desânimo.

À CAPES pelo suporte financeiro.

Ao IFTO por me conceder o afastamento e aos colegas de trabalho do Campus Araguatins Dr. Flávio, Me. Francisco, Dr. Fredson e, especialmente, ao Dr. Josafá Carvalho Aguiar, egresso dessa instituição, e hoje, Diretor do IFTO-Araguatins, o qual foi o primeiro do IFTO-Araguatins a vir fazer o doutorado na Univap e, importantes na minha adaptação.

Agradeço à minha família, meus pais, Maria Oneide e Manoel Paiva, pelos ensinamentos e conselhos passados, sempre me incentivando a trilhar o caminho da

honestidade e da dignidade, mostrando a Educação como ferramenta de transformação. Minha mãe professora sabe o poder da educação e sempre nos incentivou a estudar. Meu pai, mesmo sem muita instrução, pois trabalha desde jovem, deu seu apoio e incentivo em todos os passos. Como sou grato a vocês por serem meu exemplo e minhas maiores referências.

De modo muito especial, à minha querida esposa, Iane Paula, que me deu todo o apoio necessário nesses anos de estudos, compartilhando alegrias e dificuldades, cuidando muito bem dos nossos filhos, Ana e Davi Manoel, essa conquista não seria possível sem sua compreensão e como nossos amigos dizem, coragem, pois ficar em Imperatriz-MA trabalhando, cuidando da casa e das crianças, enquanto o esposo está em São José dos Campos-SP estudando, não é pra qualquer uma, muito obrigado, meu amor, não foi fácil, porém vencemos juntos você foi fundamental para que eu chegasse a essa conquista tão almejada por nós, a conclusão do curso de Doutorado em Física e Astronomia.

E, a Deus, sobretudo!

ESTUDO DAS VARIAÇÕES DIÁRIA E MENSAL DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL (EIA) SOBRE O SETOR BRASILEIRO DURANTE 2016 (FASE DECRESCENTE DO CICLO SOLAR 24)

RESUMO

O presente estudo investiga as variações das características da Anomalia Ionosférica Equatorial (*Equatorial Ionization Anomaly - EIA*), no setor brasileiro, em 2016 (fase decrescente do ciclo solar 24), utilizando dados de Conteúdo Eletrônico Total (*Total Electron Content - TEC*). Os dados foram obtidos por meio de 35 receptores de Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System - GPS*) –TEC, de dupla frequência, distribuídos em 3 linhas perpendiculares ao equador magnético, denominadas de setores (oeste, central e leste), do equador magnético até além do pico sul da anomalia. Os dados Conteúdo Eletrônico Total na Vertical (*Vertical Total Electron Content - VTEC*) foram obtidos a partir de dados de TEC das estações de GPS-TEC, que foram comparados aos dados de VTEC calculados pelo modelo *International Reference Ionosphere - IRI*. Notou-se que a EIA apresenta uma variação semianual nos três setores, com máximo principal durante o verão, mínimo durante o inverno e máximo secundário durante a primavera. Além disso, a EIA mostra seu comportamento clássico com uma depressão (vale) ao redor do equador magnético e cristas em baixas latitudes (de $\pm 15^\circ$ a $\pm 20^\circ$). Quando a EIA não é formada, a ionização máxima se localiza em torno do equador magnético e as cristas da anomalia estão ausentes. Durante a investigação, notou-se a formação da EIA atípica, que apresenta múltiplas estruturas. O número de dias, durante 2016, que mostraram EIA formada nos setores oeste, central e leste é de 248 (78,2%), 236 (74,4%) e 265 (83,6%), respectivamente. A EIA não formada é encontrada com maior frequência durante os meses de inverno, e o número de dias de 2016 em que isso ocorre nos setores oeste, central e leste foram 69 (21,8%), 81 (25,6%) e 52 (16,4%), respectivamente. As cristas da EIA mostraram variabilidade significativa na forma, na intensidade, na extensão e no tempo que permanecem formadas, entre os três setores, durante as diferentes estações do ano. Além disso, foram realizadas análises comparativas entre as variações da EIA obtidas por observações de GPS-TEC e pelo modelo IRI-2016 e os resultados são discutidos.

Palavras-chave: EIA. TEC. Variabilidade diária e mensal. IRI-2016.

STUDY OF THE DAILY AND MONTHLY VARIATIONS OF THE EQUATORIAL IONIZATION ANOMALY (EIA) OVER THE BRAZILIAN SECTOR DURING 2016 (DESCENDING PHASE OF THE SOLAR CYCLE 24)

ABSTRACT

It has been noticed recently that the equatorial ionization anomaly (EIA) in the Brazilian eastern, middle, and western sectors present significant longitudinal variability within a short separation due to the presence of typical magnetic field structure over South America. Therefore, the main motivation of this study is to investigate day-to-day and month-to-month characteristics of the EIA in three closely spaced longitudinal sectors over the Brazilian region during the year 2016 in the descending phase of the solar activity. These three longitudinal sectors are perpendicular to the magnetic equator at its largest declination over the globe. The EIA showed a semiannual variation in all sectors with a major maximum during the summer, a minimum during the winter, and secondary maximum during spring. In addition, the EIA shows its classical behavior with a trough around the magnetic equator and crests at low latitudes (from $\pm 15^\circ$ to $\pm 20^\circ$). When the EIA is not developed, the maximum ionization is located around the dip equatorial latitudes and the anomaly crest is absent. The number of days within 1 year that showed clear EIA development in the west, middle, and east sectors is 248 (78.2%), 236 (74.4%), and 265 (83.6%), respectively. The undeveloped/absence of EIA is also found often during the months of winter, and the numbers of such days during 2016 in the west, middle, and east are 69 (21.8%), 81 (25.6%), and 52 (16.4%), respectively. Also, the shape, strength, extent, and lifetimes of EIA crest have shown significant variability between the three sectors during different seasons. Further, a comparative analysis is carried out on the variations of EIA crest and lifetime between GPS observations and IRI-2016 model, and the results are discussed.

Keywords: EIA. TEC. Daily and monthly variability. IRI-2016.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As camadas da atmosfera neutra dividida de acordo com o perfil vertical de temperatura (troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera) ou de acordo com sua composição química (homosfera, heterosfera e exosfera). A termosfera é verificada em dois perfis: Baixa atividade solar (LSA – Low Solar Activity) e alta atividade solar (HSA – High Solar Activity).....	23
Figura 2 - Variação vertical da densidade eletrônica das camadas D, E, F (F1 e F2) durante o dia e a noite, em função da atividade solar. Onde alta e baixa atividade solar são indicadas por linhas contínuas e tracejadas, respectivamente.....	27
Figura 3 - Distribuição média do perfil vertical dos principais constituintes neutros e a distribuição média do perfil vertical dos principais íons e densidade eletrônica das camadas ionosféricas	28
Figura 4 - À esquerda: diagrama esquemático ilustrando o crescimento de uma irregularidade no plasma da ionosfera equatorial de acordo com a instabilidade GR-T. À direita: ilustração da evolução da instabilidade	34
Figura 5 - Representação esquemática do dínamo da região F durante o horário de ocorrência do pico pré-reverso; (a) Terminadouro alinhado com o meridiano magnético. (b) Terminadouro fazendo um ângulo com o meridiano	37
Figura 6 - Ilustração do efeito fonte na ionosfera gerando a anomalia de ionização equatorial. Esquema de forças que atuam sobre o plasma referente a este fenômeno	41
Figura 7 - (A) Ilustração bidimensional da EIA sobre a América do Sul. A cor avermelhada representa os picos da anomalia, um em cada hemisfério (magnético) localizados, aproximadamente, entre 15 e 20° de latitude magnética). (B) ilustra o efeito fonte. As linhas azuis mostram como o plasma se desloca em espiral ao longo das linhas de campo.....	42
Figura 8 - Constelação dos satélites GPS ao redor da Terra	47
Figura 9 - Estrutura Básica do Sinal GPS – modernizada	49
Figura 10 - Segmento de controle do GPS	50
Figura 11 – Principais Componentes de um Receptor GPS.....	51
Figura 12 - Geometria utilizada para obtenção do TEC vertical (VTEC).....	57
Figura 13 - Mapa da América do Sul, onde a curva preta indica o equador magnético e a curva amarela representando o equador geográfico. As três linhas perpendiculares ao equador magnético indicam os setores (leste, central e oeste) onde a EIA é estudada. As estações de GPS-TEC utilizadas nos setores leste, central e oeste estão representadas por ícones verdes, vermelhos e amarelos, respectivamente. As distâncias entre os setores estão indicadas por setas duplas brancas e as distâncias entre os equadores em cada setor estão indicadas por setas duplas amarelas	62
Figura 14 - (A) Variação da média mensal do índice F10.7 cm ao longo de 2016. Os pontos indicam o valor da média mensal e a barra vertical mostra o ± 1 desvio padrão. (B) mostra a variação das médias anuais do índice F10.7 cm ao longo dos ciclos 22, 23 e 24. Os círculos vermelhos, os quadrados verdes e os triângulos azuis indicam as médias anuais dos ciclos solares 22, 23 e 24, respectivamente.....	65
Figura 15 - Parâmetros de entrada do modelo IRI	67
Figura 16 - (A) Mapa mostrando os 12 locais usados para um caso ideal em todas as estações estariam supostamente localizadas igualmente espaçadas entre si sobre a linha branca (ícones azuis). Os ícones amarelos mostram os 10 locais dos receptores	

GPS TEC usados para o setor oeste. (B) Gráficos de contorno mostrando as variações da EIA utilizando as médias mensais do IRI-TEC para fevereiro em função do dip-latitude e de UT. O painel superior mostra características da EIA usando dados do modelo IRI para locais ideais e o painel inferior mostra as características da EIA usando dados do modelo IRI para localização das estações de GPS-TEC..... 68

Figura 17 - Gráficos de contorno de VTEC em função do dip-latitude (eixo Y) e de UT (eixo X), onde observa-se a variabilidade da EIA de janeiro a dezembro de 2016. A Figura (17A) mostra a variabilidade sazonal da EIA, do equador para além da crista da anomalia da EIA no setor oeste brasileiro. (B) O mesmo que a Figura (17A), mas para o setor central brasileiro. (C) O mesmo que a Figura (17A), mas para o setor leste brasileiro 71

Figura 18 - Gráficos de contorno mostrando as variações das médias mensais, onde os valores de VTEC variam de 0 a 50 VTECu em função do dip-latitude e de UT. (A) Máximo principal da EIA (janeiro, fevereiro e março), primeira linha setor leste, segunda linha setor central e terceira linha setor oeste. (B) Segue a mesma relação entre linhas e setores da Figura A, porém para o mínimo da EIA (junho, julho e agosto). (C) Segue a mesma relação entre linhas e setores da Figura A, porém para o máximo secundário da EIA (setembro, outubro e novembro)..... 73

Figura 19 - Gráficos de contorno mostrando a variação média de mês a mês do IRI-VTEC em função do dip-latitude e de UT de janeiro a dezembro de 2016. (A) Variabilidade sazonal da EIA, do equador para além da crista da EIA no setor leste brasileiro. (B) O mesmo que a Figura (19A), mas para o setor central brasileiro. (C) O mesmo que a Figura (19A), mas para o setor oeste brasileiro..... 77

Figura 20 - Comparação da variação diária do entre o GPS-VTEC observado e o IRI-VTEC calculado pelo modelo IRI-2016 em função de UT e dip-latitude em 15 de fevereiro de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados 81

Figura 21 - Comparação da variação diária entre o GPS-VTEC observado e o VTEC-IRI calculado pelo modelo IRI-2016 em função de UT e dip-latitude em 15 de abril de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados 83

Figura 22 - Comparação da variação diária entre o GPS-VTEC observado e o IRI-VTEC calculado pelo modelo IRI-2016 em função de UT e dip-latitude em 15 de junho de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados. 84

Figura 23 - Comparação da variação diária entre o GPS-VTEC observado e o IRI-VTEC calculado pelo modelo IRI-2016 em função de UT e dip-latitude em 15 de setembro 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados 85

Figura 24 - Comparação entre a variação da média mensal do GPS-VTEC e do IRI-VTEC em função de UT e dip-latitude em fevereiro de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados..... 87

Figura 25 - Comparação entre a variação da média mensal do GPS-VTEC e do IRI-VTEC em função de UT e dip-latitude em abril de 2016, nos setores oeste, central e

leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados.....	88
Figura 26 - Comparação entre a variação da média mensal do GPS-VTEC e do IRI-VTEC em função de UT e dip-latitude em junho de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados.....	89
Figura 27 - Comparação entre a variação da média mensal do GPS-VTEC e do IRI-VTEC em função de UT e dip-latitude em setembro de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados.....	90
Figura 28 - Os painéis da esquerda mostram os gráficos de contorno de VTEC em função de UT (eixo X), dip-latitude (eixo Y a esquerda) e latitude geográfica (eixo Y a direita), onde observa-se a evolução da EIA (aproximadamente entre 15:00 e 24:00 UT. As seis linhas pretas verticais, nos painéis à esquerda, destacam os horários (16:00, 17:00, 18:00, 19:00, 20:00 e 21:00 UT) que foram utilizados para gerar os painéis à direita para se estudar de maneira mais detalhada a variação do VTEC nesses horários em função dip-latitude (eixo X inferior) e latitude geográfica (eixo X superior). Os gráficos da direita mostram a variação do VTEC em função do dip-latitude às 16:00, 17:00, 18:00, 19:00, 20:00 e 21:00 UT, indicando a localização das cristas e vale da EIA. As Figuras 28A, 28B e 28C mostram a variação da EIA nos dias 05 de março de 2016, 14 de julho de 2016 e 07 de outubro de 2016, respectivamente	95
Figura 29 - Variações da EIA em (29A) de 15 de março de 2016, (29B) de 15 de junho de 2016 e (29C) de 04 de outubro de 2016. Os painéis superior, intermediário e inferior referem-se aos setores oeste, central e leste brasileiro, respectivamente. Os painéis a esquerda mostram os gráficos de contorno VTEC, nos quais nota-se a evolução da EIA, em função de UT (eixo x), dip-latitude (eixo Y a esquerda) e latitude geográfica (eixo Y a direita). As seis linhas pretas verticais (nos painéis a direita) mostram a variação do VTEC às 16:00, 17:00, 18:00, 19:00, 20:00 e 21:00 UT e destacam o período em que a EIA deveria ser verificada na escala VTEC (eixo Y a esquerda) em função dip-latitude (eixo X inferior) e latitude geográfica (eixo X superior)	102
Figura 30 - As Figuras (30A), (30B) e (30C) mostram a variação da EIA nos dias 18 de fevereiro de 2016, 03 de agosto de 2016 e 10 de outubro de 2016, respectivamente. Os painéis superior, intermediário e inferior referem-se aos setores oeste, central e leste brasileiro, respectivamente. Os painéis à esquerda mostram os gráficos de contorno VTEC nos quais pode-se notar a evolução da EIA, em função de UT (eixo x), dip-latitude (eixo Y a esquerda) e latitude geográfica (eixo Y a direita). As seis linhas pretas verticais (nos painéis a direita) mostram a variação do VTEC às 16:00, 17:00, 18:00, 19:00, 20:00 e 21:00 UT e destacam o período em que a EIA deveria ser verificada na escala VTEC (eixo Y a esquerda) em função dip-latitude (eixo X inferior) e latitude geográfica (eixo X superior)	107
Figura 31 - (a) Variação dia-a-dia da ocorrência da EIA formada (vermelho), não formada/ausente (verde) e geomagneticamente perturbado (branco) para o setor oeste durante o ano de 2016. (b) O mesmo que (a), mas para o setor central. (c) O mesmo que (a), mas para o setor leste	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos no GNSS.....	52
Tabela 2 - Detalhes das estações de GPS usadas na Figura 18: nomes, símbolos, latitudes, longitudes e dip-latidade.	63
Tabela 3 - Número de casos mensal e a porcentagem durante um período geomagnético calmo em que a EIA é formada ou não formada nos setores oeste, central e leste são indicados por sim e não, respectivamente. O número de dias de cada mês e o número de dias perturbados também são mostrados. O padrão vermelho destaca os meses em que a taxa de EIA formada é superior a 75% e o padrão amarelo destaca os meses em que o número de EIA não formada é superior a 25%.	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMHA – Estação de Humaitá
AMPR – Estação de Parintins
AMTE – Estação de Tefé
BABR – Estação de Barreiras
BATF – Estação de Teixeira de Freitas
BELE – Estação de Belém
BOAV – Estação de Boa Vista
C/A – Código de fácil aquisição
CEFE – Estação de Vitória
COSPAR – *Committee for Space Research*
CUIB – Estação de Cuiabá
DGPS – Diferencial GPS
DoD – *Departmento of Defense*
Dst – *Disturbance storm time index*
EIA – *Equatorial Ionization Anomaly*
EUV – Extremo ultravioleta
GNSS – *Global Navigation Satellite System*
GOGY – Estação de Goiânia
GPS – *Global Positioning System*
GSC – *Gradual Storm Commencement*
IAG – *Internacional Association of Geodesy*
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGS – *International GNSS Service*
IMPZ – Estação de Imperatriz
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IRI – *International Reference Ionosphere*

ITAM – Estação de Itacoatiara

JAMG – Estação de Jaíba

JPL – *Jet Propulsion Laboratory*

LT – Tempo local

MABA – Estação de Marabá

MAPA – Estação de Macapá

MCL1 – Estação de Montes Claros 1

MCS – *Master Control Station*

MGIN – Estação de Inconfidentes

MGMC – Estação de Montes Claros 2

MGUB – Estação de Uberlândia

MSCG – Estação de Campo Grande

MTCN – Estação de Canarana

MTCO – Estação de Colider

MTJI – Estação de Juína

MSTID - *Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbance*

NAVSTAR – *Navigation Satellite with time and ranging*

P – Código preciso

PAIT – Estação de Itaituba

PASM – Estação de Santarém

PD – Pseudodistância

PICR – Estação de Corrente

POVE – Estação de Porto Velho

PRGU – Estação de Guarapuava

PRN – *Pseudo-random-noise*

RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RJCG – Estação de Campos dos Goytacazes

ROJI – Estação de Ji-Paraná

S/A – *Selective availability*

SPS – Serviços de posicionamento padrão

SAGA – Estação de São Gabriel da Cachoeira

SCLA – Estação de Lages

SPFR – Estação de Franca

SSW – *Warming stratospheric sudden*

TEC – *Total Electron Content*

TECu – *Total Electron Content Unit*

TID - *Traveling Ionospheric Disturbance*

TOPL – Estação de Palmas

UBA1 – Estação de Ubatuba

UHF – *Ultra High Frequency*

URSI – *Union Radio-Scientifique Internationale*

UT – *Universal Time*

UV – Ultravioleta

VTEC – *Vertical total electron content*

VHF – *Very High Frequency*

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

A_p – Amplitude do código P

A_c – Amplitude do código C/A

$\vec{B}\vec{B}$ – Vetor campo geomagnética

c – Velocidade da luz, $3,0 \times 10^8$ m/s

C_i – Sequência do código C/A

D_i – Fluxo de dados

$\vec{E}\vec{E}$ – Vetor campo elétrico

f – Frequência nominal, Hz

f_s – Frequência do sinal gerado no oscilador do satélite

f_R – Frequência do sinal gerado no oscilador do receptor

f_1 – Frequência da portadora

g – Aceleração da gravidade terrestre, $m\ s^{-2}$

Hm – Altura média da ionosfera

$h\nu$ – Energia de fotoionização

$I_{fR}^S I_{fR}^S$ – Refração ionosférica para a fase da onda portadora

$I_{gR}^S I_{gR}^S$ – Refração ionosférica para o grupo

k – Constante de Boltzmann, $1,381 \times 10^{-23}$ Joules

L1 – Onda portadora do sinal GPS, MHz

L2 – Onda portadora do sinal GPS, MHz

m – Massa molecular, kg

m_R – Efeito multicaminhamento

n – Densidade numérica dos constituintes atmosféricos

N – Vetor densidade eletrônica

N – Ambiguidade na observável fase da onda portadora

N_e – Densidade média de elétrons

$n_e n_e$ – Densidade eletrônica

$n_f n_f$ – Índice de refração para velocidade de fase

ng – Índice de refração para velocidade de grupo

p – Pressão atmosférica, kg m^{-2}

P_i – Sequência do código

q_m – Taxa de produção máxima de fótons

R – Antena receptora

R_m – Raio médio da Terra

S – Satélite

T – Temperatura absoluta, K

t – Tempo

$t_S t_S$ – Instante de emissão do sinal

$t_R t_R$ – Instante de recepção do sinal

z' – Ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico

Z_1 – Variabilidade de altitude

U – Vento zonal

v – Velocidade média de derivas das partículas ionizadas

V_f – Velocidade da fase portadora

V_g – Velocidade da fase de grupo

$\nabla P \nabla P$ – Gradiente de pressão

W_i – Criptografia sobre o código

Gregos

δS – Desvio do relógio do satélite

δR – Desvio do relógio do receptor

$\Phi_n, L2, i$ – Ruído da fase do estado do oscilador

σ – Média do TEC

α_{eff} – Coeficiente de recombinação

ρ – Distância geométrica

φ_R – Fase da onda portadora gerada no receptor

φ_S – Fase da onda portadora gerada no satélite

λ – Comprimento de onda

ϵ_R – Os erros das medidas de pseudodistância

d_{R1}^S, d_{R1}^S – Corresponde o atraso instrumental do satélite na portadora

d_{R2}^S, d_{R2}^S – Corresponde o atraso instrumental do receptor na portadora

$\Delta_f^{iono}, \Delta_f^{iono}$ – Os efeitos de atrasos provocados pela refração da ionosfera

$\Delta_f^{tropo}, \Delta_f^{tropo}$ – Os efeitos de atrasos provocados pela refração da troposfera

Símbolo especial

∇ – Operador nabla

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Atmosfera Terrestre	22
1.1.1 Atmosfera Neutra	23
1.1.2 Ionosfera	25
1.2 Mecanismos de geração de irregularidades	32
1.2.1 Instabilidade Rayleigh-Taylor	32
1.2.2 Os efeitos dos ventos meridionais na evolução e morfologia das irregularidades de plasma	35
1.2.3 Os efeitos da deriva vertical e do ângulo de declinação magnética	36
1.3 Anomalia de Ionização Equatorial (<i>Equatorial Ionization Anomaly - EIA</i>)	39
1.4 O Modelo IRI (International Reference Ionosphere)	43
2 INSTRUMENTAÇÃO	46
2.1 GPS	46
2.1.1 Breve histórico e fundamentos sobre GPS	46
2.1.2 Segmento espacial	47
2.1.3 Características dos sinais GPS	48
2.1.4 Segmento de controle	49
2.1.5 Segmento de usuários	51
2.1.6 Erros sistemáticos envolvidos nas observáveis	51
2.1.7 Alguns Efeitos que estão relacionados com a propagação do sinal GPS	52
2.1.8 Refração ionosférica e a medida do conteúdo eletrônico total	53
2.1.9 Determinação do TEC vertical (VTEC)	57
3 DADOS E METODOLOGIA	59
3.1 Metodologia do modelo IRI	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1 Variação sazonal da EIA sobre o setor brasileiro usando dados de três conjuntos de GPS-TEC	69
4.2 Comparação da EIA entre os setores oeste, central e leste durante o máximo principal, mínimo e máximo secundário	72
4.3 Comparação entre as características da EIA utilizando dados de GPS-TEC e do modelo IRI	76
4.3.1 Variação diária da EIA observada e comparação como a calculada pelo modelo IRI	80
4.3.2 Comparar a variação das características da EIA entre as médias mensais do VTEC a partir dos receptores de GPS-TEC e os calculados pelo modelo IRI	86
5 METODOLOGIA PARA CLASSIFICAÇÃO DA EIA	93
5.1 EIA formada	93
5.2 EIA não formada	100
5.3 EIA Atípica	106

5.4 Análise da variação da classificação dia a dia da EIA 110

6 CONCLUSÕES	116
REFERÊNCIAS	118
ANEXO A	129

1 INTRODUÇÃO

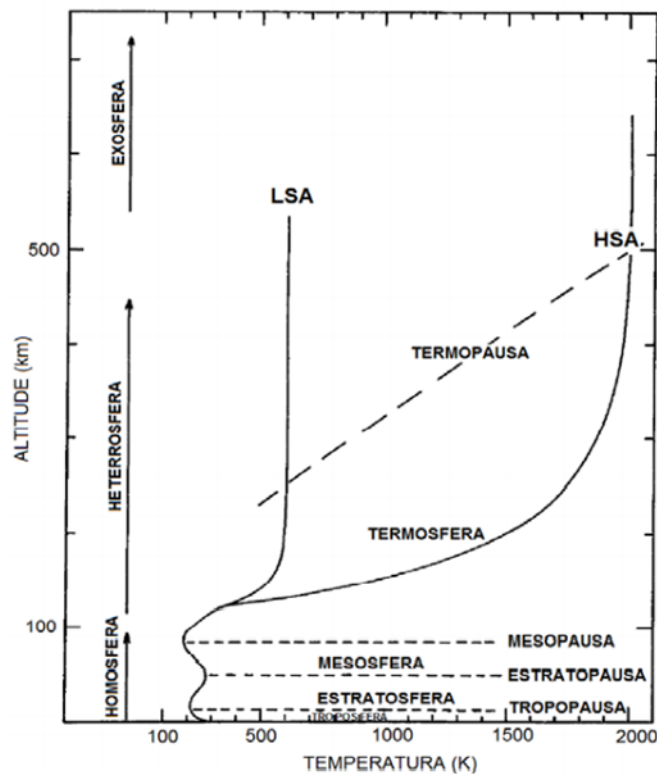
O uso crescente de informações de satélites nas atividades humanas e aplicações tecnológicas deu origem a uma nova sociedade, chamada “sociedade digital”, onde a observação da Terra, o monitoramento do clima, o estudo da atmosfera, o georreferenciamento/posicionamento (GPS), o estudo do campo magnético terrestre e telecomunicações (voz e vídeo) desempenham um papel cada vez mais importante. Porém, as comunicações e a troca de dados entre satélite-satélite e satélite-base terrestre são realizadas através de ondas eletromagnéticas (ondas na faixa de rádio frequência). Estas ondas de rádio sofrem interferência e, em alguns casos extremos, são degradadas ao se propagarem pela ionosfera. A necessidade de conhecer e investigar, em detalhes, o comportamento da ionosfera, tornou-se um tópico de pesquisa importante chamado clima espacial. A ionosfera (plasma) altera a velocidade e a direção de propagação (refração) das ondas de rádio, em relação a sua propagação no vácuo. Além disso, podem ocorrer absorção, espalhamento e reflexão dessas ondas ao se propagarem pela ionosfera (DAVIES, 1990; AARONS, 1997). O principal fator causador de alteração e degradação das ondas de rádio são as variações bruscas na densidade eletrônica ionosférica. Estas variações podem ocorrer em função da hora local, dia-a-dia, mês-a-mês, atividade solar e atividade geomagnética. Temos, na região equatorial e baixas latitudes, um bom exemplo de variação (ionosférica) chamado anomalia de ionização equatorial (*Equatorial Ionization Anomaly* - EIA), que se caracteriza por um aumento da densidade eletrônica da região F ionosférica nas regiões de baixas latitudes (crista) e também por diminuição da densidade eletrônica na região do equador magnético (vale). Deste modo, é de singular importância investigar a EIA, pois sua variabilidade pode interferir na propagação das ondas de rádio.

1.1 Atmosfera Terrestre

A porção da atmosfera terrestre composta por átomos e moléculas neutras pode ser classificada em relação à variação vertical da temperatura e composição química (seção 1.1.1). Chapman (1950), baseado na variação do perfil vertical da temperatura atmosférica, classificou a atmosfera neutra em 4 diferentes camadas:

troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera (RISHBETH; GARRIOTT, 1969), mostradas na Figura 1. Por outro lado, a porção da atmosfera terrestre ionizada, chamada de ionosfera, possui basicamente as camadas D, E e F (Figura 2). Essas camadas são geradas pela radiação solar na faixa do UV, EUV e Raio-X e são controladas pelo campo magnético terrestre, por campos elétricos e o acoplamento atmosfera neutra-ionizada, tais características serão apresentadas na seção 1.1.2 (BANKS; KOCKRTS, 1973; RISHBETH; GARRIOTT, 1969; TASCIONE, 1994).

Figura 1 - As camadas da atmosfera neutra dividida de acordo com o perfil vertical de temperatura (troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera) ou de acordo com sua composição química (homosfera, heterosfera e exosfera). A termosfera é verificada em dois perfis: Baixa atividade solar (LSA – Low Solar Activity) e alta atividade solar (HSA – High Solar Activity)



Fonte: Adaptado de Banks e Kockarts (1973).

1.1.1 Atmosfera Neutra

A atmosfera e a superfície da Terra absorvem radiação solar em vários comprimentos de onda. Este processo gera aquecimento térmico, perda de calor e energia, devido a processos de transporte e processos radiativos. Assim, de acordo com o perfil vertical de variação de temperatura, formam-se as camadas Troposfera,

Estratosfera, Mesosfera e Termosfera ([RISHBETH; GARRIOTT, 1969](#)). Uma descrição sucinta dessas 4 camadas é apresentada a seguir:

Troposfera: Inicia-se na superfície da Terra e pode atingir uma altitude máxima de 7 a 15 km (dependendo da latitude). Concentra cerca de 75 a 80% da massa atmosférica e é, nessa região, que ocorrem os principais fenômenos meteorológicos. A temperatura diminui com o aumento da altitude, até atingir um mínimo de, aproximadamente, 230 K, na tropopausa (região de transição entre a troposfera e a estratosfera).

Estratosfera: Na estratosfera a temperatura aumenta com a altitude, devido a absorção da radiação ultravioleta (UV) pelo Ozônio (O_3), podendo chegar a atingir uma temperatura entre 260 a 270 K. Estende-se do topo da tropopausa até a região limite denominada estratopausa, que pode atingir uma altitude máxima que varia de 40 a 50 km de altitude.

Mesosfera: Nessa região a temperatura diminui com a altitude, é nela que se atinge a menor temperatura da atmosfera terrestre, aproximadamente, 180 K no seu topo. O resfriamento da mesosfera é devido à relaxação vibracional das moléculas de CO_2 (transição vibracional) e a emissão de fótons no infravermelho e no visível. Está situada entre a estratopausa e a mesopausa. Podendo atingir uma altitude máxima de até 90 km de altitude.

Termosfera: Região que se estende de 100 a 1000 km de altitude. Nessa região, a temperatura aumenta com a altitude, até atingir um máximo que varia com o ciclo solar (Veja Figura 1). A temperatura máxima pode variar de 800 a 1000 K, durante o período de mínimo e de 1500 a 2000 K durante o máximo do ciclo solar. O aquecimento é devido a absorção de energia solar na faixa de UV e EUV, que produz O a partir de O_2 por fotodissociação ([BANKS; KOCKRTS, 1973](#), [RISHBETH; GARRIOTT, 1969](#); [TASCIONE, 1994](#)).

Com relação à classificação relacionada com os processos químicos, pode-se dividir a atmosfera em 3 camadas, denominadas de Homosfera, Heterosfera e Exosfera, vide Figura 1.

A Homosfera se estende desde a superfície da terra até, aproximadamente, 100 km de altitude, onde essa região da atmosfera se caracteriza por ter uma proporção constante entre os diversos constituintes atmosféricos. Devido a essa homogeneidade química, ela é chamada de Homosfera. A composição química da

Homosfera é de aproximadamente 78% de N₂, 21% de O₂ e aproximadamente 1% de argônio (Ar) e dióxido de carbono (CO₂). Os gases (H₂ e O₃) e o vapor de água H₂O, são minoritários, mas são importantes por absorverem radiação solar diretamente na faixa do UV e EUV.

A Heterosfera, inicia-se no topo da Homosfera e vai até, aproximadamente, 500 km de altitude, onde a proporção dos constituintes não é constante à medida que a altitude aumenta. Na Heterosfera, a distribuição dos constituintes varia de acordo com o seu peso molecular. Os principais constituintes da Heterosfera são Hidrogênio (H), Hélio (He), Oxigênio (O), Nitrogênio (N₂), oxigênio molecular (O₂) e Argônio (Ar). Os gases mais pesados (Ar, O₂ e N₂) dominam a base da Heterosfera, enquanto os mais leves (H e H₂), estão no topo.

Na Exosfera, os átomos (H e He) podem escapar para o meio interplanetário, devido a menor ação do campo gravitacional terrestre (comparada à ação do campo em altitudes menores), a alta energia cinética das partículas e a baixa frequência de colisões entre átomos e moléculas.

1.1.2 Ionosfera

A Ionosfera é a porção ionizada da atmosfera terrestre, compreendida entre, aproximadamente, 60 e 1000 km de altura (Figura 2). A formação das camadas ionosféricas depende do equilíbrio entre produção e perda de elétrons e íons. A equação da continuidade expressa a variação temporal e espacial da densidade eletrônica (DAVIES, 1990):

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = q - L - \vec{\nabla} \cdot (n_e \vec{v}) \quad \frac{\partial n_e}{\partial t} = q - L - \vec{\nabla} \cdot (n_e \vec{v}) \quad (1)$$

onde $\partial n_e / \partial t$ representa a taxa de variação temporal da densidade eletrônica, q é a taxa de produção, L é a taxa de perda (que pode ser proporcional a n_e^2 nas regiões D e E ou proporcional $n_e n_s$ da região F) e $\vec{\nabla} \cdot (n_e \vec{v})$ é o termo de transporte do plasma (\vec{v} a velocidade do plasma).

Os principais fatores que influenciam na formação dos perfis ionosféricos, apresentados na Figura 2 são: 1. Absorção da radiação solar que varia com as propriedades das partículas que compõem a atmosfera, 2. A física da recombinação, que depende da densidade atmosférica (que muda com a altura), 3. A composição da atmosfera, que muda com a altura e o 4 é o termo de transporte que depende da eletrodinâmica de cada região. Destarte, os três principais perfis ionosféricos (D, E e F) podem ser associados a diferentes processos físicos e químicos.

A radiação solar, representada na Equação 2, é a principal fonte de ionização dos átomos e moléculas.

$$I(h) = I(\infty) \exp \left[-\sigma n_0 H_n \sec \chi \exp \left(\frac{-(h-h_0)}{H_n} \right) - \exp \left(\frac{(h_m-h)}{H_n} \right) \right].$$

$$I(h) = I(\infty) \exp \left[-\sigma n_0 H_n \sec \chi \exp \left(\frac{-(h-h_0)}{H_n} \right) - \exp \left(\frac{(h_m-h)}{H_n} \right) \right]. \quad (2)$$

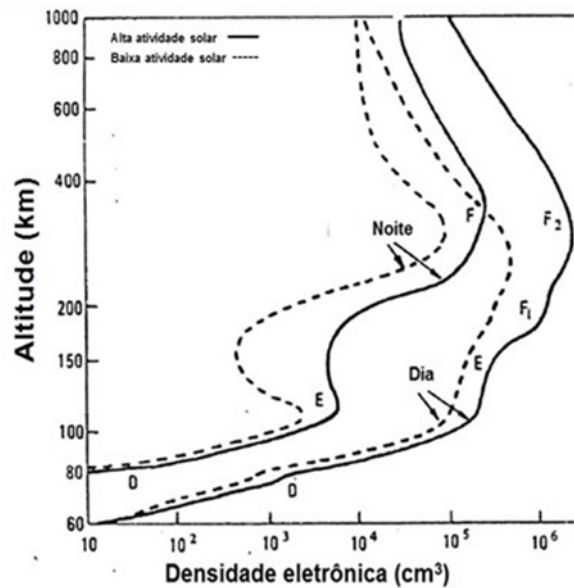
Onde, I é intensidade de radiação solar, σ é a taxa de absorção do fóton e χ é o ângulo zenital formado entre a direção da radiação e a direção vertical do plano de incidência da radiação. H_n é altura de escala atmosférica.

A taxa de produção iônica q é dada por meio da Função de Chapman:

$$q = q_m \exp \left[1 + \left(\frac{(h_m-h_0)}{H_n} \right) - \exp \left(\frac{(h_m-h)}{H_n} \right) \right]$$

$$q = q_m \exp \left[1 + \left(\frac{(h_m-h_0)}{H_n} \right) - \exp \left(\frac{(h_m-h)}{H_n} \right) \right]. \quad (3)$$

Figura 2 - Variação vertical da densidade eletrônica das camadas D, E, F (F1 e F2) durante o dia e a noite, em função da atividade solar. Onde alta e baixa atividade solar são indicadas por linhas contínuas e tracejadas, respectivamente

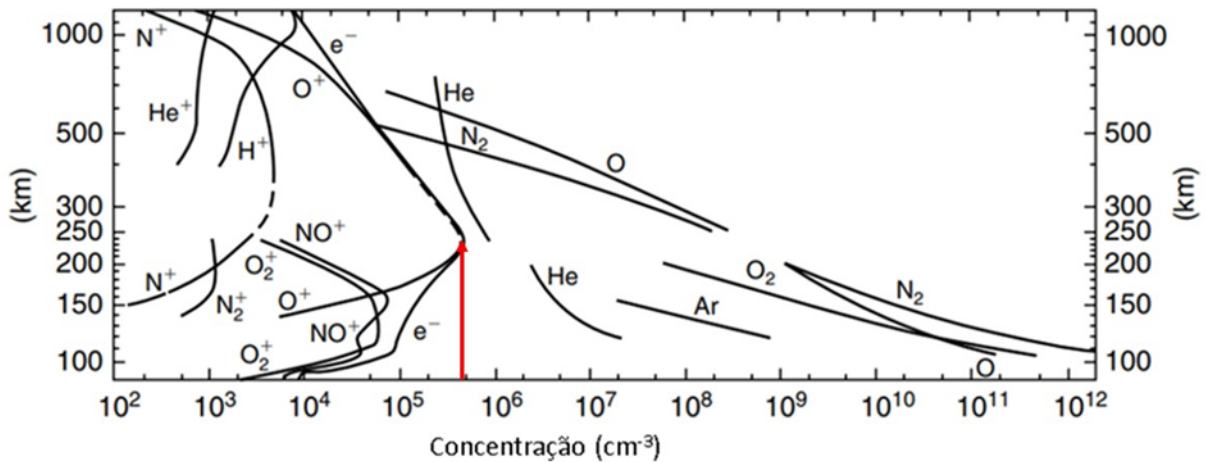


Fonte: Tascione (1994).

Como pode ser observado na Figura 2, a ionização ocorre em toda a extensão vertical da ionosfera durante o dia, e a densidade eletrônica máxima ocorre em torno de 300 km de altitude, com os valores máximos entre 10^6 a 10^7 elétrons/cm³, durante o período de atividade solar máxima, enquanto os menores valores de densidade ocorrem durante a noite, no período de atividade solar mínima. Acima da densidade máxima de elétrons da região F2, a densidade eletrônica diminui uniformemente. Não só a densidade geral de elétrons diminui à noite, mas as camadas F1 e D desaparecem logo após o pôr-do-sol (MOOR, 2011; TASCIONE, 1994).

A Figura 3 apresenta a distribuição da atmosfera neutra e da ionosfera, sob condições de baixa atividade solar. É possível identificar o pico de densidade, aproximadamente, em 250 km de altitude destacado por uma seta vermelha, conhecido como pico da região F. Nessas condições, a máxima densidade iônica (O^+) e eletrônica (e^-) é observada próxima de 10^6 partículas /cm³. O perfil vertical de elétrons pode ser modificado por reações químicas (fotoionização, recombinação dissociativa e recombinação radiativa) e pelo transporte. (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; DAVIES; BAKER, 1965; KELLEY, 2009).

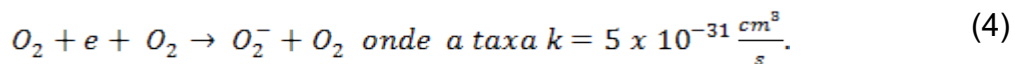
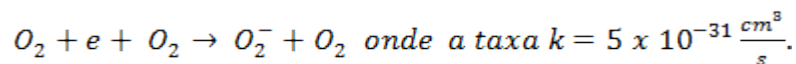
Figura 3 - Distribuição média do perfil vertical dos principais constituintes neutros e a distribuição média do perfil vertical dos principais íons e densidade eletrônica das camadas ionosféricas



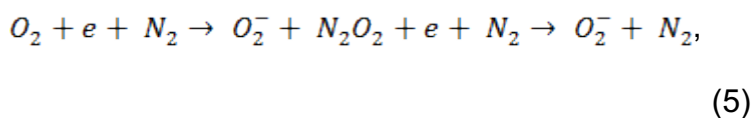
Fonte: adaptado de Kelley (2009).

Região D: Região da ionosfera entre 50 e 95 km, caracterizada pela baixa densidade iônica e formada pela absorção da radiação cuja seção transversal é menor que 10^{-19} cm^2 , que inclui raios-X, com $\lambda < 10 \text{ \AA}$, radiação ultravioleta, com $\lambda > 1750 \text{ \AA}$ e raios cósmicos, que são importantes nesta região da baixa ionosfera. Por meio dessa interação fotoiônica surgem os íons N_2^+ , N_2^+ e O_2^+ , O_2^+ . Outra radiação importante na região D é a Lyman- α ($\lambda = 1216 \text{ \AA}$), responsável pela formação do íon NO^+ (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; BANKS; KOCKARTS, 1973).

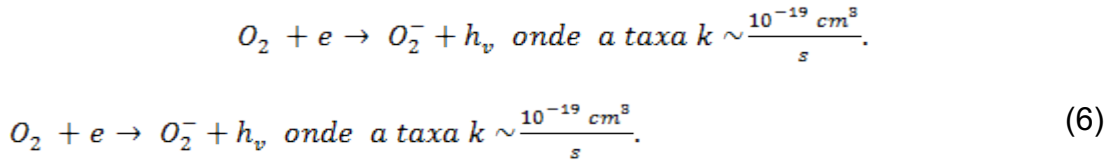
Nesta região, a produção de íons negativos ocorre por reações químicas envolvendo três reagentes mais importantes nas altas densidades da região D:



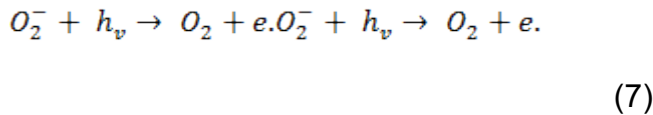
o terceiro reagente pode ser N_2 , porém neste caso, tem-se:



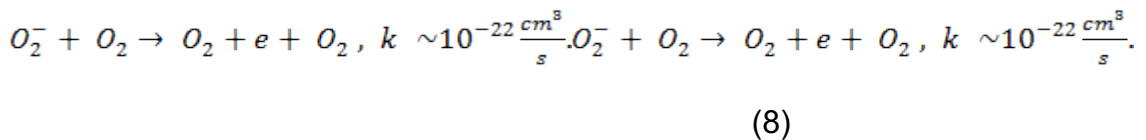
Sendo o coeficiente é muito menor. A reação com três reagentes é mais efetiva em altas densidades da região D ($[O_2] \sim 10^{13}$ para 10^{14} cm^{-3})



O processo de perda consistiu na remoção dos elétrons de O_2^- O_2^- durante o dia por *photodetachment* (foto separação)



E separação por colisões



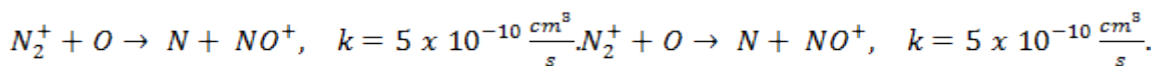
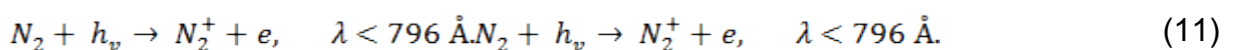
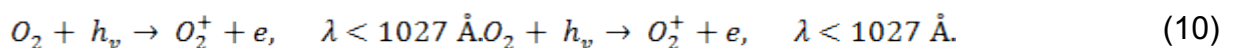
Um processo dominante de perda iônica é o processo de perda quadrática:

$$L(n^+) = \alpha n_e^2 L(n^+) = \alpha n_e^2. \quad (9)$$

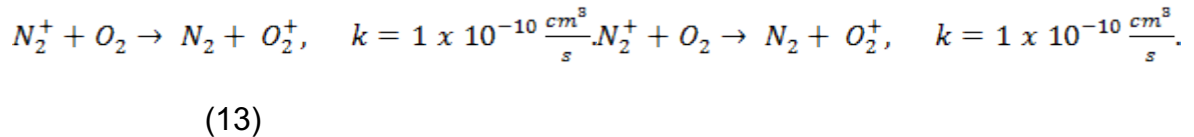
Onde α é o coeficiente de recombinação efetiva.

Região E: É formada pela absorção da radiação cuja seção transversal é menor que $5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$. A principal faixa de radiação para sua formação é a radiação solar no intervalo entre 100 e 310 Å e de $\lambda > 800 \text{ Å}$. As radiações, no espectro dos raios-X ($\lambda > 10 - 00 \text{ Å}$), provocam o surgimento dos íons N_2^+ e O_2^+ , a linha Lyman- β em $\lambda = 1025 \text{ Å}$ e a 34 linha C (III) em $\lambda = 977 \text{ Å}$ são importantes para a formação do íon $O_2^+ O_2^+$, e Lyman-*contínuo contínuo* ($\lambda < 910 \text{ Å}$) para o $O^+ O^+$ (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; BANKS; KOCKARTS, 1973; TASCIONE 1994).

Principais reações de formação de íons:

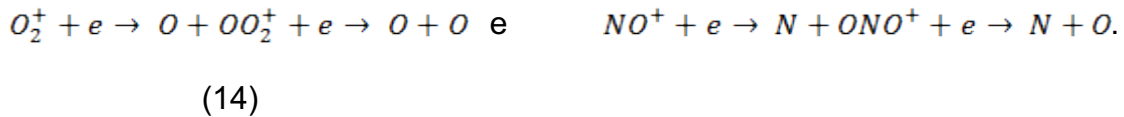


(12)

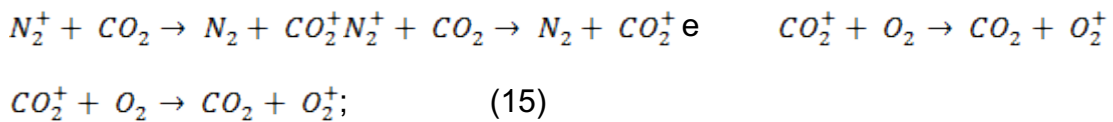


Processos dominantes de perda iônica são:

1. Recombinação eletrônica dissociativa:



2. Troca de carga:

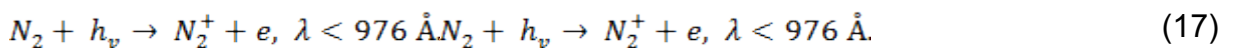
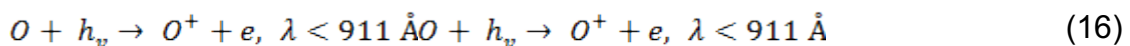


3. Processo de perda quadrática (equação 09).

Região F: É formada pela absorção da radiação com seção transversal maior que 10^{-17} cm^2 . A radiação no EUV, na faixa entre $796 < \lambda < 910 \text{ \AA}$, é a principal fonte de ionização da camada F, e é importante na geração dos íons O^+ e O_2^+ , este em menor quantidade. A faixa de λ entre $796 - 732 \text{ \AA}$, por sua vez, é importante na formação dos íons N_2^+ , O_2^+ , e H^+ . Observa-se que na região F O^+O^+ é o íon dominante.

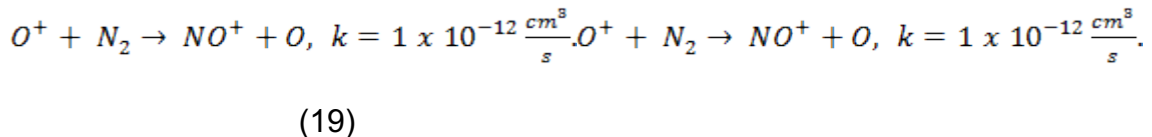
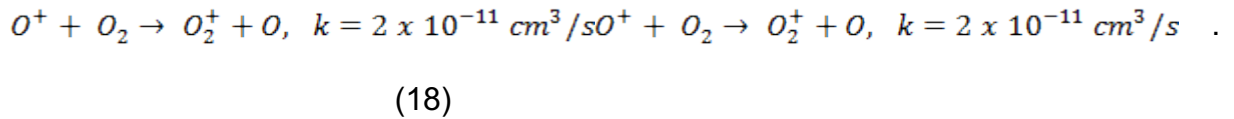
A radiação que compreende a faixa de $\lambda < 732 \text{ \AA}$, é importante na formação de N_2^+ , N_2^+ , O^+O^+ , $O_2^+O_2^+$, H^+H^+ e He^+He^+ ($\lambda \leq 504,3 \text{ \AA}$) (BANKS; KOCKARTS, 1973; NOGUEIRA, 2009).

Na região F1, a formação de íons ocorre, sobretudo, por fotoionização:



A característica distintiva entre a camada E e a camada F1 é que os íons atômicos que compõem a região F1 devem transferir sua carga para moléculas antes da recombinação porque a recombinação é radiativa. Na camada F1, ocorre a transição entre os processos de perda iônica quadrática e linear. Os processos de perda iônica quadrática e linear e seus respectivos coeficientes, α e β , têm características distintas: o coeficiente α é dependente da temperatura e independente da altura, o coeficiente β sofre variação em função da concentração molecular e

decrece, rapidamente, com a altura (Processo de perda linear: $L(n^+) = \beta n_e$
 $L(n^+) = \beta n_e$).



A camada F2 tem comportamento diurno e noturno, sendo a única a permanecer durante a noite. É verificada a partir de 200 km de altura. A principal fonte de ionização é a radiação EUV e comprimentos de onda de Raio-x. Os principais constituintes que são inicialmente ionizados na camada F2 são o O e o N_2 .

Devido à baixa densidade atmosférica em altas altitudes, a camada F2 se mantém durante à noite, maiormente, pela baixa eficiência do processo de recombinação iônica.

A camada F3 foi proposta por [Balan e Bailey \(1995\)](#), [Jenkins et al. \(1997\)](#); inicialmente chamada de camada G. É normalmente verificada, em regiões próximas ao equador magnético e de baixas latitudes, tendo comportamento diurno ([TARDELLI, 2016](#)). Posteriormente [Tardelli e Fagundes \(2015\)](#) observaram uma quarta estratificação da camada F (F4), em regiões perto do equador magnético.

Nas regiões acima de 150 - 200 km, a escala temporal para o processo de transporte torna-se comparável com as de reações iônicas, tal que a distribuição da densidade iônica não é controlada somente pelos efeitos locais (produção e perda), mas também por um sistema envolvendo difusão de íons das regiões de produção para as regiões de perda.

Os principais aspectos que são responsáveis por controlar a dinâmica (transporte e movimento) do plasma ionosférico são:

a) Ventos Neutros: são formados pela maré atmosférica e surgem mediante os gradientes de pressão causados por aquecimento solar, que produzem forças de arraste proporcionais à diferença entre a velocidade do vento U e a velocidade das partículas carregadas (v) e as respectivas frequências de colisão.

- b) Campos Elétricos: são produzidos por ventos e são originados pelos dínamos da região E (durante o dia) e da região F (durante a noite). Íons e elétrons são movidos por este campo elétrico; a deriva eletromagnética resultante da interação $\vec{E} \times \vec{B}$ transporta o plasma perpendicularmente ao campo magnético.
- c) Gradientes de Pressão e Efeitos Gravitacionais: o plasma ionosférico tende a ter uma difusão ao longo das linhas de campo geomagnético, devido aos efeitos gravitacionais e aos gradientes de pressão.

O setor sul-americano está sob ação de processos eletrodinâmicos que são peculiares das regiões equatoriais e de baixa latitude (JONAH *et al.*, 2015).

No setor brasileiro, pesquisas sobre a ionosfera são realizadas para investigar fenômenos que causam variações nos valores do TEC, por exemplo a EIA. Por estar na região equatorial, o Brasil sofre de forma mais acentuada os efeitos desses fenômenos ionosféricos (CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2003, 2007; DAL POZ; CAMARGO, 2006; JONAH *et al.*, 2015), pois a declinação das linhas de campo magnético é maior, o gradiente entre o equador magnético e a região da crista da EIA é mais intenso na região brasileira, o que resulta em grande variação temporal e espacial do TEC (DASGUPTA; PAUL; DAS, 2007; MUELLA *et al.*, 2010). Essas peculiaridades fomentam os estudos que têm sido realizados por vários pesquisadores, tanto sobre a variação do TEC no setor brasileiro, quanto sobre o impacto da ionosfera no posicionamento com GPS (CAMARGO, 1999; FONSECA JUNIOR, 2002; MATSUOKA; CAMARGO, 2004; MATSUOKA; CAMARGO, 2004; DAL POZ; CAMARGO, 2006; MATSUOKA; CAMARGO; BATISTA, 2006; SILVA; KRUEGER; VEIGA, 2006; JONAH *et al.*, 2015).

1. 2 Mecanismos de geração de irregularidades

1.2.1 Instabilidade Rayleigh-Taylor

Booker e Wells (1938) foram pioneiros no estudo de irregularidades ionosféricas equatoriais, utilizando uma ionossonda eles observaram ionogramas com múltiplos ecos na camada F, durante a noite. Estas múltiplas reflexões foram atribuídas a irregularidades no plasma ionosférico da camada F. Posteriormente, foi proposto que o mecanismo responsável pela geração dessas irregularidades de

grande escala na região F equatorial seriam instabilidades do tipo Rayleigh-Taylor (R-T), originalmente sugerida por [Dungey \(1956\)](#). O mecanismo de instabilidade R-T surge devido à combinação de perturbações oscilatórias na base da camada F e uma rápida subida da camada F, logo após ao entardecer. A rápida subida da camada F é devido a uma intensificação do campo elétrico que está para leste durante o dia e antes de reverter para oeste durante a noite apresenta uma intensificação (pico pré-reverso do campo elétrico zonal). Geralmente as perturbações oscilatórias na base da camada F são atribuídas as ondas de gravidade/MSTIDs e são a semeadoras da instabilidade R-T e a rápida subida da camada F amplifica a instabilidade R-T.

[Dungey \(1956\)](#) foi o primeiro a propor que a instabilidade gravitacional Rayleigh-Taylor (R-T), que surge devido ao efeito da força de gravidade na presença do campo magnético da Terra, contribuiria para geração das irregularidades do plasma na base da região F equatorial, o que explicaria os traços espalhados nos ecos refletidos da região F equatorial, observados a partir dos ionogramas. [Dagg \(1957\)](#), referenciado por [Fejer e Kelley \(1980\)](#), sugeriu que as irregularidades surgiam, do acoplamento das regiões E e F, e que elas, eram produzidas inicialmente por um movimento turbulento (ondas de gravidade/MSTIDs) na região do dínamo (região E) e transferidas para a região F devido à alta condutividade ao longo das linhas de campo magnético. [Martyn \(1959\)](#), referenciado por [Fejer e Kelley \(1980\)](#), foi o primeiro a propor que o mecanismo gerador do espalhamento da região F equatorial era a instabilidade $\vec{E} \times \vec{B} \cdot \vec{E} \times \vec{B}$. [Calvert \(1963\)](#) sugeriu que um vento descendente, causado pelo resfriamento da atmosfera superior que surge logo após ao entardecer poderia amplificar as irregularidades ionosféricas da região equatorial (Região F). Esse mecanismo proporcionaria o mesmo grau de instabilidade na base da camada F que a instabilidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B} \cdot \vec{E} \times \vec{B}$.

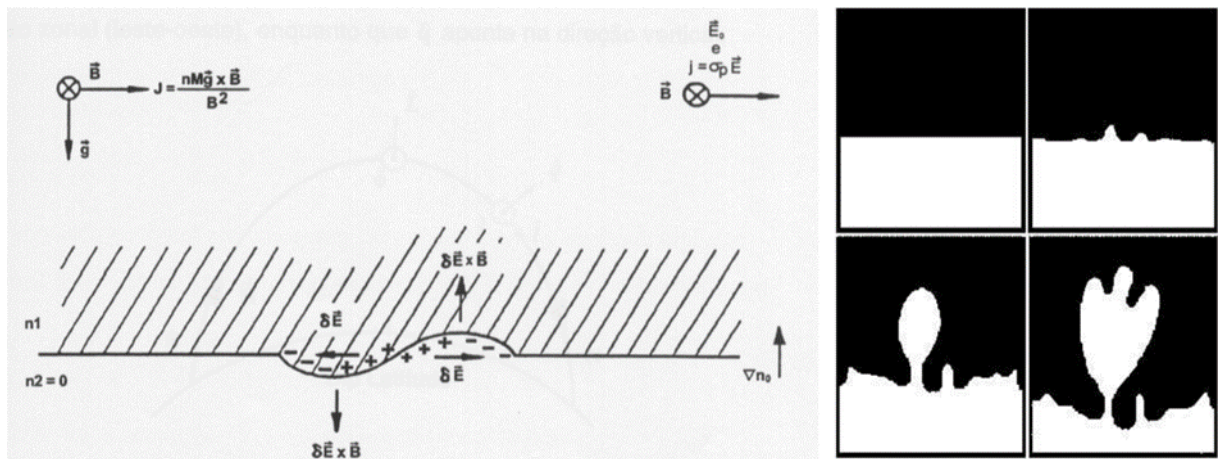
A visão teórica discutida pelos autores é fundamentada em processos de instabilidade de plasma, nas quais a instabilidade Gravitacional Rayleigh-Taylor e a instabilidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B} \cdot \vec{E} \times \vec{B}$ têm sido as teorias mais aceitas como mecanismos geradores das irregularidades na região F da ionosfera.

A Figura 4 apresenta a presença do campo magnético \vec{B} , uma corrente \vec{j} se desenvolve perpendicularmente a \vec{g} e \vec{B} e flui na direção leste-oeste, entre as regiões fronteiriças de concentrações elevadas e rarefeitas, tendo como magnitude,

$$J_x = \frac{nMg}{B}, J_x = \frac{nMg}{B}, \quad (20)$$

em que n denota a densidade do plasma e M a massa molecular dos íons.

Figura 4 - À esquerda: diagrama esquemático ilustrando o crescimento de uma irregularidade no plasma da ionosfera equatorial de acordo com a instabilidade GR-T. À direita: ilustração da evolução da instabilidade



FONTE: Kelley (2009).

Ao longo do dia, a ionosfera equatorial sofre um deslocamento para cima em consequência da deriva eletromagnética $\vec{E} \times \vec{B}$. Esse movimento vertical do plasma ionosférico na região tropical é resultado do campo elétrico dirigido para leste, gerado pelo dínamo da região E na presença do campo magnético (dirigido para norte), que é transmitido à região F em razão da alta condutividade existente ao longo das linhas de campo magnético. À noite, a direção do campo elétrico é invertida, provocando um movimento do plasma ionosférico para baixo. No entanto, antes da inversão, próximo ao terminadouro do anoitecer, a deriva eletromagnética sofre um aumento abrupto, originando um máximo na velocidade de deriva vertical da ionosfera denominado pico pré-reverso, causado pelo aparecimento de campos elétricos de polarização na região F. Como após o pôr-do-sol a região E, rapidamente, desaparece devido ao processo de recombinação e, não há condutividade suficiente para curto-circuitar os campos elétricos de polarização da região F, o efeito dínamo da região F

torna-se eficiente e contribui para a subida da camada ionizada por meio do mecanismo $\vec{E} \times \vec{B} \vec{E} \times \vec{B}$.

1.2.2 Os efeitos dos ventos meridionais na evolução e morfologia das irregularidades de plasma

O valor integrado do gradiente de densidade pode ser controlado pelas condições de simetria/assimetria na distribuição de ionização em ambos os hemisférios da EIA e que são provocadas por um vento meridional transequatorial.

Os ventos transequatoriais movem o plasma para cima no hemisfério em que ele estiver em direção ao equador e, para baixo, no hemisfério em que ele estiver se afastando do equador. Deste modo, naquele hemisfério em que o vento baixa a camada, o plasma da região F é movido para altitudes em que a v_{in} v_{in} é maior e, onde a perda por recombinação dissociativa também é maior provocando, com isso, uma contribuição para a redução na taxa de crescimento da instabilidade. No hemisfério em que o vento sobe a camada o efeito oposto será observado.

Os ventos meridionais horizontais, em especial, os ventos transequatoriais, podem causar uma significativa assimetria na distribuição de ionização sobre as cristas da anomalia equatorial (SOUZA *et al.*, 2000; SEBA *et al.*, 2018) e, conseqüentemente, uma assimetria na distribuição da condutividade e da taxa de recombinação ao longo da linha de campo. O aumento na condutividade e na taxa de recombinação, no lado em que o vento baixa a camada, geralmente, não é compensado pela redução nestes fatores no lado em que o vento sobe a camada (ABDU, 2001), aumentando a contribuição da quantidade integrada destes fatores sobre a taxa de crescimento. Da mesma forma, o decréscimo que a ação destes ventos provoca no gradiente de densidade, integrado ao longo do tubo de fluxo, faz com que a taxa de crescimento da instabilidade diminua. Abdu (2001) aponta que a assimetria na EIA também pode modificar o gradiente longitudinal da condutividade Pedersen integrada e, em contrapartida, pode alterar o campo elétrico zonal responsável pela deriva vertical do pico pré-reverso. Portanto, o efeito direto dos ventos neutros meridionais é o de modificar a distribuição da densidade do plasma na ionosfera, reduzindo os gradientes de densidade integrados ao longo das linhas de

campo, aumentando a condutividade correspondente e a taxa de recombinação e, conseqüentemente, suprimindo o mecanismo de instabilidade.

Um vento neutro meridional/transequatorial pode modificar a taxa de crescimento da instabilidade GR-T de três formas: (1) agindo para reduzir o gradiente de densidade integrado ao longo do tubo de fluxo; (2) atuando para aumentar a condutividade integrada ao longo do tubo de fluxo, e; (3) atuando na modificação do gradiente de condutividade longitudinal, através do terminadouro do anoitecer, para aumentar os campos elétricos de polarização na região F, responsáveis pela deriva vertical da camada durante o horário de ocorrência do pico pré-reverso. A variabilidade da EIA está fortemente ligada a distúrbios do campo geomagnético, mas durante os períodos geomagnéticos calmos, o principal agente para a deriva do plasma, na região equatorial, é a interação entre a ionosfera e os ventos termosféricos (RICHMOND, 1995).

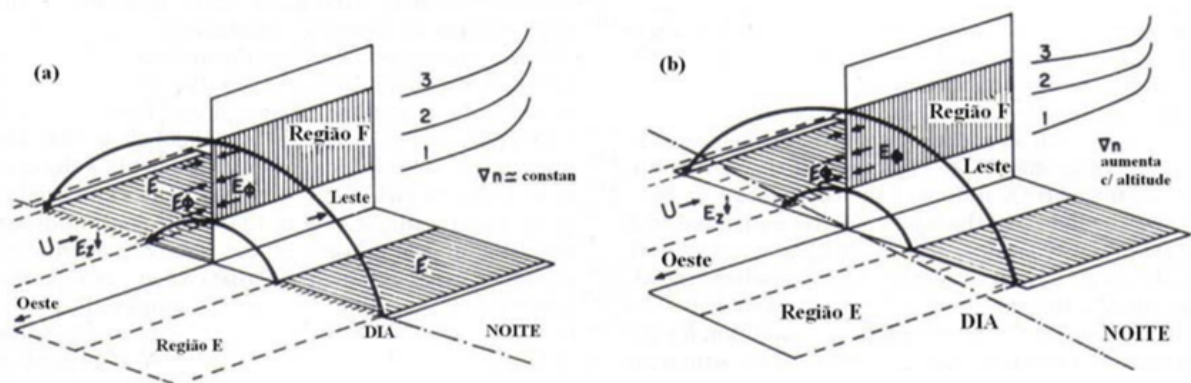
Os ventos são responsáveis pelo mecanismo dínamo que gera os campos elétricos ionosféricos. Esses campos, por sua vez, são fundamentais para a formação do EIA. Os ventos meridionais na direção do Equador aumentam a ionização, transportando o plasma para altitudes mais elevadas, onde a reação de recombinação é baixa, enquanto os ventos polares reduzem ionização, transportando plasma para altitudes mais baixas, onde a reação de recombinação é alta (RAM; SU; LIU, 2009). Os ventos transequatoriais causam redistribuição significativa de ionização resultando em assimetria da EIA e esta assimetria influencia no crescimento da instabilidade do plasma (PAUL; DASGUPTA, 2010).

1.2.3 Os efeitos da deriva vertical e do ângulo de declinação magnética

Um dos fatores que está bem estabelecido, no estudo de irregularidades ionosféricas, é a forte correlação existente entre o movimento de deriva vertical da ionosfera, ao entardecer, e a ocorrência das irregularidades na região F. De acordo com a teoria do dínamo da região F (Fig. 5), ventos neutros termosféricos para leste, através do terminadouro do anoitecer, produzem um campo elétrico vertical para baixo ($E_z = -\vec{U}E_z = -\vec{U} \times \vec{B}\vec{B}$) que mapeia ao longo das linhas de campo magnético para um campo ($\vec{E}_\theta \vec{E}_\theta$) que aponta em direção ao equador, nas camadas E conjugadas.

Este campo $(\vec{E}_\theta)\vec{E}_\theta$ tende a direcionar uma corrente Hall para oeste, mas em virtude da descontinuidade na condutividade Hall, do dia para a noite, não há fluxo de corrente no lado noturno, de forma que um acúmulo das cargas surge na região do terminadouro. Esse acúmulo de cargas dá origem a campos elétricos de polarização que são mapeados para a região F, fazendo com que o plasma se mova com uma velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}/B^2$ (ABDU *et al.*, 1992).

Figura 5 - Representação esquemática do dínamo da região F durante o horário de ocorrência do pico pré-reverso; (a) Terminadouro alinhado com o meridiano magnético. (b) Terminadouro fazendo um ângulo com o meridiano



FONTE: Adaptada de Abdu *et al.* (1992)

Ventos zonais para leste, mais fortes, vão produzir, diretamente, campos elétricos de polarização mais intensos na região F. Com relação à magnitude do gradiente longitudinal da condutividade, ela é determinada pelo grau de simultaneidade entre o horário do pôr-do-sol nas duas regiões E magneticamente conjugadas, que estão acopladas à região F equatorial. Quando o pôr-do-sol é simultâneo nas duas regiões E conjugadas, o que ocorre quando há um perfeito alinhamento do terminadouro com o meridiano magnético, valores maiores de gradiente de condutividade serão produzidos. Isso faz com que o circuito que liga às duas regiões conjugadas seja interrompido simultaneamente, o que favorece a aparição de campos elétricos de polarização na região F com magnitudes relativamente maiores, e que resulta num pico pré-reverso na deriva vertical do plasma maior, porém, com menor duração. Por outro lado, enquanto uma das regiões E permanecer iluminada pelo sol, haverá condutividade e, por conseguinte, mesmo que um dos circuitos esteja interrompido, ocorrerá fluxo de carga pelo outro lado, o que

pode ser traduzido por uma variação mais lenta do gradiente de condutividade. Neste caso, ter-se-á uma deriva vertical do pico pré-reverso de menor magnitude, todavia com maior duração. Uma variação mais lenta do gradiente de condutividade ou um aumento da condutividade integrada em baixas altitudes atuará diretamente para diminuir a taxa de crescimento da instabilidade R-T e, com isso, prevenir o desenvolvimento de irregularidades de plasma (SOBRAL; ABDU, 1991; ABDU, 2001).

Desta forma, o ângulo de declinação magnética altera as dependências longitudinais e sazonais do efeito dínamo da região F sobre a magnitude do pico pré-reverso da deriva vertical e, conseqüentemente, na geração das irregularidades do plasma na região F. Como exemplo, no setor longitudinal brasileiro, onde a declinação magnética é elevada (aproximadamente 22° oeste), um aumento na ocorrência das irregularidades da região F tende a surgir durante os meses do solstício de verão, quando o terminadouro do anoitecer está proximamente alinhado ao meridiano magnético, o que corresponde a um pôr-do-sol quase simultâneo nas regiões E conjugadas.

Sendo assim, como efeito do ângulo de declinação magnética elevado, tem-se uma alteração do gradiente longitudinal (para oeste) da condutividade Pedersen integrada ao longo do tubo de fluxo magnético através do terminadouro e, conseqüentemente, a velocidade de deriva vertical da camada pode ser intensificado (ABDU, 2001). De acordo com Abdu *et al* (2003), este máximo na ocorrência das irregularidades tende a ficar mais centrado nos meses do solstício de verão com o aumento da atividade solar.

Durante o verão e os anos de atividade solar máxima, o fluxo solar e a densidade do plasma ambiente aumentam favorecendo, com isso, o aumento da taxa de crescimento da instabilidade GR-T. Todos estes fatores contribuem para que fortes irregularidades na região F possam ser observadas e apresentarem tempos de vida maiores. Porém, na condição de perfeito alinhamento entre o terminadouro e o meridiano magnético (∇n invariante), tende a ocorrer uma diminuição na eficiência para o crescimento das irregularidades. Fejer, Scherliess e Paula (1999) atribuíram a ocorrência das irregularidades na região F, como consequência das variabilidades da deriva vertical do plasma na ionosfera equatorial. O efeito da atividade geomagnética sobre as irregularidades pode estar, diretamente, relacionado com a resposta dos campos elétricos zonais na região equatorial às perturbações do campo magnético

terrestre, penetração de campos elétricos e a ação de ventos neutros perturbados. O desenvolvimento da EIA pode ser drasticamente alterado por perturbações magnetosféricas. Outras fontes associadas à modificação da EIA são: campos elétricos de dínamo perturbado (BLANC; RICHMOND, 1980).

1.3 Anomalia de Ionização Equatorial (*Equatorial Ionization Anomaly - EIA*)

A radiação solar incide diretamente na região equatorial, portanto espera-se que a densidade eletrônica ionosférica na região equatorial seja máxima e diminui ao passo que se afasta da região equatorial. Entretanto, medidas da variação latitudinal da densidade eletrônica contradisseram está expectativa inicial (NAMBA; MAEDA, 1939; APPLETON, 1946). Observações da variação latitudinal da densidade eletrônica mostrou que existe um mínimo da densidade eletrônica (vale) no equador magnético e máximos (cristas) de densidade eletrônica em baixas latitudes (aproximadamente $\pm 15^\circ$ latitudes magnéticas).

A relação crista-vale pode atingir valores de até 1,6 quando a densidade eletrônica é máxima na crista (N_{max}). Essa estrutura é conhecida como Anomalia de Ionização Equatorial (EIA), sendo um fenômeno tipicamente diurno e, por conseguinte, abrange uma parte considerável da região iluminada da Terra. A posição das cristas e a razão crista-vale variam com a hora local, estação do ano e atividade solar (BALAN; SOUZA; BAILEY, 2018).

Após a descoberta da EIA, várias teorias como a teoria da difusão de Mitra (1946) e a teoria da deriva eletrodinâmica de Martyn (1955) foram sugeridas para explicar a EIA. De acordo com a teoria de difusão (Mitra, 1946) o plasma difunde-se, ao longo das linhas de campo magnético terrestre da região de alta densidade eletrônica (equador), até a baixas latitudes sob a influência das forças de gravidade e gradiente de pressão. Martyn (1955) propôs que, além da difusão, a deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ ascendente do plasma também deveria ser importante para gerar a EIA. Mais tarde, quando os computadores se tornaram poderosos o suficiente, Rishbeth, Lyon e Peart (1963) mostrou que a difusão é importante, mas é a combinação das teorias de deriva e difusão são responsáveis por gerar a EIA. A combinação de ambas teorias foi bem-sucedida para explicar as observações do vale e cristas na região equatorial

e baixas latitudes, respectivamente (BRAMLEY; PEARL, 1965; MOFFETT; HANSON, 1965).

É bem conhecido que a ionosfera durante o dia mais, especificamente, a camada F equatorial e inclusive nas regiões próximas a região equatorial apresenta uma deriva vertical para cima (efeito fonte, veja Figura 6) devido à uma configuração geométrica especial entre o campo magnético da Terra (\vec{B}) e o componente zonal do campo elétrico (\vec{E}). No equador geomagnético e nas latitudes próximas ao equador geomagnético, o campo magnético terrestre (direção Norte-Sul) é paralelo ou quase paralelo à superfície da terra e a interação com o campo elétrico perpendicular para leste (\vec{E}_{leste}) produz uma deriva vertical ascendente da camada F que é dada por $\vec{V}_{Z_{ascendente}} = \frac{\vec{E}_{leste} \times \vec{B}_{norte}}{B^2} \vec{V}_{Z_{ascendente}} = \frac{\vec{E}_{leste} \times \vec{B}_{norte}}{B^2}$ (KELLEY, 2009, DIAS *et al.*, 2020).

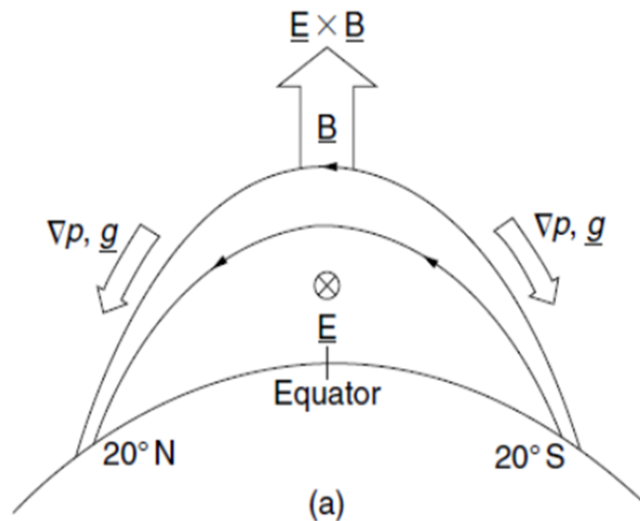
A intensidade de \vec{V}_Z depende da hora local, longitude, acoplamento termosfera-ionosfera e, adicionalmente, exibe uma variabilidade dia-a-dia, sazonal, atividade solar e ciclo solar. Para explicar as diferentes características nas variações do dia-a-dia da deriva de \vec{V}_Z , é importante levar em consideração os dínamos das regiões E e F (FEJER *et al.*, 1979). Esses dois dínamos também são necessários para explicar a intensificação \vec{E}_{leste} logo após o pôr-do-sol antes do campo elétrico reverter para \vec{E}_{oeste} , um fenômeno chamado de pico pré-reversão do campo elétrico (PRE).

A deriva vertical ascendente na região equatorial faz com que o plasma da região F atinge altitudes mais elevadas e se difunda para baixo ao longo das linhas do campo magnético devido às forças gravitacionais e do gradiente de pressão. Este fenômeno é chamado de efeito fonte o qual uma porção considerável do plasma é removida da região do equador magnético e depositada em latitudes baixas. Resultando em um vale no equador magnético e cristas de densidade eletrônica, sendo que as cristas localizadas no hemisfério norte e sul, entre $\pm 15^\circ$ e $\pm 20^\circ$ dip latitude. É importante mencionar que as cristas de densidade de plasma são geradas

devido à remoção da densidade de plasma do equador geomagnético e depositada em baixas latitudes (Figuras 6 e 7) (DIAS *et al.*, 2020).

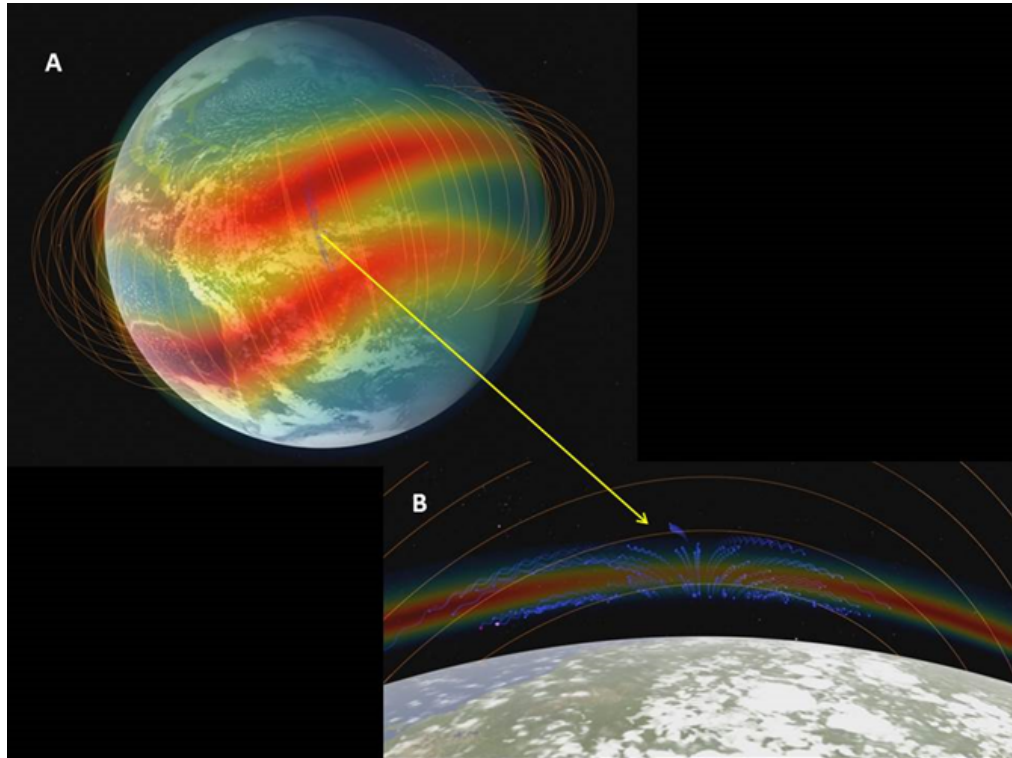
Segundo Romero-Hernandez *et al.* (2018) a variação dia-a-dia da EIA é controlada por vários parâmetros, como localização do ponto subsolar, radiação solar (UV, EUV e raio-X), atividade solar, explosões solares, ejeção de massa coronal. Adicionalmente a atmosfera neutra (termosfera) desempenha um papel importante na variação dia-a-dia da EIA devidas alterações na relação $[O]/[N_2]$, ventos termosféricos e ondas (ondas planetárias, marés e ondas de gravidade). No entanto, a eletrodinâmica da camada F é o fator mais importante para explicar a variação dia-a-dia da EIA, via efeito fonte.

Figura 6 - Ilustração do efeito fonte na ionosfera gerando a anomalia de ionização equatorial. Esquema de forças que atuam sobre o plasma referente a este fenômeno



Fonte: Kelley (2009).

Figura 7 - (A) Ilustração bidimensional da EIA sobre a América do Sul. A cor avermelhada representa os picos da anomalia, um em cada hemisfério (magnético) localizados, aproximadamente, entre 15 e 20° de latitude magnética). (B) ilustra o efeito fonte. As linhas azuis mostram como o plasma se desloca em espiral ao longo das linhas de campo



Fonte: Bridgman (2018).

O campo elétrico zonal surge dos ventos de maré na região E. Esses ventos surgem da diferença de pressão entre o lado iluminado e o lado não iluminado da atmosfera. Durante o dia, os ventos de maré estão para oeste, os elétrons e íons estão presos às linhas de campo, girando em espiral, gerando o dínamo da região E. Logo, a deriva vertical é resultado da interação entre o campo elétrico e o campo magnético terrestre, qualquer alteração nos ventos de maré, modifica o dínamo da região E é, conseqüentemente, formação e intensidade da EIA. Logicamente, o contrário também é verdadeiro, caso haja redução do EUV, reduz-se o número de cargas, ou seja, reduz-se a ionização, portanto, diminui-se o efeito fonte. A relação entre a atmosfera neutra e a ionizada muda. Modificando o acoplamento, que modifica o campo elétrico, que modifica a deriva vertical que, por fim, modifica a EIA.

A variabilidade diária da EIA e a morfologia da crista da anomalia exibem forte dependência com as características diurnas do eletrojato equatorial (*Equatorial Electrojet – EEJ*). Investigações mostram que o EEJ pode fornecer informações sobre as características da EIA com poucas horas de antecedência. Por isso, alguns estudos

sobre o papel do EEJ nas características da EIA em diferentes setores durante atividades solares calmas e perturbadas podem ser utilizadas para melhorar as previsões do TEC sobre a região equatorial e em baixas latitudes (VENKATESH *et al.*, 2015).

Na década de 1980, Walker e Strickland (1981) compararam a morfologia da EIA durante o mínimo solar nos setores da Ásia Oriental e da América, com base em dados de frequência crítica observados por ionossondas (foF2). Constatou-se que a evolução diurna da EIA nos dois setores apresentam diferenças sistemáticas, e tais diferenças foram atribuídas a influência do vento meridional devido à localização relativa do ponto subsolar, em relação ao equador magnético, a declinação magnética e a magnitude do campo magnético local.

A variação dia-a-dia, sazonal e morfológica da EIA durante períodos calmos e perturbado geomagneticamente têm sido extensivamente estudada em diferentes setores utilizando principalmente dados observacionais de Ionossonda e GPS-TEC (ANDERSON 1973; WALKER; STRICKLAND, 1981; HUANG; CHENG; CHEN, 1989; SU *et al.*, 1997; TSAI *et al.*, 2001; LIN *et al.*, 2007; WU *et al.*, 2008; STOLLE *et al.*, 2008; ZHANG *et al.*, 2009; ZHAO *et al.*, 2009; LIU *et al.*, 2013; VIEIRA *et al.*, 2017; LUAN *et al.*, 2015; MO *et al.*, 2018; RIBEIRO *et al.*, 2019; FAGUNDES *et al.*, 2020; DIAS *et al.*, 2020).

1.4 O Modelo IRI (International Reference Ionosphere)

O *International Reference Ionosphere* (IRI) é um projeto internacional patrocinado pelo Comitê de Pesquisas Espaciais (COSPAR, *Committee for Space Research*) e pela União Internacional de Ciências de Rádio (URSI, *International Union of Radio Sciences*). Essas organizações internacionais formaram um Grupo de Trabalho, no final dos anos 60, para produzir um modelo empírico padrão da ionosfera, baseado em dados ionosféricos disponíveis naquele momento. A primeira edição, amplamente, utilizada do modelo foi a versão IRI-78 (RAWER; BILITZA; RAMAKRISHNAN, 1978), posteriormente várias outras versões atualizadas foram lançadas em anos subsequentes (BILITZA, 1986; 1990; 2001; BILITZA; REINISCH, 2008). O modelo IRI-2012 foi lançado com melhorias da estimativa da densidade eletrônica, bem como a temperatura do elétron e composição de íons, tornou-se o

padrão ISO (Organização Internacional para Padronização) oficial para a ionosfera (BILITZA *et al.*, 2014). Como solicitado pelo COSPAR e pela URSI, o IRI foi construído como um modelo empírico que representa a síntese da maioria das observações de solo, *in situ*, por satélites e foguetes disponíveis (BILITZA *et al.*, 2017).

O modelo IRI fornece as médias mensais da densidade eletrônica, temperatura do elétron, temperatura iônica e composição iônica entre 50 e 2000 km de altitude para uma determinada localização, data e hora. Além disso, os parâmetros fornecidos pelo IRI incluem o TEC, a probabilidade de ocorrência de Spread-F, a região F1 e a deriva vertical equatorial. As principais fontes de dados são: a rede mundial de ionosondas, radares de espalhamento incoerentes (Jicamarca, Arecibo, Millstone Hill, Malvern, St. Santin), e instrumentos a bordo de satélites e foguetes que proporcionam observações *in situ*. O IRI é atualizado de 5 em 5 anos, durante *workshops* especiais do IRI (por exemplo, durante a assembleia geral do COSPAR). Mais informações podem ser encontradas nos relatórios dos *workshops* do IRI, patrocinados pelo COSPAR. Várias atualizações estão planejadas para o futuro, incluindo modelos para a deriva do íon, descrição da ionosfera auroral e polar e os distúrbios devido as tempestades geomagnéticas (BILITZA, 2018).

Entre os diferentes modelos que foram desenvolvidos, durante as últimas décadas, para entender as variações dos parâmetros ionosférico, o modelo IRI é muito utilizado pela comunidade científica para estimar a densidade eletrônica ionosférica, em função da latitude, longitude, altitude e hora, devido a disponibilidade de uso e uma interface amigável com o usuário.

Estudos comparativos entre os dados medidos, experimentalmente, e os calculados pelo modelo IRI, foram realizados por vários pesquisadores em diferentes regiões do globo terrestre, em diferentes condições (BATISTA *et al.*, 1994; ABDU *et al.*, 1996; BILITZA *et al.*, 1998; LUHR; XIONG 2010; AGGARWAL, 2011; OYEKOLA; FAGUNDES, 2012; PRASAD *et al.*, 2012; 2013; NOGUEIRA *et al.*, 2013; VENKATESH *et al.*, 2014a; 2014b; DIAS *et al.*, 2020).

Abdu *et al.* (1996) mostraram, no seu estudo, que o modelo IRI-90 apresenta resultados adequados durante o período de mínimo solar, no setor brasileiro. A versão IRI-90 reproduziu, razoavelmente, bem o comportamento climatológico da ionosfera em baixas latitudes, especialmente, para período de média atividade solar. Algumas discrepâncias foram notadas, sobretudo, no período de alta atividade solar. Aggarwal

(2011) utilizando, o modelo IRI-2007, mostrou que existe uma boa concordância entre as observações e os resultados obtidos pelo modelo IRI, para baixa atividade solar, no setor indiano. [Oyekola e Fagundes \(2012\)](#), mostraram uma concordância razoável entre os resultados do modelo IRI e os parâmetros ionosféricos, observados no setor africano, durante baixa e alta atividade solar. Embora, em alguns horários do dia (amanhecer e pôr-do-sol) o modelo necessite de melhorias.

Modelos ionosféricos são importantes em algumas aplicações, tais como na aviação civil, sistemas de navegação orientados pelos sinais dos satélites do GPS têm sido empregados para uso na precisão das aproximações de pouso e decolagem de aeronaves e na navegação em cruzeiro. No entanto, tais sistemas ainda não podem ser implementados em determinadas regiões da terra em virtude dos erros provocados por perturbações no sinal de GPS, devido a ionosfera. Com isso, a necessidade de se desenvolver modelos ionosféricos, para corrigir os erros provocados pela ionosfera tem crescido entre a comunidade técnica.

Um aprimoramento no modelo ionosférico, utilizado no sistema de GPS pode, a longo prazo, proporcionar soluções para os erros inerentes à propagação dos sinais dos satélites que propagam pela ionosférica. Os principais efeitos ionosféricos no sistema de comunicação dos GPS são: o atraso de grupo na modulação do sinal, o avanço na fase da portadora, a introdução de “bias” ou ruídos nos sinais de satélites, o efeito Doppler, a rotação da polarização do sinal, a curvatura da onda de rádio, a distorção na forma de onda do pulso, a atenuação e a cintilação (flutuação) na amplitude e fase do sinal ([KINTNER; LEDVINA, 2005](#); [KINTNER et al., 2007](#)).

O modelo IRI é um dos melhores modelos disponíveis para o estudo da ionosfera, especialmente para períodos de baixa e média atividade solar. Mas, o modelo segue necessitando de melhorias, principalmente, para período de alta atividade solar.

2 INSTRUMENTAÇÃO

2.1 GPS

Dados de receptores GPS de dupla frequência tem sido amplamente utilizado pela comunidade científica para o estudo ionosféricos (região F), através do parâmetro TEC (“Total Electronic Content”) (CAMARGO, 1999; MATSUOKA; CAMARGO; BATISTA, 2009; KUMAR *et al.*, 2009; NOGUEIRA *et al.*, 2013; OLUWADARE *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2020, DIAS *et al.*, 2020). Nesse trabalho, utilizou-se da variação diária e variação dia-a-dia do VTEC para investigar as características morfológicas, tempo de duração, variação mês-a-mês das características da EIA no setor brasileiro.

2.1.1 Breve histórico e fundamentos sobre GPS

O NAVSTAR-GPS, ou apenas GPS, como é mais comumente conhecido, foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (*DoD* – “*Department of Defense*”), desde a década de 1970, com o intuito de ser o principal sistema de navegação das forças armadas norte-americanas. Ele resultou da fusão de dois programas financiados pelo governo norte-americano para desenvolver um sistema de navegação de abrangência global. Tem sido usado para solução de problemas geodésicos desde 1983, mas sua configuração final foi concluída em 1994. Esse sistema de radionavegação, por satélite, foi criado para fornecer informações tridimensionais (latitude, longitude e altitude), velocidade e o tempo do usuário, adequadamente, equipado. Essas informações são obtidas em tempo real e sob quaisquer condições climáticas (MONICO, 2008).

O princípio básico de navegação, pelo GPS, consiste na medida da distância entre o usuário e quatro satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites, em um sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Esta distância é baseada em códigos gerados nos satélites e sua réplica no receptor.

O GPS consiste de três segmentos principais: Espacial, Controle e de Usuários. Enquanto o primeiro está associado com a constelação dos satélites e seus sinais, o

de Controle monitora e faz a devida manutenção do sistema. O sistema de Usuários do GPS é abrangente e continua a se ampliar, descritos a seguir.

2.1.2 Segmento espacial

O segmento espacial consiste de no mínimo 24 satélites MEO (*Medium Earth Orbits* – Satélites de Órbita média) distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com quatro satélites em cada plano, em uma altitude aproximada de 20.200 km conforme ilustrado na Figura 8. Os planos orbitais têm inclinação de 55° em relação ao Equador e o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. Dessa forma, a posição dos satélites se repete, a cada dia, aproximadamente, quatro minutos antes em relação ao dia anterior. Essa configuração garante que, no mínimo, quatro satélites GPS sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre, a qualquer hora. (SEEBER, 1993; MONICO, 2000; HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 1994).

Figura 8 - Constelação dos satélites GPS ao redor da Terra



Fonte: MONICO (2008).

Devido à confiabilidade das informações geradas e do grande desenvolvimento da tecnologia envolvida nos receptores GPS, este está sendo utilizado em diversas áreas, não apenas para uso militar, mas também à comunidade civil e científica, por exemplo, nas áreas de engenharia de agrimensura, na cartografia, em levantamentos

geodésicos, em segurança florestal, trabalhos de prospecção e exploração de recursos naturais, geologia, arqueologia, em segurança civil, no controle de frotas de veículos terrestres, na navegação marítima, nas telecomunicações, no monitoramento e deslocamento de usuário, tal como no projeto SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia), em agricultura de precisão e em atividades aeroespaciais, tais como em satélites de sensoriamento remoto para identificação de regiões de desflorestamento, no monitoramento de queimadas e na aviação civil.

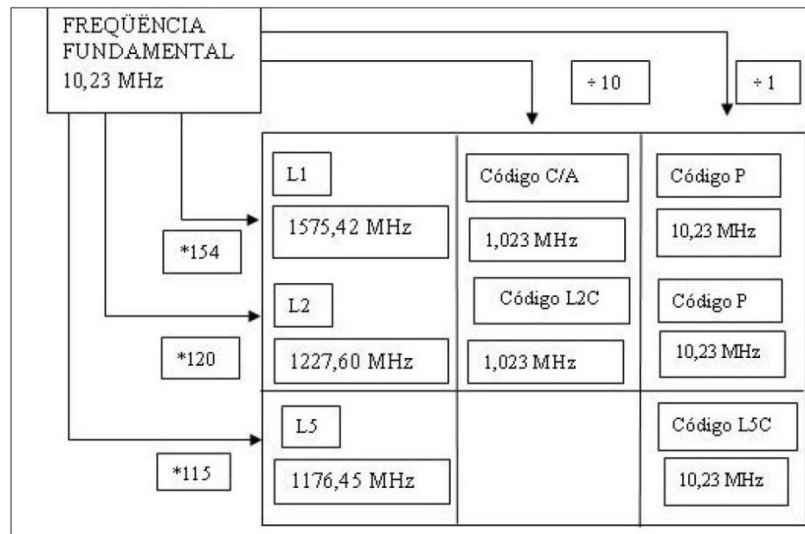
A comunidade científica o utiliza por seu relógio altamente preciso, onde durante experimentos científicos de coleta de dados pode-se registrar com precisão de microssegundos (10^{-6} segundos) quando uma determinada amostra foi obtida. Em ciências espaciais e atmosféricas, o GPS é empregado em sondagem troposférica e em sondagem ionosférica. Na ciência ionosférica pode ser utilizado no monitoramento de irregularidades de plasma e no estudo de fenômenos peculiares da ionosfera em regiões equatorial e de baixa latitude, tal como a EIA.

2.1.3 Características dos sinais GPS

Os sinais básicos do GPS são ilustrados na Figura 09, inclusive o código L2C na portadora L2, bem como a portadora L5, os quais fazem parte da modernização do GPS. É importante frisar que apenas os satélites lançados, a partir de setembro de 2005, têm o código L2C disponível e que a portadora L5 fará parte apenas dos satélites do Bloco IIF.

As mensagens de navegação, que fornecem as informações básicas para o cálculo das posições dos satélites, são também moduladas sobre as portadoras, em uma taxa de 50 bps (bits por segundo). Elas contêm parâmetros orbitais (elementos keplerianos e suas variações), dados para a correção da propagação na atmosfera, parâmetros para a correção do erro dos relógios dos satélites, saúde dos satélites etc. (MONICO, 2008).

Figura 9 - Estrutura Básica do Sinal GPS – modernizada



Fonte: MONICO (2008).

Observa-se que, atualmente, há três tipos de sinais envolvidos no GPS: as portadoras (L1 e L2), os códigos (C/A, L2C e P(Y)) e os dados (navegação, relógio, etc.). Essa estrutura permite não só medir a fase da portadora e sua variação, mas também o tempo de propagação da modulação.

2.1.4 Segmento de controle

As principais tarefas do segmento de controle são:

- Monitorar e controlar, de forma contínua, o sistema de satélites; determinar o sistema de tempo GPS;
- Predizer as efemérides dos satélites, calcular as correções dos relógios dos satélites; e
- Atualizar, periodicamente, as mensagens de navegação de cada satélite.

O sistema de controle é composto por cinco estações monitoras (Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia e Colorado Springs), três delas com antenas para transmitir os dados para os satélites (Ascension Island, Diego Garcia e Kwajalein), e uma estação de controle central (MCS: *Master Control Station*) localizada em Colorado Springs, Colorado. Essas cinco estações de monitoramento parecem à AAF *American Air Force*; com as sete da NGA (*National Geospatial-*

Intelligence Agency), antiga NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), compõem as estações monitoras GPS do DoD. A Figura 10 mostra a distribuição das estações monitoras e demais elementos do segmento de controle do GPS (MALYS *et al.*, 1997).

Figura 10 - Segmento de controle do GPS



Fonte: MONICO (2008).

Cada estação monitorada é equipada com oscilador externo de alta precisão e receptor de dupla frequência, o qual rastreia todos os satélites visíveis e transmite os dados para a MCS, via sistema de comunicação. Os dados são processados na MCS para determinar as órbitas dos satélites às correções dos relógios dos satélites, de modo que, periodicamente, as mensagens de navegação transmitidas (*broadcast ephemeris* – efemérides transmitidas) sejam atualizadas. A informação atualizada é enviada para os satélites a partir das antenas terrestres. Toda a infraestrutura do segmento de controle passou por atualização em setembro de 2007, incluindo receptores, computadores etc.

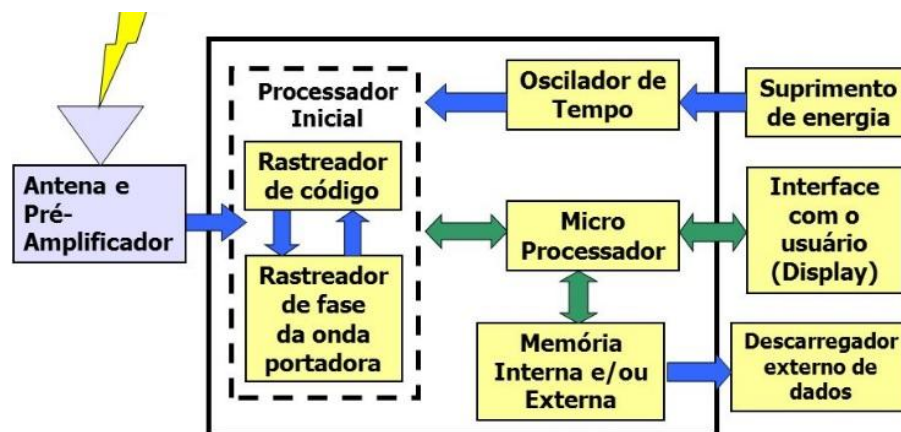
A distribuição geográfica das estações monitora o sistema de satélites somente ao longo do Equador. Esta configuração atende aos requisitos de navegação e várias outras aplicações, mas não é adequada para a determinação de órbitas altamente precisas, em particular para aplicações em geodinâmica. Isso em razão de reduzido número de estações, que torna a geometria um pouco deficiente.

2.1.5 Segmento de usuários

O segmento de usuários está diretamente associado aos receptores GPS. A categoria de usuários pode ser dividida em civil e militar. Os militares fazem uso dos receptores GPS para estimar suas posições e deslocamentos quando realizam manobras de combate e de treinamento. Atualmente, há grande quantidade de receptores no mercado civil, para as mais diversas aplicações, limitadas apenas pela imaginação dos usuários, o que demonstra que o GPS, realmente, atingiu sua maturidade.

A Figura 11 representa uma breve descrição dos elementos mais importantes dos receptores de GPS.

Figura 11– Principais Componentes de um Receptor GPS



Fonte: MONICO (2008).

2.1.6 Erros sistemáticos envolvidos nas observáveis

As observáveis GNSS, como todas as outras observáveis envolvidas nos processos de medidas, estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Erros sistemáticos podem ser parametrizados (modelados como termos adicionais) ou reduzidos (ou mesmo eliminados) por técnicas apropriadas de observação. Erros aleatórios, por sua vez, não apresentam qualquer relação funcional com as medidas e são, em geral, as discrepâncias remanescentes nas observações, depois que todos os erros grosseiros e sistemáticos forem eliminados ou minimizados. Eles são inevitáveis, sendo, portanto, considerados uma propriedade inerente da observação.

Os diversos erros, agrupados segundo as possíveis fontes, são apresentados na Tabela 1. As fontes consideradas são os satélites, a propagação do sinal, o receptor/antena e a própria estação (MONICO, 2000).

Tabela 1 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos no GNSS

Fontes	Erros
Satélite	<ul style="list-style-type: none"> • Erro da órbita • Erro do relógio • Relatividade • Atraso entre as duas portadoras no hardware do satélite • Centro de fase da antena do satélite • Fase Wind-up
Propagação do sinal	<ul style="list-style-type: none"> • Refração troposférica • Refração ionosférica • Perdas de ciclos • Multicaminho ou sinais refletidos • Rotação da Terra
Receptor/Antena	<ul style="list-style-type: none"> • Erro do relógio • Erro entre os canais • Centro de fase da antena do receptor • Atraso entre as duas portadoras no hardware do receptor • Fase Wind-up
Estação – (alguns erros são, na realidade, efeitos geodinâmicos que devem ser corrigidos).	<ul style="list-style-type: none"> • Erros nas coordenadas • Multicaminho ou sinais refletidos • Marés terrestres • Movimento do polo • Carga oceânica • Pressão da atmosfera

Fonte: MONICO, 2008.

2.1.7 Alguns Efeitos que estão relacionados com a propagação do sinal GPS

As ondas que são transmitidas pelos satélites atravessam diferentes camadas atmosféricas antes de chegar à estação receptora, durante o caminho percorrido entre o satélite e o receptor sofrem várias mudanças, as quais alteram a velocidade da onda ocasionando alterações em sua potência ou intensidade. Além disso, os sinais entre

o satélite e receptor estão passíveis de obstrução e reflexão, em seu trajeto, por objeto que possa estar próximo à antena receptora. Tratar-se-á aqui de erros relacionados aos satélites GPS relativos erros orbitais e refração ionosférica.

2.1.8 Refração ionosférica e a medida do conteúdo eletrônico total

A refração ionosférica depende da frequência e, conseqüentemente, do índice de refração. O efeito da refração é proporcional ao TEC, ou seja, ao aumento do número de elétrons presentes, ao longo do caminho percorrido pelo sinal entre o satélite e o receptor. O TEC varia no tempo e no espaço, em razão das variações da radiação solar, da localização e do campo geomagnético, entre outras anomalias e irregularidades, como a EIA e a cintilação ionosférica (LEICK, 2004).

As variações temporais compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos. Essas variações influenciam diretamente na alteração da densidade de elétrons na ionosfera. A localização tem forte influência na variação da densidade de elétrons na ionosfera, por causa da não homogeneidade de sua estrutura global. Ela se altera com a latitude, em razão da variação do ângulo zenital do sol, que influencia diretamente no nível de radiação, que por sua vez, altera também a densidade de elétrons na ionosfera. As regiões equatoriais são caracterizadas por um alto nível de densidade de elétrons.

O Brasil, por estar localizado na região equatorial, sofre de forma acentuada os efeitos da ionosfera. Várias pesquisas têm sido realizadas sobre a ionosfera com base em dados GNSS coletados no Brasil. Para uma detalhada descrição dos vários fenômenos que causam mudanças nos valores do TEC e seus efeitos no posicionamento, o leitor interessado deve consultar Camargo (1999), Matsuoka (2003; 2007), Dal Póz e Camargo (2006) e Aguiar e Camargo (2005).

O afastamento do índice de refração de seu valor unitário, nas diferentes camadas da ionosfera, faz que a velocidade da fase portadora (v_f) dada por:

$$v_f = \lambda f, \quad (36)$$

$$v_f = \lambda f, \quad (36)$$

sofra um retardo. Nessa expressão λ representa o comprimento da onda e f a sua frequência (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 1994).

Para um grupo de ondas, como os códigos modulados sobre a portadora, a propagação da energia é definida com a velocidade de grupo (v_g),

$$v_g = - \frac{df}{d\lambda} \lambda^2 \quad (37)$$

e sofre um avanço durante a propagação do sinal.

A partir da diferenciação da equação (36) e substituindo-a na equação (37), obtém-se uma expressão que relaciona a velocidade de grupo com a velocidade de fase, descrita como equação *Rayleigh*:

$$v_g = v_f - \lambda \frac{dv_f}{d\lambda} \quad (38)$$

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

$$n_f = \frac{c}{Vf} \quad (39)$$

$$n_g = \frac{c}{Vg} \quad (40)$$

sendo c a velocidade da luz.

A equação modificada de *Rayleigh* relaciona esses dois índices de refração por meio da expressão (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 1994):

$$n_g = n_f - \lambda \frac{dn_f}{d\lambda} \quad (41)$$

ou

$$n_g = n_f - \lambda \frac{dn_f}{df} \quad (42)$$

Isso é obtido da derivação da relação $c = \lambda f$, em relação a f .

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

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots, \quad (43)$$

onde os coeficientes c_2 , c_3 e c_4 dependem apenas da densidade de elétrons por m³, ao longo da trajetória em que o sinal se propaga. Considerando só os efeitos de primeira ordem, obtém-se

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (44)$$

logo, ao se derivar a equação (44), tem-se

$$dn_f = -2 \frac{c_2}{f^3} df, \quad (45)$$

que, ao ser substituída na equação (41), proporciona o índice de refração de velocidade de grupo, ou seja,

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (46)$$

Pode-se observar que os índices de refração da fase e do grupo se diferenciam somente no sinal do coeficiente c_2 . Esse coeficiente, que depende da densidade de elétrons n_e é dado por (CAMARGO, 1999; FEDRIZZI, 2003):

$$c_2 = -40,3 n_e \quad (47)$$

Em unidades do Sistema Internacional (SI) de medida, a constante 40,3 é dada em mHz² (el por m²)⁻¹ e n_e em elétrons por m³. Assim, tem-se que:

$$n_f = 1 - \frac{40,3 n_e}{f^2}. \quad (48)$$

e

$$n_g = 1 + \frac{40,3 n_e}{f^2}. \quad (49)$$

Resultando em diferentes velocidades nos sinais, de modo que ocorre atraso no grupo e avanço na fase, pois a velocidade de grupo V_g é menor que a velocidade de fase V_f . Destarte, resulta em um aumento nas distâncias obtidas a partir dos códigos modulados sobre a portadora, e uma diminuição nas obtidas a partir da fase, de uma mesma quantidade.

A distância S entre o satélite (s) e o receptor (r), desprezando-se outros erros sistemáticos, é dada por:

$$S = \int_r^s n ds \quad , \quad (50)$$

onde n representa, de forma genérica, o índice de refração da fase ou de grupo. A diferença entre a distância medida e a distância geométrica $\rho\rho$, entre o satélite e o receptor, é chamada de refração ionosférica $I_r^s I_r^s$ e representa o erro sistemático, que, no caso da fase da portadora, é dada por

$$I_{f_r}^s = \int_s^r \left(1 - \frac{40,3 n_e}{f^2}\right) ds - \rho, \quad (51)$$

ou

$$I_{f_r}^s = - \frac{40,3}{f^2} \int_s^r n_e ds \quad (52)$$

onde a parcela variável caracteriza a densidade de elétrons ao longo do caminho e representa o TEC, ou seja,

$$TEC = \int_s^r n_e ds . \quad (53)$$

Logo, tem-se

$$I_{f_r}^s = - \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (54)$$

De forma similar, obtém-se a refração ionosférica para os sinais modulados pelo código $I_{g_r}^s I_{g_r}^s$:

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (55)$$

Nas expressões (54) e (55) o TEC é dado ao longo da direção do satélite e do receptor, e a unidade empregada para representá-lo é dada em (el por m^2). Para quantidades do TEC na direção vertical (VTEC), o efeito da refração é calculado a partir das seguintes equações:

$$I_{f_r}^s = - \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC, \quad (56)$$

e

$$I_{gr}^s = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC, \quad (57)$$

respectivamente, para a fase e o código.

Nas expressões (56) e (57), o valor de $z'z'$, que representa o ângulo zenital do caminho do sinal em relação a um plano de altitude média $H_m H_m$, denominado ponto ionosférico, é obtido da seguinte expressão (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 1994):

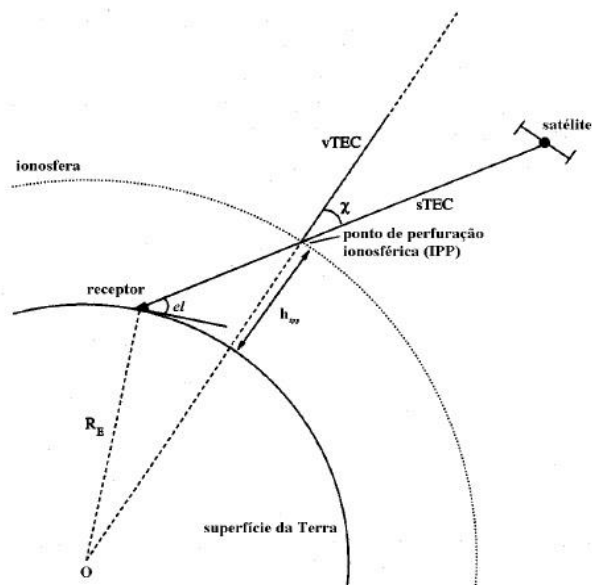
$$\text{sen } z' = \frac{R_E}{R_E + h_m} \text{sen } z, \quad (58)$$

onde $R_E R_E$ é o raio médio da Terra, $h_m h_m$ representa a altura média da ionosfera, que varia entre 300 e 400 km, e z é o ângulo zenital do satélite na estação de observação. A Figura 12 ilustra as quantidades envolvidas na expressão (58).

2.1.9 Determinação do TEC vertical (VTEC)

O valor do TEC é obtido a partir de medidas das trajetórias oblíquas do sinal entre o satélite e o receptor. Este é designado por TEC inclinado ou “slant” TEC (sTEC).

Figura 12 - Geometria utilizada para obtenção do TEC vertical (VTEC)



Fonte: Modificada de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (1994).

Para se obter valor do TEC, sobre um determinado local, ou gerar mapas de TEC em escalas regionais ou globais, é preciso converter o TEC inclinado em TEC vertical equivalente (VTEC). Para realizar esta conversão supõe-se um modelo de ionosfera em que a densidade eletrônica encontra-se confinada numa camada de espessura infinitesimal (*“thin layer”*), localizada a uma determinada altura de referência Figura 12, e também que não existam variações horizontais na distribuição de elétrons ao longo do percurso do sinal, desde o satélite até o receptor.

Conforme mostrado na Figura 12, para a transformação dos valores medidos de TEC inclinado em um valor de VTEC, faz-se uma projeção na vertical no ponto de intersecção do feixe do sinal do satélite com a ionosfera (IPP), ou seja (JAKOWSKI, 1996):

$$VTEC = \cos(z') TEC_r^s TEC_r^s \quad (70)$$

Onde o valor de z , que representa o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico localizado em uma camada de altura média (hm), $TEC_r^s TEC_r^s$ é o TEC dado ao longo da direção entre o satélite e o receptor. A relação geométrica que descreve a função de mapeamento é dada por:

$$\cos(\chi) = \sqrt{1 - \left(\frac{R_E \cos(el)}{R_E + h_{ipp}}\right)^2} \quad \cos(\chi) = \sqrt{1 - \left(\frac{R_E \cos(el)}{R_E + h_{ipp}}\right)^2} \quad (71)$$

em que R_E é o raio da Terra, el é o ângulo de elevação do satélite e h_{ipp} denota altitude do ponto de perfuração ionosférica. Funções de mapeamento que levam em consideração algumas dessas dependências podem ser encontradas em Sardón *et al.* (1994). De acordo com Lunt *et al.* (1999) e Balan *et al.* (2002), a magnitude da contribuição plasmasférica nas medidas do TEC obtidas através do GPS pode atingir valores maiores do que 50% à noite, no hemisfério que está no inverno e durante o período de atividade solar mínima. No presente estudo não foi estimado a contribuição da plasmasfera nas medidas de TEC.

3 DADOS E METODOLOGIA

Com a finalidade de investigar as variações das características da EIA no setor brasileiro, foram utilizados dados de 35 estações de GPS-TEC da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), que fazem parte do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Como mostra a Figura 13 as estações GPS-TEC, foram selecionadas por serem as mais próximas das três linhas perpendiculares ao equador magnético (linha preta). Esses receptores GPS selecionados ao longo de três conjuntos latitudinais são utilizados para investigar semelhanças e diferenças da EIA nesses 3 setores (leste, central e oeste).

Os valores de TEC são obtidos usando a técnica de atraso diferencial que utiliza GPS de dupla frequência (frequências de L1 e L2) nos locais considerados. Esses dados observacionais formam comparados com os dados calculados pelo modelo IRI-2016.

Estudos recentes indicam que o comportamento da EIA no setor leste e oeste brasileiro apresenta diferenças significativas. Essas diferenças foram notadas quando [Vieira et al. \(2017\)](#) estudaram a resposta ionosférica no setor brasileiro ao (aquecimento súbito da estratosfera) SSW de 2012 e quando [Fagundes et al. \(2016\)](#) estudaram a resposta ionosférica a tempestade de *St. Patrick*. Motivado por estes resultados este trabalho se propõem a estudar a variação dia-a-dia e mensal das características morfológicas, formação e evolução da EIA em 3 diferentes longitudes do setor brasileiro (oeste, central e leste) utilizando dados de VTEC obtidos através de receptores de GPS de duas frequências (L1 e L2) e comparando os dados observacionais aos calculados pelo modelo IRI-2016. Usando a mesma metodologia utilizada por [Seemala e Valladares \(2011\)](#) os dados de VTEC foram obtidos a partir das estações receptoras de GPS-TEC utilizadas, neste trabalho.

[Venkatesh et al \(2014\)](#) estudaram a EIA no setor oriental brasileiro, usando um conjunto de sete estações de GPS-TEC abrangendo desde a região equatorial até baixas latitudes. Mostraram ainda que a EIA desenvolve-se durante o verão e equinócios com vale equatorial e crista em baixa latitude e, durante o inverno, não mostram a formação da EIA com ionização máxima sobre o equador e nem crista em baixa latitude. Mais recentemente, aproveitando o aumento do número de receptores GPS - TEC na região brasileira, as variações EIA são estudadas com mais detalhes

utilizando dois conjuntos de receptores GPS - TEC, nos setores leste e oeste do Brasil, em alguns casos específicos. Além disso, [Tardelli et al. \(2018\)](#) estudou a estratificação da camada F em F3 e F4 perto da crista sul da EIA na América do Sul.

A EIA é estudada em outros setores e no Hemisfério Norte (HN). [Adebesin et al. \(2018\)](#) investigaram o vale da EIA no setor Africano, usando parâmetros de ionosonda ($h'F$, NmF2 e deriva de plasma vertical), usando três setores equatoriais e encontraram variação semianual de NmF2, com o primeiro pico em março e o segundo pico em outubro-novembro. Além disso, [Seba et al. \(2018\)](#) investigaram a climatologia da EIA e sua relação com o Spread-F no setor Africano. [Rao, Chakraborty e Pandey \(2018\)](#) estudaram a variação da EIA usando foF2 e comparou com o modelo IRI-2016 no setor chinês. [Khadka et al. \(2018\)](#) estudaram o papel do vento neutro e do campo elétrico na assimetria da EIA. No setor indiano no HN, as cristas mostram valores máximos durante os meses de equinócio e valores mínimos durante o inverno e o verão ([KUMAR et al., 2014](#)). Apesar da proposta de [Appleton \(1946\)](#) de que o EIA é caracterizada por um vale no equador magnético e cristas em cerca de ± 15 latitudes magnéticas, é importante investigar a variação espaço-temporal em diferentes hemisférios e longitudes, especialmente, no setor americano onde os equadores magnéticos e geográficos apresentam uma geometria única.

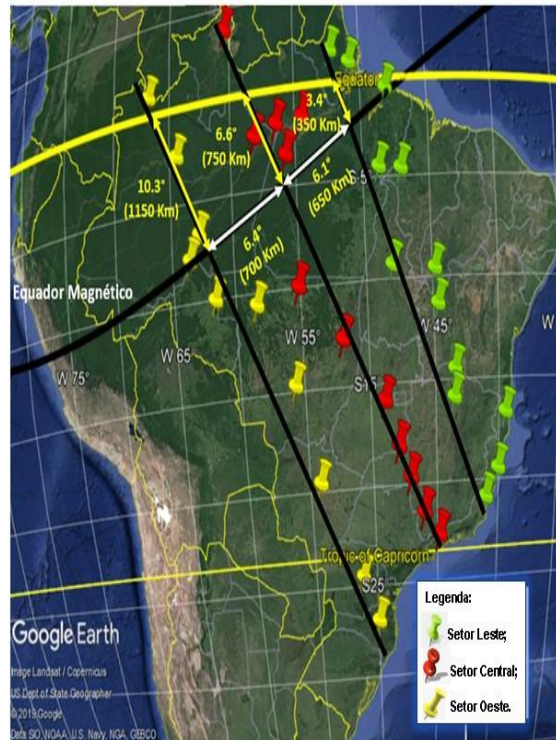
A EIA mostra variabilidades significativas em diferentes escalas espaciais e temporais. Os principais fatores que afetam a variabilidade do EIA são: os processos fotoquímicos, devido à variação da intensidade do fluxo de radiação solar (UV e EUV), força do efeito fonte e direções do vento neutro. As variações sazonais da EIA e, conseqüentemente, a variação semianual é controlada pelo ponto subsolar, acoplamento termosfera-ionosfera, ciclo solar, e eletrodinâmica da região F (efeito fonte).

Conforme mencionado por [Romero - Hernandez et al. \(2018\)](#), várias anomalias são importantes e devem ser levadas em consideração para entender a sazonalidade ionosférica e o comportamento inter-hemisférico, como anomalias de inverno, equinociais e anuais. No entanto, a ionosfera sobre a região sul americana apresenta uma complexidade extra em comparação com outros setores da Terra devido a uma configuração única entre os equadores geográfico e geomagnético (Figura 13). De tal modo, todos os fenômenos ionosféricos que ocorrem nesta região da Terra têm um

comportamento distinto e específico, principalmente, aqueles que ocorrem na camada F equatorial e em baixas latitudes.

A Figura 13 mostra o mapa da América do Sul, onde o equador geográfico é indicado por uma curva amarela e o equador magnético por curva preta. As 3 linhas perpendiculares ao equador geomagnético indicam as longitudes onde foi estudada a EIA, denominadas de setor leste, central e oeste. As estações de GPS-TEC utilizadas no setor leste estão localizadas em uma faixa longitudinal de $39,7^{\circ}\text{O}$ a $52,3^{\circ}\text{O}$ e são indicadas por ícones verdes, no setor central a faixa longitudinal é de $45,1^{\circ}\text{O}$ a $60,7^{\circ}\text{O}$ e são indicadas por ícones vermelhos e no setor oeste a faixa longitudinal é de $50,3^{\circ}\text{O}$ a 67°O e são indicadas por ícones amarelos. Estes setores estão separados por aproximadamente $6,0^{\circ}$ (~ 700 km) em longitude. Nota-se, na Figura 13, que a distância entre os equadores geográfico e geomagnético é $\sim 3,4^{\circ}$ (~ 350 km) no setor leste, $\sim 6,6^{\circ}$ (~ 750 km) no setor central e $\sim 10,3^{\circ}$ (~ 1150 km) no setor oeste. Ao longo de cada meridiano foram selecionadas estações desde o hemisfério norte magnético, passando pelo equador magnético até além do pico da anomalia no hemisfério sul (Figura 13). A tabela 2 fornece informações como: nome, símbolo, coordenadas geográficas e dip-latitude das estações. Este estudo foi realizado utilizando dados do ano de 2016 que faz parte da fase decrescente do ciclo solar 24. A Figura 14A mostra a variação do F10.7 durante os ciclos solares 22, 23 e 24 e a Figura 14B a variação do F10.7 no ano de 2016, onde a média anual de 2016 é igual aproximadamente a 80 s.f.u (onde 1 *solar flux units* (s.f.u.) = 10^{-22} W m⁻² Hz⁻¹).

Figura 13 - Mapa da América do Sul, onde a curva preta indica o equador magnético e a curva amarela representando o equador geográfico. As três linhas perpendiculares ao equador magnético indicam os setores (leste, central e oeste) onde a EIA é estudada. As estações de GPS-TEC utilizadas nos setores leste, central e oeste estão representadas por ícones verdes, vermelhos e amarelos, respectivamente. As distâncias entre os setores estão indicadas por setas duplas brancas e as distâncias entre os equadores em cada setor estão indicadas por setas duplas amarelas



Fonte: Google Earth (modificada pelo autor).

Tabela 2 - Detalhes das estações de GPS usadas na Figura 18: nomes, símbolos, latitudes, longitudes e dip-latidade.

N.º	Nome da estação	Símbolo	Lat. Geo. (+N)	Lon. Geo. (+O)	Dip-Latitude (+N)
Setor Oeste					
1	S. G. da Cachoeira	SAGA	-0,1	-67,0	9,1
2	Tefé	AMTE	-4,22	-64,7	5,5
3	Humaitá	AMHA	-7,5	-63,0	1,2
4	Porto Velho	POVE	-8,7	-63,9	0,4
5	Ji-Paraná	ROJI	-10,9	-62,0	-2,2
6	Juína	MTJI	-11,4	-58,7	-4,0
7	Cuiabá	CUIB	-15,5	-56,1	-8,7
8	Campo Grande	MSCG	-20,4	-54,5	-13,5
9	Guarapuava	PRGU	-25,4	-51,5	-18,8
10	Lages	SCLA	-27,8	-50,3	-21,1
Setor Central					
1	Boa Vista	BOAV	2,8	-60,7	9,5
2	Itacoatira	ITAM	-3,1	-58,4	3,2
3	Parintins	AMPR	-2,6	-56,7	3,0
4	Santarém	PASM	-2,4	-54,7	2,1
5	Itaítuba	PAIT	-4,3	-56,0	1,1
6	Colider	MTCO	-10,8	-55,4	-4,9
7	Canarana	MTCN	-13,5	-52,3	-8,9
8	Goiânia	GOGY	-16,7	-49,2	-13,2
9	Uberlândia	MGUB	-18,9	-48,2	-15,6
10	Franca	SPFR	-20,5	-47,4	-17,3
11	Inconfidentes	MGIN	-22,3	-46,3	-19,3
12	Ubatuba	UBA1	-23,5	-45,1	-20,8

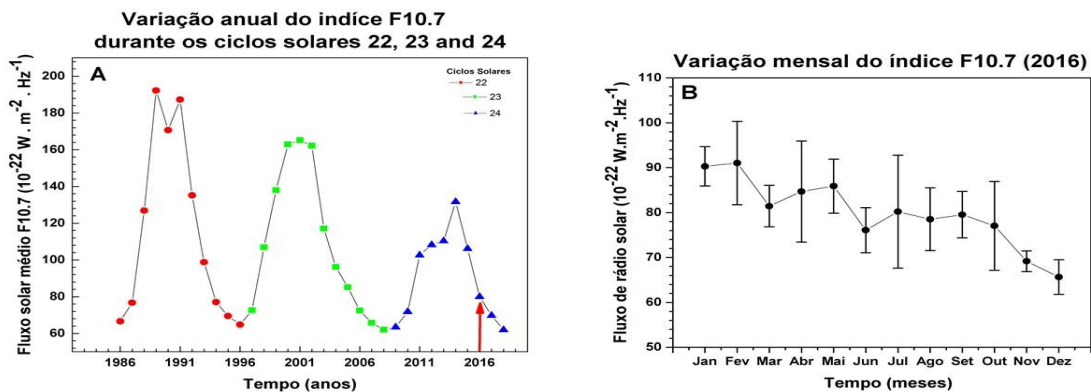
Setor Leste					
1	Laranjal do Jari	APLJ	-0,5	52,3	3,9
2	Macapá	APMA	0,1	-51,1	2,5
3	Belém	BELE	-1,4	-48,4	-0,3
4	Marabá	MABA	-5,3	-49,1	-3,5
5	Imperatriz	IMPZ	-5,5	-47,5	-4,5
6	Palmas	TOPL	-10,2	-48,3	-8,2
7	Corrente	PICR	-10,4	-45,2	-10,2
8	Barreiras	BABR	-12,1	-45,0	-11,8
9	Jaíba	JAMG	-15,3	-43,8	-15,2
10	Montes Claros 2	MGMC	-16,7	-43,8	-16,3
11	Teixeira de Freitas	BATF	-17,5	-39,7	-19,4
12	Vitória	CEFE	-20,3	-40,3	-21,2
13	Campos dos Goytacazes	RJCG	-21,8	-41,3	-21,7

O índice F10.7 é utilizado como indicador de intensidade da radiação EUV (CHEN *et al*, 2011.), visto que este índice é um bom indicador da atividade do ciclo solar, conseqüentemente, da radiação EUV e da taxa de ionização dos constituintes neutros, ele é amplamente utilizado nos estudos ionosféricos. A Figura 14A mostra a variação das médias anuais do índice F10.7 ao longo dos ciclos solares 22, 23 e 24. Os círculos vermelhos, os quadrados verdes e os triângulos azuis indicam as médias anuais dos ciclos solares 22, 23 e 24, respectivamente.

O índice F10.7 no máximos solares 22, 23 e 24 foram: ~192, ~165 e ~131 s.f.u., respectivamente. Nota-se, que houve uma redução de ~60 s.f.u. entre os máximos dos ciclos solares 22 e 24. Já em relação aos mínimos dos ciclos solares 22, 23 e 24, observou-se que não houve grandes alterações do F10.7, permanecendo próximo de 60 s.f.u. O ano 2016 encontra-se destacado por uma seta vermelha na Figura 14A, fase decrescente do ciclo solar 24, com média F10.7 = 80 s.f.u. A Figura 14B mostra a variação das médias mensais do índice F10.7 ao longo de 2016. Os pontos indicam os valores das medias mensais e as barras verticais mostram ± 1 desvio padrão. Nota-se que o F10.7 é maior em janeiro-fevereiro (~90 s.f.u.) e

decrece ao longo do ano atingindo o menor valor em dezembro (~65 s.f.u.). No entanto, ao longo do ano houve uma pequena oscilação da média mensal.

Figura 14 - (A) Variação da média mensal do índice F10.7 cm ao longo de 2016. Os pontos indicam o valor da média mensal e a barra vertical mostra o ± 1 desvio padrão. (B) mostra a variação das médias anuais do índice F10.7 cm ao longo dos ciclos 22, 23 e 24. Os círculos vermelhos, os quadrados verdes e os triângulos azuis indicam as médias anuais dos ciclos solares 22, 23 e 24, respectivamente



Fonte: Elaborada pelo autor utilizando dados do site: *Natural Resources Canada*.

O estudo das características morfológicas da ionosfera na região equatorial e baixas latitudes tem sido realizado através da frequência crítica da camada F2 (foF_2) e do TEC por vários pesquisadores durante décadas (DABAS; LAKSHMI; REDDY, 1993; KANE, 2003; BATISTA; ABDU, 2004; DA COSTA; BOAS; FONSECA, 2004; RAO *et al.*, 2006; BHUYAN; BORAH, 2007; BAGIYA *et al.*, 2009, JONAH *et al.*, 2015, DUARTE-SILVA *et al.*, 2015, VENKATESH *et al.*, 2015). Da Costa, Boas e Fonseca (2004) investigaram variações diárias e sazonais do TEC em Presidente Prudente, uma estação localizada perto da crista da EIA, período de baixa atividade solar (1997). Notou-se que o TEC foi máximo durante os meses de verão (de novembro até fevereiro) e mínimo durante os meses de inverno (de maio a agosto), com valores intermediários durante os meses de equinócio, primavera (setembro-outubro), obteve-se maiores valores de TEC do que o equinócio de outono (março-abril). Outro comportamento importante é que a variabilidade diurna no equador é menor que na crista da EIA e a variabilidade noturna é maior que a diurna em todas as estações do ano e latitudes.

O setor sul-americano está sob ação de processos eletrodinâmicos que são peculiares das regiões equatoriais e de baixa latitude (JONAH *et al.*, 2015). A declinação das linhas de campo magnético é maior na região brasileira e o gradiente entre o equador magnético e a região da crista da anomalia é mais intenso, o que resulta em grande variação temporal e espacial do TEC (DASGUPTA; PAUL; DAS, 2007; MUELLA *et al.*, 2010).

A variação sazonal da crista da EIA é investigada por diversos pesquisadores por muitas décadas nos setores indiano, asiático, africano e brasileiro e as variações semestrais são relatadas em todos esses setores (AMAECHEI; OYEYEMI; AKALA, 2019; BERTONI *et al.*, 2006; HUANG *et al.* 2013., LIU *et al.*, 2013; JONAH *et al.*, 2015; KUMAR *et al.*, 2014; MO *et al.*, 2018; RAO *et al.*, 2006; RAO *et al.*, 2018; VENKATESH *et al.*, 2014b; ZHAO *et al.*, 2009). Os picos semestrais nos setores chinês e indiano ocorrem durante o equinócio (primavera e outono), mas no setor brasileiro os picos ocorrem durante o verão e a primavera (equinócio).

3.1 Metodologia do modelo IRI

O modelo de referência ionosférica internacional (IRI) – 2016, (https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php, Bilitza, 2001 e 2018) é o modelo mais utilizado para calcular os valores VTEC. Com o objetivo de entender se a EIA modelada pelo IRI mostra diferenças significativas em relação aos observados nos três setores, os valores de TEC para todas as estações utilizadas neste trabalho são calculados utilizando a versão online do IRI. As opções padrão do modelo IRI-2016, com “URSI”, para “Ne F-peak”; “NeQuick” para “Ne Topside”; “AMBT-2013” para “altura do F-pico” e “ABT-2009” para “Espessura do lado inferior” são considerados durante a execução do modelo. Uma análise comparativa foi feita entre as características da EIA usando os dados GPS-VTEC observados e o TEC calculado pelo modelo IRI-2016 para os três setores.

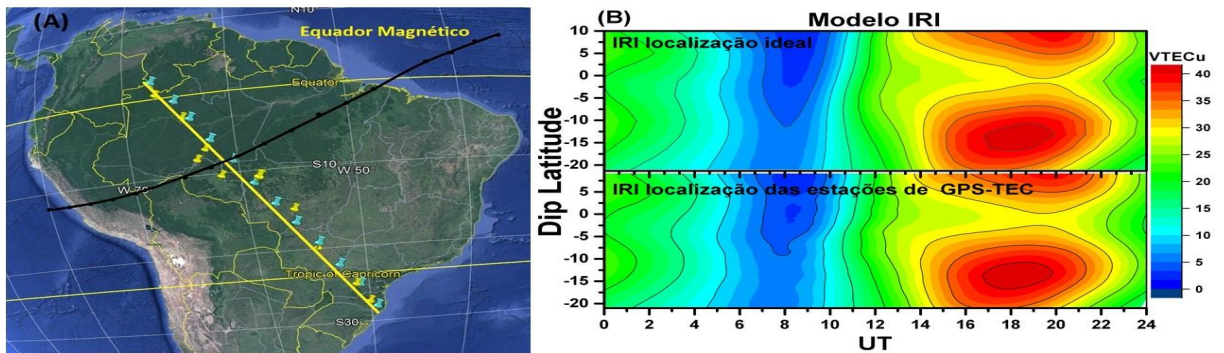
A Figura 15 mostra os parâmetros de entrada do modelo IRI-2016 que foram utilizados: ano, mês, dia, horário, coordenadas geográficas, altura do pico de densidade eletrônica e TEC.

Figura 15 - Parâmetros de entrada do modelo IRI

Year(1958-2018): 2016 **Month:** January **Day(1-31):** 05
Time Universal **Time** (0. - 24.0 in decimal hours): 1.5
Coord. Type Geographic **Latitude**(-90. - 90. deg.): -8.5 **Longitude**(0. - 360. deg.) 297
Height (km, from 60. to 2000.): 300
Hour profile[0.-24.] **Start** 0 **Stop** 23.9 **Stepsize** 0.25
Electron content: Upper boundary (50. - 2000. km) 2000
 Hour of day, UT/LT
 (depending on user's choice above)
 Total Electron Content (TEC), 10^{16} m^{-2}
 Fonte: <http://irimodel.org/>

Para verificar a influência nos resultados, das posições das estações de GPS, em relação a linha perpendicular ao equador magnético e entre as estações, foram calculadas as médias, utilizando alguns dias (5, 10, 15, 20 e 25, para cada estação com resolução temporal de 25 minutos), para as mesmas coordenadas das estações que foram usadas para o conjunto de GPS-TEC, no setor oeste (ícones amarelos) e para um caso ideal, onde as localizações das estações representadas por ícones azuis na Figura (16A) distribuídos, ao longo da linha branca perpendicular ao equador geomagnético, e igualmente espaçadas.

Figura 16 - (A) Mapa mostrando os 12 locais usados para um caso ideal em todas as estações estariam supostamente localizadas igualmente espaçadas entre si sobre a linha branca (ícones azuis). Os ícones amarelos mostram os 10 locais dos receptores GPS TEC usados para o setor oeste. (B) Gráficos de contorno mostrando as variações da EIA utilizando as médias mensais do IRI-TEC para fevereiro em função do dip-latidade e de UT. O painel superior mostra características da EIA usando dados do modelo IRI para locais ideais e o painel inferior mostra as características da EIA usando dados do modelo IRI para localização das estações de GPS-TEC



A Figura (16B) apresenta os gráficos de contorno de VTEC_u, o (painel superior) mostra a EIA (cristas e vale) para o conjunto de coordenadas representadas pelos ícones azuis da Figura (16A). Enquanto o (painel inferior) mostra os resultados para o conjunto de estações representadas pelos ícones amarelos na Figura 16A. Observa-se que ambos os gráficos de contorno de VTEC calculados pelo modelo IRI são semelhantes quanto a intensidade e ao formato, contudo com uma pequena diferença na distância entre as cristas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Variação sazonal da EIA sobre o setor brasileiro usando dados de três conjuntos de GPS-TEC

Os gráficos de contorno das médias mensais do VTEC em função do UT e do dip-latitude de janeiro a dezembro são apresentados nas Figuras 17A (oeste), 17B (central) e 17C (leste). A escala de cores que mostra os valores de VTEC_u varia de 0 a 50 uniformemente para todos os meses nos três setores. É imprescindível mencionar que o ano de 2016 pertence à fase decrescente do ciclo solar (ciclo 24) com média de F10.7 = 80 s.f.u, (1 s.f.u. = 10⁻²² W m⁻² Hz⁻¹).

Por volta das 10:00 - 11:00 UT, é possível notar uma transição do crepúsculo (azul escuro ~ 5 VTEC_u) para a manhã (azul claro ~ 10 VTEC_u e verde claro ~ 20 VTEC_u). Essa transição de cores é um sinal de que o processo de fotoionização começa na camada F da ionosfera. A eletrodinâmica relacionada ao efeito da fonte começa por volta das 12:00 UT e a formação da EIA começa por volta das 13:00 - 14:00 UT. Algumas horas depois, a EIA está totalmente formado (para mais detalhes, consulte as Figuras 17A, 17B e 17C). De acordo com [Fejer et al. \(1979\)](#), a deriva vertical tornou-se positiva e a camada F inicia sua deriva ascendente por volta das 12:00 - 13:00 UT (7:00-8:00 LT) em Jicamarca (setor americano). Portanto, os presentes resultados corroboram com a observação de deriva vertical da camada F feita em Jicamarca (setor peruano).

Ao analisar as Figuras 17A, 17B e 17C, percebe-se que todos os setores têm variações semianual notórias na intensidade das cristas da EIA com máximo principal do VTEC durante janeiro, fevereiro a março, mínimo durante junho, julho e agosto e máximo secundário durante setembro, outubro e novembro. Além disso, abril, maio e dezembro são meses de transição.

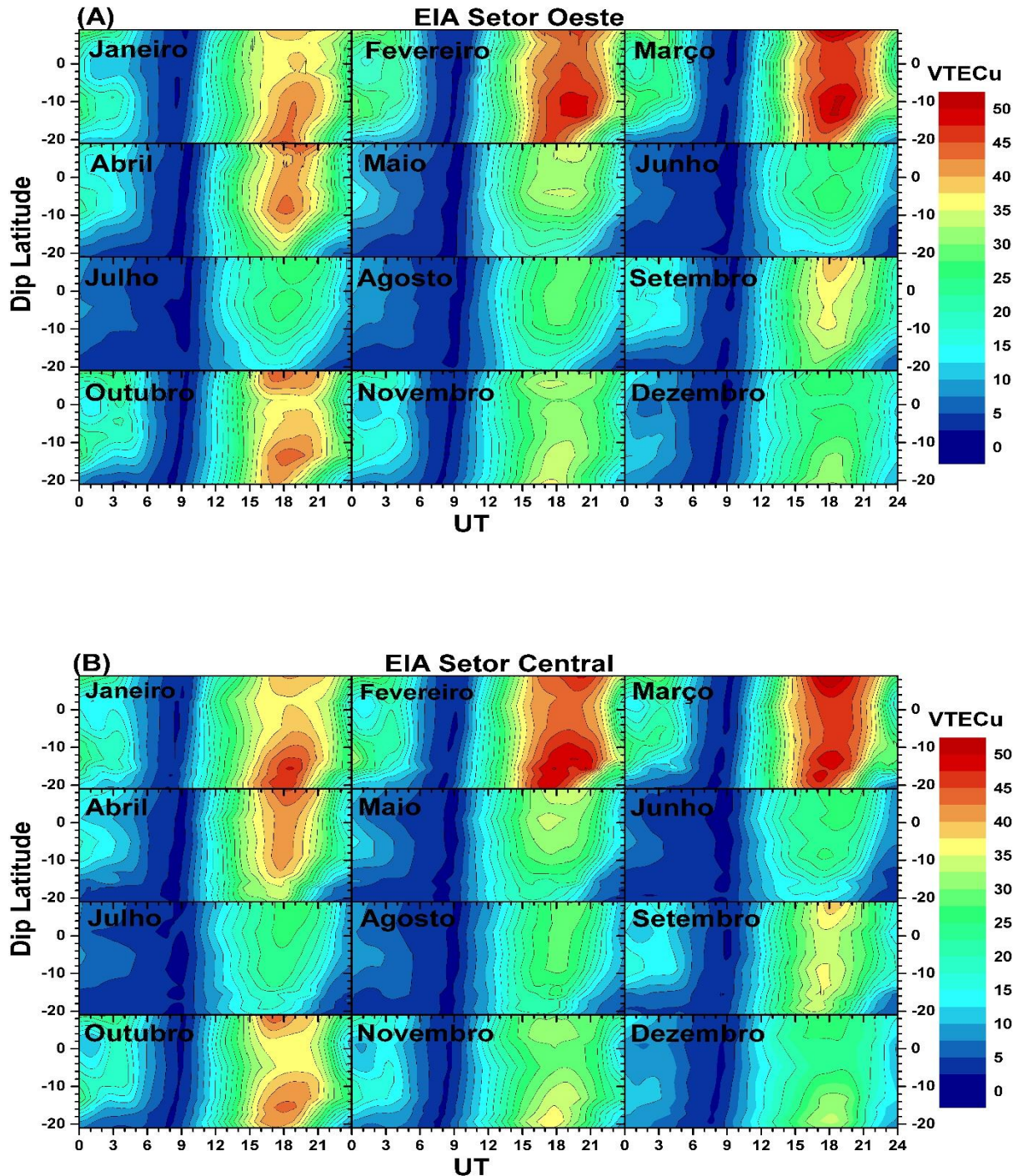
Os valores máximos médios do VTEC são, aproximadamente, 55 VTEC_u para o máximo principal, 30 VTEC_u para o mínimo e 40 VTEC_u para o máximo secundário. É importante notar que, dentro de uma curta distância entre os setores leste, central e oeste, são observadas diferenças importantes na morfologia da EIA de um mês para o outro, durante os principais períodos máximo principal, mínimo e máximo secundário da EIA. Além disso, a comparação mensal entre as cristas e o vale da EIA nos três

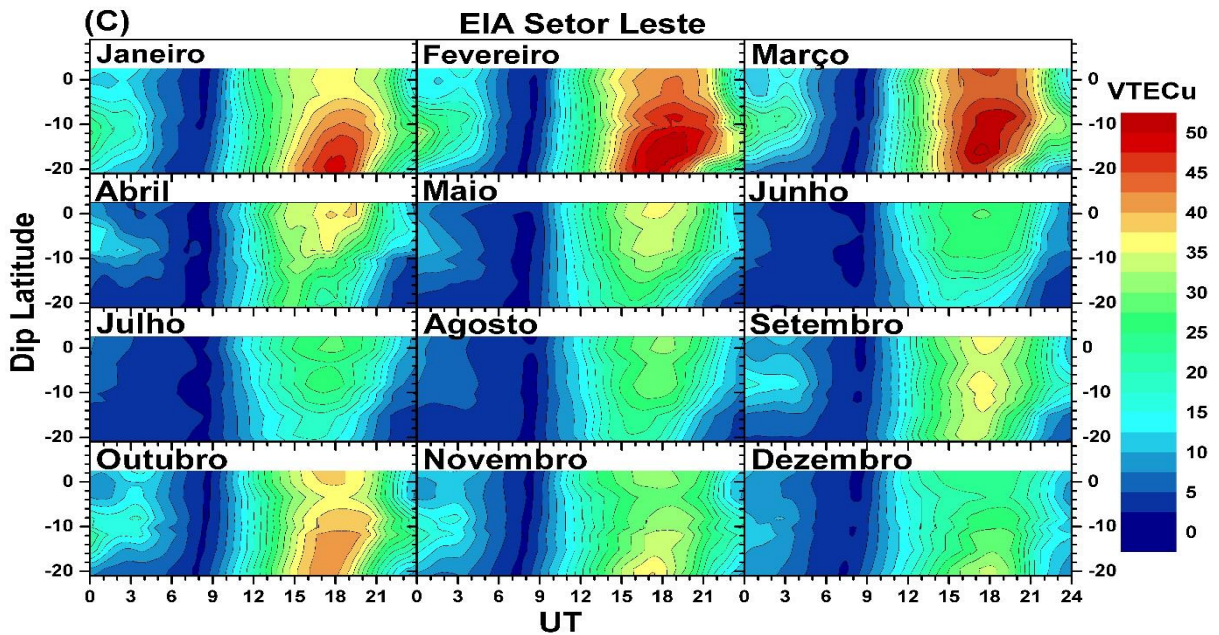
setores indicam que os setores leste e oeste apresentam morfologia e intensidade de densidade (VTEC) com grandes diferenças. No entanto, em alguns meses o setor central é semelhante ao leste e outros são semelhantes aos setores oeste.

A variação sazonal da EIA é investigada por vários pesquisadores nos setores indiano, asiático, africano e brasileiro e variações semestrais são relatadas em todos esses setores (AMAECHEI; OYEYEMI; AKALA, 2019, RAO *et al.*, 2018, MO *et al.* 2018, KUMAR *et al.*, 2014, JONAH *et al.*, 2015, VENKATESH *et al.*, 2014b, LIU *et al.*, 2013, ZHAO *et al.*, 2009, BERTONI *et al.*, 2006, RAO *et al.*, 2006). Os picos semestrais nos setores chinês e indiano, no hemisfério norte, ocorrem durante o equinócio (primavera e outono), mas no setor brasileiro, no hemisfério sul, os picos ocorrem durante o solstício (verão) e equinócio (primavera).

O referido estudo indica que as variações mensais da EIA, no setor brasileiro, diferem entre os setores estudados separados por uma curta distância longitudinal, devido ao efeito combinado da geometria dos equadores geográficos e geomagnéticos e do ângulo do zênite solar (fotoionização). Para investigar mais detalhadamente as diferenças e semelhanças da EIA, as características da EIA ao longo das três zonas longitudinais diferentes são apresentadas e discutidas na seção a seguir.

Figura 17 - Gráficos de contorno de VTEC em função do dip-latitude (eixo Y) e de UT (eixo X), onde observa-se a variabilidade da EIA de janeiro a dezembro de 2016. A Figura (17A) mostra a variabilidade sazonal da EIA, do equador para além da crista da anomalia da EIA no setor oeste brasileiro. (B) O mesmo que a Figura (17A), mas para o setor central brasileiro. (C) O mesmo que a Figura (17A), mas para o setor leste brasileiro

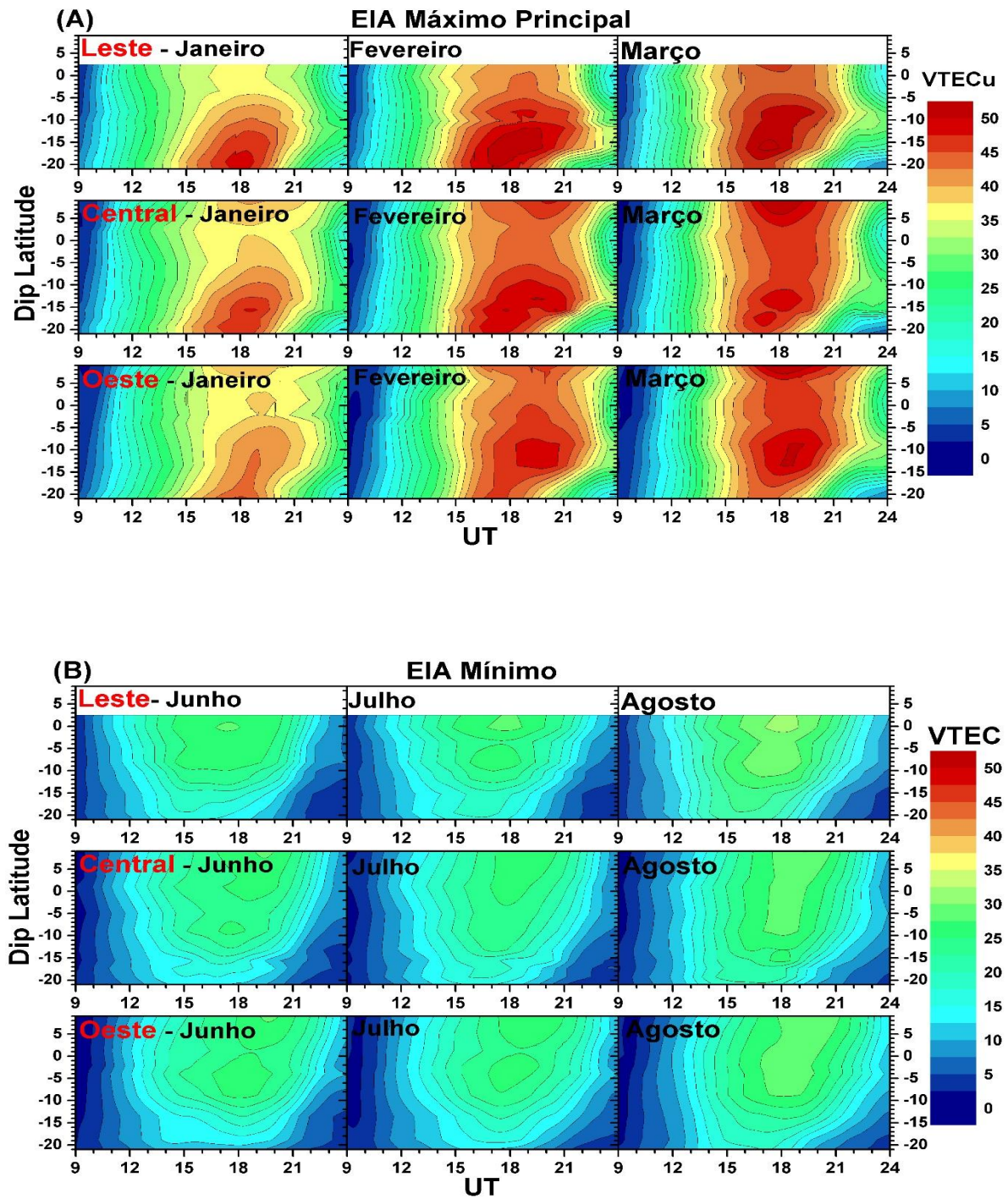


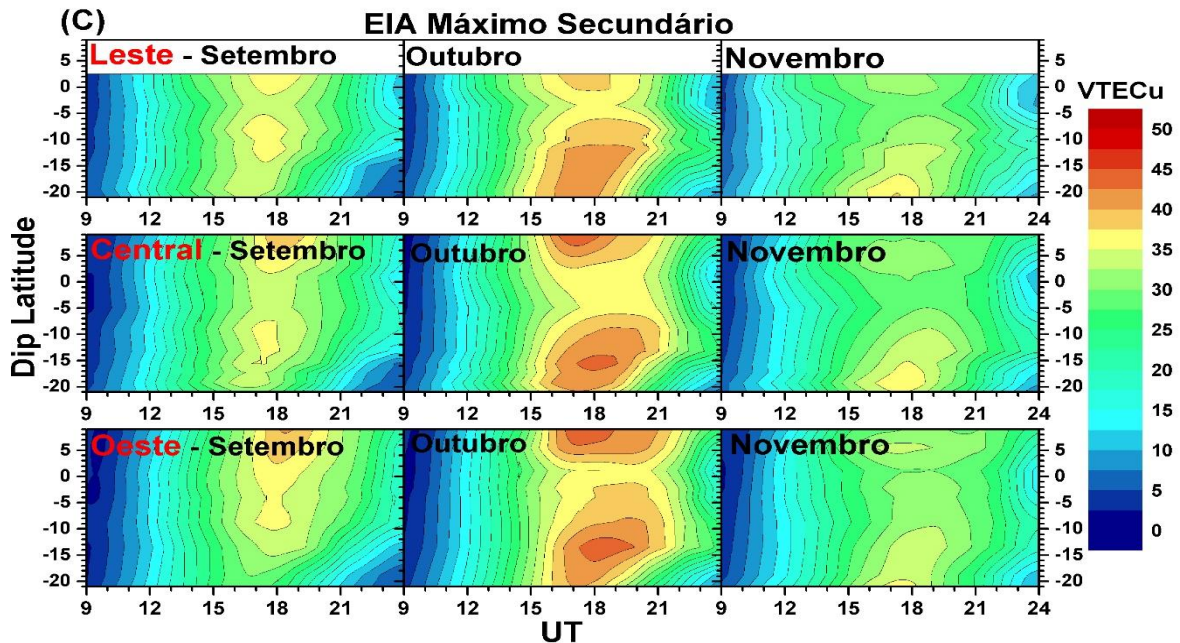


4.2 Comparação da EIA entre os setores oeste, central e leste durante o máximo principal, mínimo e máximo secundário

Para entender as semelhanças e diferenças das características da EIA, entre os três setores, foram analisadas as variações da EIA durante o máximo principal (janeiro, fevereiro e março), mínimo (junho, julho e agosto) e máximo secundário (setembro, outubro e novembro), com particular interesse na posição e extensão das cristas e do vale no setor brasileiro. A Figura 18 mostra os gráficos de contorno das médias mensais da variação do VTEC em função do dip-latitude e de UT nos três setores durante o máximo principal (18A), mínimo (18B) e máximo secundário (18C). A primeira linha de cada painel se refere aos setores leste, segunda linha setor central e terceira linha setor oeste. Como a produção de ionização é iniciada por volta das 18:00 UT, somente após esse horário o processo de formação da EIA é iniciado, esses gráficos de contorno VTEC são apresentados das 9:00 UT às 24:00 UT.

Figura 18 - Gráficos de contorno mostrando as variações das médias mensais, onde os valores de VTEC variam de 0 a 50 VTECu em função do dip-latitude e de UT. (A) Máximo principal da EIA (janeiro, fevereiro e março), primeira linha setor leste, segunda linha setor central e terceira linha setor oeste. (B) Segue a mesma relação entre linhas e setores da Figura A, porém para o mínimo da EIA (junho, julho e agosto). (C) Segue a mesma relação entre linhas e setores da Figura A, porém para o máximo secundário da EIA (setembro, outubro e novembro)





A Figura (18A) apresenta as variações das médias do VTEC das 9:00 UT às 24:00 UT mostrando a EIA durante o máximo principal (janeiro, fevereiro e março). Observa-se que a EIA é formada durante os três meses nos três setores. As cristas da EIA, durante o mês de janeiro são menos intensas e tem menor tempo de duração do que as de fevereiro e março nos três setores.

A crista da EIA é menos intensa no setor oeste do que no Leste e no central, principalmente, em janeiro. Essas diferenças entre os três setores longitudinais são atribuídas, mormente, aos efeitos variados de diferentes processos fotoquímicos e dinâmicos. Provavelmente, a maior distância entre os equadores geográfico e magnético no setor oeste do que no setor leste. Em fevereiro, as cristas da EIA são mais intensas e mais bem formadas.

Nota-se que a separação crista-vale-crista, no setor oeste, é mais próxima do que no setor central. Em março, a forma da EIA no setor central é muito complexa, mostrando dupla crista sul, mas no leste e oeste a crista apresenta sua forma e duração padrão.

A Figura 18B mostra a EIA durante o mínimo (junho, julho e agosto) para os três setores longitudinais. Durante esses 3 meses em todos os setores, as cristas da EIA são menos intensas, em alguns casos é possível afirmar que elas não são formadas. A maior parte do plasma está concentrada ao longo do equador

geomagnético. Em junho, a EIA não é formada no setor leste, pois é possível observar que a maior parte do plasma se concentra sobre o equador magnético, porém é formada francamente nos setores central e oeste.

Além disso, a depressão nos setores central e oeste é estreita e a crista sul pouco intensa nesses dois setores. Em julho, a EIA é fracamente formada nos setores leste e oeste, mas o vale é estreito e as cristas sul pouco intensas. No entanto, no setor central, a EIA não é formada, pois não é possível observar a crista sul. Em agosto, as cristas da EIA não são formadas em nenhum dos três setores. Contudo, percebe-se que a crista norte da EIA se estende a região equatorial até as baixas latitudes. Durante o inverno (junho, julho e agosto), o efeito da fonte é mais fraco em comparação com outras estações e não tem força suficiente para formar a crista da EIA todos os dias, como mostra a Tabela 3 (ocorrência diária da EIA). Isso explica por que a crista da EIA é menos intensa e ausente em muitos dias durante o inverno.

A Figura (18C) apresenta a EIA durante o máximo secundário (setembro, outubro e novembro). Em setembro, a EIA é menos intensa, todavia observando a distribuição do plasma é possível afirmar que a EIA é formada nos setores leste e central, porquanto as duas cristas e o vale podem ser vistos, mas a duração e a extensão longitudinal são mais curtas do que aquelas observadas durante o máximo principal. Ainda em setembro, no setor oeste, a EIA não é formada, porque não são observados as cristas e o vale da EIA. As cristas mais intensas da EIA são as de outubro, ou seja, nota-se que são semelhantes nos três setores, porém o vale no setor central é um pouco mais largo do que nos setores leste e oeste. Em novembro, as cristas da EIA são menos intensas e o vale é maior que em setembro e outubro em todos os setores. Semelhante ao máximo principal, o máximo secundário mostra uma assinatura fraca do PRE logo após o pôr-do-sol. Mesmo assim, a assinatura é mais fraca que o máximo, é possível ver a intensificação secundária da EIA seguindo as isolinhas na Figura 18C, entre as 21:00 e as 24:00 UT.

Além disso, a depressão equatorial observada, durante o máximo principal, Figura (18A) é maior que a observada durante o máximo secundário Figura (18C). O que significa que as cristas estão bem separadas durante o máximo principal. Isso pode ter sido causado pela combinação do efeito fonte forte e do ângulo zenital solar durante o verão e pela grande distância entre os equadores geográfico e magnético.

Além disso, é possível observar que os valores durante o mês de março têm maior longitude nos setores centra e oeste do que no setor leste.

Ressalta-se, na Figura (18A), que durante o máximo principal da EIA há uma clara diferença entre a formação (por volta de 15:00 UT) e o decaimento (por volta das 22:00 UT) no desenvolvimento das cristas. A intensidade da crista aumenta rapidamente, mas o decaimento ocorre de forma mais gradual. Isso é visto em todos os três setores com diferentes durações e intensidades. O decaimento gradual da crista da EIA durante as etapas finais é a assinatura do PRE que ocorre durante o pôr-do-sol.

A comparação das características da EIA durante 2016 entre os três setores indica variações mensais e sazonais significativas na intensidade, extensão e duração das cristas e vale da EIA. Sabe-se que a variabilidade da EIA é causada por vários fatores, como efeito fonte, ventos neutros e processos fotoquímicos (LUAN *et al.*, 2015; RAM; SU; LIU, 2009). No setor oeste a distância entre os equadores é maior, enquanto eles são comparativamente mais próximos no setor leste.

Essas variações entre os três setores longitudinais se devem às grandes variações nas distâncias entre os equadores geográficos e magnéticos para os três setores. Portanto, o efeito fonte no setor oeste se origina de uma distância maior do equador geográfico, onde a produção é máxima. Além disso, os efeitos de diferentes fatores nos comportamentos da EIA são alterados com o afastamento dos equadores geográfico e geomagnético combinados com ventos neutros (SU *et al.*, 1997). Assim, a combinação dos processos fotoquímicos, efeito fonte e afastamento entre os equadores geográficos e geomagnéticos exercem um papel importante na variabilidades dia-a-dia das características da EIA nos três setores considerados nesta investigação.

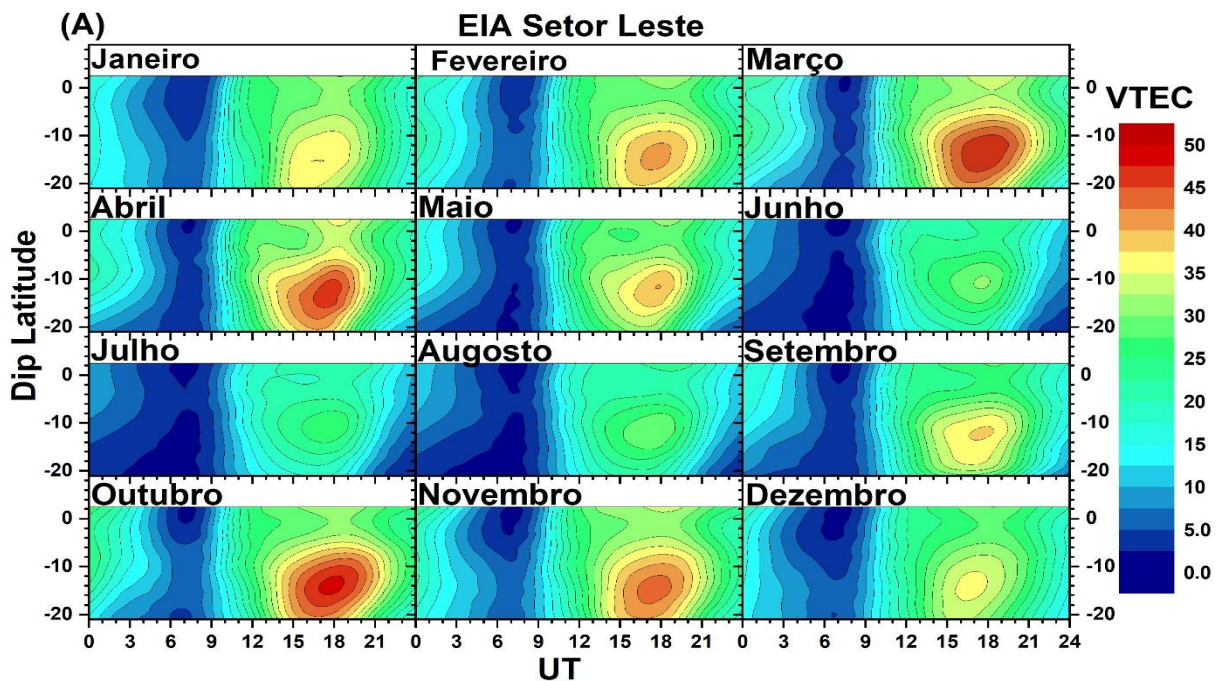
4.3 Comparação entre as características da EIA utilizando dados de GPS-TEC e do modelo IRI

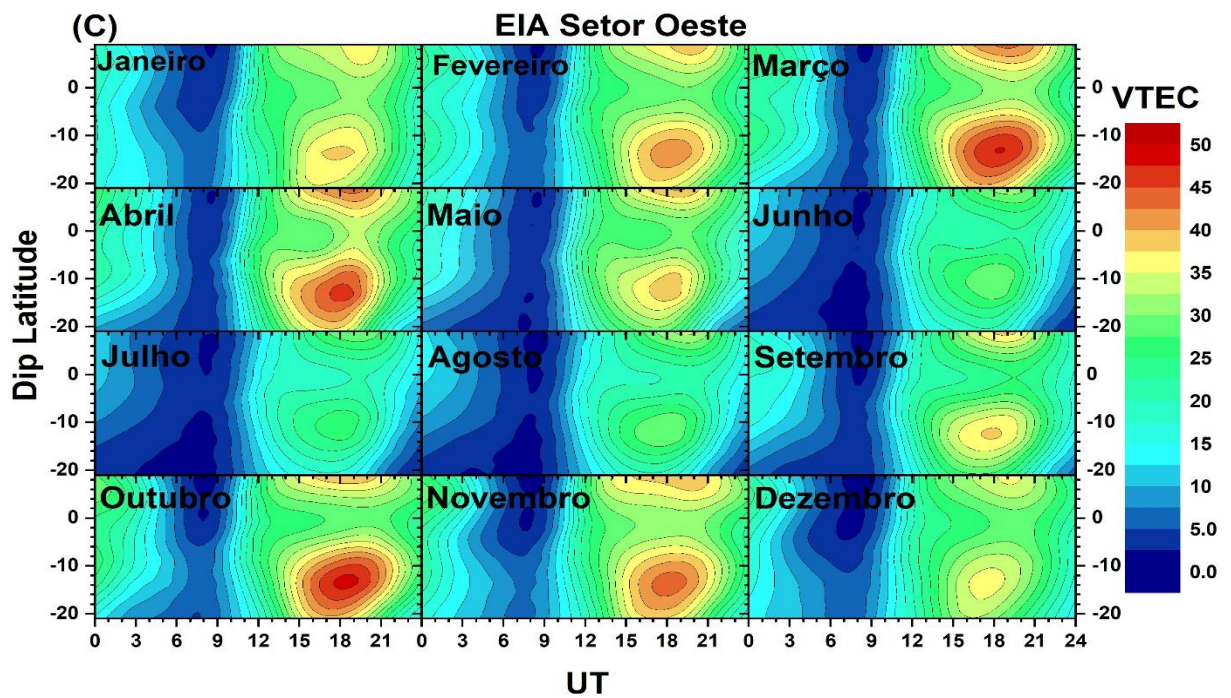
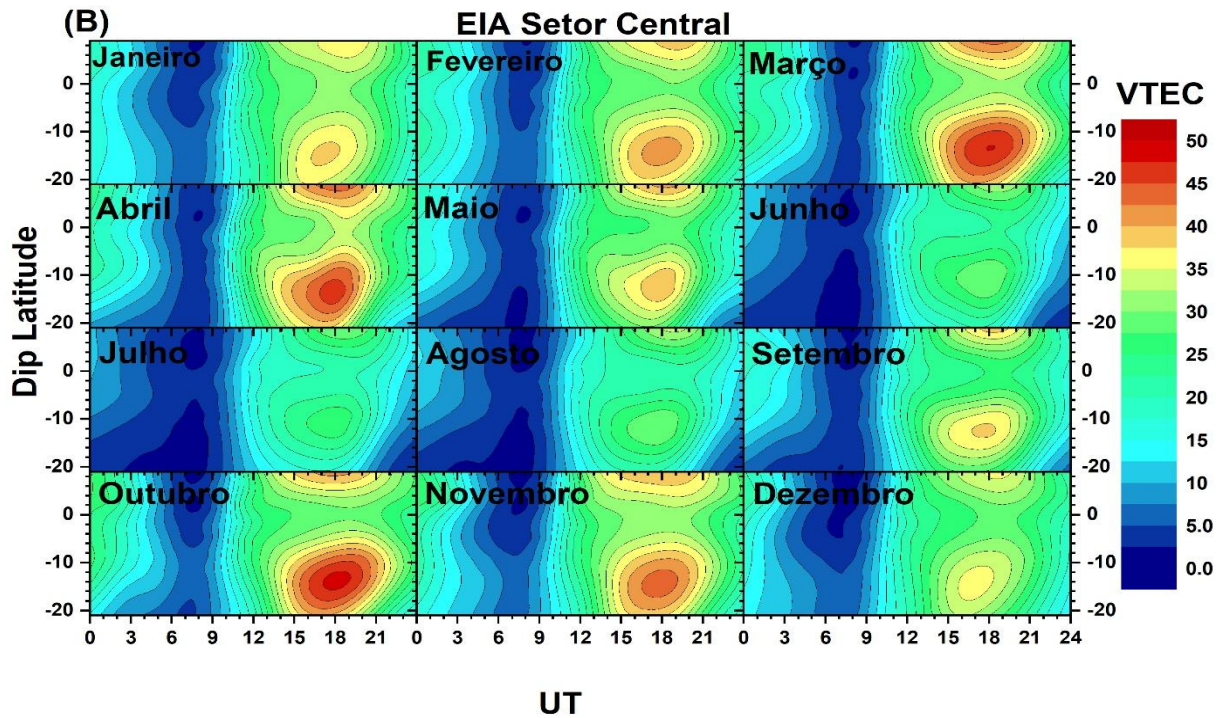
A Figura (19A) mostra os gráficos de contorno da EIA utilizando as médias dos VTEC de alguns dias de cada mês (5, 10, 15, 20 e 25) calculados pelo modelo IRI-2016 em função do dip-latitude e de UT para os setores brasileiros oeste, central e

leste; para as mesmas coordenadas das estações que foram utilizadas nas redes de GPS-TEC (Tabela 3).

Analisando os gráficos de contorno das variações da EIA e utilizando as médias mensais calculadas pelo modelo IRI nos três setores, percebe-se que são muito semelhantes. Portanto, não é possível verificar diferenças entre as características da EIA nos setores leste e oeste da região brasileira. Provavelmente, o modelo IRI-TEC precise de algumas melhorias para representar as especificidades da configuração geométrica entre os equadores geográfico e magnético no setor brasileiro. Portanto, a comparação entre as médias mensais das variações diurnas da EIA obtidas utilizando dados observacionais e empregando GPS-VTEC e do modelo IRI-VTEC é útil para estimar desempenho do modelo IRI-2016 e para prever a variabilidade da EIA (cristas e vale) no setor brasileiro.

Figura 19 - Gráficos de contorno mostrando a variação média de mês a mês do IRI-VTEC em função do dip-latidade e de UT de janeiro a dezembro de 2016. (A) Variabilidade sazonal da EIA, do equador para além da crista da EIA no setor leste brasileiro. (B) O mesmo que a Figura (19A), mas para o setor central brasileiro. (C) O mesmo que a Figura (19A), mas para o setor oeste brasileiro





Os gráficos de contorno, utilizando dados de VTEC, calculados pelo IRI, nos três setores, mostram um comportamento semestral em relação a intensidade das cristas da EIA, como visto nas variações do GPS-TEC. No entanto, os meses de

ocorrência do máximo principal, mínimo e máximo secundário são diferentes entre os resultados fornecidos pelas estações de GPS-TEC e calculados pelo IRI.

Nos resultados calculados pelo IRI, durante o máximo principal, a maior intensidade da EIA, ou seja, os maiores valores de VTEC ocorrem nos meses equinociais de março, abril e outubro, com o máximo secundário ocorrendo durante os meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Esses meses de ocorrência do maior máximo e máximo secundário da EIA não coincidem exatamente com as observações do GPS. No entanto, o mínimo da EIA no modelo IRI, ou seja, os menores valores de VTEC ocorrem nos meses de junho, julho e agosto que está de acordo com as observações.

A morfologia da EIA (crista e depressão) observada através dos valores medidos pelo modelo IRI-TEC e GPS-TEC tem grandes diferenças. Quando se compara os gráficos de contorno é possível notar que a EIA vista através dos dados do GPS-TEC é mais alongada do que a vista no modelo IRI-TEC, que apresenta uma forma ovalada. Além disso, a EIA (IRI-TEC) apresenta uma crista e um vale que são mais definidos. Por outro lado, o vale EIA (GPS-TEC) nem sempre está localizado no equador magnético e é maior do que o previsto pelos resultados do modelo (IRI-TEC).

Uma comparação entre o GPS-VTEC e os valores calculados pelo modelo IRI-2012 nas estações localizadas em Palmas-TO (10,2°S, dip-latitude 5,5°S, perto da região equatorial) e São José dos Campos-SP (23,2°S, dip-latitude 17,6°S, sob a crista da anomalia) em um período de baixa atividade solar, no setor brasileiro é feito por, [De Abreu et al. \(2017\)](#). Eles notaram que o modelo IRI-TEC e o GPS-TEC apresentaram melhor concordância durante a noite.

Entretanto, durante o dia, o IRI-TEC e o GPS-VTEC ou foF1 mostraram diferenças maiores ([VENKATESH et al., 2014a](#), [VENKATESH 2014b](#), [DE ABREU et al., 2017](#), [PERNA et al., 2018](#)). [Rao et al. \(2018\)](#) investigou o foF2 no setor chinês de baixa latitude e notou discrepância significativa entre os valores de foF2, utilizando ionossonda e o modelo IRI-2016. Eles notaram que o modelo IRI-2016 subestima os valores de foF2 no inverno e equinócios e superestima os valores de foF2 no verão.

Além disso, analisando os gráficos de contorno das médias mensais do VTEC calculadas pelo modelo IRI, nota-se que a variabilidade da EIA é semelhante nos três setores, porém as diferenças são significativas quando analisadas as variabilidades

utilizando os dados das estações de GPS-VTEC. Isso mostra que o modelo de IRI não capturou, adequadamente, as diferenças Leste-Oeste da EIA no setor brasileiro.

Provavelmente, o modelo IRI-VTEC precisa de algumas melhorias para levar em consideração as especificações da configuração geométrica entre os equadores geográficos e magnéticos no setor brasileiro. Assim sendo, a comparação entre as variações diurnas médias mensais da EIA obtidas a partir do GPS-VTEC medido, experimentalmente, e dos dados calculados pelo modelo IRI-VTEC usando as estações disponíveis, próximas às linhas pretas, na Figura 13, é útil para estimar o desempenho do modelo IRI-2016 para prever EIA (crista e vale) no setor brasileiro.

4.3.1 Variação diária da EIA observada e comparação como a calculada pelo modelo IRI

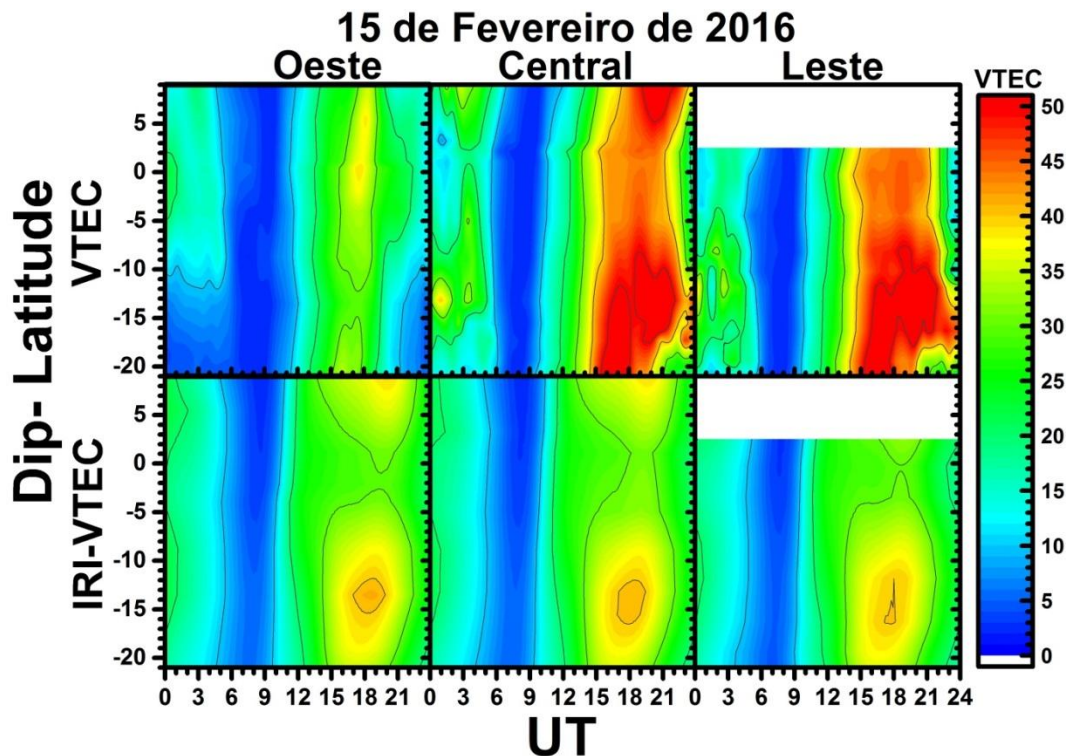
Utilizando um conjunto de receptores de GPS-TEC para cada longitude, conforme mostrado na Figura 13 (oeste, central e leste), foram obtidos os TECs diários e usando a metodologia [Seemala e Valladares \(2011\)](#) os dados de VTEC foram obtidos de cada estação. Destarte, os gráficos de contorno representam a distribuição do VTEC em função do UT e dip-latitude para o dia 15 dos meses representativos de cada estação do ano (fevereiro/verão, abril/outono, junho/inverno e setembro/primavera). Utilizando o modelo IRI-2016 foram escolhidos os mesmos dias e coordenadas das estações selecionadas da rede de GPS-TEC, conforme consta na Figura 13, com a finalidade de se realizar uma comparação entre os dados VTEC obtidos a partir da rede de receptores e os calculados pelo modelo IRI-2016 (Figuras 20, 21, 22 e 23). Nessas Figuras, os painéis da parte superior mostram a variação do GPS-VTEC obtidos e os painéis da parte inferior mostram os resultados de IRI-VTEC, calculados pelo modelo IRI-2016, em função de UT e dip-latitude para os 3 setores estudados.

Nessas Figuras, o limite mínimo de TECu é 0 e o limite máximo é de 35 a 40 TECu no setor oeste e entre 45 e 50 TECu, nos setores central e leste, respectivamente. Pode-se notar que a intensidade vai aumentando de oeste para leste, já segundo o modelo IRI a intensidade permanece semelhante nos três setores. É importante averiguar que o VTEC máximo, no dia representativo de verão, ocorre aproximadamente entre 16:00 e 22:00 UT (padrão avermelhado), pois é o período em

que há maior intensidade da radiação solar que é a principal fonte de ionização das moléculas neutras, principalmente, por fotoionização. O mínimo de VTEC nessa data ocorre, aproximadamente, entre 06:00 e 10:00; 6:00 e 11:00 e 4:00 e 09:00 UT nos setores oeste, central e leste, respectivamente (padrão azul, TECu: 0 a 10), período em que há maior recombinação eletrônica resultando na produção de átomos e moléculas neutras.

Na Figura 20 (parte inferior-IRI), nota-se que os valores máximos de VTEC calculados (~38 a 39 VTECu) são menores que os obtidos da parte superior (45 a 50 VTECu), os valores máximos de VTEC são próximos nos três setores. Logo, praticamente não existe uma variação longitudinal, vista através dos 3 setores. Também, o mínimo de VTEC-IRI ocorre aproximadamente entre 05:00 e 10:00; 04:00 e 09:00 e 04:00 a 09:00, nos setores oeste, central e leste, respectivamente (padrão de cor azul, 0 a 5, é igual nos três setores).

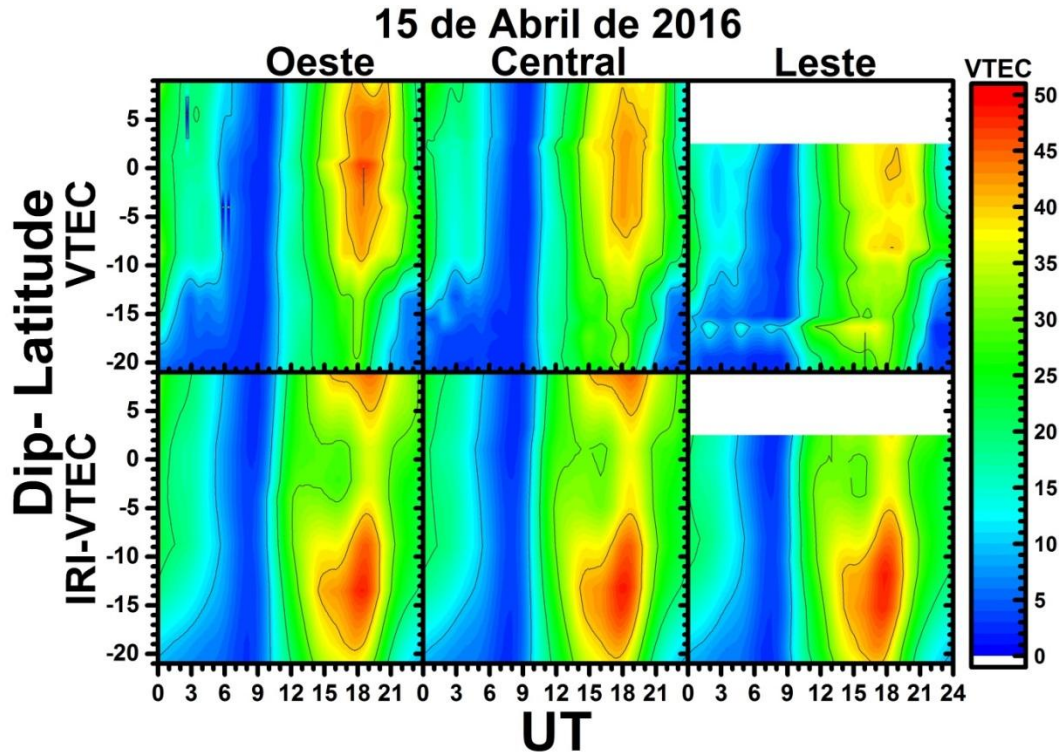
Figura 20 - Comparação da variação diária do entre o GPS-VTEC observado e o IRI-VTEC calculado pelo modelo IRI-2016 em função de UT e dip-latitude em 15 de fevereiro de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados



Na Figura 21, o limite máximo do VTEC é de 40 a 45, 40 a 42 e 35 a 40 VTECu nos setores oeste, central e leste, respectivamente. Pode-se notar que os valores de máximos de VTEC diminuem de oeste para leste, já segundo o modelo IRI os valores máximos de VTEC são próximos nos três setores. É importante observar que o VTEC máximo, no dia representativo de outono, ocorre aproximadamente entre 17:00 e 21:00 UT (padrão avermelhado), nos setores oeste e central e entre 18:00 e 20:00 UT no setor leste, posto que é o período em que há maior intensidade da radiação. O mínimo de VTEC nessa data ocorre, aproximadamente, entre 05:00 e 11:00, nos três setores (padrão azul, VTECu: 0 a 10), pois é o período em que há maior recombinação eletrônica resultando na produção de átomos e moléculas neutras.

Na Figura 21 (parte inferior-IRI) nota-se que os valores máximos de VTEC calculados (~40 a 45 VTECu) são maiores que os obtidos da parte superior nos setores central e leste (40 a 42 VTECu), os valores máximos de VTEC são próximos nos três setores. Portanto, praticamente não existe uma variação longitudinal, vista através dos 3 setores. Também, o mínimo de VTEC-IRI ocorre, aproximadamente, entre 06:00 e 10:00; 05:00 e 10:00 e 05:00 a 09:00, nos setores oeste, central e leste, respectivamente (padrão de cor azul, 0 a 5, é igual nos três setores).

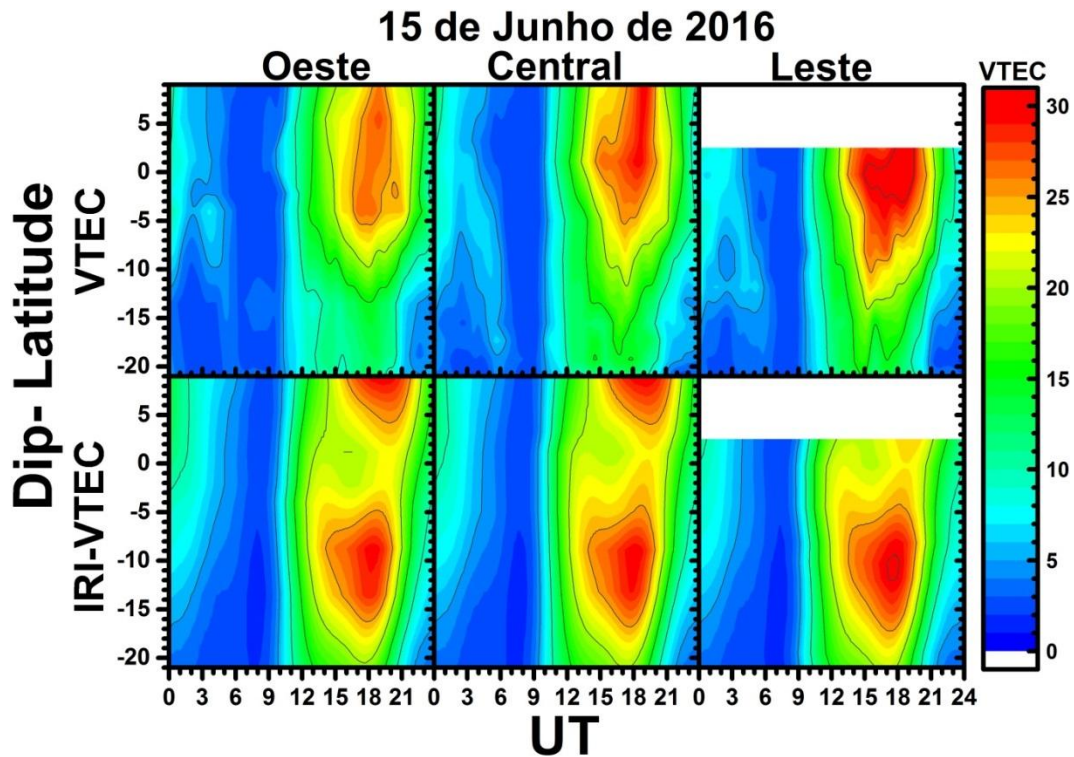
Figura 21 - Comparação da variação diária entre o GPS-VTEC observado e o VTEC-IRI calculado pelo modelo IRI-2016 em função de UT e dip-latitude em 15 de abril de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados



Destaca-se que, entre os dias aqui analisados, 15 de junho (representativo de inverno) é o mês com os menores valores de máximos de VTEC (30 TECu), pode-se notar que tanto os dados observacionais quanto os previstos aumentam os valores de VTEC de oeste para leste. Observa-se que os maiores valores de VTEC, na parte superior, ocorrem entre 16:00 e 20:00, 15:00 e 20:00, 13:00 e 21:00 UT, nos setores oeste, leste e sul, respectivamente (padrão avermelhado, 25 a 30 VTEC). Os valores mínimos do VTEC para o mesmo período ocorrem entre 00:00 e 10:00 UT nos três setores (padrão azul, 0 a 8 VTECu).

Na Figura 22 (parte inferior-IRI), nota-se que os valores máximos de VTEC calculados (~25 a 27 VTECu) são menores que os obtidos da parte superior no setor leste (25 a 30 VTECu), os valores máximos de VTEC são próximos nos três setores, logo, praticamente não existe uma variação longitudinal, vista através dos 3 setores. Também, o mínimo de VTEC-IRI ocorre, aproximadamente, entre 04:00 e 10:00; 03:00 e 10:00 e 02:00 a 09:00 UT, nos setores oeste, central e leste, respectivamente (padrão de cor azul, 0 a 5, é igual nos três setores).

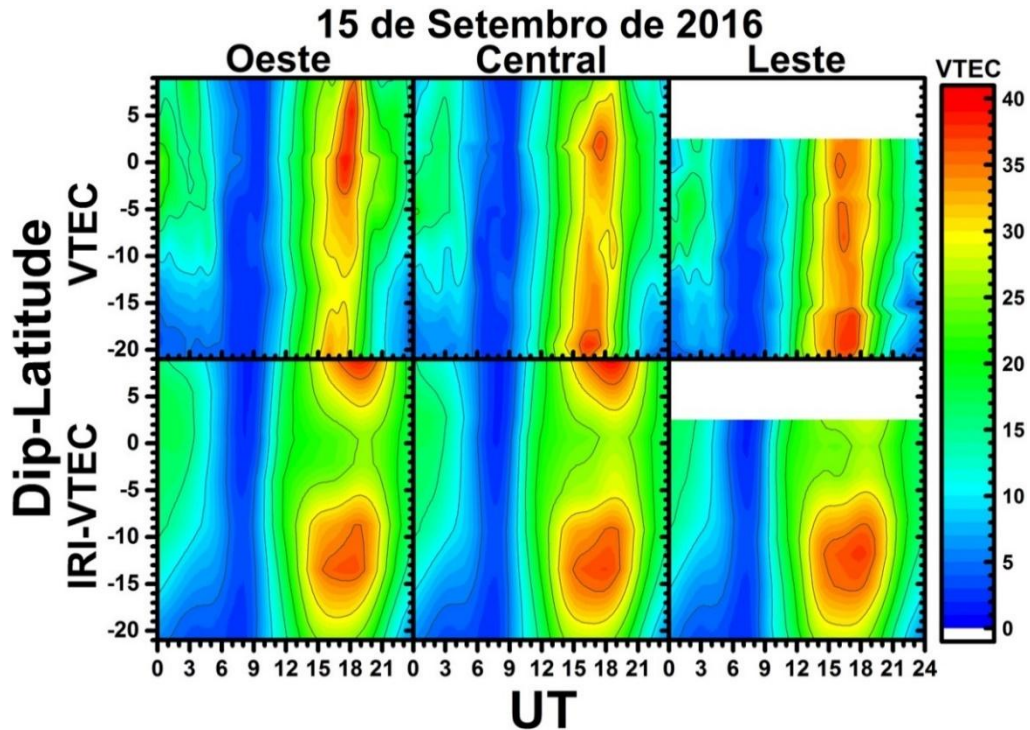
Figura 22 - Comparação da variação diária entre o GPS-VTEC observado e o IRI-VTEC calculado pelo modelo IRI-2016 em função de UT e dip-latitude em 15 de junho de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados.



Destaca-se que entre os dias aqui analisados 15 de junho (representativo de inverno) é o mês com os menores valores de máximos de VTEC (30 VTECu), pode-se notar que tanto os dados observacionais quanto os previstos aumentam os valores de VTEC de oeste para leste. Observa-se que os maiores valores de VTEC, na parte superior, ocorrem entre 16:00 e 20:00, 15:00 e 20:00, 13:00 e 21:00 UT, nos setores oeste, leste e sul, respectivamente (padrão avermelhado, 25 a 30 VTEC). Os valores mínimos do VTEC para o mesmo período ocorrem entre 00:00 e 10:00 UT nos três setores (padrão azul, 0 a 8 VTECu).

Na Figura 23 (parte inferior-IRI), nota-se que os valores máximos de VTEC calculados (~25 a 27 VTECu) são menores que os obtidos da parte superior no setor leste (25 a 30 VTECu), os valores máximos de VTEC são próximos nos três setores. Logo, praticamente, não existe uma variação longitudinal, vista através dos 3 setores. Também, o mínimo de VTEC-IRI ocorre, aproximadamente, entre 04:00 e 10:00; 03:00 e 10:00 e 02:00 a 09:00 UT, nos setores oeste, central e leste, respectivamente (padrão de cor azul, 0 a 5, é igual nos três setores).

Figura 23 - Comparação da variação diária entre o GPS-VTEC observado e o IRI-VTEC calculado pelo modelo IRI-2016 em função de UT e dip-latitude em 15 de setembro 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados



Analisando as variações dos dias representativos dos meses (fevereiro, abril, junho e setembro) é possível observar que os valores de VTEC obtidos são maiores que os calculados pelo modelo IRI-2016 em fevereiro, junho e setembro, exceto em abril no equinócio de outono em que o VTEC calculado é maior que o obtido. Os maiores valores de VTEC foram obtidos em fevereiro/Verão (50 VTECu), porém os menores foram calculados em junho/Inverno (30 VTECu).

Em relação a investigação da variação das características morfológicas, formação e evolução da EIA através da distribuição do VTEC em função de UT e dip-latitude. Nota-se que no verão a EIA não é bem formada, pois não é possível observar a formação do vale sobre o equador magnético e formação das duas cristas da anomalia através do VTEC obtido no setor oeste. No entanto, é observada nos setores central e Leste. Já em relação ao VTEC calculado, nota-se que a EIA está bem formada, mas apenas com valores menores de VTEC é possível ressaltar, de maneira mais nítida, a formação da EIA nesse dia.

No equinócio de outono com o VTEC obtido o comportamento da EIA não pode ser observado mesmo que mal formada em nenhum dos setores, pois não há formação do vale sobre o equador magnético e a formação das duas cristas da

anomalia. Já com os valores de VTEC calculados observa-se a boa formação da EIA nos três setores, ou seja, formação do vale sobre equador magnético e formação dos picos da anomalia.

No inverno, estação com os menores valores máximos de VTEC (30 VTECu), não se observa a formação da EIA com a distribuição dos VTEC obtidos, mas é possível perceber que os valores de VTEC são maiores no setor leste, já com os VTEC calculados, nota-se a boa formação da EIA nos três setores. No equinócio de primavera não é possível observar a boa formação da EIA através da distribuição do VTEC obtido, nota-se uma redução dos valores de VTEC de oeste para leste, já em relação a distribuição do VTEC calculado, é possível observar a boa formação da EIA nos três setores.

Os resultados obtidos estão de acordo com os encontrados em outros estudos (RISHBETH, 2000; BATISTA; ABDU, 2004; BAGIYA *et al*, 2009; AGGARWAL, 2011; FAGUNDES *et al*, 2015; JONAH *et al*, 2015; TAKAHASHI *et al*, 2016; MO *et al*, 2017).

4.3.2 Comparar a variação das características da EIA entre as médias mensais do VTEC a partir dos receptores de GPS-TEC e os calculados pelo modelo IRI

Neste estudo, as variações médias mensais do VTEC foram calculadas a partir dos VTECs diários obtidos através dos TECs de cada estação receptora. Assim, foram produzidos gráficos de contorno de VTEC em função de UT e dip-latidade para cada mês do ano de 2016. Utilizando o Modelo IRI-2016 foi calculado o VTEC para as mesmas coordenadas das estações receptoras utilizadas neste estudo.

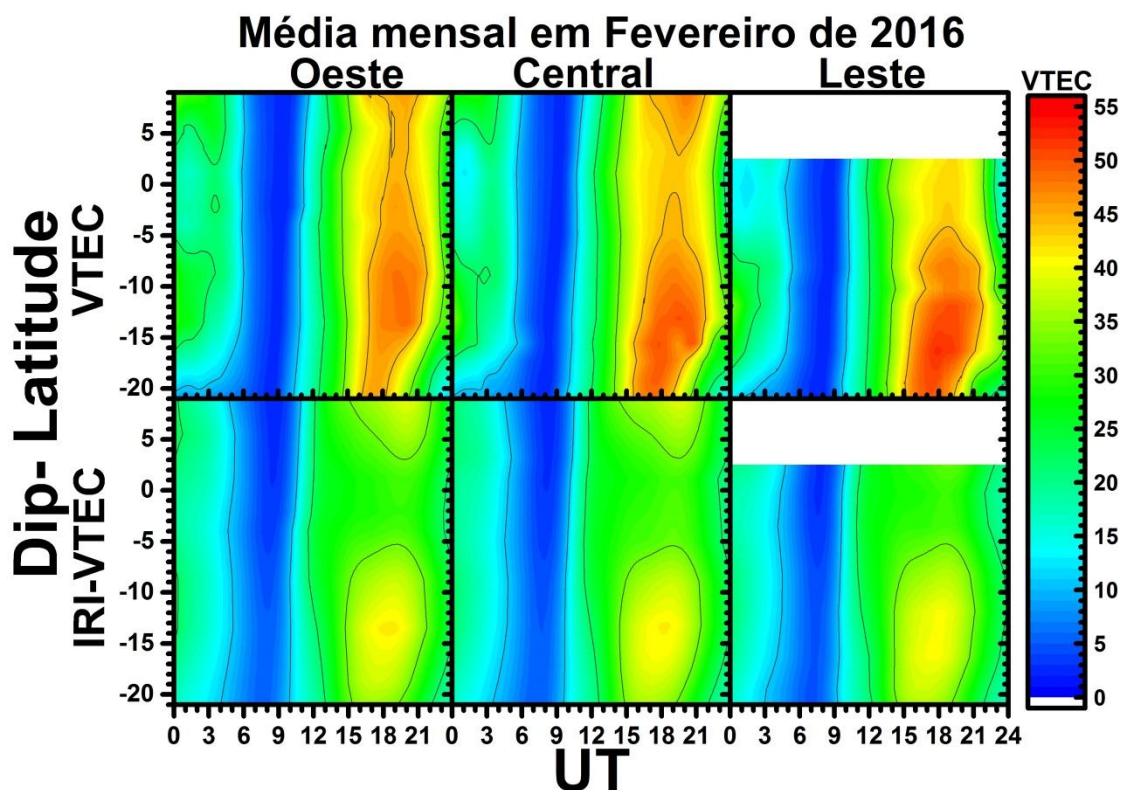
As Figuras 24, 25, 26 e 27, na parte superior mostram a distribuição das médias dos VTEC obtidos a partir dos TEC obtidos das estações de GPS-TEC, em função de UT e dip-latidade para os meses de fevereiro (verão), junho (inverno), abril (equinócio de outono) e setembro (equinócio de primavera), respectivamente, nos setores estudados conforme Figura 13. As Figuras também mostram na parte inferior a média do VTEC calculado pelo modelo IRI-2016 em função de UT e dip-latidade. O limite mínimo utilizado é igual para todos os gráficos (VTEC=0).

Nota-se, claramente, na parte superior da Figura 24 que trata do VTEC observado nesse mês representativo de verão, os máximos de VTEC são aproximadamente entre 45 e 50 (VTECu) nos três setores e ocorrem entre 17:00 e

22:00, 16:00 e 22:00, 15:00 e 22:00 UT, nos setores oeste, central e leste, respectivamente, (padrão avermelhado, VTECu 45 a 55). O mínimo de VTEC ocorre aproximadamente entre 06:00 e 11:00 UT, no setor oeste e entre 05:00 e 10:00 UT, nos setores central e leste, respectivamente (padrão azul: 0 a 15 VTECu, nos três setores). Ainda sobre o mês de verão o nível intermediário caracterizado pela cor verde predomina entre 00:00 e 05:00, 00:00 e 06:00, 00:00 e 05:00 UT, nos setores oeste, central e leste (padrão de cor verde, VTECu, entre 20 e 35, nos três setores).

Na parte inferior da Figura 24 (VTEC-IRI), compreende-se que os valores máximos de VTEC calculados (35 a 40 VTECu) são menores que os obtidos (45 a 50 VTECu) e os valores dos VTEC são próximos nos três setores e ocorrem entre 15:00 e 21:00 UT, nos três setores, enquanto os valores mínimos de VTEC ocorrem entre 04:00 e 10:00 UT, nos três setores.

Figura 24 - Comparação entre a variação da média mensal do GPS-VTEC e do IRI-VTEC em função de UT e dip-latidade em fevereiro de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados



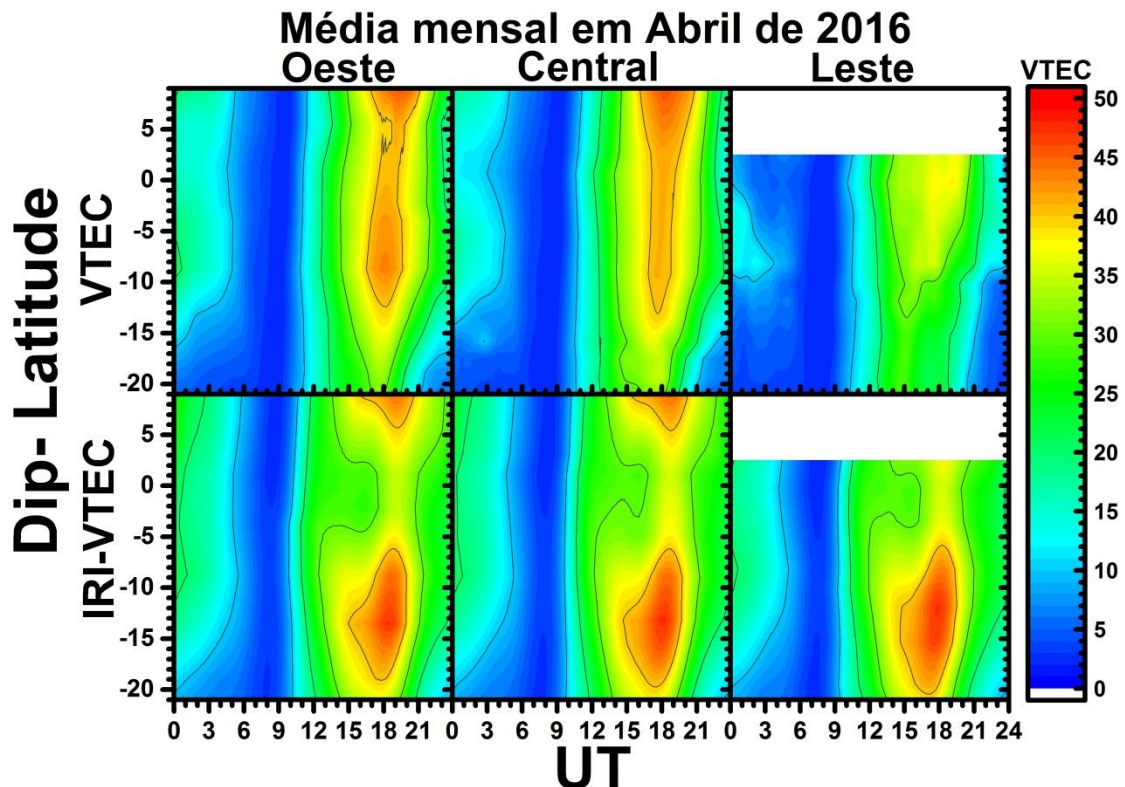
Na Figura 25 do mês de abril (representativo de equinócio de outono) os valores máximos de VTECu são 40 a 45, nos setores oeste e central, respectivamente, e entre 35 a 37 VTECu para o setor leste. Esses valores máximos ocorrem,

aproximadamente, entre 17:00 e 20:00, 17:00 e 21:00, 16:00 e 20:00 UT, nos setores oeste, central e leste, respectivamente (padrão avermelhado, exceto o setor leste, 40 a 45 VTECu nos setores oeste e central).

Nesse mês, os valores mínimos de VTECu ocorrem entre 02:00 e 11:00, 00:00 e 11:00, 00:00 e 11:00 UT, nos setores oeste, central e leste, respectivamente, (padrão azul, VTECu: 0 a 15, nos três setores). Ainda em relação ao mês representativo do equinócio de outono os valores intermediários do VTEC, representados pela cor verde, são observados nos períodos entre 0:00 e 02:00 UT, no setor oeste, mas não aparece nos setores central e leste (padrão de cor verde, VTECu: 15 a 30).

Na parte inferior da Figura 25 (VTEC-IRI), verifica-se que os valores máximos de VTEC calculados (40 a 45 VTECu) são maiores que os obtidos (40 a 42 VTECu) e os valores dos VTEC são próximos nos três setores e ocorrem ente 15:00 e 20:00 UT, nos três setores, enquanto os valores mínimos de VTEC ocorrem entre 05:00 e 10:00 UT, nos três setores.

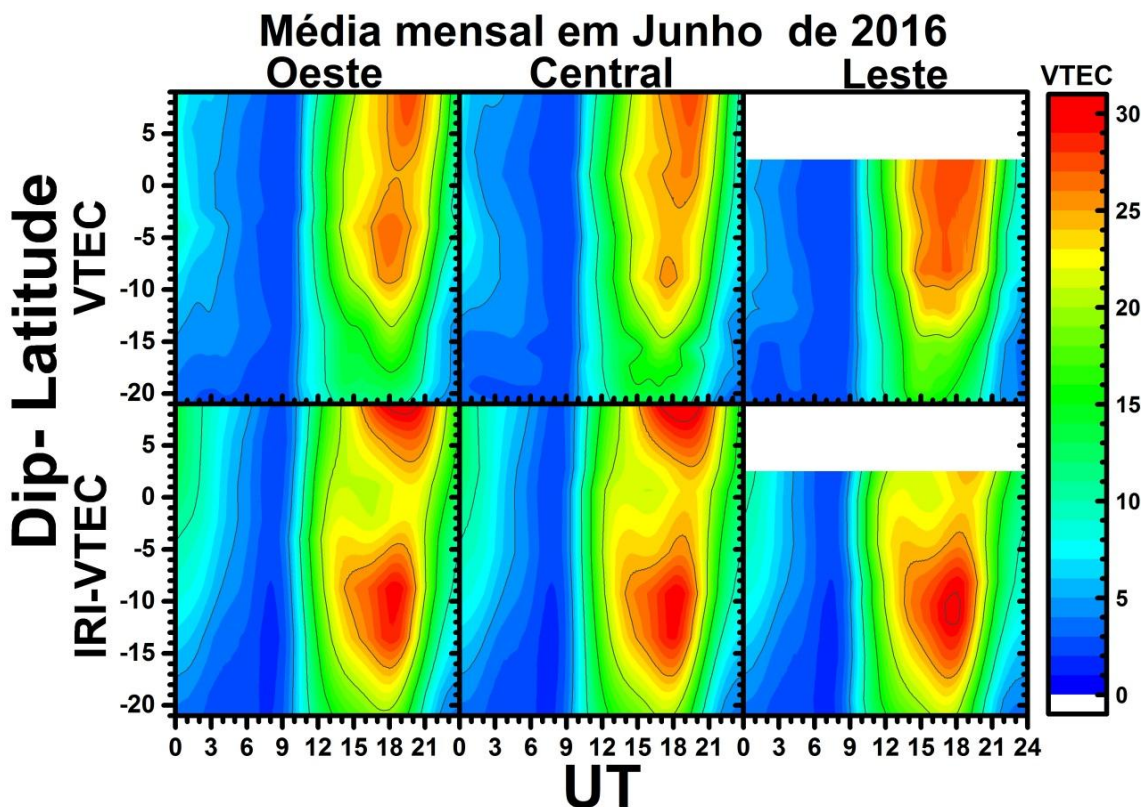
Figura 25 - Comparação entre a variação da média mensal do GPS-VTEC e do IRI-VTEC em função de UT e dip-latidade em abril de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados



Na Figura 26, do mês de junho (representativo de inverno), na parte superior os valores máximos de VTEC obtidos estão entre 25 a 27 VTECu, nos três setores. Esses valores máximos ocorrem, aproximadamente, entre 17:00 e 21:00 UT, nos setores oeste e central, respectivamente, e entre 14 a 21 UT, no setor leste (padrão avermelhado, 25 a 30 nos três setores). Nesse mês, os valores mínimos de VTEC ocorrem entre 00:00 e 10:00 UT, nos setores oeste e central, respectivamente, no setor leste entre 00:00 e 09:00 UT (padrão azul, VTECu: 0 a 10, nos três setores). Ainda em relação ao mês representativo de inverno, os valores intermediários do VTEC representados pela cor verde não são observados neste mês (padrão de cor verde, VTECu: 10 a 20).

Na parte inferior da Figura 26 (VTEC-IRI), nota-se que os valores máximos de VTEC calculados (25 a 30 VTECu) são maiores que os obtidos (25 a 27 VTECu) e os valores dos VTECs são próximos nos três setores e ocorrem entre 14:00 e 20:00 UT, nos três setores, enquanto os valores mínimos de VTEC ocorrem entre 03:00 e 09:00 UT, nos três setores.

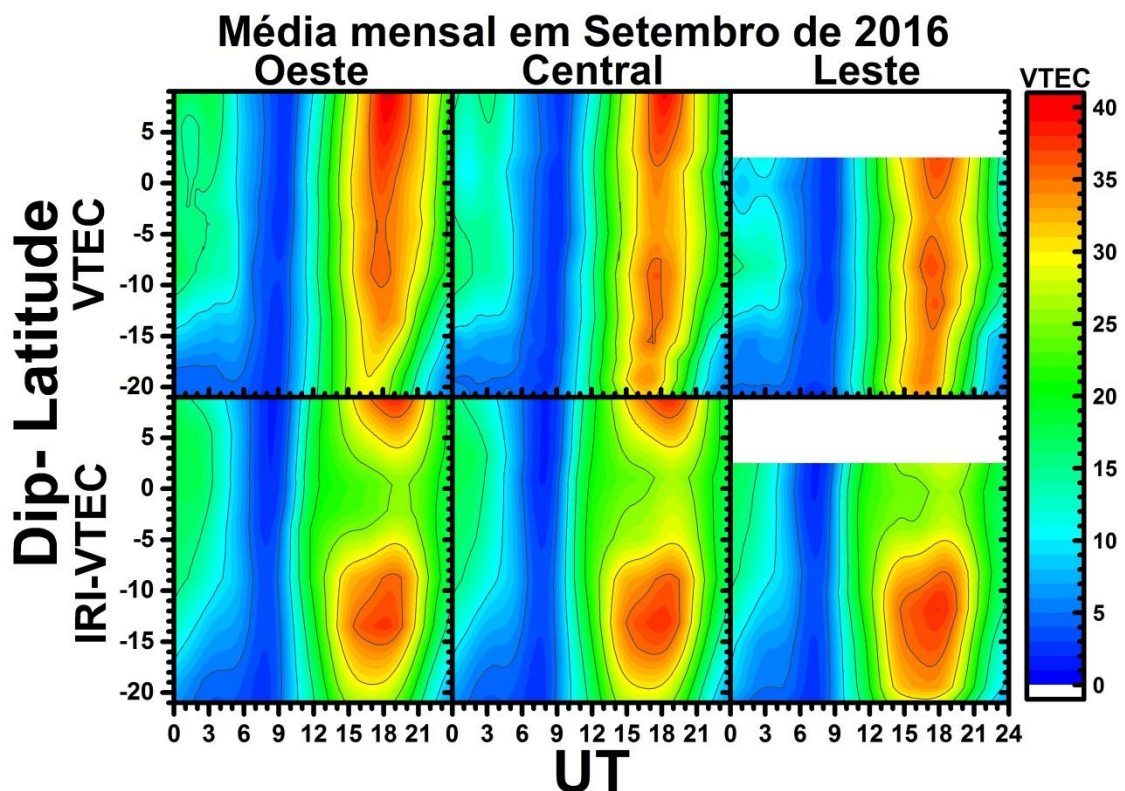
Figura 26 - Comparação entre a variação da média mensal do GPS-VTEC e do IRI-VTEC em função de UT e dip-latidade em junho de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados



No mês de setembro, Figura 27 (representativo de equinócio de primavera) os valores máximos de VTEC são 35 a 37, nos setores oeste e central e entre 30 e 35 VTECu no setor leste. Esses valores máximos ocorrem, aproximadamente, entre 16:00 e 20:00, 17:00 e 20:00, 16:00 e 19:00 UT, nos setores oeste, central e leste, respectivamente. Nesse mês, os valores mínimos de VTEC ocorrem entre 05:00 e 10:00 UT, nos três setores. Ainda no mês representativo de primavera os valores intermediários do VTEC são observados nos períodos 00:00 a 05:00 UT, nos três setores.

Na parte inferior da Figura 27 (VTEC-IRI), nota-se que os valores máximos de VTEC calculados (30 a 35 VTECu) são menores que os obtidos (35 a 37 VTECu) e os valores dos VTEC são próximos nos três setores e ocorrem ente 15:00 e 20:00 UT, nos três setores, enquanto os valores mínimos de VTEC ocorrem entre 03:00 e 09:00 UT, nos três setores.

Figura 27 - Comparação entre a variação da média mensal do GPS-VTEC e do IRI-VTEC em função de UT e dip-latitude em setembro de 2016, nos setores oeste, central e leste. A variação espaço-temporal da EIA pode ser notada nos gráficos de contorno nos padrões que variam de amarelados a avermelhados



Analisando as variações médias mensais dos VTECs representativas dos meses (Fevereiro, Abril, Junho e Setembro) é possível observar que os valores de VTEC obtidos são maiores que os calculados pelo modelo IRI-2016 em fevereiro/verão e setembro/primavera, enquanto em abril/outono e junho/inverno a média mensal do VTEC calculado é maior que a do obtido. Os maiores valores médios mensais de VTECs foram obtidos em fevereiro/Verão (55 TECu), porém os menores foram calculados em junho/Inverno (30 TECu).

Em relação a investigação da variação das características morfológicas, formação e evolução da EIA através da distribuição do VTEC em função de UT e dip-latitude, vê-se que, no verão, a EIA é bem formada, pois é possível observar a formação do vale sobre o equador magnético e formação das duas cristas da anomalia através do VTEC obtido nos três setores, em relação ao VTEC calculado, nota-se que a EIA mesmo menos intensa devido aos menores valores das médias de VTECs calculados está bem formada.

No equinócio de outono, com o VTEC obtido, o comportamento da EIA pode ser observada mal formada no setor leste, mal formada porque a formação do vale é muito pequena e os picos não são tão intensos. Ou seja, não há grande concentração de íons a ponto de formar um pico intenso. Nota-se, que nos setores central e leste não é possível observar a formação da EIA. Já em relação as médias mensais dos VTECs calculados é possível observar a EIA bem formada nos três setores. Ou seja, formação do vale sobre equador magnético e formação dos picos da anomalia.

No inverno, estação com os menores valores máximos de VTEC (30 TECu), em relação a distribuição dos VTECs obtidos, é possível observar a formação da EIA com a distribuição dos VTEC obtidos, somente no setor oeste. Pois, é possível observar a formação do vale sobre o equador magnético e a formação dos dois picos da anomalia.

Nos outros dois setores (central e leste) não foi possível observar a formação da EIA, já em relação as médias dos VTECs calculados é possível observar a boa formação da EIA nos três setores. No mês de setembro/primavera não é possível observar a EIA a partir dos VTECs obtidos no setor oeste. Entretanto, é possível verifica a formação da EIA nos setores centra e leste, já em relação ao comportamento da EIA em relação aos VTECs calculados é possível observar a boa formação da EIA

nos três setores, pois é possível observar o vale sobre o equador magnético e a formação dos dois picos de anomalia.

5 METODOLOGIA PARA CLASSIFICAÇÃO DA EIA

No capítulo anterior investigou-se a variação mês-a-mês da EIA no ano de 2016 nos setores oeste, central e leste, no território brasileiro, durante o período decrescente do ciclo solar 24 (média anual do F10.7= 80 s.f.u.). Verificou-se que a EIA apresenta uma variação semianual nos 3 setores, o máximo principal ocorre no verão (janeiro, fevereiro e março), o mínimo no inverno (junho, julho e agosto) e o máximo secundário na primavera (setembro, outubro e novembro). No entanto, diferentemente dos setores Africano, Indiano e asiático, os máximos da EIA ocorrem no outono e na primavera (equinócios). Apesar da EIA apresentar uma variação semianual em todos os setores do globo terrestre, o setor americano mostra características singulares e ainda é assunto de intensa investigação. Posteriormente comparou-se a EIA obtida através de dados experimentais de VTEC com a obtida através dos dados de TEC calculados pelo modelo IRI-2016.

Durante o estudo da variação mês-a-mês da EIA, através da média mensal do VTEC, notou-se que existe grande variabilidade dia-a-dia de casos de EIA formada e não formada ao longo do ano. Neste capítulo, será investigada a variação dia-a-dia da EIA, neste sentido é proposta uma metodologia para classificar a EIA em:

1. Formada onde pode se identificar claramente cristas sul e o vale em torno do equador magnético, eventualmente pode-se notar o início da crista norte;
2. Não formada onde não há a formação do vale na região equatorial e das cristas em baixas latitudes. No entanto, forma-se uma única crista alongada latitudinalmente em torno do equador magnético;
3. Casos atípicos, ocorre em eventos de EIA formada (crista e vale) e bem como em EIA não formada/ausente (crista ao redor do equador). Nos casos da EIA formada (vale e crista), nota-se que a crista apresentava múltiplas estruturas ou no caso a EIA não formada/ausente a crista ao redor do equador apresenta múltiplas estruturas.

5.1 EIA formada

A incidência da radiação solar é máxima em torno do equador geográfico, logo, esperava-se uma densidade eletrônica máxima em torno equador geográfico e uma diminuição gradual da densidade eletrônica ao se afastar do equador geográfico.

Porém, as primeiras observações revelaram uma variação latitudinal de densidade eletrônica com um mínimo próximo do equador magnético e picos em baixas latitudes (entre $\pm 15^\circ$ e $\pm 20^\circ$ latitudes magnéticas). Esta estrutura inesperada da distribuição latitudinal na densidade de eletrônica com um vale ao redor do equador e cristas próximas a aproximadamente $\pm 17^\circ$ latitudes magnéticas, foi estudada inicialmente por [Namba e Maeda \(1939\)](#); [Appleton \(1946\)](#). Nestes estudos foram reportados que a relação da densidade eletrônica entre as cristas e o vale pode atingir valores de até 1,6 durante o dia.

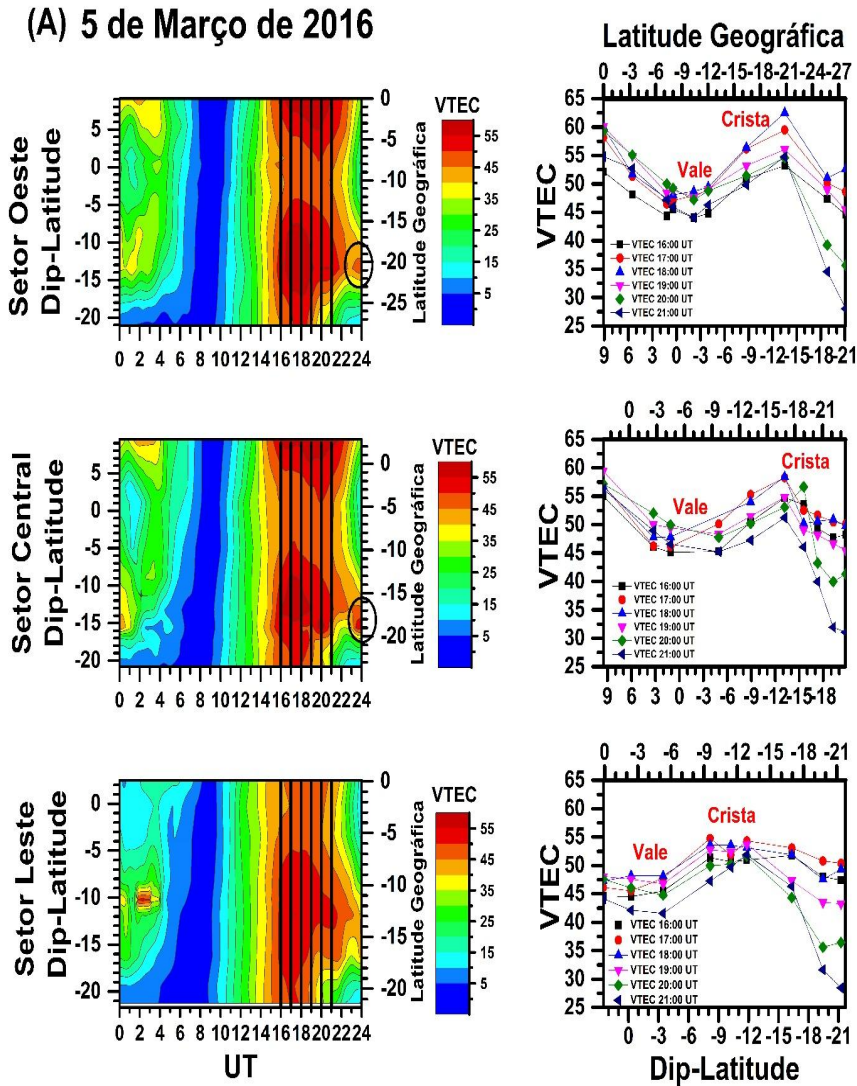
A EIA ocorre mais ou menos na metade do globo terrestre, ou seja, parte do lado iluminado e entardecer. As posições das cristas e a razão crista-vale variam com a estação do ano, com o ciclo solar e a variação dia-a-dia (devido aos acoplamentos entre as camadas E e F e atmosfera neutra e ionizada). Revisões sobre EIA foram apresentadas por diversos pesquisadores ([MOFFETT \(1979\)](#), [ANDERSON \(1981\)](#), [WALKER \(1981\)](#), [STENING \(1992\)](#), [ZHAO *et al.*, 2009](#), [KUMAR *et al.*, 2014](#), [BALAN; SOUZA; BAILEY \(2018\)](#), [BALAN *et al* \(2018b\)](#), [DIAS *et al* \(2020\)](#)).

Portanto, será considerada EIA formada quando a variação latitudinal do VTEC apresentar um vale na região do equador magnético e a crista sul bem formada, ou seja, com uma extensão latitudinal e longitudinal (em baixas latitudes). É importante ressaltar que a resolução temporal usada para fazer as Figuras 28, 29 e 30 dos gráficos de contorno do VTEC é de 1 minuto.

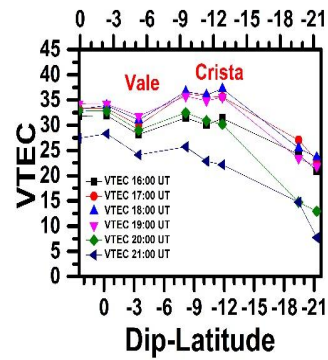
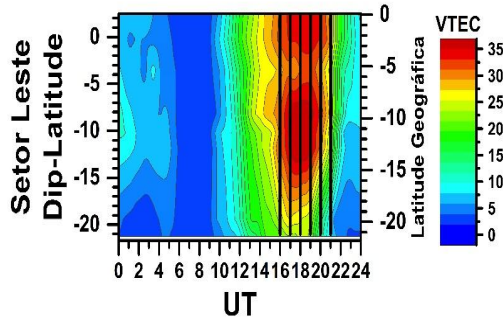
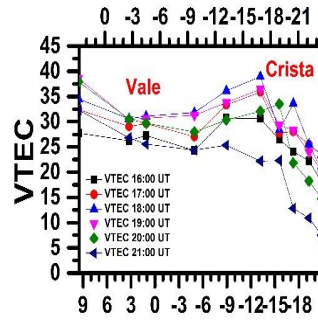
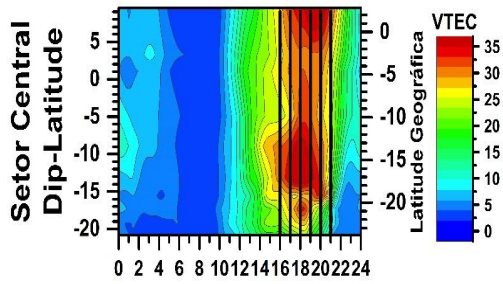
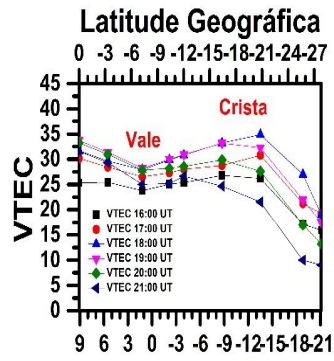
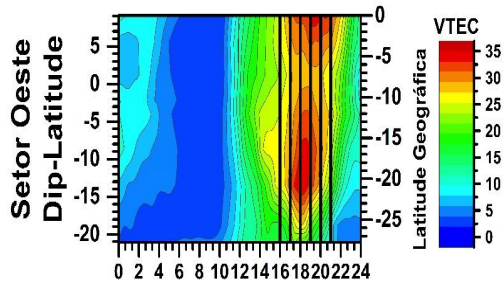
Na Figura 28 a EIA pode ser identificada pelos padrões vermelhos nos gráficos de contorno, sendo que o valor máximo do VTECu para cada gráfico de contorno vai depender do mês considerado (55-março, 35-julho e 55-outubro VTECu). Em linhas gerais a formação da EIA tem início por volta das 15:00 UT e atinge o seu apogeu às 18:00 UT.

Após esse horário a intensidade da EIA começa a diminuir até desaparecer por volta das 21:00-22:00 UT. As Figuras 28 A, B e C são dias representativos de dias em que a EIA está bem formada nos setores oeste, central e leste, mostrando que a EIA se forma tanto no solstício como no equinócio. As Figuras a direita da Figura 28 (gráficos de linha) mostram a variação do VTEC em função do dip-latitude/latitude geográfica para 6 horários específicos que estão indicados nos gráficos de contorno (16:00, 17:00, 18:00, 19:00, 20:00 e 21:00 UT).

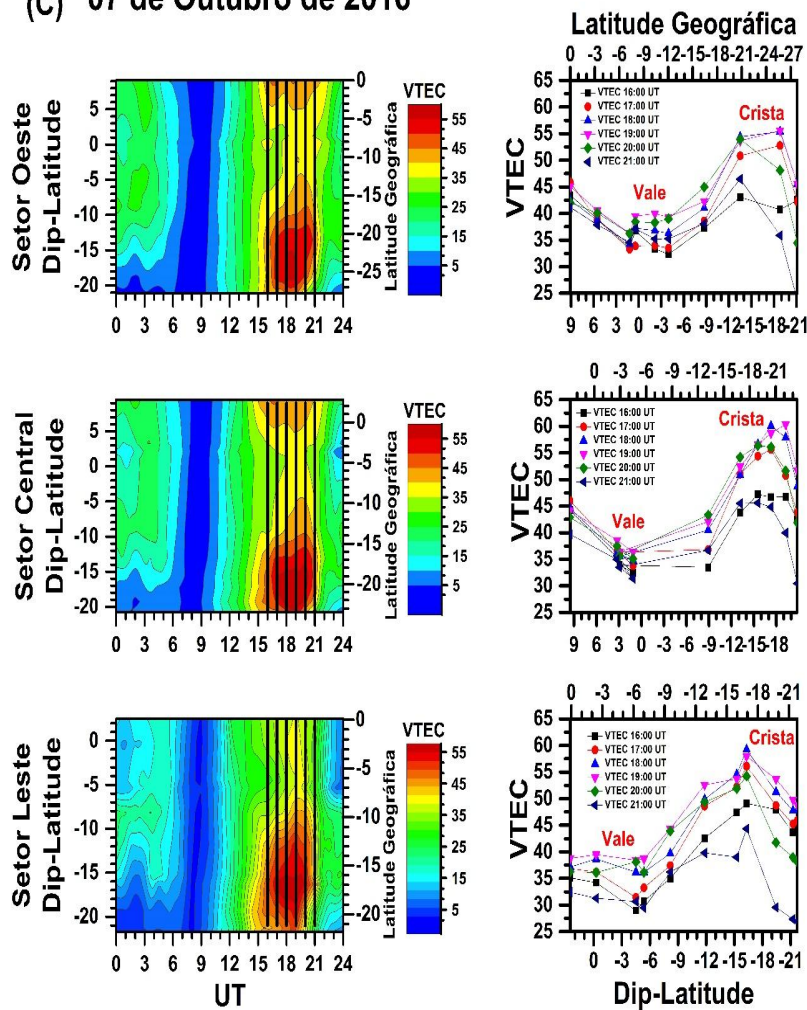
Figura 28 - Os painéis da esquerda mostram os gráficos de contorno de VTEC em função de UT (eixo X), dip-latitude (eixo Y a esquerda) e latitude geográfica (eixo Y a direita), onde observa-se a evolução da EIA (aproximadamente entre 15:00 e 24:00 UT. As seis linhas pretas verticais, nos painéis à esquerda, destacam os horários (16:00, 17:00, 18:00, 19:00, 20:00 e 21:00 UT) que foram utilizados para gerar os painéis à direita para se estudar de maneira mais detalhada a variação do VTEC nesses horários em função dip-latitude (eixo X inferior) e latitude geográfica (eixo X superior). Os gráficos da direita mostram a variação do VTEC em função do dip-latitude às 16:00, 17:00, 18:00, 19:00, 20:00 e 21:00 UT, indicando a localização das cristas e vale da EIA. As Figuras 28A, 28B e 28C mostram a variação da EIA nos dias 05 de março de 2016, 14 de julho de 2016 e 07 de outubro de 2016, respectivamente



(B) 14 de Julho de 2016



(c) 07 de Outubro de 2016



Na Figura 28A (05 de março de 2016) a escala de cores do VTECu varia de 0 (azul escuro) a 55 (vermelho intenso). Durante a noite-madrugada e madrugada-amanhecer os setores oeste, central e leste das 00:00 às 06:00 UT e 06:00 às 11:00 UT predomina um padrão verde-azul claro (~ 15 a 35 VTECu) e um padrão azul (~ 0 a 15 VTECu), respectivamente. No entanto, entre 11:00 e 15:00 UT é possível notar uma transição do padrão verde (~ 30 VTECu) para o amarelo-laranja (~ 45 VTECu), indicando uma intensificação do processo de fotoionização na ionosfera. A EIA inicia seu processo de formação por volta das 15:00 UT, atinge seu apogeu mais ou menos entre 17:00 e 18:00 UT e termina em torno de 21:00 e 22:00 UT.

Pode-se notar um padrão vermelho escuro em baixas latitudes (~ 50 a 55 VTECu) e um vale na região equatorial pelo padrão laranja-vermelho claro (~ 40 a 45 VTECu). Neste dia específico, o tempo de vida da EIA nos setores oeste e central é de ~6 horas (16:00 as 22:00) UT e no setor leste é de ~5 horas (16:00 às 21:00 UT).

É possível notar que a posição e extensão das cristas e vale variam de setor para setor.

Analisando o gráfico de linhas (Figura 28A - direita) é possível notar no setor oeste o início da crista do hemisfério norte. O vale atinge seu valor mínimo de ~ 45 VTECu às 16:00 UT (dip-latitude $\sim 1^\circ$ e latitude geográfica $\sim -7^\circ$) e a crista sul atinge seu valor máximo ~ 63 VTECu às 18:00 UT (dip-latitude $\sim -13^\circ$ e latitude geográfica $\sim -21^\circ$). Portanto, no setor oeste a relação entre a crista e o vale é de $\sim 1,4$.

No setor central também é possível ver o início da crista norte, o centro do vale atinge o valor mínimo de 45 VTECu às 16:00 UT (dip-latitude $\sim 1^\circ$ e latitude geográfica $\sim -4^\circ$), e a crista sul atinge seu valor máximo ~ 60 VTECu entre 17:00 e 18:00 UT (dip-latitude $\sim -13^\circ$ e latitude geográfica $\sim -17^\circ$). A relação entre a crista e o vale no setor central é de 1,3. No setor leste o vale atinge seu valor mínimo de ~ 43 VTECu às 21:00 UT (dip-latitude $\sim 0^\circ$ e latitude geográfica $\sim -2^\circ$) e a crista sul atinge seu valor máximo ~ 55 VTECu às 17:00 UT (dip-latitude $\sim -8^\circ$ e latitude geográfica $\sim -10^\circ$). Portanto, no setor leste a relação entre a crista e o vale é de $\sim 1,3$.

Na Figura 28A (Figuras de contorno) mostra uma intensificação da crista da EIA entre 23:00 e 24:00 UT em baixas latitudes nos setores oeste e central, indicada por um círculo preto no setor oeste (-12 e -15° dip-latitude) e central (-15 e -17° dip-latitude). Por outro lado, está intensificação da crista em baixas latitudes é muito fraca no setor leste. Indicando que o pico pré-reverso (PRE) do campo elétrico não é uniforme no setor brasileiro.

A Figura 28B mostra um exemplo da EIA formada durante o inverno (14 de julho de 2016), onde o VTECu nos gráficos de contorno varia de 0 a 35 VTECu. Nos gráficos de contorno é possível ver o início da crista do hemisfério norte em todos os setores (oeste, central e leste).

Nota-se que, durante a noite-madrugada e madrugada-amanhecer, os setores oeste, central e leste das 00:00 às 05:00 UT e 05:00 às 10:00 UT predomina um padrão azul escuro (~ 0 a 5 VTECu) e um padrão azul claro (~ 5 a 10 VTECu), respectivamente. No entanto, entre 10:00 às 15:00 UT percebe-se uma predominância do padrão verde (~ 15 a 20 VTECu) e a seguir uma transição para o padrão amarelo-laranja (~ 25 a 30 VTECu), marcando uma intensificação do processo de fotoionização e logo a seguir o creste da EIA é formada em baixas latitudes. A Figura 28B indica que no setor oeste o centro do vale está localizado em $\sim 1^\circ$ dip-latitude ($\sim -7^\circ$ latitude

geográfica). A crista sul-Oeste permanece bem formada por aproximadamente 4 horas (17:00 as 20:00 UT) e a extensão latitudinal da crista-Oeste é de aproximadamente 10° em dip-latidade, entre $\sim -5^\circ$ dip-latidade ($\sim -13^\circ$ latitude geográfica) e $\sim -15^\circ$ dip-latidade ($\sim -22^\circ$ latitude geográfica). No setor central o centro do vale-Central está em $\sim 0^\circ$ dip-latidade ($\sim -6^\circ$ latitude geográfica). A crista-Central Sul permanece bem formada por aproximadamente 5 horas (16:00 à 21:00 UT) e a sua extensão latitudinal é $\sim 10^\circ$ ($\sim -15^\circ$ a -5° dip-latidade, ~ -20 a -10 latitude geográfica). No setor leste o centro do vale-Leste está em $\sim -4^\circ$ dip-latidade ($\sim -6^\circ$ latitude geográfica). A crista-Leste Sul permanece bem formada por aproximadamente 5 horas e sua extensão longitudinal é de $\sim 12^\circ$, começando em $\sim -4^\circ$ dip-latidade ($\sim -6^\circ$ latitude geográfica) e terminando em $\sim -16^\circ$ dip-latidade ($\sim -17^\circ$ latitude geográfica).

Os gráficos de linha da Figura 28B a direita para os setores oeste, central e leste indicam um VTEC máximo e mínimo de 35 e 27 VTECu, 40 e 27 VTECu e 38 e 30 VTECu, respectivamente. Indicando uma razão crista e vale para os setores oeste, central e leste de $\sim 1,3$, $\sim 1,5$ e $\sim 1,3$, respectivamente.

A Figura 28C (07 de outubro de 2016) mostra um exemplo da EIA formada durante o equinócio, onde a escala de cores do VTECu varia de 0 (azul escuro) a 55 (vermelho escuro). Nos gráficos de contorno é possível notar o início da crista do hemisfério norte magnético nos setores oeste e central.

Entretanto, no setor leste não é possível ver o início da crista norte, indicando que ela se forma mais ao norte. Nota-se que durante a noite-madrugada e madrugada-amanhecer os setores oeste, central e leste das 00:00 às 06:00 UT e 06:00 às 10:00 UT predomina um padrão verde-azul claro (~ 10 a 20 VTECu) e um padrão azul escuro (~ 0 a 10 VTECu), respectivamente.

No entanto, entre 10:00 às 15:00 UT é possível notar uma predominância do padrão verde (~ 25 a 30 VTECu) e a seguir uma transição para o padrão amarelo-laranja (~ 40 a 45 VTECu), marcando uma intensificação do processo de fotoionização e logo a seguir o creste da EIA é formada em baixas latitudes. A Figura 28C indica que no setor oeste o centro do vale está localizado em $\sim 0^\circ$ dip-latidade ($\sim -8^\circ$ latitude geográfica).

A crista oeste/sul permanece bem formada por, aproximadamente, 6 horas (16:00 as 21:00 UT) e a extensão latitudinal da crista oeste é de aproximadamente -

15 em dip-latidade, entre $\sim -20^\circ$ dip-latidade ($\sim -26^\circ$ latitude geográfica) e $\sim -5^\circ$ dip-latidade ($\sim -9^\circ$ latitude geográfica). No setor central o centro do vale está localizado em $\sim 0^\circ$ dip-latidade ($\sim -5^\circ$ latitude geográfica). A crista central/sul permanece bem formada por aproximadamente 6 horas e a sua extensão latitudinal é $>15^\circ$, entre $\sim -20^\circ$ a -5° dip-latidade, (~ -19 a -10 latitude geográfica). No setor leste o centro do vale/leste está localizado em $\sim -5^\circ$ dip-latidade ($\sim -6^\circ$ latitude geográfica). A crista leste/sul permanece bem formada por, aproximadamente, 6 horas e sua extensão longitudinal é de $\sim 14^\circ$, começando em $\sim -7^\circ$ dip-latidade ($\sim -8^\circ$ latitude geográfica) e terminando em $\sim -21^\circ$ dip-latidade ($\sim -17^\circ$ latitude geográfica).

Os gráficos de linha da Figura 28B a direita para os setores oeste, central e leste indicam um VTEC máximo e mínimo de 55 e 32 VTECu, 60 e 35 VTECu e 60 e 30 VTECu, respectivamente. Indicando uma razão crista e vale para os setores oeste, central e leste de $\sim 1,7$, $\sim 1,7$ e $\sim 2,0$, respectivamente

Os casos apresentados acima (Figura 28) são exemplos para evidenciar a variabilidade dos casos de EIA formada. Pode-se constatar que a intensidade, posição e extensão latitudinal do vale e da crista da EIA varia ao longo do ano e de setor para setor. A variação da EIA em setores separados por uma distância longitudinal relativamente pequena ($\sim 6^\circ$) não é esperada. Uma possível explicação para estas diferenças em setores longitudinais relativamente próximos é a grande variação da distância entre os equadores magnético e geográfico no setor sul americano.

5.2 EIA não formada

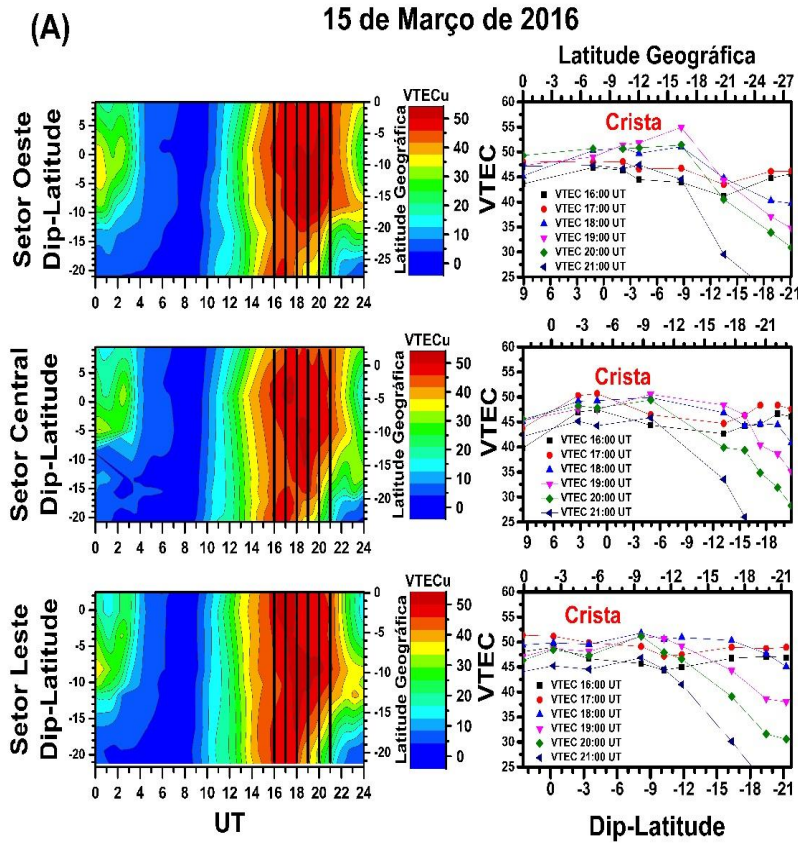
A EIA é classificada como não formada quando o plasma formado em torno do equador magnético permanece acumulado na região próxima a ele, formando assim apenas uma crista alongada latitudinalmente em torno do equador magnético, pois o que caracteriza a formação da EIA é a remoção do plasma do equador pelo efeito fonte, criando o vale e, conseqüentemente, duas cristas em até $\sim \pm 20^\circ$ de latitudes magnéticas.

Na Figura 29 é possível verificar que a EIA não é formada, a partir de padrões avermelhados nos gráficos de contorno percebe-se que não é possível identificar a formação do vale e das duas cristas que caracterizam a EIA, contudo o que se observa é a formação de apenas uma crista alongada latitudinalmente em torno do equador

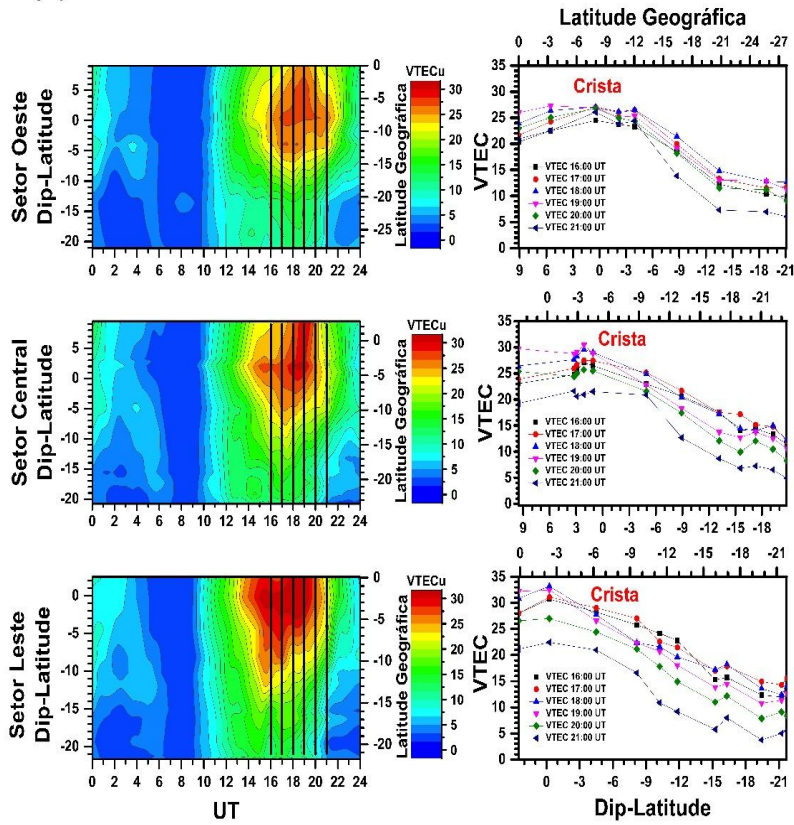
magnético. O valor máximo do VTECu para cada gráfico de contorno vai depender do mês considerado (50-março, 30-junho e 40-outubro VTECu). Em linhas gerais a EIA é formada a partir das 15:00 UT o que não é observado na Figura 29. As Figuras 29 A, B e C apresentam dias representativos em que a EIA não é formada nos três setores estudados, mostrando que ela pode não se formar tanto no solstício como no equinócio. Observa-se que a evolução espaço-temporal do VTEC em torno do equador magnético e da baixa latitude é completamente diferente dos dias representativos de dias em que a EIA está formada (Figuras 29 A, B e C).

Possivelmente, o efeito fonte naqueles dias não possui força suficiente para remover o plasma da região equatorial para baixa latitude e assim formar as cristas da anomalia. Portanto, os íons produzidos ao redor do equador magnético não são removidos para baixas latitudes e as cristas em baixas latitudes não são formadas. Consequentemente, a ionização máxima permanece ao redor do equador magnético e começa a diminuir, à medida que se move do equador para a baixa latitude. Embora o efeito fonte não tenha força suficiente para formar as cristas da EIA, ele é capaz de espalhar os íons por alguns graus em ambos os lados do equador magnético, conforme observado nos painéis da Figura 29. Para mais detalhes sobre a supressão da EIA durante um período perturbado e calmo, consulte [Takahashi, Oya e Watanabe \(1987\)](#), [Abdu *et al.* \(1991\)](#), [Fagundes *et al.*, 2016](#) e [Venkatesh *et al.*, 2014a](#).

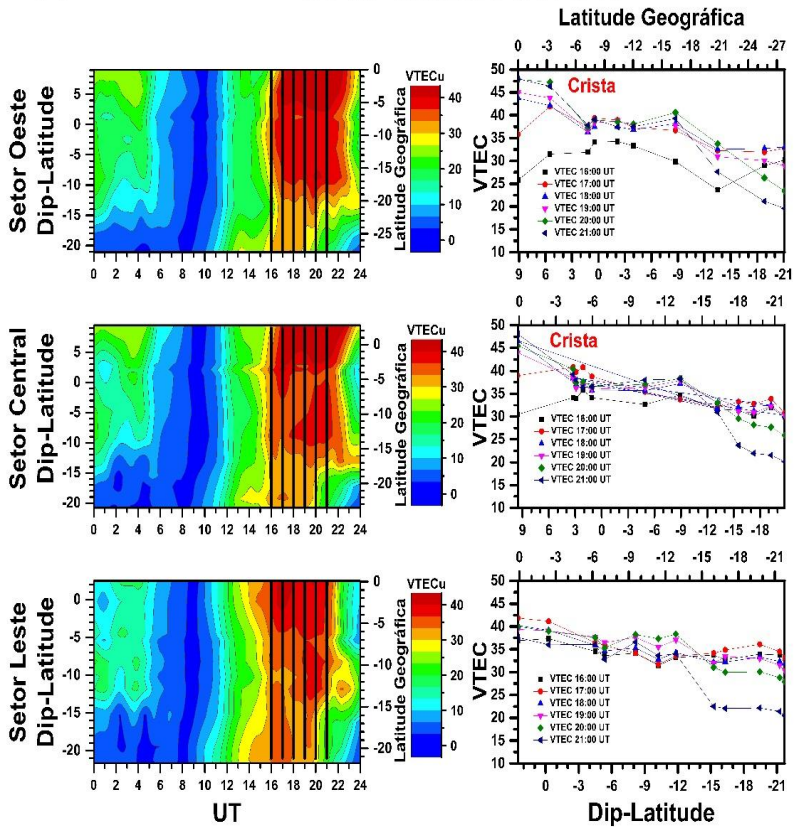
Figura 29 - Variações da EIA em (29A) de 15 de março de 2016, (29B) de 15 de junho de 2016 e (29C) de 04 de outubro de 2016. Os painéis superior, intermediário e inferior referem-se aos setores oeste, central e leste brasileiro, respectivamente. Os painéis a esquerda mostram os gráficos de contorno VTEC, nos quais nota-se a evolução da EIA, em função de UT (eixo x), dip-latidade (eixo Y a esquerda) e latitude geográfica (eixo Y a direita). As seis linhas pretas verticais (nos painéis a direita) mostram a variação do VTEC às 16:00, 17:00, 18:00, 19:00, 20:00 e 21:00 UT e destacam o período em que a EIA deveria ser verificada na escala VTEC (eixo Y a esquerda) em função dip-latidade (eixo X inferior) e latitude geográfica (eixo X superior)



(B) 15 de Junho de 2016



(C) 04 de Outubro de 2016



A Figura (29A) (15 de março de 2016) ao analisar os gráficos de contorno, em que a escala de cores do VTEC varia de 0 (azul escuro) a 50 (vermelho intenso) VTECu. Nota-se que o processo de fotoionização se intensifica a partir das 15:00 UT alcançando os valores máximos de VTEC, representados pela coloração avermelhada (50 VTECu), entre 16:00 e 21:00UT, nos três setores e nesse intervalo, observa-se acúmulo de plasma ao redor do equador magnético, caracterizando a EIA não formada.

A crista formada em cada setor tem duração de 2 (das 18:00 às 20:00 UT), 3 (das 17:00 às 20:00 UT) e 4(das 16:00 às 20:00 UT), nos setores oeste, central e leste, respectivamente. Importante destacar que a duração da crista aumenta de 2 para 4 horas do setor oeste para leste, respectivamente. No setor leste a crista além de permanece mais tempo formada (4 horas) ela se estende para a região sul.

Quanto ao posicionamento da crista, no setor oeste a posição é entre 6° dip-latidade (-3° latitude geográfica) e -11° dip-latidade (-18° latitude geográfica), no setor central entre 4° dip-latidade (-2° latitude geográfica) e -11° dip-latidade (-15° latitude geográfica) e no setor leste ela se estende até -16° dip-latidade (-17° latitude geográfica).

Analisando o gráfico de linhas (a direita), é possível observar que o VTEC máximo 55 VTECu ocorre em -9° dip-latidade (-17° latitude geográfica) às 19:00 UT no setor oeste, enquanto o valor máximo 50 VTECu foi alcançado nos setores central às 17:00 UT e no leste às 18:00 UT nas posições 1° dip-latidade (-5° latitude geográfica) e -8° dip-latidade (-10° latitude geográfica), respectivamente. É importante destacar que o VTEC máximo mais próximo do equador magnético ocorreu no setor central, enquanto o maior máximo ocorreu no setor oeste.

A Figura (29B) apresenta a variação do VTEC em 15 de junho de 2016 nos setores oeste, central e leste da região brasileira através de gráficos de contorno (a esquerda) e de linhas (a direita). Ao analisar os gráficos de contorno, em que a escala de cores do VTEC varia de 0 (azul escuro) a 30 (vermelho intenso) VTECu, por se tratar do inverno a variação do VTEC é mais baixa que em 28(A).

Nota-se que o processo de fotoionização se intensifica a partir das 16:00, 15:00 e 14 UT, nos setores oeste, central e leste, respectivamente. Alcançando os valores máximos de VTEC representados pela coloração avermelhada (31 VTECu) até 21:00

UT nos três setores e nesse intervalo observa-se acúmulo de plasma ao redor do equador magnético, caracterizando a EIA não formada.

A crista formada tem duração de 3 (das 17:00 às 20:00 UT), 4 (das 16:00 às 20:00 UT) e 5 (das 15:00 às 20:00 UT), nos setores oeste, central e leste, respectivamente. Importante destacar que a duração da crista aumenta de 3 para 5 horas do setor oeste para leste, concomitantemente. No setor leste, além da crista permanecer mais tempo formada (5 horas). Nesse setor, a EIA não formada está melhor caracterizada, pois o plasma tem sua maior densidade ao redor do equador magnético.

Quanto ao posicionamento da crista, no setor oeste a posição é entre 7° dip-latitude (-2 ° latitude geográfica) e -1° dip-latitude (-9 ° latitude geográfica), no setor central a crista se estende até -2° dip-latitude (-7° latitude geográfica) e no setor leste ela se estende até -3° dip-latitude (-5° latitude geográfica).

Analisando o gráfico de linhas (a direita), é possível observar que no setor oeste o VTEC máximo 28 VTECu ocorre em 0° dip-latitude (-8° latitude geográfica) às 20:00 UT, no setor central foi alcançado até 32 VTECu em 2° dip-latitude (-4° latitude geográfica) às 19:00 UT e no leste o valor máximo 34 VTECu ocorre em 0 dip-latitude (-2 latitude geográfica) às 18:00 UT. É importante destacar que o maior máximo entre os três setores 34 VTECu ocorre no setor leste.

A Figura (29C) apresenta a variação do VTEC em 04 de outubro de 2016 nos setores oeste, central e leste da região brasileira por meio de gráficos de contorno (à esquerda) e de linhas (à direita). Ao analisar os gráficos de contorno, em que a escala de cores do VTEC varia de 0 (azul escuro) a 45 (vermelho intenso) VTECu. Nota-se que o processo de fotoionização se intensifica a partir das 16:00 UT nos três setores. Alcançando os valores máximos de VTEC representados pela coloração avermelhada (45 VTECu) até 22:00 UT no setor oeste e 21:00 UT, nos setores central e leste nesses intervalos observa-se o acúmulo do plasma ao redor do equador magnético, caracterizando a EIA não formada.

A crista formada em cada setor tem duração de 5 (das 17:00 às 22:00 UT), 5 (das 17:00 às 22:00 UT) e 2 (das 16:00 às 18:00 UT horas), nos setores oeste, central e leste, respectivamente. No setor leste, além da crista permanece menos tempo formada (2 horas) e nesse setor a EIA não formada está melhor caracterizada, porquanto o plasma tem sua maior densidade ao redor do equador magnético.

Quanto ao posicionamento da crista, no setor oeste ela se estende até 2° dip-latitude (-6° latitude geográfica), no setor central a crista se estende até 2° dip-latitude (-4° latitude geográfica) e no setor leste ela se estende até 1° dip-latitude (-3° latitude geográfica).

Analisando o gráfico de linhas (à direita) é possível observar que no setor oeste o VTEC máximo 47 VTECu ocorre em 5° dip-latitude (-3° latitude geográfica) às 20:00 UT, no setor central foi alcançado até 40 VTECu em 2° dip-latitude (-5° latitude geográfica) às 17:00 UT e, no leste, o valor máximo 40 VTECu ocorre em 0 dip-latitude (-2 latitude geográfica) às 17:00 UT. É importante destacar que o maior máximo entre os três setores 47 VTECu ocorre no setor oeste.

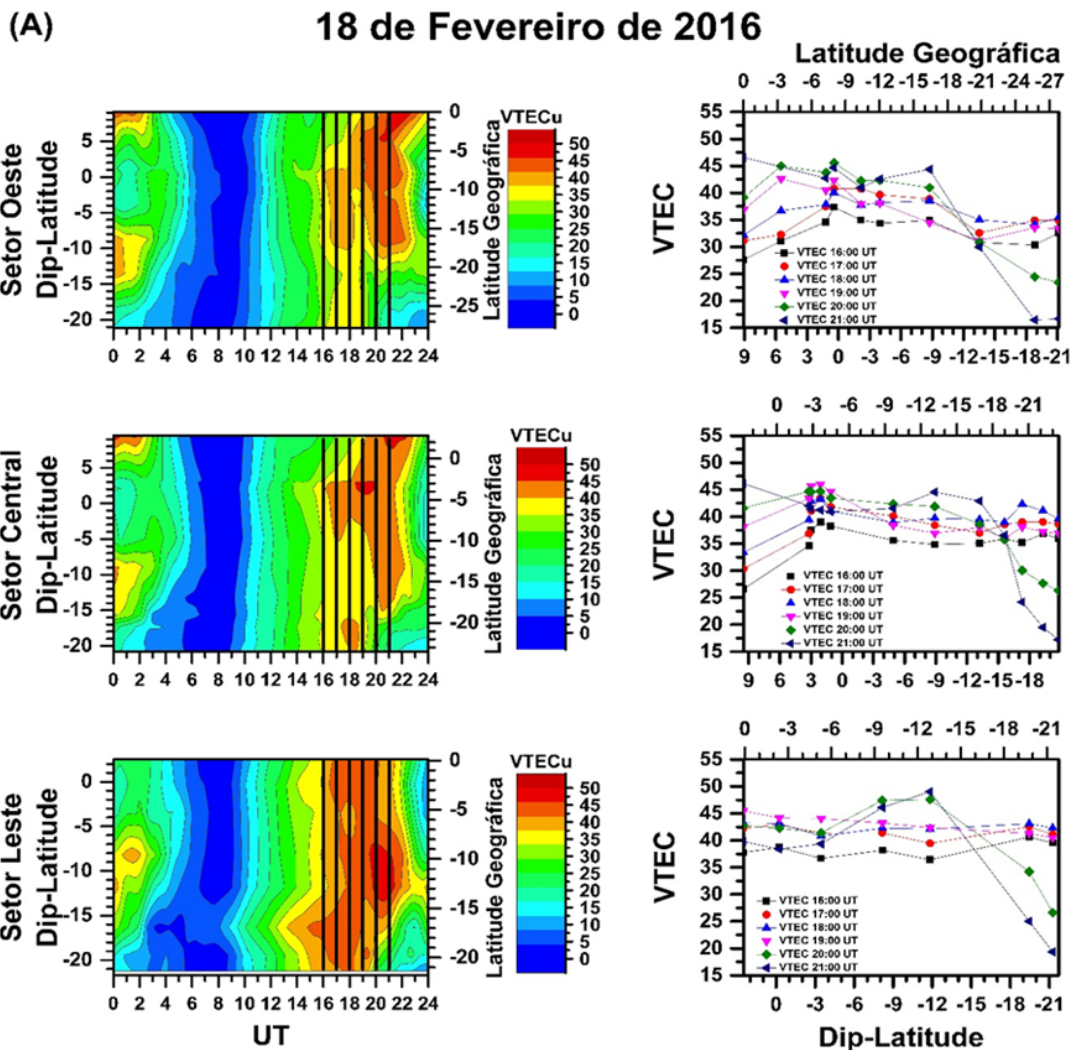
Através do estudo diário foi possível observar que a EIA não formada ocorre, principalmente, durante o inverno. Com isso, é possível que a baixa densidade do plasma nesse período contribua para a não formação da EIA, porém a maior densidade é formada justamente onde ocorre a maior incidência da radiação solar, logo, conclui-se que a não formação da EIA deve-se também a força insuficiente do efeito fonte que não remove o plasma para baixas latitudes. O vento neutro inter-hemisférico que faz o a Anomalia de Ionização Equatorial (EIA) assimétrica afeta o desenvolvimento e o crescimento.

5.3 EIA Atípica

Durante a investigação da classificação dia-a-dia da EIA formada e não formada, verificou-se que em alguns casos de EIA formada, as cristas apresentavam múltiplas estruturas ou no caso de EIA não formada o vale apresentava também múltiplas estruturas. Os casos de EIA atípicas ocorrem tanto em períodos geomagneticamente perturbados (Figuras 30A e 30B), bem como em períodos geomagneticamente calmos (Figura 30C).

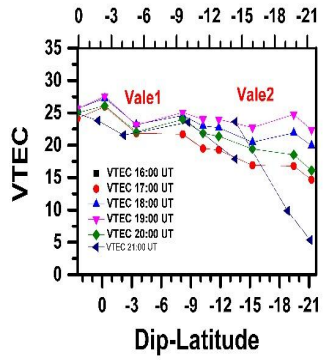
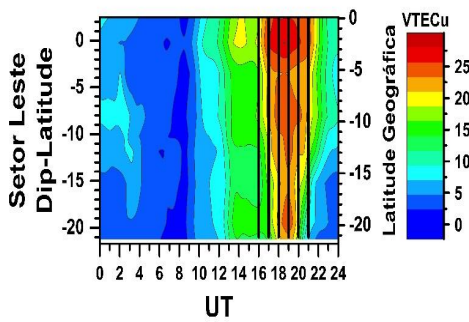
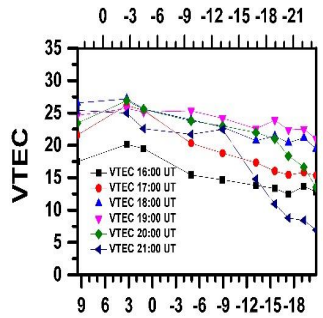
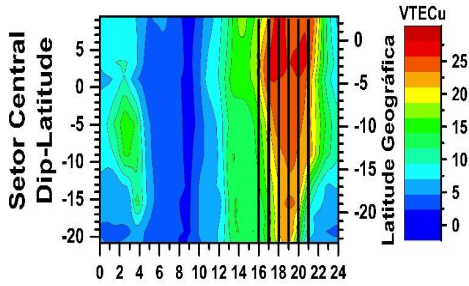
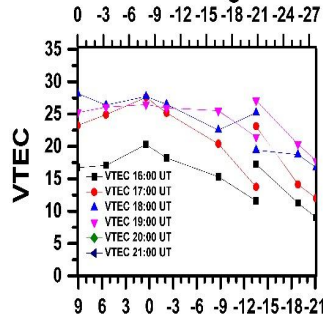
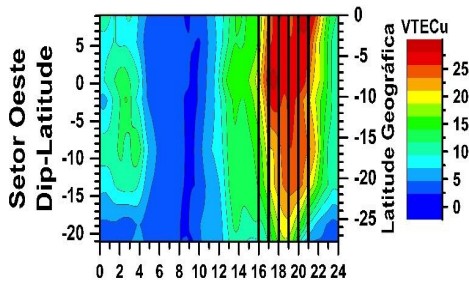
É importante ressaltar que a EIA atípica, para um dia específico, não necessariamente está presente nos 3 setores ao mesmo tempo, as vezes a EIA atípica pode estar presente apenas em 1 ou 2 setores. Estes casos de EIA atípica merecem um estudo mais detalhado no futuro utilizando um número maior de estações de GPS e estabelecer uma metodologia adequada para estudar estes casos atípicos.

Figura 30 - As Figuras (30A), (30B) e (30C) mostram a variação da EIA nos dias 18 de fevereiro de 2016, 03 de agosto de 2016 e 10 de outubro de 2016, respectivamente. Os painéis superior, intermediário e inferior referem-se aos setores oeste, central e leste brasileiro, respectivamente. Os painéis à esquerda mostram os gráficos de contorno VTEC nos quais pode-se notar a evolução da EIA, em função de UT (eixo x), dip-latitude (eixo Y a esquerda) e latitude geográfica (eixo Y a direita). As seis linhas pretas verticais (nos painéis a direita) mostram a variação do VTEC às 16:00, 17:00, 18:00, 19:00, 20:00 e 21:00 UT e destacam o período em que a EIA deveria ser verificada na escala VTEC (eixo Y a esquerda) em função dip-latitude (eixo X inferior) e latitude geográfica (eixo X superior)

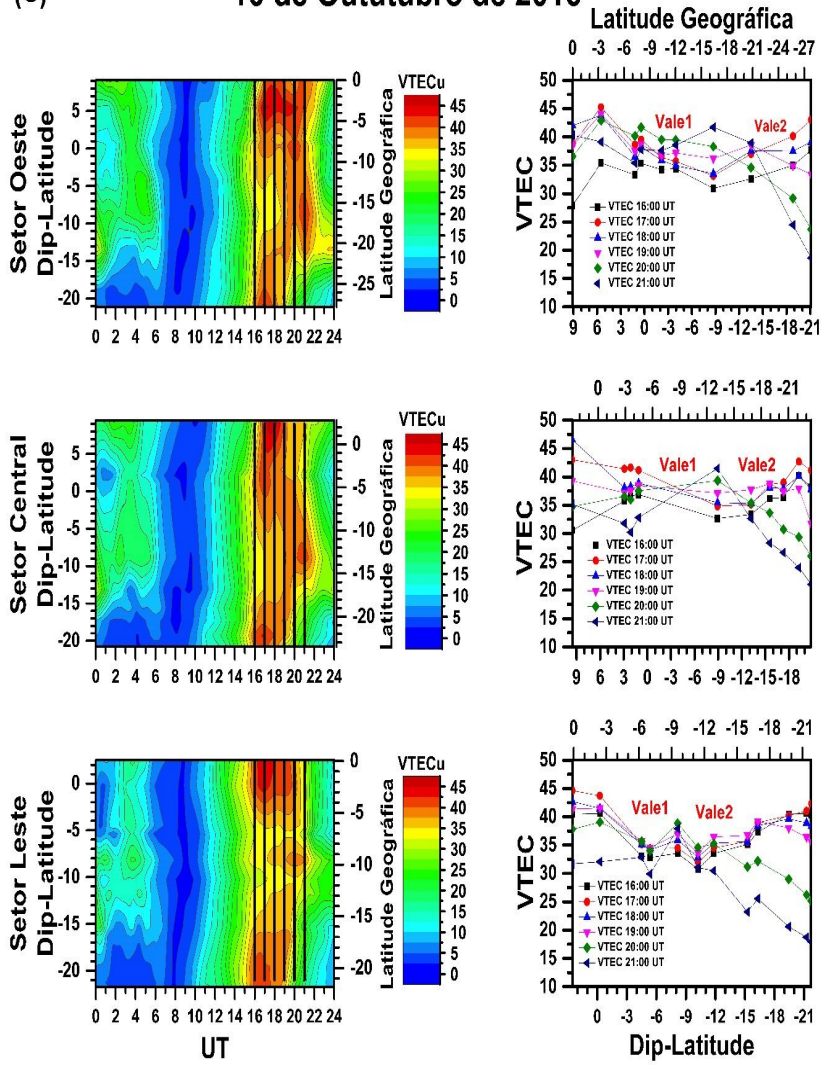


(B)

03 de Agosto de 2016 Latitude Geográfica



(C) 10 de Outubro de 2016



5.4 Análise da variação da classificação dia a dia da EIA

Fagundes *et al.*, 2016, Vieira *et al.*, 2017, Ribeiro *et al.*, 2019 investigaram, recentemente, a ionosfera durante tempestades geomagnéticas e eventos de aquecimento estratosférico súbito (SSW) mostraram que a EIA apresenta características diferentes quando comparamos o setor leste com o setor oeste brasileiro.

Nestes estudos, notou-se que a EIA nos setores leste e oeste brasileiro apresenta diferenças significativas na sua intensidade, tempo de vida e morfologia. Embora o presente estudo não esteja relacionando tempestades geomagnéticas ou eventos de SSW, as diferenças significativas da EIA dentro de uma separação longitudinal de cerca de ~1500 km (~12,5°) não eram esperadas. Portanto, estes resultados anteriores motivaram a realizar uma investigação da variação dia-a-dia da EIA durante um período geomagneticamente calmo em 3 setores brasileiros, denominados oeste, central e leste.

Utilizando a metodologia descrita acima foi investigada a ocorrência ou ausência da EIA, durante dias geomagneticamente calmos, nos setores oeste, central e leste brasileiro. O resultado desta investigação é apresentado na Figura 31, onde as barras vermelhas indicam os dias em que houve a formação de EIA, as barras verdes indicam os dias em que houve não formação/ausência da EIA e as barras brancas os dias geomagneticamente perturbados. Os casos atípicos que ocorreram durante dias geomagneticamente calmos foram classificados como EIA formado ou não formada/ausente dependendo dos critérios 1 e 2 apresentados no início do capítulo 5.

Na Figura 31, os gráficos do tipo histograma para os setores oeste, central e leste mostram a variação dia-a-dia da ocorrência ou da ausência da EIA ao longo do ano de 2016, para dias geomagneticamente calmos. Onde as barras vermelhas indicam os dias em que a EIA se desenvolveu e as barras verdes indicam os dias quando a EIA não se formou/ausente. Os dias geomagneticamente perturbados são indicados por barras brancas. Foram considerados dias geomagnéticos perturbados quando o índice Dst apresentou um valor < -40 nT, e, portanto, não foram levados em consideração no estudo.

Pode-se notar, na Figura 31, que de janeiro a abril e de setembro a dezembro a ocorrência de EIA desenvolvida nos três setores é muito maior que os casos de não

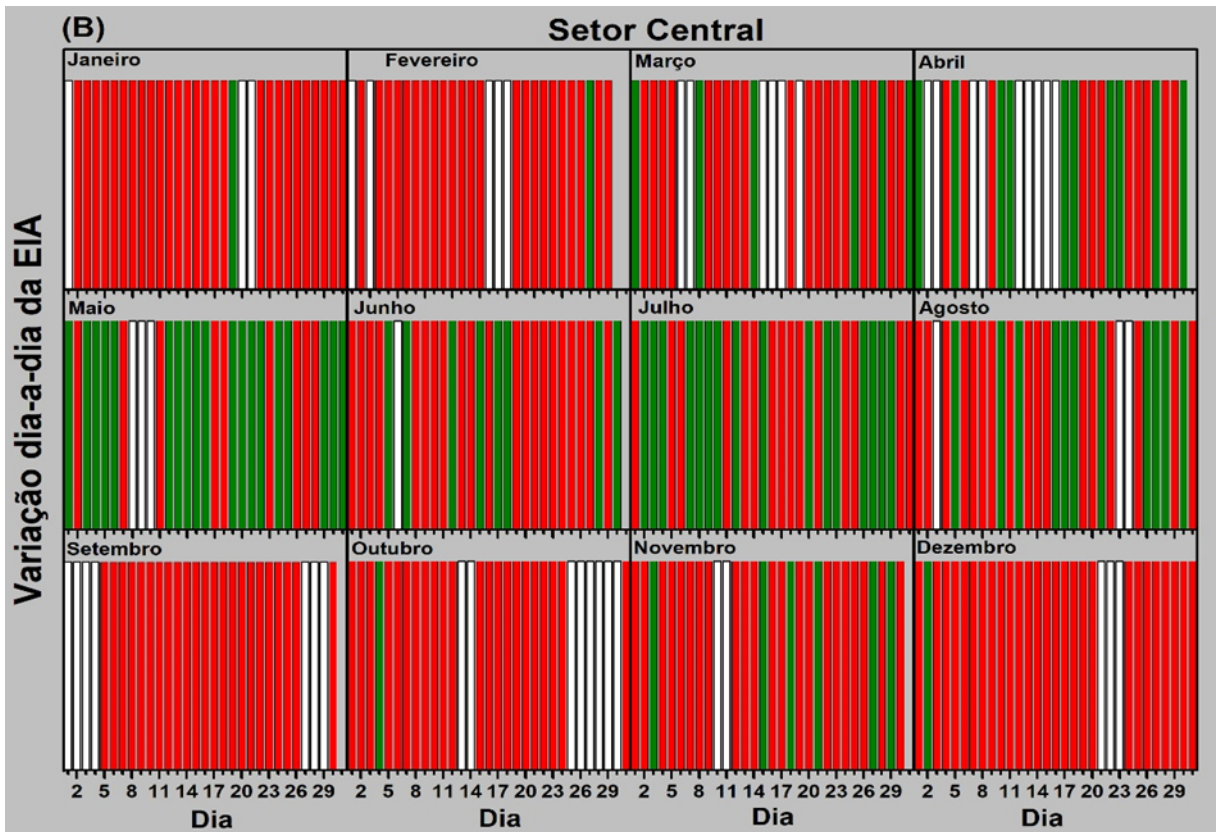
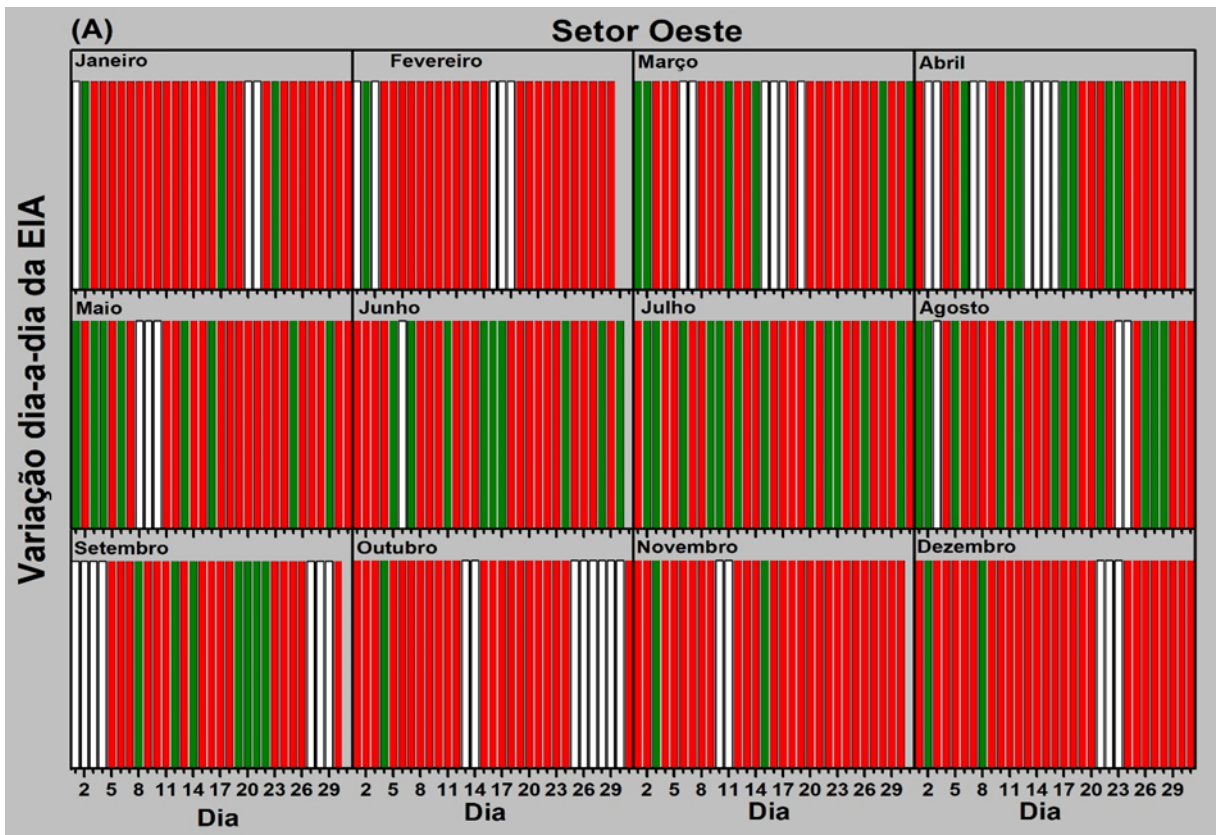
formação/ausência da EIA. Por outro lado, de maio a agosto, o número de dias em que a EIA não formou/ausente aumentou em comparação com janeiro-abril e setembro-dezembro.

Uma síntese do estudo da variação dia-a-dia da ocorrência ou não ocorrência/ausência da EIA, nos setores oeste, central e leste é apresentado na Tabela 3 (dias geomagneticamente calmos). A Tabela apresenta o número de dias por mês quando o EIA desenvolveu-se (indicado por “Sim”) e não desenvolvido/ausente (indicado por “Não”). Onde a porcentagem é indicada entre parênteses e foi calculada utilizando a Equação 72. Na Tabela 3, destaca-se quando a porcentagem de dias quando houve a ocorrência de EIA formada é superior a 75% pelo padrão de cor vermelha e ressalta-se quando a porcentagem de EIA não desenvolvido/ausente é superior a 25% pelo padrão de cor amarelo.

$$Porcentagem\ mensal = \left(\frac{N^{\circ}. de\ casos}{N^{\circ}. de\ dias\ do\ m\ e s - N^{\circ}. de\ dias\ perturbados} \right) \times 100$$

$$Porcentagem\ mensal = \left(\frac{N^{\circ}. de\ casos}{N^{\circ}. de\ dias\ do\ m\ e s - N^{\circ}. de\ dias\ perturbados} \right) \times 100 \quad (72)$$

Figura 31 - (a) Variação dia-a-dia da ocorrência da EIA formada (vermelho), não formada/ausente (verde) e geomagneticamente perturbado (branco) para o setor oeste durante o ano de 2016. (b) O mesmo que (a), mas para o setor central. (c) O mesmo que (a), mas para o setor leste



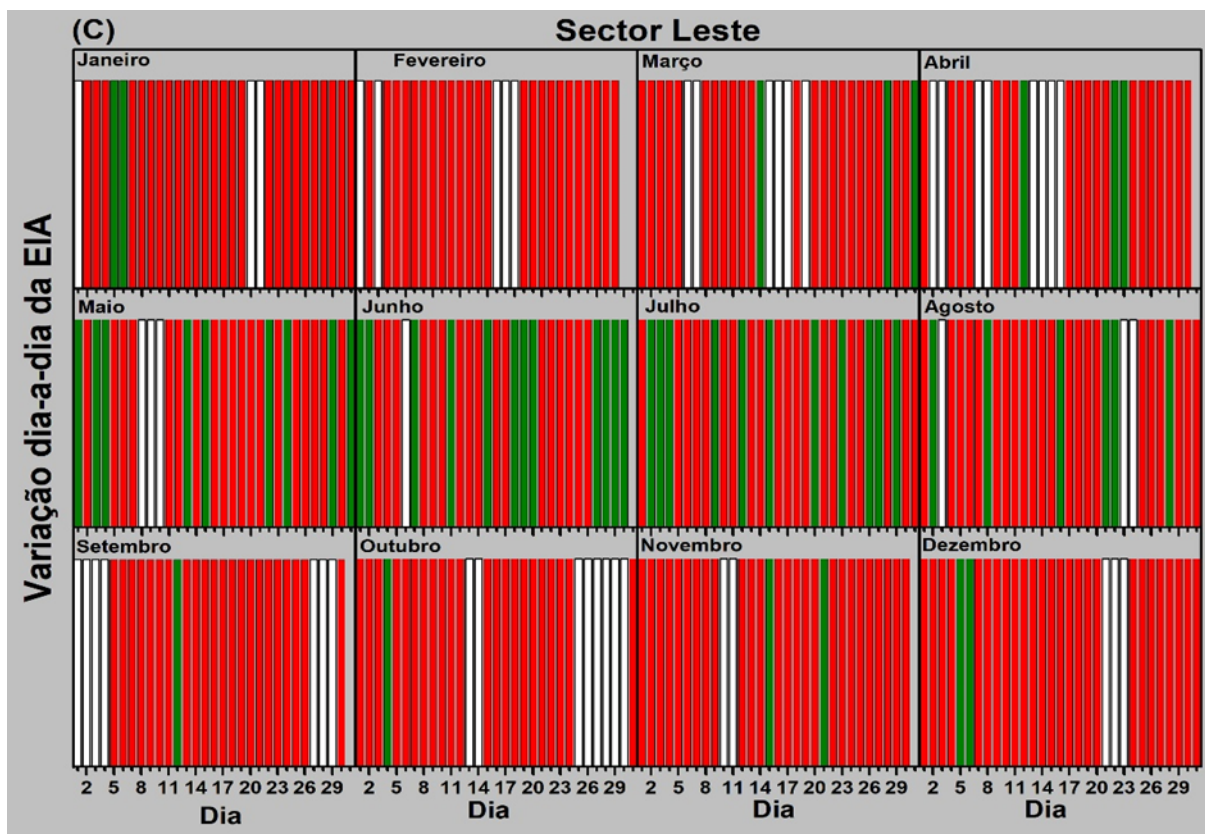


Tabela 3 - Número de casos mensal e a porcentagem durante um período geomagnético calmo em que a EIA é formada ou não formada nos setores oeste, central e leste são indicados por sim e não, respectivamente. O número de dias de cada mês e o número de dias perturbados também são mostrados. O padrão vermelho destaca os meses em que a taxa de EIA formada é superior a 75% e o padrão amarelo destaca os meses em que o número de EIA não formada é superior a 25%.

Meses	N.º de dias	N.º de dias perturbados*	Setor Oeste		Setor Central		Setor Leste	
			Sim (%)	Não (%)	Sim (%)	Não (%)	Sim (%)	Não (%)
Jan	31	3	25 (89,3)	3 (10,7)	27 (96,4)	1 (3,6)	26 (92,9)	2 (7,1)
Fev	29	5	23 (95,8)	1 (4,2)	23 (95,8)	1 (4,2)	24 (100)	0 (0,0)
Mar	31	6	19 (76,0)	6 (24,0)	19 (76,0)	6 (24,0)	22 (88,0)	3 (12,0)
Abr	30	8	15 (68,2)	7 (31,8)	11 (50,0)	11 (50,0)	19 (86,4)	3 (13,6)
Mai	31	3	20 (71,4)	8 (28,6)	9 (32,1)	19 (67,9)	19 (67,9)	9 (32,1)
Jun	30	1	20 (69,0)	9 (31,0)	21 (72,4)	8 (27,6)	17 (58,6)	12 (41,4)
Jul	31	0	19 (61,3)	12 (38,7)	15 (48,4)	16 (51,6)	20 (64,5)	11 (35,5)
Ago	31	3	17 (60,7)	11 (39,3)	17 (60,7)	11 (39,3)	22 (78,6)	6 (21,4)
Set	30	7	16 (69,6)	7 (30,4)	23 (100)	0 (0,0)	22 (95,7)	1 (4,3)
Out	31	8	22 (95,7)	1 (4,3)	22 (95,7)	1 (4,3)	22 (95,7)	1 (4,3)
Nov	30	2	26 (92,9)	2 (7,1)	22 (78,6)	6 (21,4)	26 (92,9)	2 (7,1)
Dez	31	3	26 (92,9)	2 (7,1)	27 (96,4)	1 (3,6)	26 (92,9)	2 (7,1)
Total	366	49	248 (78,2)	69 (21,8)	236 (74,4)	81 (25,6)	265 (83,6)	52 (16,4)

perturbados* (Dst ≤ -40)

A variação semianual pode ser novamente verificada nos setores oeste, central e leste através do número de dias “Sim” e “Não” que ocorrem nos meses de janeiro a dezembro de 2016 e as porcentagens que são apresentadas entre parênteses ajudam nesta análise (Tabela 3). É relevante notar que nela, o número de meses em que a EIA formou em mais de 75% dos dias do mês é 6, 7 e 9 nos setores oeste, médio e leste, respectivamente (padrão de cor vermelha). De forma complementar pode se notar que o número de meses em que o EIA não está desenvolvido/ausente em mais de 25% dos dias é 6, 5 e 3, nos setores oeste, médio e leste, respectivamente (padrão de cor amarelo).

Indicando que em uma distância longitudinal de ~1500 km (~12,5°) existe uma clara diferença na formação ou ausência da EIA no setor brasileiro. Provavelmente, a estrutura anômala do campo magnético terrestre no setor americano (grande declinação do equador magnético) seja um dos ingredientes mais importantes para explicar as diferenças entre os setores oeste, central e leste. Indicando que o processo de fotoionização e a distância entre os equadores geográficos e geomagnéticos combinados com o efeito fonte desempenham um papel importante na variação dia-a-dia e sazonal do desenvolvimento ou não da EIA.

Estes resultados sugerem que as diferenças longitudinais dentro de uma separação de ~12,5° entre o setor oeste para o leste estão relacionadas com a configuração geométrica dos equadores magnéticos e geográficos. Porque, dentro dessa pequena separação longitudinal, o único parâmetro que muda, significativamente, é a separação entre os dois equadores. No entanto, é importante que estudos envolvendo a modelagem ionosférica testem essa hipótese.

O número total de casos de EIA desenvolvidos durante o ano de 2016 é de 248 (78,2%), 236 (74,4%) e 265 (83,6%), e nos setores oeste, central e leste, respectivamente. Ao comparar os setores leste-central e leste-oeste, como esperado, o número total de dias com EIA formada no setor leste é maior do que nos setores médio e oeste. Todavia, ao comparar os setores central e oeste, o setor oeste apresenta um número total de dias com EIA formada pouco maior do que o setor central. Esperava-se que o setor oeste tivesse um número total menor de dias com EIA formado do que o setor central.

Provavelmente, essa contradição do número total de casos com EIA desenvolvidos entre os setores central e oeste deva estar relacionada como ao processo de

fotoionização e distância entre os equadores geográficos e geomagnéticos que na verdade não é bem compreendida ainda, talvez essa combinação não seja uma função linear.

Portanto, quando o número de receptores GPS na região equatorial brasileira aumentar, será possível estudar a EIA no setor brasileiro usando 4 ou 5 conjuntos latitudinais de GPS-TEC e explorar essa contradição entre os setores médio e oeste. Conseqüentemente, explorar em detalhes como a combinação do processo de fotoionização e a distância entre os equadores geográficos e geomagnéticos atuam na formação da EIA e sua variabilidade dia-a-dia e sazonal.

É válido ressaltar que os estudos das características da EIA, no setor americano, devem continuar, visto que existem várias questões científicas que devem ser esclarecidas, principalmente, a variação dia-a-dia, ao longo do ano, e em função do ciclo solar. Os casos de EIA atípicos durante períodos, geomagneticamente, calmos e perturbados devem ser melhor investigadas no futuro.

6 CONCLUSÕES

O VTEC calculado, para um conjunto de 35 estações de GPS, sobre o território brasileiro, foi utilizado para estudar a EIA, em três setores longitudinais, denominados oeste, central e leste, utilizando três redes latitudinais, que se estendem desde baixas latitudes magnéticas do Hemisfério Norte (HN) até além da crista da EIA no Hemisfério Sul (HS).

Os dados experimentais, dessas 3 redes de GPS-TEC, são analisados para investigar variabilidade e frequência de ocorrência mês-a-mês e dia-a-dia da EIA. Como também, a variação espaço-temporal da depressão do plasma equatorial e das cristas da EIA em baixas latitudes, por exemplo, a forma, a posição e a extensão da depressão de plasma e das cristas.

É importante ressaltar que essas 3 redes longitudinais formam 2 pares separados por uma distância longitudinal, relativamente, pequena e são denominadas leste-central e central-oeste e são separadas por uma distância longitudinal de 650 km ($6,1^\circ$) e 700 km ($6,4^\circ$), respectivamente. Esta investigação assume uma importância muito grande no estudo da EIA devido à configuração geométrica particular entre os equadores geográfico e magnético no HS, nos setores leste, central e oeste, sendo que a distância entre os equadores são de 350 km ($3,4^\circ$), 750 km ($6,6^\circ$) e 1150 km ($10,3^\circ$), simultaneamente.

Além disso, as características observadas, experimentalmente, da EIA, a partir dos dados experimentais de GPS-TEC, são comparadas com as obtidas pelo TEC do modelo IRI-2016. As principais conclusões da presente investigação estão resumidas a seguir:

1- As variações diárias e mensais da EIA nos setores leste, central e oeste do Brasil mostram uma variação semianual. Todos os setores mostram um máximo durante o verão (janeiro, fevereiro e março), um mínimo durante o inverno (junho, julho e agosto) e um máximo secundário durante a primavera (setembro, outubro e novembro);

2- Investigou-se a frequência de ocorrência da EIA desenvolvida e não desenvolvida/ausente para os setores oeste, central e leste, para um período calmo. O número de dias com EIA desenvolvidos e não desenvolvidos/ausentes durante o período calmo mostrou uma dependência longitudinal. Notou-se que o número de

meses com mais de 75% de dias com EIA desenvolvida é maior no setor leste do que nos setores central e oeste brasileiros;

3- As cristas da EIA em janeiro são mais fracas e têm uma vida útil mais curta do que as de fevereiro e março nos três setores. As cristas da EIA em fevereiro são as mais intensas e bem formadas em todos os setores. A crista da EIA é comparativamente mais fraca no setor oeste do que nos setores do central e leste, principalmente em janeiro. A EIA, durante o máximo principal, mostra uma depressão no plasma equatorial mais longa do que aquelas observadas durante o máximo secundário;

4- Durante os meses de mínimo da EIA (junho, julho e agosto), nota-se que as cristas da EIA não são desenvolvidas ou são mais fracas que nos outros meses. Em junho, a EIA não é desenvolvida no setor leste, mas nos setores central e oeste é bem estreita. Em agosto, a crista da EIA não se forma em nenhum dos três setores;

5- Durante o máximo secundário, as cristas mais fortes da EIA são verificadas em outubro e as EIAs são bastante semelhantes em todos os setores, mas as depressões de plasma equatoriais nos setores do central e oeste são mais alongadas que no setor leste;

6- Os máximos principal e secundário da EIA, calculado através do VTEC, do modelo IRI-2016, não têm uma boa concordância com os observados através GPS-VTEC obtidos, experimentalmente. No entanto, para o mínimo, as observações e o modelo IRI-2016 apresentam uma boa concordância. A crista da EIA vista a partir das observações do VTEC é latitudinalmente mais alongada, enquanto no modelo IRI apresenta em forma oval;

7- Por outro lado, a depressão de plasma equatorial da EIA vista através do VTEC não está localizada no equador magnético e é latitudinalmente maior do que a prevista pelo modelo (IRI-TEC). Em resumo, quando se compara as características da EIA utilizando os dados de VTEC e TEC (IRI-2016) diferenças marcantes são notadas, indicando que o modelo IRI ainda tem que ser aperfeiçoado para melhor representar as características ionosféricas observadas no setor brasileiro.

No futuro, seria interessante comparar o comportamento da EIA durante um ciclo solar completo. Também fazer uma comparação entre os setores americano e africano, já que o número de receptores de GPS na África está crescendo e, atualmente, essa comparação é possível.

REFERÊNCIAS

- AARONS, J. 50 years of radio-scintillation observations. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 39, p. 7-12, 1997.
- ABDU, M. A. *et al.* Equatorial spread F statistics and empirical representation for IRI: A regional model for the Brazilian longitude sector. **Advances in Space Research**, v. 31, p. 703-716, 2003.
- ABDU, M. A. *et al.* Magnetospheric disturbance effects on the equatorial ionization anomaly (EIA)—An overview. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 53, n. 8, p. 757–771, 1991, [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(91\)90126-R](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90126-R).
- ABDU, M. A. *et al.* A new aspect of magnetic declination control of equatorial spread F and F region dynamo. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, p. 14897-14904, 1992.
- ABDU, M. A. *et al.* An overview of IRI-observational data comparison in American (Brazilian) sector low latitude ionosphere. **Adv. Space Res.**, v. 18, n. 6, p. 13–22, 1996, doi:10.1016/0273-1177(95)00893-4.
- ABDU, M. A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread F. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, p. 869-884, 2001.
- ADEBESIN, B.O. *et al.* Ionospheric climatology at Africa EIA trough stations during descending phase of sunspot cycle 22. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.172, p.83-99, doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.009, 2018.
- AGGARWAL, M. TEC variability near northern EIA crest and comparison with IRI model. **Advances in Space Research**, v. 48, p. 1221-1231, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.05.037>.
- AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Análise da performance do Modelo da Ionosfera (Mod_Ion_FK) no posicionamento por ponto em tempo real. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 22., 2005, Macaé. **Anais...**, Macaé, 2005.
- AMAECHI, P. O.; OYEYEMI, E. O.; AKALA, A. O. Variability of the African Equatorial Ionization Anomaly (EIA) crests during year 2013. **Canadian Journal of Physics**, 2019, Doi:10.1139/cjp-2017-0985.
- ANDERSON, D. N. A theoretical study of the ionospheric F-region equatorial anomaly—I: Theory. **Planet. Space Sci.**, v. 21, p. 409–419, 1973, doi:10.1016/0032-0633(73)90040-8.
- ANDERSON, D. N. Modeling the ambient, low-latitude F-region ionosphere—A review. **J. Atmos. Terr. Phys.**, v. 43, p. 753–762, 1981, doi:10.1016/0021-9169(81)90051-9.

- APPLETON, E. Two Anomalies in the Ionosphere. **Nature**, v. 157, p. 691. <https://doi.org/10.1038/157691a0>, 1946.
- BAGIYA, M. S. *et al.* TEC variations during low solar activity period (2005–2007) near the Equatorial Ionospheric Anomaly Crest region in India. **Ann. Geophys.**, v. 27, p.1047–1057, 2009, <https://doi.org/10.5194/angeo-27-1047-2009>.
- BALAN, N. *et al.* Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan under magnetically quiet conditions at high solar activity. **Earth Planet Sp**, v. 54, p. 71–79, 2002, <https://doi.org/10.1186/BF03352423>.
- BALAN, N.; BAILEY, G. J. Equatorial plasma fountain and its effects: Possibility of an additional layer. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 100, 1995.
- BALAN, N.; SOUZA, J.; BAILEY, G.J. Recent developments in the understanding of equatorial ionization anomaly: A review. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 171, p. 3-11, 2018.
- BALAN, N. *et al.* A brief review of equatorial ionization anomaly and ionospheric irregularities. **Earth and Planetary Physics**, v. 2, p. 257-275, 2018b.
- BANKS, P. M; KOCKARTS, G. **Aeronomy**. Part A. New York: Academic Press, 1973.
- BATISTA, I. S. *et al.* Total electron content at low latitudes and its comparison with IRI90. **Adv. Space Res.**, v. 14, n. 12, p. 87–90, 1994, doi:10.1016/0273-1177(94)90246-1.
- BATISTA, I.S.; ABDU, M.A. Ionospheric variability at Brazilian low and equatorial latitudes comparison between observations and IRI model. **J. Adv. Space Res.**, v. 34 p. 1894 – 1894, 2004.
- BERTONI, SAHAI, F. *et al.* IRI-2001 model predictions compared with ionospheric data observed at Brazilian low latitude stations. **Annales Geophysicae, European Geosciences Union**, v.24, n. 8, p. 2191-2200, 2006.
- BHUYAN, P. K.; BORAH, R. R. TEC derived from GPS network in India and comparison with IRI. **Adv. Space Res.**, v. 39, n. 5, p. 830–840, 2007, doi:10.1016/j.asr.2006.12.042.
- BILITZA, D. International reference ionosphere: Recent developments. **Radio Sci.**, v. 21, p. 343–346, 1986, doi:10.1029/RS021i003p00343.
- BILITZA, D. **International Reference Ionosphere 1990**, NSSDC Report 90-22, 1990.

- BILITZA, D. *et al.* Comparison between IRI and GPS-IGS derived electron content during 1991–97. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 24, n.4, p. 311-319, 1998, doi.org/10.1016/S1464-1917(99)00004-5.
- BILITZA, D. International Reference Ionosphere 2000. **Radio Sci.**, v. 36, p. 261–275, 2001, doi:10.1029/2000RS002432.
- BILITZA, D.; REINISH, B. W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. **Adv. Space Res.**, v. 42, v.4, p. 599–609, 2008, , doi:10.1016/j.asr.2007.07.048.
- BILITZA, D. *et al.* The International Reference Ionosphere 2012: A model of international collaboration. **J. Space Weather Space Clim.**, v. 4, n. A07, 2014, doi:10.1051/swsc/2014004.
- BILITZA, D. *et al.* International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. **Space Weather**, v. 15, p. 418–429, 2017, doi:10.1002/2016SW001593.
- BILITZA, D. **International Reference Ionosphere**. Disponível em: <https://iri.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 23 ago. 2018.
- BLANC, M. ; RICHMOND, A.D. The ionospheric disturbance dynamo. **JGR: Space Physics**, v. 85, p. 1669-1686, 1980.
- BOOKER, H.G; WELLS, H.W. Scattering of radio waves by the f-region of the ionosphere. **Terr. Magn.**, v.43, p. 249-256, 1938.
- BRAMLEY, E. N.; PEART, M. Effects of ionization transport on the equatorial F region. **Nature**, v. 206, p. 1245–1246, 1965.
- BRIDGMAN, Tom. **Interface to Space: The Equatorial Fountain**. 2018. Disponível em: <https://svs.gsfc.nasa.gov/4617>. Acesso em: 18 set. 2018.
- CALVERT, W. Instability of equatorial F layer after sunset. **Journal of Geophysical Research**, v. 68, p. 2591, 1963.
- CAMARGO, P.O. **Modelo Regional da Ionosfera Para Uso em Posicionamento Com Receptores GPS de Uma Frequência**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.
- CHAPMAN, S. Upper atmospheric nomenclature. **Journal of Geophysical Research**, v. 55, n. 4, p. 395–399, 1950.
- CHEN, Y. *et al.* Does the F10.7 Index Correctly Describe Solar EUV Flux during the deep solar minimum of 2007-2009? **Journal Of Geophysical Reaserch (JGR)**, v. 116, A04304, 2011, doi: 10.1029/2010JA016301.

DA COSTA, A.M.; BOAS, J. W. V.; FONSECA, J. R. GPS total electron content measurements at low latitudes in Brazil for low solar activity. **Geofis. Int.**, v. 43, p. 129 – 137, 2004.

DABAS, R. S.; LAKSHMI, D. R.; REDDY, B. M. Solar Activity Dependence of Ionospheric Electron Content and Slab Thickness Using Different Solar Indices. **PAGEOPH**, v. 140, p. 4, 1993.

DAGG, M. The origin of the ionospheric irregularities responsible for radio-star scintillations and spread-*F*—II. Turbulent motion in the dynamo region. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 11, p. 139-150, 1957.

DAL POZ, W. R.; CAMARGO, P. O. Consequências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo com receptores GPS de simples frequência. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, n. 2, p. 275-294, 2006.

DASGUPTA, A.; PAUL, A.; DAS, A.; Ionospheric Total Electron Content (TEC) studies with GPS in the equatorial region. **Indian Radio Space Phys.**, v. 36, p. 278 – 292, 2007.

DAVIES, K. **Ionospheric radio**. London: Peter Peregrinus, 1990.

DAVIES, K.; BAKER, D. M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, p. 1896-1977, 1965, <https://doi.org/10.1029/JZ070i009p02251>.

DE ABREU, J. A. *et al.* Comparison of GPS-TEC measurements with IRI2012-TEC predictions in the Brazilian sector during the unusual solar minimum 2009. **INGV Annals of Geophysics**, v. 60, p. 3, 2017, doi.org/10.4401/ag-7300.

DIAS, M. A. L. *et al.* Daily and monthly variations of the equatorial ionization anomaly (EIA) over the Brazilian sector during the descending phase of the Solar Cycle 24. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 125, n. 9, 2020, <https://doi.org/10.1029/2020JA027906>.

DUARTE-SILVA, M.H., *et al.* Ionospheric slab thickness at the equatorial anomaly region after the deep solar minimum of cycle 23/24. **Adv. Space Res**, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.05.010>.

DUNGEY, J. W. Convective diffusion in the equatorial F-region, **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 9, p. 304–310, 1956.

FAGUNDES, P. R. *et al.* Ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming over the equatorial, low, and middle latitudes in the South American sector. **J. Geophys. Res. Space Physics**, v. 120, p. 7889-792, 2015, [doi: 10.1002/2014JA02064](https://doi.org/10.1002/2014JA02064).

FAGUNDES, P. R. *et al.* Positive and negative GPS-TEC ionospheric storm effects during the extreme space weather event of March 2015 over the Brazilian sector. **J.**

Geophys. Res. Space Physics, v. 121, p. 5613–5625, 2016, doi:10.1002/2015JA022214.

FAGUNDES, P. R. *et al.* Ionospheric disturbances in a large area of the terrestrial globe by two strong solar flares of September 6, 2017, the strongest space weather events in the last decade. **Advances in Space Research**, v. 66, p. 1775-1791, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.032>.

FEDRIZZI, M. **Estudo do efeito das tempestades magnéticas na ionosfera utilizando dados do GPS**. São José dos Campos. 223f. 2003. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

FEJER, B. G. *et al.* Dependence of Equatorial F Region Vertical Drifts on Season and Solar Cycle. **Journal of Geophysical Research**, v. 84. n. A10, p. 5792-5796, 1979.

FEJER, B.G.; KELLEY, M.C. Ionospheric irregularities. **Reviews of Geophysics**, v. 18, p. 401-454, 1980.

FEJER, B. G.; SCHERLISS, L.; PAULA, E. R. da. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 19854- 19869, 1999.

FONSECA JUNIOR, E.S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil**. 2002. 176p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS: theory and practice**. Wien: Springer-Verlag, 1994.

HUANG, Y-N.; CHENG, K.; CHEN, S-W. One the equatorial anomaly of the ionospheric total electron content near the northern anomaly crest region. **Journal Of Geophysical Research: Space Physics**, v. 94, p. 13515-13525, 1989.

HUANG, L. *et al.* Analysis of the north–south asymmetry of the equatorial ionization anomaly around 1101E longitude. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 102, p. 354-361, 2013, doi.org/10.1016/j.jastp.2013.06.01.

JAKOWSKI, N. *TEC Monitoring by using satellite positioning systems*. In.: KOHL, H.; RÜSTER, R.; SCHLEGEL, K. (ed.). **Modern ionospheric science**. Katlenburg-Lindau: Max- Planck-Institut für Aeronomie, 1996, p. 371-390.

JENKINS, B. *et al.* Observations and model calculations of an additional layer in the topside ionosphere above Fortaleza, Brazil. **Ann. Geophys.**, v. 15, n.6, p. 753-759, 1997.

JONAH, O.F. *et al.* TEC variation during high and low solar activities over South American sector. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.135, p. 22 – 35, 2015.

- KANE, R.P. Day-to-day variability of quiet-time ionospheric foF2. **Indian Journal of Radio & Space Physics**, v. 32, p. 344-348, 2003.
- KELLEY, M. C. **The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics**. 2nd. ed. London: Elsevier, 2009.
- KHADKA, S. M. *et al.* Effects of electric field and neutral wind on the asymmetry of equatorial ionization anomaly. **Radio Science**, v. 53, n. 5, p. 683-697, 2018, doi: 10.1029/2017RS006428.
- KINTNER, P. M.; LEDVINA, B. M. The ionosphere, radio navigation, and global navigation satellite systems. **Advances in Space Research**, v. 35, p. 788-811, 2005.
- KINTNER, P. M. *et al.* GPS and ionospheric scintillations. **Space Weather**, v. 5, S09003, 2007, doi: 10.1029/2006SW000260.
- KUMAR, S. *et al.* Annual variability of water vapor from GPS and MODIS data over the Iodo-Gangetic Plains. **J. Ind. Geophys. Union**, v. 13, n. 1, p. 17-23, 2009.
- KUMAR, S. *et al.* Equatorial Ionospheric Anomaly (EIA) and comparison with IRI model during descending phase of solar activity (2005-2009). **Advances in Space Research**, v. 53, p. 724-733, 2014, 10.1016/j.asr.2013.12.019.
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 2nd. ed. New York: Wiley, 2004.
- LIN, C. *et al.* Variations in the equatorial ionization anomaly peaks in the Western Pacific region during the geomagnetic storms of April 6 and July 15, 2000. **Earth Planet Sp**, v. 59, p. 401-405, 2007, <https://doi.org/10.1186/BF03352701>.
- LIU, G. *et al.* Seasonal variability of GPS-VTEC and model during low solar activity period (2006-2007) near the equatorial ionization anomaly crest location in Chinese zone. **Advances in Space Research**, v. 51, p. 366-376, 2013, doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.002.
- LIU, Y. *et al.* Investigation of mid-latitude nighttime ionospheric E-F coupling and inter-hemispheric coupling by using COSMIC GPS Radio Occultation measurements. **JGR Space Physics**, v. 125, 2020, <https://doi.org/10.1029/2019JA027625>.
- LUAN, X. *et al.* Interhemispheric asymmetry of the equatorial ionization anomaly in solstices observed by COSMIC during 2007-2012. **J. Geophys. Res. Space Physics**, v. 120, p. 3059-3073, 2015, doi:10.1002/2014JA020820.
- LUHR, H.; XIONG, C. IRI-2007 model overestimates electron density during the 23/24 solar minimum. **Geophys. Res. Lett.**, v. 37, L23101, 2010, doi:10.1029/2010GL045430.
- LUNT, N. *et al.* *The influence of the protonosphere on GPS observations: model simulations*. **Radio Science**, v. 34, p. 725-732, 1999.

MALYS, S. *et al.* Refinements of the World Geodetic System. ION GPS 97, Kansas, **Proceedings...**, Kansas, 1997, p 841.

MARTYN, D. F. **Interpretation of observed F-2 'winds' as ionization drifts.** Physics of the Ionosphere. London: Physical Society, 1955.

MARTYN, D. The Normal F Region of the Ionosphere. **IRE**, v. 47, n. 2, p. 147–155, 1959.

MATSUOKA, M. T. **Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS.** 2003. 164 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 56/01, p. 14-27, 2004.

MATSUOKA, M. T. **Influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento Por Ponto com GPS: Avaliação na Região Brasileira.** 263 f. 2007. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) –Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente , 2007.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Análise da Ionosfera usando dados de receptores de GPS durante um período de alta atividade solar e comparação com dados de digissondas. **Revista Brasileira de Geofísica (RBGF)**, v. 27, p. 565-582, 2009.

MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.; BATISTA, I.S. Impacto de explosões solares no comportamento da ionosfera e no posicionamento com GPS na região brasileira: Estudo de caso para o dia 28 de outubro de 2003. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, n. 2, p. 315-334, 2006.

MITRA, S. Geomagnetic Control of Region F_2 of the Ionosphere. **Nature**, v. 158, p. 668–669, 1946.

MO, X. *et al.* Meridional movement of northern and southern equatorial ionization anomaly crests in the East-Asian sector during 2002–2003 SSW. **Sci. China Earth Sci.**, v. 60, p. 776–785, 2017, <https://doi.org/10.1007/s11430-016-0096-y>.

MO, X. H. *et al.* Morphological characteristics of equatorial ionization anomaly crest over nanning region. **Radio Science**, v. 53, n. 1, p. 37-47, 2018, doi: 10.1002/2017RS006386.

MOFFETT, R. J. The equatorial anomaly in the electron distribution of the terrestrial F region. **Fund. Cosm. Phys.**, v. 4, p. 313, 1979.

MOFFETT, R. J.; HANSON, W. B. Effect of ionization transport on the equatorial F region. **Nature**, v. 206, p. 705, 1965.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo: Editora UNESP, 2000.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo: Editora UNESP, 2008.

MOOR, L. P. **Estudo das irregularidades ionosféricas da região F durante um período de atividade solar mínima.** 2011. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2011.

MUELLA, M. T. A. H. *et al.* Scintillation-producing Fresnel- scale irregularities associated with the regions of steepest TEC gradients adjacent to the equatorial ionization anomaly. **J. Geophys. Res.**, v. 115, 2010.

NAMBA, S.; MAEDA, K.-I. **Radio Wave Propagation.** report, p. 86. Corona, Tokyo, 1939.

NATURAL RESOURCES CANADA: banco de dados. Disponível em: <https://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-5-en.php>. Acesso em: 27 fev. 2018.

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 Brasileiras.** 2009. 148 p. Dissertação (Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial) – INPE, São José dos Campos, 2009.

NOGUEIRA, P. A. B. *et al.* Equatorial ionization anomaly development as studied by GPS TEC and *foF2* over Brazil: A comparison of observations with model results from SUPIM and IRI-2012. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 104, p. 45-54, 2013, doi.org/10.1016/j.jastp.2013.08.013.

OLUWADARE, T. S. *et al.* Characterization of GPS-TEC over African equatorial ionization anomaly (EIA) region during 2009–2016. **Advances in Space Research**, v. 63, p. 282–301, 2019, <http://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.044>.

OYEKOLA, O.S.; FAGUNDES, P.R. Equatorial F2-layer variations: Comparison between F2 peak parameters at Ouagadougou with the IRI-2007 model. **Earth Planets Space**, v. 64, p. 553-566, 2012, doi:10.5047/eps.2011.07.017.

PAUL, A.; DASGUPTA, A. Characteristics of the equatorial ionization anomaly in relation to the day-to-day variability of ionospheric irregularities around the postsunset period. **Radio Science**, v. 45, n. 06, p. 1-10, 2010.

PERNA, L., *et al.* Bottom side profiles for two close stations at the southern crest of the EIA: Differences and comparison with IRI-2012 and NeQuick2 for low and high solar activity. **Adv. Space Res.**, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.007>, 2018.

PRASAD, S. N. V. S. *et al.* On the variabilities of the Total Electron Content (TEC) over the Indian low latitude sector. **Advances in Space Research**, v. 49, p. 898-913, 2012, doi.org/10.1016/j.asr.2011.12.020.

- PRASAD, J. R. *et al.* Development of Relationship between Roughness (IRI) and Visible Surface Distresses: A Study on PMGSY Roads. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 322-331, 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.125.
- RAM, T.; SU, S.-Y.; LIU, C. H. FORMOSAT-3/COSMIC observations of seasonal and longitudinal variations of equatorial ionization anomaly and its interhemispheric asymmetry during the solar minimum period. **J. Geophys. Res.**, v. 114, A06311, 2009.
- RAO, P. V. S. R. *et al.* Temporal and spatial variations in TEC using simultaneous measurements from the Indian GPS network of receivers during the low solar activity period of 2004?2005. **Annales Geophysicae, European Geosciences Union**, v. 24, n. 12, p. 3279-3292, 2006.
- RAO, S.S.; CHAKRABORTY, M.; PANDEY, R. Ionospheric variations over Chinese EIA region using foF2 and comparison with IRI-2016 model. **Advances in Space Research**, v. 62, p. 84-93, 2018, 10.1016/j.asr.2018.04.009.
- RAWER, K.; BILITZA, D.; RAMAKRISHNAN, S. Goals and status of international reference ionosphere. **Rev. Geophys.**, v. 16, n. 2, p. 177–181, 1978.
- RIBEIRO, B. A. G. *et al.* Equatorial and low-latitude positive ionospheric phases due to moderate geomagnetic storm during high solar activity in January 2013. **Advances in Space Research**, v. 64, p. 995-1010, 2019, 10.1016/j.asr.2019.05.032.
- RICHMOND, A. D. Modeling the equatorial ionospheric electric fields. **J. Atmos. Terr. Phys.**, v. 57, p. 1103–1115, 1995.
- RISHBETH, H.; LYON, A. J.; PEART, M. Diffusion in the equatorial F layer. **J. Geophys. Res.**, v. 68, n. 9, p. 2559–2569, 1963, <https://doi.org/10.1029/JZ068i009p02559>.
- RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic, v. 168, 1969, p. 1336.
- RISHBETH, H. The equatorial F-layer: progress and puzzles. **Ann. Geophys.**, v. 18, p. 730-739, 2000, <https://doi.org/10.1007/s00585-000-0730-6>.
- ROMERO-HERNANDEZ, E. *et al.* Daytime Ionospheric TEC Weather Study Over Latin America. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 123, p. 10345-10357, 2018, <https://doi.org/10.1029/2018JA025943>.
- SARDÓN, E. *et al.* *Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from global positioning system observations.* **Radio Science**, v. 29, p. 577-586, 1994.
- SEBA, E. B., *et al.* The relationship between equatorial ionization anomaly and nighttime equatorial spread F in East Africa. **Adv. Space Res.**, v. 62, n. 7, p. 1737-1752, 2018.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. Berlin: New York: Editora: de Gruyter, 1993.

SEEMALA, G. K.; VALLADARES, C. E. Statistics of total electron content depletions observed over the South American continent for the year 2008. **Radio Science**, v. 46, 2011, doi:10.1029/2011RS004722.

SILVA, M.M.S.; KRUEGER, C.P.; VEIGA, L.A.K. Avaliação dos requisitos específicos da norma brasileira NBR.14166/1998 com ênfase ao posicionamento com NAVSTAR-GPS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, n. 2, p. 235-247, 2006.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A. Solar activity effects on equatorial plasma bubble zonal velocity and its latitude gradient as measured by airglow scanning photometers. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 53, p. 729-742, 1991.

SOUZA, J. R. *et al.* Determination of vertical plasma drift and meridional wind using the Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model and ionospheric data at equatorial and low latitudes in Brazil: summer solar minimum and maximum conditions. **J Geophys Res**, v. 105, p. 12813–12821, 2000.

STENING, R.J. Modelling the low latitude *F* region. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 54, p. 1387-1412, 1992, 10.1016/0021-9169(92)90147-D.

STOLLE, C. *et al.* Estimating the daytime Equatorial Ionization Anomaly strength from electric field proxies. **J. Geophys. Res.**, v. 113, A09310, 2008, doi:10.1029/2007JA012781.

SU, Y. Z. *et al.* A modelling study of the longitudinal variations in the north-south asymmetries of the ionospheric equatorial anomaly. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 59, p. 1299-1310, 1997, 10.1016/S1364-6826(96)00016-8.

TAKAHASHII, T.; OYA, H.; WATANABE, S. Ionospheric disturbances induced by substorm associated electric-fields in the low-latitude F-region. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 39, n. 4, p. 187–209, 1987, <https://doi.org/10.5636/jgg.39.187>.

TAKAHASHI, H. *et al.* Ionospheric TEC Weather Map Over South America. **Space Weather**, v. 14, p. 937–949, 2016, doi:10.1002/2016SW001474.

TARDELLI, A.; FAGUNDES, P. R. Observations of ionospheric F layer quadruple stratification near equatorial region. **Journal of geophysical research-space physics**, v. 120, n. 1, p. 834-840, 2015.

TARDELLI, A. **Estudo de múltiplas estratificações da camada-f ionosférica em regiões de baixa latitude e equatorial**. 124p. Tese (Doutorado em Física e Astronomia), Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2016.

TARDELLI, A. *et al.* Study of the F3 and StF4 Layers at Tucumán Near the Southern Crest of the Equatorial Ionization Anomaly in Western South America. **JGR: Space Physics**, v. 123, p. 2156–2167, 2018, <https://doi.org/10.1002/2017JA024539>.

TASCIONE, T. F. **Introduction to the Space Environment**. 2nd. Ed. Malabar: Krieger Publishing Company, 1994.

TSAI, H-F. *et al.* Seasonal variations of the ionospheric total electron content in Asian equatorial anomaly region. **Journal Of Geophysical Research**, v. 106, n. A12, p. 30363-30369, 2001, 10.1029/2001JA001107.

VENKATESH, K. *et al.* On the performance of the IRI-2012 and NeQuick2 models during the increasing phase of the unusual 24th solar cycle in the Brazilian equatorial and low latitude sectors. **J. Geophys. Res. Space Physics**, v.119, p.5087-5105, 2014a, 10.1002/2014JA019960.

VENKATESH, K. *et al.* Assessment of IRI-2012 profile parameters by comparison with the ones inferred using NeQuick2, ionosonde and FORtulaMOSAT-1 data during the high solar activity over Brazilian equatorial and low latitude sector. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.121, p. 10-23, 2014b.

VENKATESH, K. *et al.* Day-to-day Variability of Equatorial Electrojet and its Role on the Day-to-Day Characteristics of the Equatorial Ionization Anomaly Over the Indian and Brazilian Sectors. **Journal of Geophysical Research (JGR)**, v. 120, 2015, doi:10.1002/2015JA021307.

VIEIRA, F. *et al.* Total electron content disturbances during minor sudden stratospheric warming, over the Brazilian region: A case study during January 2012. **J. Geophys. Res. (JGR). Space Physics**, v. 122, p. 2119-2135, 2017, doi: 10.1002/2016JA023650.

WALKER, G.O.; STRICKLAND, A.E. A comparison of the ionospheric equatorial anomaly in the East Asian and the American regions at Sunspot minimum. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 43, p. 589-595, 1981, 10.1016/0021-9169(81)90121-5.

WU, C-C. *et al.* Variation of ionospheric total electron content in Taiwan region of the equatorial anomaly from 1994 to 2003. **Advances in Space Research**, v. 41, p. 611-616, 2008, doi.org/10.1016/j.asr.2007.06.013.

ZHANG, M-L. *et al.* Variability study of the crest-to-trough TEC ratio of the equatorial ionization anomaly around 120°E longitude. **Advances in Space Research**, v. 43, p. 1762-1769, 2009, 10.1016/j.asr.2008.09.031.

ZHAO, B. *et al.* Characteristics of the ionospheric total electron content of the equatorial ionization anomaly in the Asian-Australian region during 1996-2004. **Ann. Geophys.**, v. 27, n. 10, p. 3861-3873, 2009, <http://doi.org/10.5194/angeo-27-3861-2009>.

ANEXO A

DIAS, M. A. L.; FAGUNDES, P. R.; VENKATESH, K.; PILLAT, V. G.; RIBEIRO, B. A. G.; SEEMALA, G. K.; ARCANJO, M. O. Daily and Monthly Variations Of the Equatorial Ionization Anomaly (EIA) Over the Brazilian Sector During the Descending Phase Of the Solar Cycle 24. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, e2020ja027906, <https://doi.org/10.1029/2020ja027906>, 2020.

	Journal Code	Article ID	Dispatch: 00.00.00	CE: GOD
J	G	R	A	S
1	2	3	4	5
6	7	8	9	0
No. of Pages: 17			ME:	

Revised proofs are sent only in the case of extensive corrections upon request

AGU ADVANCING EARTH AND SPACE SCIENCE

JGR Space Physics

RESEARCH ARTICLE

10.1029/2020JA027906

Key Points:

- Study for the first time the day-to-day and month-to-month characteristics of the EIA in three different longitudinal sectors over Brazil
- Observations from three latitudinal networks with 15 GPS-VTEC stations spanning from the equator to low latitudes are analyzed
- A comparison between the EIA from measurements using GPS-VTEC and the IRI-2016 model

Correspondence to:

F. R. Fagundes,
fagundes@univap.br

Citation:

Dias, M. A. L., Fagundes, P. R., Venkatesh, K., Pillat, V. G., Ribeiro, B. A. G., Seemala, G. K., & Arcanjo, M. O. (2020). Daily and monthly variations of the equatorial ionization anomaly (EIA) over the Brazilian sector during the descending phase of the Solar Cycle 24. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, e2020ja027906. <https://doi.org/10.1029/2020ja027906>

Received 12 FEB 2020

Accepted 15 JUL 2020

Accepted article online 6 AUG 2020

Daily and Monthly Variations of the Equatorial Ionization Anomaly (EIA) Over the Brazilian Sector During the Descending Phase of the Solar Cycle 24

M. A. L. Dias^{1,2}, P. R. Fagundes¹, K. Venkatesh³, V. G. Pillat⁴, B. A. G. Ribeiro¹, G. K. Seemala⁴, and M. O. Arcanjo¹

¹Laboratório de Física e Astronomia, Universidade do Vale do Paraíba-UNIVAP, São José dos Campos, Brazil, ²Observatório de Física Espacial, Campus Araguatins, Instituto Federal de Tocantins-IFTO, Palmas, Brazil, ³National Atmospheric Research Laboratory (NARL), Tirupati, India, ⁴Indian Institute of Geomagnetism, Navi Mumbai, India

Abstract It has been noticed recently that the equatorial ionization anomaly (EIA) in the Brazilian eastern, middle, and western sectors present significant longitudinal variability within a short separation due to the presence of typical magnetic field structure over South America. Therefore, the main motivation of this study is to investigate day-to-day and month-to-month characteristics of the EIA in three closely spaced longitudinal sectors over the Brazilian region during the year 2016 in the descending phase of the solar activity. These three longitudinal sectors are perpendicular to the magnetic equator at its largest declination over the globe. The EIA showed a semiannual variation in all sectors with a major maximum during the summer, a minimum during the winter, and secondary maximum during spring. In addition, the EIA shows its classical behavior with a trough around the magnetic equator and crests at low latitudes (from $\pm 15^\circ$ to $\pm 20^\circ$). When the EIA is not developed, the maximum ionization is located around the dip equatorial latitudes and the anomaly crest is absent. The number of days within 1 year that showed clear EIA development in the west, middle, and east sectors is 248 (78.2%), 236 (74.4%), and 265 (83.6%), respectively. The undeveloped/absence of EIA is also found often during the months of winter, and the numbers of such days during 2016 in the west, middle, and east are 69 (21.8%), 81 (25.6%), and 52 (16.4%), respectively. Also, the shape, strength, extent, and lifetimes of EIA crest have shown significant variabilities between the three sectors during different seasons. Further, a comparative analysis is carried out on the variations of EIA crest and lifetime between GPS observations and IRI-2016 model, and the results are discussed.

1. Introduction

It is well known that the equatorial ionosphere is characterized by the dynamic phenomena called the equatorial ionization anomaly (EIA). The day-to-day variability of EIA is controlled by several solar parameters, such as radiation (UV, EUV, and X-ray), solar activity, flares, and coronal mass ejection events. In addition, the neutral atmosphere (thermosphere) plays an important role in EIA day-to-day variations due to composition changes ([O]/[N₂]), thermospheric winds, and planetary, tide, and gravity waves (Romero-Hernandez et al., 2018). However, the equatorial F-region electrodynamic is the most important factor that controls the EIA day-to-day variability via fountain effect, as described below.

During the daytime, the equatorial and near-equatorial F-region present a vertical upward drift due to the special geometric configuration between the Earth's magnetic field (\vec{B}) and the zonal electric field component (\vec{E}). At the geomagnetic equator and the surrounding latitudes, the terrestrial magnetic field is parallel or almost parallel (north-south direction) to the Earth's surface, and its combination with the perpendicular daytime zonal electric field \vec{E}_{zonal} yields the F-layer upward vertical drift that is given by Equation 1.

$$\vec{V}_{\text{upward}} = \frac{\vec{E}_{\text{zonal}} \times \vec{B}_{\text{northward}}}{B^2} \quad (1)$$

The \vec{V}_z intensity depends on local time, longitude, and thermosphere-ionosphere coupling and exhibit significant variability from day-to-day, season, solar activity, and solar cycle. To explain different features in the

©2020. American Geophysical Union.
All Rights Reserved.