



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

FABRICIO DOS SANTOS PROL

**TOMOGRAFIA DA IONOSFERA A PARTIR DO GNSS E
TÉCNICAS ALGÉBRICAS: ESTUDO DE CASO PARA A
REGIÃO BRASILEIRA**

A faint, light-colored graphic in the background features a central globe showing the Americas. Overlaid on the globe are several overlapping, light gray elliptical lines that resemble satellite orbits or paths in space.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Presidente Prudente
2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

FABRICIO DOS SANTOS PROL

**TOMOGRAFIA DA IONOSFERA A PARTIR DO GNSS E
TÉCNICAS ALGÉBRICAS: ESTUDO DE CASO PARA A
REGIÃO BRASILEIRA**

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo.

Presidente Prudente
2015

P958t Prol, Fabricio dos Santos.
Tomografia da ionosfera a partir do GNSS e técnicas algébricas: estudo de caso para a região brasileira / Fabricio dos Santos Prol. - Presidente Prudente : [s.n.], 2015
94 f.

Orientador: Paulo de Oliveira Camargo
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. TEC. 2. Problema inverso. 3. Tomografia baseada em células. 4. Tomografia baseada em funções. 5. Imageamento ionosférico. I. Camargo, Paulo de Oliveira. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Cartográficas pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Presidente Prudente

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO
(ORIENTADOR)

Prof. Dr. JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO
(UNESP/FCT)

Prof. Dr. MARCIO TADEU DE ASSIS HONORATO MUELLA
(UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA)

FABRÍCIO DOS SANTOS PROL

Presidente Prudente (SP), 24 de fevereiro de 2015.

DADOS CURRICULARES

Fabricio dos Santos Prol

Nascimento	20/02/1989 - Santos - SP
Filiação	Carlos Henrique Rezende Prol Márcia Tavares dos Santos Prol
2007 – 2011	Curso de Graduação Engenharia Cartográfica Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP
2013 – 2015	Curso de Pós-Graduação Mestrado em Ciências Cartográficas Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa.

Agradeço ao meu orientador Prof. Paulo de Oliveira Camargo, sendo o principal motivador da pesquisa.

Um “*thanks*” ao Prof. Galera, por sempre desenvolver o meu “pensar” e pelas suas inúmeras contribuições científicas.

Agradeço ao Prof. Marcio Muella, pelas diversas contribuições como membro de banca da defesa, bem como pelo auxílio no fornecimento de dados de ionossondas pertencentes à UNIVAP.

A todos da sala de permanência da Pós-Graduação pela convivência diária. Em especial ao Victor Blasechi e ao José Marcato, sempre com boas ideias; ao Renan Furlan, Daniel Arana, Raquel Alves, Guilherme Cardim, Samara, Renato, Alisson, Érico, Ricão, Deroco, Michelle, Adilson e Ana Paula. Ao Marcos e Gabi, Carlos e Mayara, Ulisses e Thanan.

Ao GEGE, sobretudo ao Bruno Vani e Rogério Oyama, por todo o crescimento que compartilhamos juntos; ao Paulo Sérgio e nossas proveitosas discussões. A todo o pessoal do Laboratório de Geodésia Espacial: Hérica Reis, Vinicius Stuani, Emerson (Boni), e a todos os que já deixaram sua história no LGE. Ao Prof. Felipe Nievinsk, Prof.^a Dani e Prof. Milton Shimabukuro, por compartilharem conhecimento nas áreas da Geodésia e Computação.

Agradeço a minha família: meus pais por sempre me apoiarem; meu irmão que, apesar da distância, sempre esteve ao meu lado nesta jornada; meus avôs Paco e Shirlei; meus avôs Vivi e Naná (minhas memórias de vocês sempre permanecem vivas) e; a todos os meus familiares.

Meu agradecimento mais especial é à Mari! Obrigado por fazer parte da minha vida e me acompanhar por todas as etapas que percorri ao desenvolver este mestrado. Agradeço seus carinhosos pais Toninho e Alcina, que dupla!

Agradeço ao IGS, IBGE, projeto LISN e ao projeto CALIBRA pelo fornecimento dos dados GNSS. Também agradeço ao INPE (EMBRACE) e UNIVAP por conceder dados de ionossondas localizadas sobre o Brasil.

Seria impossível atingir a profundidade deste trabalho sem o conhecimento acumulado de muitas gerações. Agradeço indiretamente a todos que desenvolveram pesquisas em prol da ciência.

EPÍGRAFE

“Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos.”

Albert Einstein

RESUMO

A variação espaço-temporal da densidade eletrônica na atmosfera terrestre torna a ionosfera uma região de difícil modelagem. A principal dificuldade no imageamento da ionosfera com o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é devido à geometria dos satélites, pois torna o sistema tomográfico mal condicionado. Muito embora isto ocorra, diversas técnicas foram desenvolvidas para, parcialmente, superar este problema. Há grande interesse no uso de técnicas de tomografia para o imageamento da ionosfera, pois estas permitem descrever a ionosfera ao nível da densidade eletrônica, um importante parâmetro para compreender os processos físicos e químicos que ocorrem na alta atmosfera bem como para corrigir o atraso ionosférico no posicionamento GNSS. No Brasil, existem interesses adicionais no imageamento ionosférico por meio de técnicas tomográficas devido às características peculiares da ionosfera e do campo geomagnético sobre a região. Neste sentido, métodos utilizados para a reconstrução tomográfica da ionosfera são apresentados e discutidos neste trabalho. Uma ênfase especial é dada para a formulação matemática dos métodos baseados em células (ou técnicas algébricas) e em funções, onde algumas de suas principais vantagens e limitações são apresentadas. As técnicas baseadas em células foram utilizadas para realizar experimentos na região brasileira. Os resultados apresentaram que o imageamento ionosférico permitiu estimar a densidade de pico de perfis da ionosfera com eficiência melhor ou similar ao modelo IRI (*International Reference Ionosphere*), bem como o TEC (*Total Electron Content*) inclinado (STEC – *Slant TEC*) com menor RMSE (*Root Mean Square Error*) àqueles estimados por meio de mapas de VTEC (*Vertical TEC*) do IGS (*International GNSS Service*). Além disso, as variações diárias foram melhores representadas com as técnicas algébricas, em comparação com o IRI e os mapas do IGS, possibilitando correlacionar informações de elevação da ionosfera para alturas superiores com a intensificação da Anomalia da Ionização Equatorial (EIA), bem como com a geração de irregularidades ionosféricas.

Palavras-chave: TEC, Problema Inverso, Tomografia Baseada em Células, Tomografia baseada em Funções, Imageamento Ionosférico.

ABSTRACT

The spatial and temporal variations of the electron density in the atmosphere make the ionosphere a difficult region to model. A major difficulty arises from the incomplete geometrical coverage of the Global Navigation Satellite System (GNSS) for tomographic applications, turning the ionospheric tomography system into an ill-conditioned equation system. Although the tomography system is ill-conditioned, several techniques were developed to partially overcome the problem. There is great interest in using the tomographic techniques for ionospheric imaging, because it allows describing the ionosphere in terms of electron density, which is an important parameter to study the behavior of physical and chemical processes that occur on the upper atmosphere and for the correction of the ionospheric delay in the GNSS positioning. In Brazil, there are additional interests in tomographic techniques, due to the peculiar characteristics of the ionosphere and of the geomagnetic field over the region. In this direction, methods for ionospheric tomography reconstruction are presented and discussed in this work. Particular emphasis is given to the mathematical formulation from grid-based (or algebraic techniques) and function-based methods and some of their main advantages and limitations are presented. An application was performed using the grid-based methods in the Brazilian sector. The results presented that the ionospheric imaging using grid-based techniques allowed estimating the electron density peak with similar or better efficiency than the IRI (International Reference Ionosphere) model as well as the Slant Total Electron Content (STEC) with lower RMSE (Root Mean Square Error) from those estimated by IGS (International GNSS Service) VTEC (Vertical TEC) maps. Furthermore, the daily variations of the ionosphere were better represented with the algebraic techniques, in comparison to the IRI model and IGS maps, enabling correlate elevation of the ionosphere at higher altitudes with the Equatorial Ionization Anomaly (EIA) intensification, as well as ionospheric irregularities.

Keywords: TEC, Inverse Problem, Grid-Based Tomography, Function-Based Tomography, Ionospheric Imaging.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	14
1.2	Conteúdo da Dissertação	15
2	ESTRUTURA DA IONOSFERA	16
2.1	Antecedentes Históricos do Descobrimento da Ionosfera	17
2.2	Formação da Ionosfera	18
2.3	Variações Altimétricas da Ionosfera	19
2.4	Variações Latitudinais da Ionosfera	22
2.5	Variações Temporais da Ionosfera	23
3	TOMOGRAFIA DA IONOSFERA A PARTIR DO GNSS	25
3.1	Informação da Ionosfera a partir do GNSS	25
3.2	Tomografia Computadorizada da Ionosfera	28
3.3	Tomografia da Ionosfera Baseada em Células	32
3.3.1	<i>Background</i> da Ionosfera	32
3.3.2	Técnicas Algébricas	34
3.4	Tomografia da Ionosfera Baseada em Funções	35
3.4.1	Funções Horizontais	36
3.4.2	Funções Verticais	39
3.4.2.1	Modelo de chapman	39
3.4.2.2	Referência internacional da ionosfera	40
3.4.2.3	Funções ortogonais empíricas	41
3.4.3	Funções Tridimensionais	44
3.5	Considerações sobre as Técnicas de Tomografia da Ionosfera	46

4	DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO PARA A TOMOGRAFIA DA IONOSFERA	48
5	ANÁLISES DAS TÉCNICAS ALGÉBRICAS COM OBSERVAÇÕES SIMULADAS.....	51
5.1	Análise das Técnicas Algébricas no Imageamento Bidimensional	51
5.2	Análise das Técnicas Algébricas no Imageamento Tridimensional.....	56
5.3	Análise do Imageamento da Ionosfera no Setor Brasileiro.....	59
6	ANÁLISE DAS TÉCNICAS ALGÉBRICAS COM OBSERVAÇÕES DO GNSS.....	63
6.1	Análise da Estimativa da Frequência Crítica.....	65
6.2	Análise da Estimativa do STEC.....	69
6.3	Comparação entre Perfis Ionosféricos.....	75
6.4	Representação da Ionosfera sobre o Setor Brasileiro	79
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	86
7.1	Conclusões	86
7.2	Recomendações.....	89
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

O imageamento da ionosfera desempenha um importante papel em grande parte das investigações sobre o clima espacial. As imagens resultantes são de interesse do ponto de vista científico, pois, assim como apresentado por Kelley (2009), a ionosfera é uma região de interesse para estudos relacionados aos processos físicos e químicos da atmosfera superior da Terra, onde ocorre uma constante competição entre as partículas neutras e ionizadas da atmosfera. No cenário tecnológico, a densidade de íons e elétrons livres na ionosfera é suficiente para alterar a propagação de ondas eletromagnéticas. Portanto, a ionosfera exerce uma importante função nos sistemas de telecomunicação, pois atua como uma superfície refletora para sinais de frequências muito baixa (VLF – *Very Low Frequency*) até as altas frequências (HF - *High Frequency*). Nas frequências mais altas, como a VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*), a ionosfera causa refração e/ou difração nos sinais, o que pode introduzir consideráveis níveis de ruídos e falhas nos sinais de rádio, proporcionando interferências significativas e até mesmo interrupções (DAVIES, 1990).

Os principais equipamentos para a observação de parâmetros que descrevem o estado da ionosfera são as sondas terrestres e espaciais que emitem pulsos de Rádio Frequência (RF) em direção à atmosfera. O estudo destes parâmetros é, normalmente, realizado por meio de equipamentos específicos para tal, como a ionossonda e o radar de espalhamento incoerente inclinado/oblíquo. O GNSS (*Global Navigation Satellite System*), no entanto, têm sido muito empregado nos últimos anos como uma tecnologia efetiva na representação do estado da ionosfera (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2009), pois aliando a propriedade dispersiva da ionosfera aos sinais transmitidos em duas, ou mais, frequências distintas, é possível determinar a integral da densidade eletrônica, ou seja, o TEC (*Total Electron Content*) no trajeto do sinal desde o satélite até o receptor GNSS.

A partir de observáveis GNSS obtidas por uma rede de receptores, diversos modelos foram desenvolvidos para a representação do TEC na ionosfera. Parte desses modelos descreve a ionosfera por meio da estimativa de valores verticais de TEC (VTEC - *Vertical TEC*); porém, erros na modelagem do VTEC ocorrem devido à consideração da ionosfera como uma camada fina de altitude constante. Brunini et al. (2011), por exemplo, aponta que o erro na conversão do TEC inclinado (STEC - *Slant TEC*) para o VTEC pode atingir mais de cinco unidades de TEC (TECU - *TEC Units*), o que representa um atraso

ionosférico de aproximadamente 80 cm na portadora L_1 do GPS (*Global Positioning System*). Além disso, a suposição de camada fina é apenas uma aproximação da realidade e restringe o uso das observáveis GNSS para aplicações que analisam as variações horizontais da ionosfera. Em contraste, o sinal GNSS atravessa diversas altitudes da atmosfera, o que permite representar a ionosfera tridimensionalmente a partir de técnicas de reconstrução tomográfica (BUST; MITCHELL, 2008; WEN et al., 2012; VAN DE KAMP, 2013; CHARTIER et al., 2014).

Em geral, os algoritmos tomográficos da ionosfera podem ser divididos em dois grupos: aqueles baseados em células (*grid-based*) ou em funções (*function-based*). No primeiro grupo, a ionosfera é representada em uma grade composta por células de três dimensões (latitude, longitude e altitude), identificadas por *voxels* (*volume elements*), ou de duas dimensões (*pixels*), sendo necessário estimar a densidade eletrônica em cada célula a partir de técnicas algébricas (WEN et al., 2012). Já nos algoritmos baseados em funções, as variações ionosféricas horizontais e verticais são reconstruídas por meio de funções de superfície, que representam a densidade eletrônica em um conjunto de coeficientes (VAN DE KAMP, 2013).

Desta forma, o imageamento tridimensional com uso da tomografia permite observar a ionosfera ao nível da densidade eletrônica, sendo este um dos principais parâmetros que descreve os processos físicos e químicos que ocorrem na ionosfera, de especial interesse à Geofísica, Aeronomia e Clima Espacial, bem como permite determinar o atraso ionosférico no posicionamento GNSS. Sendo assim, diversas aplicações emergem das técnicas de tomografia da ionosfera. Rose et al. (2011), por exemplo, utilizou os algoritmos tomográficos para aprimorar o posicionamento absoluto realizado com receptores GPS (*Global Positioning System*) de simples frequência, onde os resultados apresentaram uma melhoria de 90% em comparação ao posicionamento utilizando o modelo de Klobouchar. Além disso, Hernández-Pajares et al. (2000) utiliza modelos tomográficos com duas camadas para fixar as ambiguidades no posicionamento relativo em tempo real, com receptores de duas frequências. Os resultados mostraram, para um período de tempestade geomagnética, que as ambiguidades foram completamente solucionadas na estação base e 80% das ambiguidades foram solucionadas na estação *rover* para uma linha de base de até 1000 km.

No caso de aplicações de Geofísica Espacial, Ouzounov et al. (2011) usou técnicas de tomografia para avaliar a correlação entre a densidade eletrônica com a ocorrência de terremotos. Adicionalmente, Alfonsi et al. (2011) utilizou a tomografia e medidas de

cintilação ionosférica advindas de estações monitoras (ISM - *Ionospheric Scintillation Monitors*), para identificar a extensão das irregularidades. Além disso, Pokhotelov et al. (2011) indicou que a tomografia por GPS estimou corretamente o instante de passagem de uma língua de ionização sobre a região polar do campo magnético.

No ambiente brasileiro, poucos são os estudos da ionosfera conduzidos por meio de técnicas tomográficas. Uma análise pioneira foi realizada por Muella et al. (2011), onde as imagens tomográficas foram produzidas pelo software MIDAS (*Multi-Instrument Data Analysis System*). Porém, desde esta análise até os dias de hoje, a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), pertencente ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), foi densificada de aproximadamente 50 para cerca de 100 receptores em serviço, além de que os métodos baseados em células não foram aplicados no setor brasileiro. Com isto, mais investigações podem contribuir com novas perspectivas de pesquisa, inclusive porque o Brasil apresenta características peculiares, em termos de influência da ionosfera, pois é afetado pela presença da Anomalia da Ionização Equatorial (EIA - *Equatorial Ionospheric Anomaly*), pela proximidade com a Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS) e pela ocorrência de irregularidades ionosféricas.

1.1 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo principal investigar os métodos de tomografia da ionosfera utilizando dados GNSS, com o intuito de avaliar o uso das técnicas algébricas para o imageamento da ionosfera na região brasileira. Os objetivos secundários são:

- Desenvolver uma ferramenta de construção de grades tomográficas e de tratamento de dados GNSS, a fim de reconstruir os sinais que seccionam a ionosfera;
- Avaliar as técnicas algébricas no imageamento ionosférico a partir de simulações;
- Avaliar a aplicação das técnicas algébricas na estimativa do TEC, da frequência crítica e de perfis ionosféricos e;
- Realizar o imageamento ionosférico sobre o setor brasileiro a partir de mapas de VTEC e tomogramas.

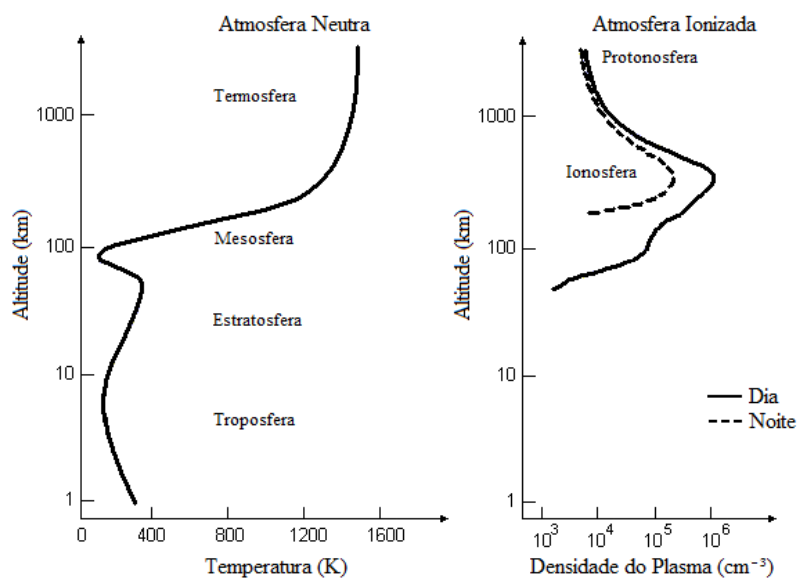
1.2 Conteúdo da Dissertação

O Capítulo 2 apresenta uma descrição teórica sobre a estrutura da ionosfera e as variações da densidade eletrônica nas regiões da ionosfera. No Capítulo 3 são apresentadas técnicas amplamente utilizadas na tomografia da ionosfera, onde são descritos os métodos de estimativa da densidade eletrônica a partir de observações GNSS. O Capítulo 4 apresenta a maneira como foi desenvolvido o aplicativo para realizar os experimentos e análises do trabalho. O Capítulo 5 mostra os resultados dos experimentos e análises das técnicas de tomografia, a partir de observações simuladas. O Capítulo 6 apresenta experimentos utilizando observações GNSS para os anos de 2013 e 2014. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões sobre os algoritmos tomográficos baseados em células aplicados ao setor brasileiro, bem como recomendações relacionadas ao assunto.

2 ESTRUTURA DA IONOSFERA

Devido à ampla influência da gravidade, a atmosfera pode ser verticalmente estratificada no estudo de sua estrutura. A atmosfera neutra pode ser organizada por um perfil representativo da temperatura. Já a ionosfera é mais bem organizada por um perfil de densidade do plasma, ou densidade eletrônica, sendo representada pelo número de elétrons livres por unidade volumétrica (KELLEY, 2009). A Figura 1 apresenta a estrutura da atmosfera neutra e ionizada organizada por meio de perfis, onde se nota a intrínseca relação do aumento da temperatura na termosfera referente à absorção da radiação solar por gases que compõe a ionosfera.

Figura 1 – Típico perfil da atmosfera neutra representada pela temperatura dos gases e a atmosfera ionizada representada pela densidade eletrônica.



Fonte: Adaptado de Kelley (2009).

As altitudes limites da ionosfera não são bem definidas na literatura. No entanto, os átomos da atmosfera estão sujeitos à ionização, principalmente, nas altitudes entre 60 km e 1000 km da superfície, por isso o termo “ionosfera” é utilizado para identificar esta região. Na realidade, a fronteira superior da ionosfera pode ser interpretada como uma zona de transição com a plasmasfera (ZOLESI; CANDER, 2014), onde a densidade atmosférica neutra é muito pequena e os íons positivos são predominantes, por isso a identificação protonosfera.

2.1 Antecedentes Históricos do Descobrimento da Ionosfera

A primeira especulação sobre a existência de uma camada elétrica na atmosfera da Terra foi feita por pesquisadores físicos, tendo como impulso a proposta de C. F. Gauss em 1839, pressupondo que as variações diárias no campo magnético da Terra teriam origem em eventos elétricos correntes na atmosfera. Em 1860, L. Kelvin argumentou sobre a existência de uma camada condutora na atmosfera relacionada com fenômenos de eletricidade.

A primeira dedução da camada foi feita por B. Stewart em 1882. Na 9th Edição da “Enciclopédia Britânica” mostrou que a fonte de perturbação magnética encontrava-se fora da Terra e sugeriu que o fenômeno poderia ser explicado devido a uma camada atmosférica condutora sendo arrastada pelo campo geomagnético, através da ação dos ventos. No entanto, a teoria não pode ser formalizada, basicamente, devido à ainda não descoberta do elétron. Schuster, em 1889, calculou matematicamente as correntes elétricas que deveriam fluir nela.

Em 1901, G. M. Marconi obteve sucesso ao transmitir sinais de rádio da Inglaterra para a América do Norte, estabelecendo a primeira comunicação transatlântica, o que lhe consagrou um prêmio Nobel em 1909. Este evento foi de difícil entendimento para a época, levando-se em conta a curvatura da Terra e visto que os sinais de rádio eram estudados como ondas eletromagnéticas propagando-se em linha reta. O. Heaviside, A. Kennely e K. Nagaoka, independentemente, explicaram este evento sugerindo a presença de uma camada condutora de eletricidade na alta atmosfera, fazendo com que esta camada conduzisse os sinais de rádio através da protuberância da curvatura da Terra, refletindo-os.

Em 1903 e 1906, J. E. Taylor e J. A. Fleming, dentre outros, sugeriram que a camada condutora era produzida pela ação ionizadora dos raios ultravioletas na atmosfera, o que implicava em diferentes formas de propagação do sinal para o dia e para a noite em função dos ventos solares. Em 1910, G. W. Pierce propôs que ondas refletidas pelas camadas ionizadas sofriam interferências, podendo cancelar ou amplificar a intensidade do sinal. Fato confirmado em 1912 por L. D. Forest, durante um experimento em Los Angeles, explicando que as amplitudes dos sinais de rádio haviam mudado após a reflexão da camada, além disto, este experimento resultou que a altura aproximada da camada refletora estaria em torno de 99 km da superfície.

O último experimento destinado a provar a existência desta camada, foi realizado em 1924 por E. V. Appleton e M. Barnett, utilizando um transmissor de sinais de rádio em dois percursos: um ao longo da superfície da Terra e outro visando ser refletido pela hipotética camada. Com um receptor, foi possível receber ambos os sinais e verificar a diferença entre o comprimento dos percursos, que, a partir de uma triangulação, possibilitou o cálculo aproximado da altura da camada refletora dos sinais, em torno de 100 km. Este método foi um dos precursores para a construção de ionossondas; tecnologia aprimorada por Breit e Tuve, que consiste em uma antena transmissora emitir uma série de pulsos de ondas de rádio que viajam até a região ionizada e refletem na direção do solo, sendo registradas por um receptor.

Foi o australiano Sir R. Watson-Watt quem propusera o nome “ionosfera”, em 1926, embora fosse começado a ser usado anos mais tarde. Então, Appleton reconhece a presença de mais de uma camada ionizada, identificando-as por nomenclatura alfabética. A camada “E” denota *Electric field* e a camada “F” segue a ordem alfabética por ser localizada em altitude elevada. Elétrons foram detectados estendendo-se abaixo da região E, contemplando a camada “D”. Em 1947, Appleton ganha o prêmio Nobel de física pelo seu trabalho sobre propriedades da ionosfera terrestre. Mais detalhes dos antecedentes históricos sobre o descobrimento da ionosfera são apresentados em McNamara (1991), Pellinen e Brekke (2011) e Cueva (2013).

2.2 Formação da Ionosfera

A formação da ionosfera terrestre ocorre principalmente quando os raios solares, na faixa espectral do Extremo Ultra Violeta (EUV), Ultra Violeta (UV) e raios-X, incidem sobre a atmosfera e desprendem os elétrons contidos na atmosfera neutra. À medida que os raios solares atingem os átomos, a energia (radiação solar) é absorvida por elétrons de átomo neutro, que ficam livres por meio do processo de fotoionização¹ (ZOLESI; CANDER, 2014). Além da fotoionização, os átomos neutros podem ser ionizados por impacto com partículas de alta energia, oriundas do espaço (raios cósmicos ou solares) ou de elétrons e íons locais que foram acelerados, processo identificado de ionização por impacto (ZHANG; LI, 2009).

¹ Fotoionização é o processo em que um átomo neutro absorve energia de um fóton para se tornar um íon positivamente carregado, deixando um elétron livre.

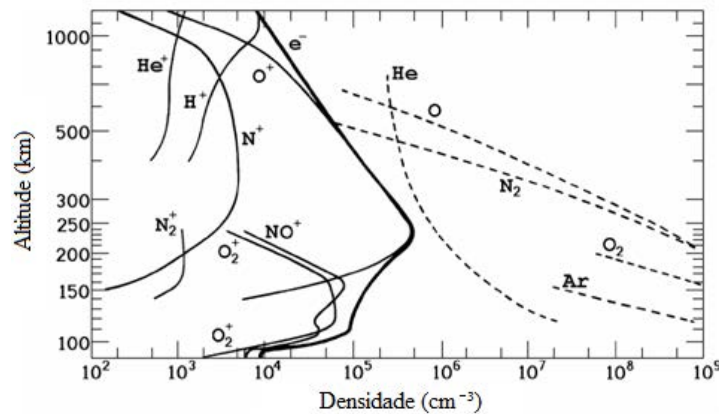
Ao passo que a radiação solar penetra na atmosfera mais densa, a produção de elétrons livres aumenta até um nível onde a densidade eletrônica é máxima. Em altitudes abaixo deste nível, apesar do aumento na densidade da atmosfera neutra, a produção de elétrons decresce, pois a maior parte da radiação ionizante foi absorvida. Assim, os raios energéticos deixam de incidir sobre os átomos e o processo inverso à ionização passa a ocorrer. O processo inverso, identificado por recombinação, produz átomos neutros a partir da combinação entre cargas positivas e elétrons. A fotoionização prevalece durante o dia e, quando o sol se põe, o processo de recombinação passa a predominar (ZOLESI; CANDER, 2014).

Após o pôr do sol, a ionosfera eleva-se a altitudes maiores. Com o aumento da altitude, a densidade da atmosfera neutra diminui e, portanto, há uma menor quantidade de átomos neutros que seriam utilizados na recombinação. Consequentemente, a recombinação é menos efetiva nas altas altitudes. Devido a este e os demais desequilíbrios nos processos de fotoionização, colisão, recombinação e junção eletrônica, as variações da ionosfera são formadas.

2.3 Variações Altimétricas da Ionosfera

Apesar de um pico de um perfil ionosférico ocorrer em torno de 250 a 450 km, há uma considerável subestrutura de composição iônica, formada principalmente por átomos de Oxigênio, Hidrogênio e Nitrogênio. Para cada altitude, há uma diferente composição de gases ionizados, ponderando a ionosfera com diferentes taxas de absorção da radiação solar, bem como tornando os processos de ionização e recombinação bem característicos para cada região altimétrica da ionosfera. A Figura 2 apresenta um exemplo de perfis da subestrutura ionizada em função dos principais constituintes, e o perfil da densidade eletrônica é equivalente ao somatório de todos os constituintes ionizados.

Figura 2 - Perfis diurnos dos principais constituintes da atmosfera neutra (linha tracejada) e atmosfera ionizada (linha sólida).



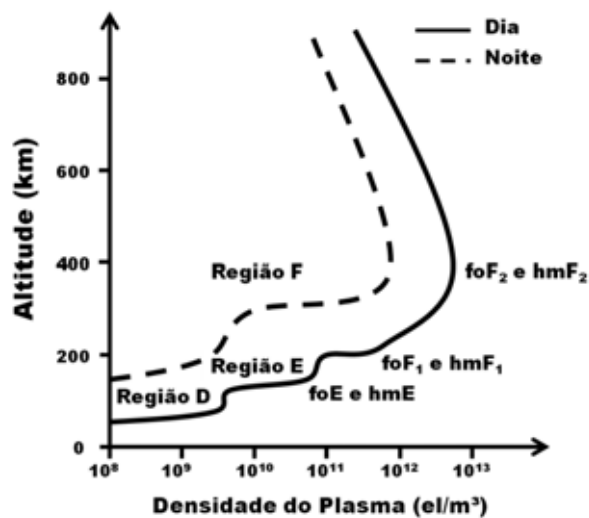
Fonte: Adaptado de Kivelson e Russel (1995).

Considera-se que a ionosfera é dividida em três principais regiões altimétricas, denominadas por D, E e F. A região D localiza-se abaixo de 90 km, possuindo a menor densidade de plasma de todas as regiões ionosféricas e desaparecendo à noite. A região E localiza-se entre 90 km e 140 km de altura, sendo importante pela sua interação com o campo magnético e pela presença de correntes elétricas que nela fluem. A região F localiza-se acima de 140 km, onde se concentram as camadas refletoras com maior densidade do plasma (ZOLESI; CANDER, 2014). A região F é subdividida, ainda, nas camadas F₁ e F₂, sendo a camada F₁ caracterizada por uma inflexão na curva da densidade eletrônica em torno de 180 km e a camada F₂ onde ocorre o pico na densidade eletrônica para um perfil ionosférico. Além disto, estudos evidenciam uma terceira subcamada na região F, a camada F₃, cuja formação e dinâmica são investigadas na região equatorial (BATISTA et al., 2002). Destaca-se que os limites das camadas são valores aproximados, visto a diversidade de fenômenos que alteram a densidade eletrônica no espaço e no tempo.

As regiões E e F podem ser caracterizadas por frequências críticas (foE, foF₁, foF₂), alturas do pico (hmE, hmF₁, hmF₂) e meia espessura² (ymE, ymF₁, ymF₂). Frequência crítica é a frequência máxima refletida pela camada, sendo que frequências maiores atravessam a camada e se propagam para altitudes superiores, sendo que a cada frequência crítica, associa-se um pico de densidade do plasma (NmE, NmF₁, NmF₂). A Figura 3 apresenta a subdivisão do perfil ionosférico em alturas de pico e frequências críticas.

²A meia espessura da camada é obtida ajustando-se uma parábola ao perfil de densidade eletrônica variando com altura, em que a parábola é centrada na densidade máxima.

Figura 3 - Perfis simbólicos das camadas da ionosfera: frequências críticas e alturas de picos.

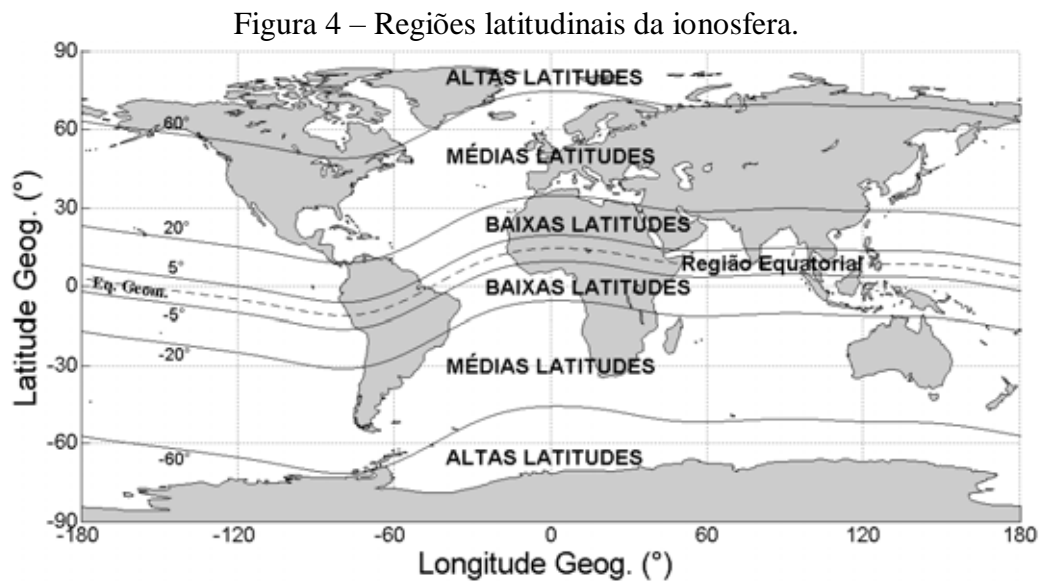


Fonte: Adaptado de Schunk e Nagy (2000).

Além da subestrutura dos perfis ionosféricos, variações altimétricas ocorrem na ionosfera devido a complexas interações entre as regiões E e F. Na região equatorial e durante o dia, o campo elétrico do dínamo da região E (gerado pelos ventos associados com as ondas de maré e de gravidade) é mapeado para a região F através da alta condutividade das linhas de campo magnético. Nestes instantes, o campo elétrico zonal é dirigido no sentido Leste, que associado ao campo geomagnético (dirigido para Norte), causa uma subida no plasma da região F, ou seja, uma deriva vertical para cima. Durante a noite, o campo elétrico zonal é dirigido para Oeste, provocando um movimento do plasma para baixo. Contudo, antes da inversão do sentido do campo elétrico, a componente Leste-Oeste provoca uma fraca deriva vertical para baixo durante o amanhecer e uma intensa deriva vertical para cima no pôr do sol. O máximo na velocidade de deriva vertical para cima da ionosfera é denominado pico pré-reversão, sendo consequência do aparecimento de campos elétricos de polarização na região F. Mais detalhes do mecanismo da deriva vertical são apresentados por Rishbeth (1971). Ademais, a intensificação da deriva vertical para cima forma um conjunto de pré-condições favoráveis ao desenvolvimento da instabilidade no plasma. No momento em que a camada F está suficientemente alta, pode haver um crescimento das flutuações na densidade eletrônica, formando irregularidades na ionosfera (ABDU, 2005).

2.4 Variações Latitudinais da Ionosfera

A ionosfera não é homogênea para diferentes latitudes. Há quatro maiores regiões latitudinais, as quais são conhecidas como regiões de altas latitudes, médias latitudes, baixas latitudes e região equatorial. A Figura 4 foi construída com o intuito de representar as regiões latitudinais da ionosfera, sendo baseada em Fonseca Junior (2002) e Seeber (2003); porém, a região equatorial foi adicionada na representação.



A ionosfera sobre os polos Norte e Sul, alternativamente denominadas de ionosfera polar ou de altas latitudes, é extremamente instável. Apesar de o Sol não incidir diretamente sobre as regiões de altas latitudes, as linhas de força do campo geomagnético são quase verticais, intensificando o processo de ionização por impacto. Em contra partida, as regiões de latitudes médias são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas. Já as regiões de baixas latitudes e equatorial são caracterizadas por um alto nível de densidade eletrônica, pois o Sol forma os menores ângulos zenitais nestas regiões.

Adicionalmente, na ionosfera equatorial ocorre o efeito fonte, originando a Anomalia da Ionização Equatorial (EIA), ou anomalia de Appleton, com dois picos latitudinais da densidade eletrônica: em torno de $\pm 15^\circ$ em relação ao equador geomagnético. O efeito fonte ocorre, pois a combinação do campo elétrico (dirigido para Leste durante o dia) e magnético (dirigido para Norte) faz com que a resultante das forças eleve os elétrons até alturas superiores. Em uma dada altitude o plasma encontra linhas geomagnéticas e, devido à

ação da gravidade e ao gradiente de pressão, difundem por essas linhas fazendo um movimento de descida para as regiões de baixas latitudes. Vale ressaltar que uma intensificação da EIA ocorre durante o pôr do Sol devido à intensificação da deriva vertical para cima, ocasionada na transição do sentido da direção do campo elétrico (Leste-Oeste) no terminator do lado do anoitecer.

2.5 Variações Temporais da Ionosfera

As variações temporais da ionosfera compreendem as variações diurnas, sazonais e de ciclos de longos períodos, ocasionando em variações da densidade eletrônica para as diferentes longitudes. A principal razão da variação diurna é a rotação da Terra em torno de seu eixo, fazendo com que o fluxo solar diminua à noite devido à recombinação e junção dos elétrons e íons. Ao longo de um dia, a densidade eletrônica atinge a máximos valores por volta de 14 horas locais e a mínimos valores às 05 horas locais.

Além das variações diárias, as estações do ano influenciam na variação da densidade eletrônica devido à mudança do ângulo zenital do Sol e da consequente mudança na intensidade do fluxo de ionização, caracterizando as variações sazonais. Devido à variação da posição do Sol, os meses de equinócio são caracterizados com maior ionização em relação aos meses de solstício.

Há, também, as variações de ciclos de longos períodos. Os ciclos são associados à atividade solar, com duração de aproximadamente 11 anos, possuindo anos de baixa e alta atividade solar. A intensidade dos ciclos é proporcional à quantidade de ocorrências de manchas solares ao longo dos anos e do fluxo de potência no comprimento de onda de 10,7 cm (MCNAMARA, 1991; ZOLESI; CANDER, 2014). Atualmente, o Sol está no ciclo denominado “ciclo 24” e o período de máxima atividade solar compreendeu nos anos entre 2012 e 2014, o que ocasionou um aumento no número de manchas solares, e, portanto, da produção de elétrons livres na ionosfera. As Figuras 5 e 6 ilustram as variações diurnas e sazonais, onde se percebe um aumento nos valores Verticais de TEC (VTEC) na comparação entre os períodos de baixa atividade e alta atividade do ciclo solar 24. Os valores de VTEC foram obtidos por meio dos mapas globais da ionosfera disponibilizados pelo IGS (*International GNSS Service*) em formato IONEX (*IONosphere map EXchange*).

Figura 5 – Variação diária e sazonal do VTEC para o ano de 2009 (ano de baixa atividade do ciclo solar 24). As médias mensais são agrupadas por estação do ano: Verão (vermelho), Primavera (amarelo), Outono (verde), Inverno (azul). Os meses de equinócio são identificados com quadrados, e os solstícios com triângulos. Localização Geográfica: 10,17° S e 48,33° W.

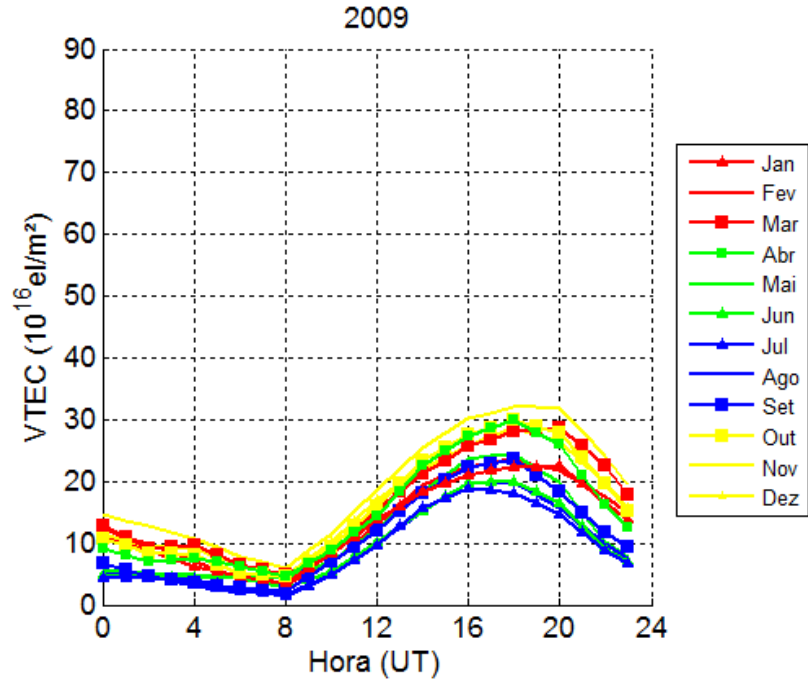
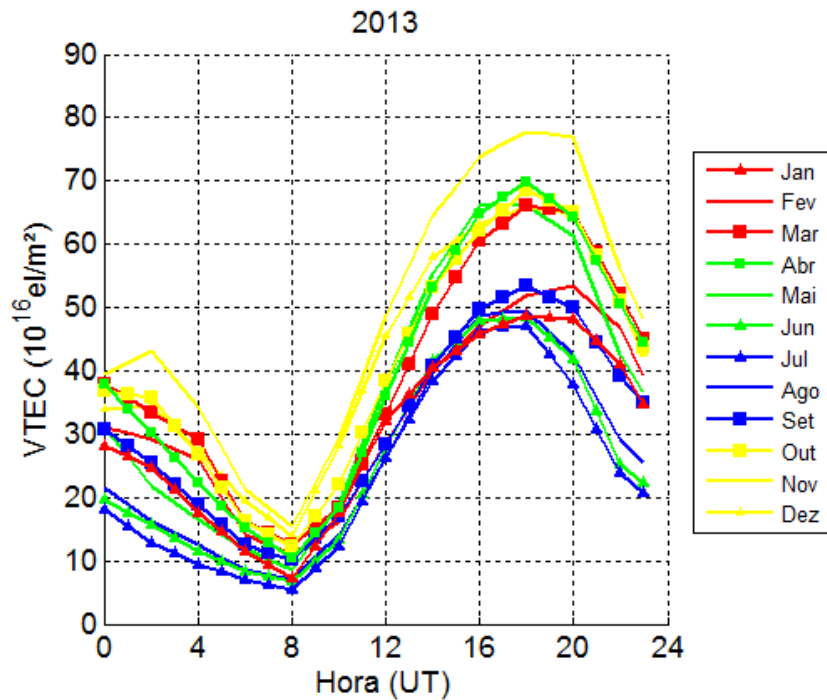


Figura 6 – Variação diária e sazonal do VTEC para o ano de 2013 (ano de alta atividade do ciclo solar 24). As médias mensais são agrupadas por estação do ano: Verão (vermelho), Primavera (amarelo), Outono (verde), Inverno (azul). Os meses de equinócio são identificados com quadrados, e os solstícios com triângulos. Localização Geográfica: 10,17° S e 48,33° W.



3 TOMOGRAFIA DA IONOSFERA A PARTIR DO GNSS

3.1 Informação da Ionosfera a partir do GNSS

Parâmetros que descrevem a ionosfera podem ser obtidos a partir de observações de código e/ou fase do GNSS. A distância obtida a partir do código (P) pode ser descrita como o tempo necessário para alinhar a réplica do código gerado no receptor com o código recebido do satélite, multiplicado pela velocidade da luz no vácuo. O tempo necessário neste alinhamento é a diferença entre o tempo de recepção do sinal (medido no sistema de tempo do receptor) e o tempo do satélite (sistema de tempo do satélite). O não sincronismo nos sistemas de tempos introduz um erro sistemático (erro dos relógios) na medida de distância, podendo, desta forma, identificá-la por pseudodistância (MONICO, 2008; SEEGER, 2003).

Durante o rastreamento da fase da portadora, o contador de ciclos (oscilador) é incrementado por um ciclo sempre que a fase do sinal varia 2π . Assim, em um determinado instante, a fase (φ) observada é igual à soma de fase ao número inteiro de ciclos contados desde o início do rastreamento. O número de ciclos inteiros entre o satélite e a antena receptora no início do rastreamento é desconhecido e é denominado de ambiguidade. Isso faz com que a medida de batimento de fase da onda portadora seja ambígua. Nas Equações (1) e (2), são apresentados os principais efeitos sistemáticos (em metros) sobre as pseudodistâncias de código e de fase da onda portadora (MONICO, 2008; SEEGER, 2003):

$$P_{L_i} = \rho + c(\tau_r - \tau_s) + T + I_{L_i} + dm_{L_i} + \varepsilon, \quad (1)$$

$$\phi_{L_i} = \rho + c(\tau_r - \tau_s) + T - I_{L_i} + dm_{L_i} + \lambda_{L_i} N_{L_i} + \varepsilon. \quad (2)$$

Nas expressões (1) e (2), os termos dependentes da frequência são identificados com o subscrito (L_i), referente ao número da portadora do sinal GNSS, ρ é a distância geométrica entre o satélite, no instante de transmissão do sinal, e o receptor, no instante de recepção do sinal, c é a velocidade da luz no vácuo, λ é o comprimento de onda, τ_r e τ_s são os erros dos relógios do receptor e do satélite, em relação ao tempo GNSS, T é o atraso causado pela troposfera, I é o atraso causado pela ionosfera, dm é erro devido ao

multicaminho, N é a ambiguidade da fase da portadora no instante inicial de rastreamento e ε representa os ruídos das observações.

O atraso ionosférico é positivo para o código, sendo relacionado com o atraso de grupo e, no caso da fase da onda portadora, o sinal negativo representa um avanço de fase. Assim, a refração ionosférica proporciona um efeito de mesma magnitude nas medidas de código e fase, porém, de sentidos opostos. A relação entre a densidade eletrônica e o atraso que a ionosfera causa no sinal GNSS é proporcional ao TEC e inversamente proporcional ao quadrado da frequência (f) do sinal GNSS (SEEBER, 2003):

$$I_{L_i} = \frac{40,3}{f_{L_i}^2} TEC, \quad (3)$$

sendo o TEC expresso pela integral da densidade eletrônica (ne) ao longo do trajeto entre o satélite (s) e a antena receptora (r), numa coluna cuja área da seção transversal equivale a 1m^2 (LEICK, 1995; SEEBER, 2003):

$$TEC = \int_r^s ne ds. \quad (4)$$

Devido às aproximações no índice de refração para a obtenção da Equação (3), descritas por Hartree-Appleton, o atraso ionosférico, utilizado em grande parte dos modelos ionosféricos, representa somente os efeitos de 1ª ordem da ionosfera. Os efeitos das demais ordens são comumente negligenciados, pois a dimensão dos erros de 2ª ordem é centimétrica e de 3ª ordem, milimétrica, como pode ser verificado nos experimentos realizados por Marques et al. (2011).

Uma vez que o atraso ionosférico é inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal GNSS, este não é eliminado na combinação linear livre da geometria e, portanto, tal combinação pode ser empregada para estimá-lo. Tomando o GPS como exemplo, os satélites transmitem os sinais em duas portadoras da banda L, gerados a partir da frequência fundamental de 10,23 MHz. Desta forma, a equação de observação da combinação linear livre da geometria para as portadoras L_1 (1,5754 GHz) e L_2 (1,2276 GHz) do código transmitido pelo GPS é dada por:

$$(P_{L_2} - P_{L_1}) = (I_{L_2} - I_{L_1}) + c(\Delta b^s + \Delta b_r) + \Delta \varepsilon. \quad (5)$$

Nesta combinação, termos adicionais de tendência diferencial do código (DCB – *Differential Code Bias*) são inseridos para o satélite (Δb^s) e para o receptor (Δb_r), pois são, também, dependentes da frequência do sinal. Neste caso, os DCBs representam a diferença do tempo de propagação do sinal GNSS no conjunto de antenas/cabos/receptores, acrescidos de uma imperfeição na modulação e demodulação do código entre as portadoras.

A partir da Equação (5) e relacionando o atraso ionosférico de código com o TEC, Equação (3), pode-se obter uma relação entre as observáveis GPS e o TEC:

$$F(P_{L_2} - P_{L_1}) = TEC + F[c\Delta b_r + c\Delta b^s + \Delta \varepsilon], \quad (6)$$

com:

$$F = \frac{f_{L_1}^2 f_{L_2}^2}{40,3(f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2)}. \quad (7)$$

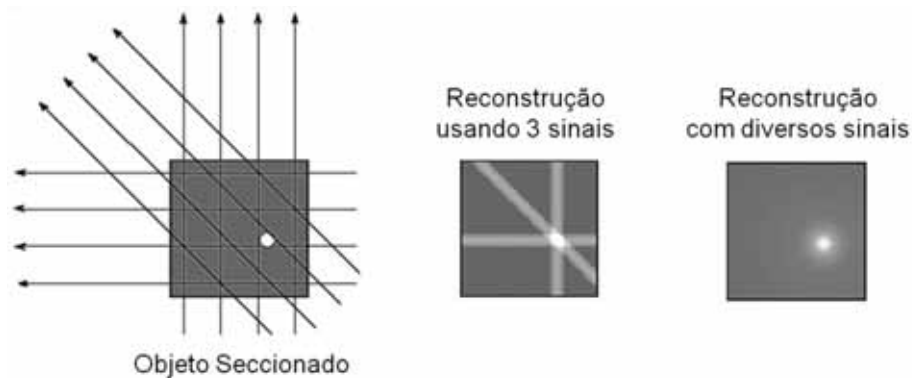
A Equação (6) é a principal equação para a estimativa do TEC a partir das observáveis de código do GNSS, sendo que além do uso direto destas observáveis, pode-se aplicar filtros para minimização do ruído (PROL; CAMARGO, 2014). Além do código, as observáveis de fase podem ser utilizadas por meio de métodos que estimem as ambiguidades, assim como a técnica de nivelamento das ambiguidades (MANNUCCI et al., 1998; SHARMA et al., 2011). Ademais, considerando que o código pode ser demodulado por meio de diferentes técnicas, deve-se aplicar uma correção para que as medidas entre as portadoras não possuam tendências adicionais. Por exemplo, o IGS (*International GNSS Service*) recomenda aplicar a correção C1-P1 para que as medidas do código civil (C/A - *Coarse/Acquisition*) tenham consistência com o código preciso (P), a partir do algoritmo “cc2noncc” (NACHO, 2008).

Os DCBs podem ser estimados em conjunto com o processo de estimação do TEC, porém é necessário inserir injunções no sistema de equações. Camargo (2009), por exemplo, impõe injunções com respeito ao conhecimento do DCB de um receptor da rede ou de um satélite. Usualmente, o IGS impõe a condição de que a média do DCB de todos os satélites é igual à zero, técnica esta identificada por *zero-mean*. Além desses, os DCBs podem ser estimados a partir da aplicação da combinação linear livre da geometria da Equação (6), tendo o TEC conhecido a partir de mapas da ionosfera (PROL; CAMARGO, 2014).

3.2 Tomografia Computadorizada da Ionosfera

A Tomografia Computadorizada (CT) é um exemplo clássico de Processamento Digital de Sinais (DSP - *Digital Signal Process*). A CT é baseada em sinais que atravessam um objeto por diversas direções. Ao invés de simplesmente formar uma imagem, os sinais são convertidos em dados digitais e armazenados em um computador. Cada trajetória do sinal é projetada em um conjunto de linhas que atravessam o objeto. As projeções são então utilizadas para calcular imagens tomográficas (cortes virtuais) por meio da solução de um problema inverso. A Figura 7 ilustra um exemplo de aquisição de um conjunto de projeções para reconstruir a correspondente imagem, onde a imagem final depende do número utilizado de projeções que seccionaram o objeto (SMITH, 1999).

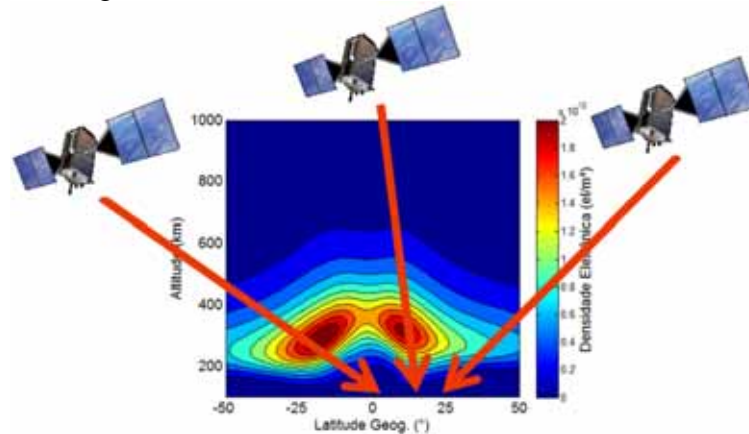
Figura 7 – Conjunto de projeções adquiridas para a reconstrução de imagens com a CT.



Fonte: Adaptado de Smith (1999).

A tomografia da ionosfera com uso de observações de TEC foi primeiramente investigada por pesquisadores da Universidade de Illinois (Estados Unidos), cujos resultados de simulações foram apresentados por Austen et al. (1988), identificando a técnica como Tomografia Computadorizada da Ionosfera (CIT - *Computerized Ionospheric Tomography*). Na CIT, a densidade eletrônica na ionosfera é o parâmetro a ser reconstruído e o TEC corresponde à integral da função das projeções que seccionam a ionosfera. A CIT possui a vantagem de que os sinais GNSS podem ser aproximados em integrais de linhas que se propagam em linha reta. Por outro lado, a reconstrução é comprometida devido à geometria utilizada das projeções disponíveis com o GNSS (BUST; MITCHELL, 2008). A Figura 8 ilustra a geometria disponível pelo GNSS e utilizada na CIT.

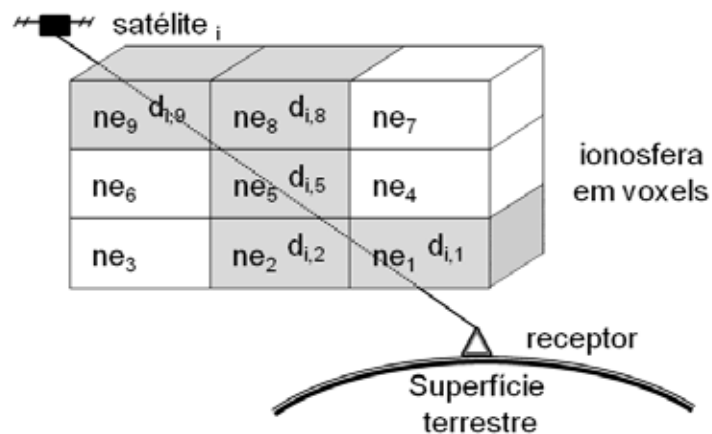
Figura 8 – Geometria do GNSS utilizada na CIT.



Em comparação com a Figura 7, um número reduzido de diferentes inclinações das projeções pode ser notado, devido, sobretudo, à ausência de sinais no sentido horizontal. Enfatiza-se que as técnicas de Rádio-Ocultação podem ser utilizadas para aumentar o número de sinais inclinados, como pode ser visto em Jakowski et al. (2004). Porém, o presente trabalho apresenta uma atenção particular na CIT utilizando a geometria utilizada com receptores localizados sobre a superfície terrestre.

Com o propósito de derivar a densidade eletrônica a partir do TEC, a CIT representa a ionosfera em um conjunto de *pixels* ou *voxels*. Considerando ne_j a densidade eletrônica para o *voxel* (j), e d_{ij} o comprimento percorrido pelo sinal GNSS (i) nos limites que interceptam o *voxel* (j), tem-se o exemplo da Figura 9 de grade da ionosfera representada em células de três dimensões. Quando o *voxel* é seccionado por um sinal, este é identificado iluminado (*voxel* cinza), mas, em geral, alguns *voxels* não são iluminados.

Figura 9 – Grade ionosférica estratificada em células de três dimensões (*voxels*).



No exemplo, o TEC pode ser escrito numa soma finita de *voxels*:

$$TEC_i = d_{i1}ne_1 + d_{i2}ne_2 + d_{i5}ne_5 + d_{i8}ne_8 + d_{i9}ne_9, \quad (8)$$

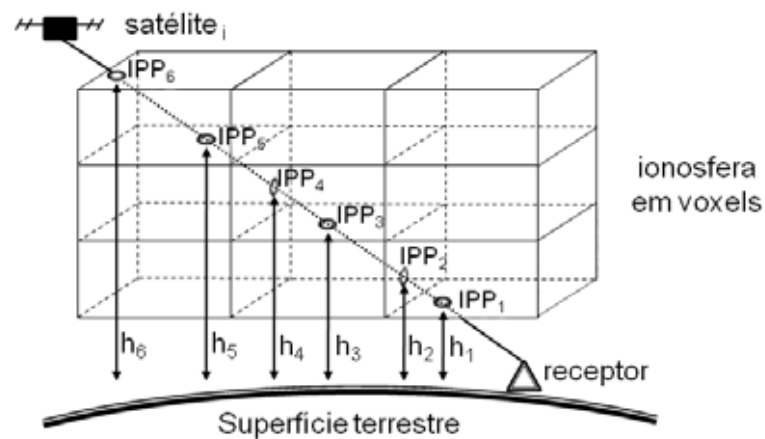
ou

$$TEC_i = \sum_{j=1}^J d_{ij}ne_j, \quad (9)$$

onde: j varia de 1 a J (número de *voxels* da grade) e $d_{ij} = 0$ se o sinal não interceptar o *voxel* correspondente.

O comprimento do sinal em cada *voxel* (d_{ij}) pode ser calculado pela projeção de um IPP (*Ionospheric Pierce Point*) em cada ponto que o sinal secciona a grade de células (SHUKLA et al., 2010). A Figura 10 ilustra a projeção de diversos IPPs em um modelo que considera a ionosfera representada por *voxels*.

Figura 10 – Projeção de IPPs em modelos que representam a ionosfera em *voxels*.



Uma vez que a posição do receptor (φ_r, λ_r), o azimuth (az) e o ângulo de elevação (el) do satélite são conhecidos, a coordenada geográfica do IPP ($\varphi_g^{ip}, \lambda_g^{ip}$) depende da altura do IPP (h^{ip}), como pode ser visto na seguinte formulação (SKONE, 2002):

$$\varphi_g^{ip} = \varphi_r + \psi \cos(az), \quad (10)$$

e

$$\lambda_g^{ip} = \lambda_r + \frac{\psi \sin(az)}{\cos(\varphi_g^{ip})}, \quad (11)$$

com:

$$\psi = \cos^{-1} \left[\left(\frac{R_m}{R_m + h^{ip}} \right) \cos(el) \right] - el, \quad (12)$$

onde a altura dos IPPs podem ser estimadas uma vez que estas coincidem com os conhecidos limites dos *voxels*. Assim, a distância geométrica entre sucessivos IPPs pode ser utilizada como uma distância aproximada de d_{ij} .

Portanto, um modelo funcional que relaciona o TEC com a densidade eletrônica pode ser criado para representar o problema inverso como um sistema linear (WEN et al., 2012):

$$L = \mathbf{A}X + V, \quad (13)$$

onde (L) corresponde ao vetor das observações de TEC, X é o vetor das densidades eletrônicas a serem estimadas em cada *voxel*, \mathbf{A} é a matriz jacobiana composta dos elementos d_{ij} e V é o vetor dos resíduos, ou seja:

$$\begin{bmatrix} TEC_1 \\ TEC_2 \\ \vdots \\ TEC_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ne_1 \\ ne_2 \\ \vdots \\ ne_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_i \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Nota-se que X pode ser estimado em algum processo de ajustamento das observações de TEC, mas o número reduzido de sinais em diferentes inclinações torna o sistema mau condicionado. Em geral, este problema pode, também, envolver mais parâmetros que observações, pois existem alguns *voxels* não iluminados e *voxels* iluminados por um sinal, ou por poucos mais. Por outro lado, o modelo permite impor informações sobre a densidade eletrônica diretamente no ajustamento. Por exemplo, Wen et al. (2012) impõe injunções de suavização para tirar proveito de que a densidade eletrônica varia suavemente em *voxels* vizinhos. No entanto, o número de parâmetros é diretamente proporcional ao número de *voxels* e, considerando as dimensões da ionosfera, bem como as variações temporais, este é um método com intenso esforço computacional, tipicamente envolvendo uma inúmera quantidade de parâmetros.

Para superar estas dificuldades, diversas técnicas foram desenvolvidas. Por conveniência prática, esta quantidade de diferentes técnicas pode ser organizada em duas distintas categorias: as técnicas baseadas em células e em funções. Desta forma, algumas das principais características da CIT podem ser delineadas.

3.3 Tomografia da Ionosfera Baseada em Células

Nas técnicas baseadas em células, o mau condicionamento devido à geometria utilizada pelo GNSS é superado por meio do uso de uma condição inicial, conhecido como *background* da ionosfera. Basicamente, o método utiliza técnicas algébricas para distribuir a diferença entre o TEC calculado a partir do *background* e o TEC obtido com o GNSS diretamente sobre a grade de células. Portanto, a CIT baseada em células é desenvolvida em duas etapas: a seleção da condição inicial seguida pela aplicação de uma técnica algébrica.

3.3.1 *Background* da Ionosfera

O *background* é geralmente construído por meio de modelos empíricos, ou semi-empíricos, da ionosfera (como o IRI – *International Reference Ionosphere*) para preencher cada célula da grade da CIT. Este processo possui muitos parâmetros, especialmente quando considerando que diversos *backgrounds* são construídos para um período diário, ou ainda, para cada instante em que as medidas do GNSS foram observadas. Desta forma, alguns métodos podem ser aplicados para reduzir a quantidade de parâmetros e, conseqüentemente, os esforços computacionais.

Uma maneira de reduzir o número de parâmetros é definindo um *background* distinto para alguns intervalos de tempo e inserindo uma relação temporal entre os *backgrounds*. Por exemplo, considerando 24 *backgrounds* construídos para representar um período diário, a densidade eletrônica em um determinado instante pode ser calculada por meio de uma interpolação linear, ao longo do intervalo dos correspondentes *backgrounds*. Ao invés de inserir uma imposição linear, outras imposições podem ser desenvolvidas para considerar a variação temporal da ionosfera. Bust e Mitchell (2008) apresentam um sistema de equações para inserir diferentes relações temporais durante a construção do *background*, onde a variação temporal é calculada utilizando apenas as células em que os sinais GNSS seccionaram a grade da CIT.

Neste sentido, a construção do *background* é geralmente baseada em modelos empíricos, representando a ionosfera por alguma suposição. No entanto, a CIT baseada em células é altamente dependente do *background*. Isto ocorre principalmente, pois esta técnica não detecta mudanças nos *voxels* que não foram seccionados com as projeções dos sinais GNSS. Portanto, o *background* da ionosfera deve ser definido com uma atenção especial. Um exemplo de alta atenção é apresentado no método desenvolvido por Mitchell et al. (1997), onde a informação vertical da ionosfera é representada por diversos modelos (p. ex., aplicando as funções de Chapman variando a altitude de pico), de forma a criar vários *backgrounds* para um determinado instante. A técnica algébrica é então processada em todos estes conjuntos de *backgrounds* e um critério de seleção é empregado para definir a imagem que melhor se ajusta às medidas.

É necessário aplicar uma técnica algébrica, pois algumas estruturas da ionosfera podem não ser representadas apenas pelo *background*. Mesmo quando o *background* é construído por meio da incorporação de dados de ionossonda, tal informação será restrita para apenas algumas posições geográficas. Nestas condições, o algoritmo algébrico é empregado para produzir imagens com mais detalhes, onde as medidas de TEC são utilizadas diretamente sobre a grade da CIT.

Vale mencionar que as tendências interfrequências do GNSS (relacionadas ao DCB) podem ser estimadas antes da construção do *background*, em conjunto com a modelagem do *background* (impondo injunções sobre os receptores ou satélites) ou ainda durante o processo de iteração da técnica algébrica. Hobiger et al. (2008) menciona que para estimar o DCB durante as iterações, este é tratado como células “virtuais” e cada comprimento das projeções dos sinais GNSS são impostos igual à um. Em seguida, no exemplo da condição imposta pelo IGS (*zero-mean*), a média de todas as observações artificiais na grade virtual é considerada igual à zero.

Deve-se considerar ainda que as observações de TEC medidas a partir do GNSS são relacionadas ao conteúdo de elétrons por todo o percurso do sinal GNSS, desde o satélite até o receptor. Por outro lado, o *background* da ionosfera é relacionado à algumas porções de altitude da atmosfera. Assim, o TEC precisa ser corrigido por algum valor que corresponde à densidade eletrônica para os locais acima ou abaixo do limite da grade da CIT. Os limites da ionosfera não são muito bem definidos, no entanto, a atmosfera é sujeita a ionização principalmente nas alturas entre 60 km e 1000 km acima da superfície terrestre. Em geral, funções verticais são utilizadas para estimar esta concentração de elétrons para os locais

fora destes limites de altitude. Com efeito, Materassi and Mitchell (2005) aplicou uma função de Chapman para corrigir o TEC em altitudes acima de 1000 km.

3.3.2 Técnicas Algébricas

A técnica algébrica de reconstrução (ART - *Algebraic Reconstruction Technique*), primeira técnica utilizada na CT, foi proposta independentemente por Gordon et al. (1970) e Hounsfield (1972), como um algoritmo de processamento de imagens derivado do método algébrico de Kaczmarz (1937). O algoritmo assume condições iniciais do objeto a ser reconstruído, onde um conjunto de linhas, com valores de suas integrais medidas, é projetado sobre uma imagem inicial. As integrais medidas destas projeções são comparadas com as projeções iniciais (projeções que contém valores da imagem inicial) e as diferenças são distribuídas pela grade da imagem, com um conhecido valor de ponderação. Este processo é repetido por um número específico de iterações, que corrigem sucessivamente a imagem existente.

Para representar a ionosfera com a ART, a imagem inicial pode ser construída a partir da densidade eletrônica obtida com modelos empíricos (*background* da ionosfera). Em cada sinal GNSS, calcula-se a projeção do sinal com o TEC medido e uma projeção com o TEC advindo da imagem inicial. Em seguida, a densidade eletrônica em cada célula (j) de cada sinal (i) é calculada com a seguinte expressão (PRYSE et al., 1998):

$$ne_j^{K+1} = ne_j^K + w \frac{(TEC_i - \sum_{j=1}^J d_{ij} ne_j^K)}{\sum_{j=1}^J d_{ij}^2} d_{ij}, \quad (15)$$

sendo que ne_j^{K+1} corresponde aos valores das densidades eletrônicas obtidas a partir da iteração ($K + 1$), ne_j^K é a densidade eletrônica incógnita em uma célula (j) da iteração (K), TEC_i representa a medida do TEC do sinal GNSS (i), o termo $(\sum_{j=1}^J d_{ij} ne_j^K)$ é correspondente a uma varredura que percorre as células da grade ionosférica e calcula o valor de TEC da correspondente projeção a partir da imagem com valores iniciais, w é um parâmetro de ponderação; Das e Shukla (2011), por exemplo, utilizaram $w = 0,02$ em seus experimentos.

No imageamento da ionosfera, destacam-se diferentes variações da ART: a SART (*Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique*) e a MART (*Multiplicative*

Algebraic Reconstruction Technique). Enquanto o algoritmo original (ART) corrige a imagem a partir de uma análise em cada projeção, a SART faz a correção da imagem após todas as diferenças entre as projeções (iniciais e medidas), dos sinais que interceptam a respectiva célula, serem calculadas (ANDERSON; KAK, 1984). Já a versão multiplicativa MART difere da ART na forma com que as diferenças, entre a projeção inicial e a medida, são distribuídas na imagem. A técnica consiste na aplicação da seguinte iteração não linear (PRYSE et al., 1998):

$$ne_j^{K+1} = ne_j^K \left(\frac{TEC_i}{\sum_{j=1}^J d_{ij} ne_j^K} \right)^{w d_{ij}/d_{max}}, \quad (16)$$

em que d_{max} é o maior comprimento d_{ij} da respectiva projeção.

Nota-se que mesmo quando $\sum_{j=1}^J d_{ij} ne_j^K > TEC_i$, os valores calculados não serão negativos; assim, uma vantagem ao se utilizar a MART em vez da ART, ou SART, é a garantia de valores não negativos na imagem reconstruída.

Diversos algoritmos algébricos são constantemente desenvolvidos para aprimorar as técnicas algébricas, contudo, a maioria é baseada nos princípios da ART, SART ou MART (HOBIGER et al., 2008; WEN; LIU, 2010; WEN et al., 2012). As iterações podem ser realizadas até o instante em que o erro da iteração é inferior a um determinado limiar, sendo o erro da iteração (ε^K) calculado por:

$$\varepsilon^K = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_s} (TEC_i - \sum_{j=1}^J d_{ij} ne_j^K)^2}{\sum_{i=1}^{n_s} TEC_i^2} \right]^{1/2}. \quad (17)$$

No que se refere à primeira iteração, é necessário informações iniciais da densidade eletrônica para cada célula, que podem ser obtidas a partir do *background* da ionosfera.

3.4 Tomografia da Ionosfera Baseada em Funções

No imageamento da ionosfera baseado em funções, a densidade eletrônica é representada por parâmetros que definem uma superfície horizontal, vertical ou

tridimensional. Quando as funções horizontais são utilizadas, tem-se a convencional representação da ionosfera em mapas verticais de TEC. No caso das funções verticais, modelos empíricos definem um perfil da ionosfera para uma dada posição. Combinando as características de ambas as funções horizontais e verticais, as medidas de TEC são diretamente utilizadas para reconstruir uma superfície tridimensional da ionosfera. A dimensão temporal é usualmente descrita por polinômios lineares ou ainda por específicas injunções, como Van de Kamp (2013) que impôs condições a partir do cálculo do TEC diferencial.

3.4.1 Funções Horizontais

Nas funções horizontais, faz-se a simplificação de que o TEC presente nos sinais GNSS pode ser estimado na direção vertical (VTEC) de um ponto projetado na ionosfera (IPP). Ponto este formado pela intersecção do vetor receptor/satélite com uma fina camada da ionosfera que se localiza, em geral, entre 300 km e 450 km acima da superfície terrestre. A projeção do TEC na vertical do IPP requer uma função de mapeamento. Na função de mapeamento geométrica padrão, obtém-se o VTEC por (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001):

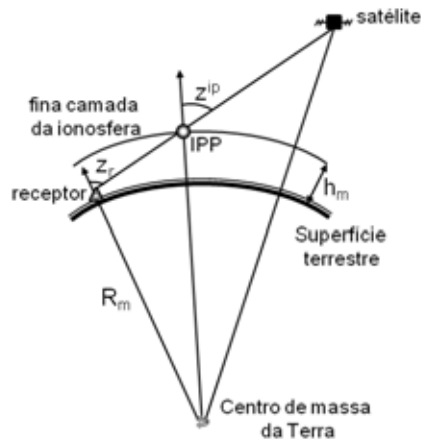
$$VTEC = \cos(z^{ip}) TEC, \quad (18)$$

sendo:

$$\text{sen}(z^{ip}) = \frac{R_m}{R_m + h_m} \text{sen}(z_r), \quad (19)$$

em que z_r é o ângulo zenital do trajeto entre o receptor e o satélite, z^{ip} é o ângulo zenital entre o IPP e o satélite e R_m é o raio médio da Terra. A Figura 11 ilustra geometria utilizada nos parâmetros envolvidos na projeção do IPP.

Figura 11 - Geometria do modelo ionosférico de fina camada.



Fonte: Adaptado de Hofmann-Wellenhof et al. (2001).

Ao substituir a Equação (18) em (6), obtém-se a principal equação de observação para a modelagem da ionosfera com o VTEC:

$$F(P_{L_2} - P_{L_1}) = \frac{VTEC}{\cos(z^{ip})} + F[c\Delta b_r + c\Delta b_s + \Delta\varepsilon]. \quad (20)$$

Devido à natureza periódica do efeito da refração ionosférica, o VTEC é representado por funções matemáticas de superfície, tais como séries, polinômios e harmônicos esféricos. Esta função de superfície pode ser determinada a partir da área de abrangência em que se pretende mapear a ionosfera, classificando os modelos de VTEC em globais, regionais ou locais.

Nos modelos globais, dados de uma rede mundial de estações GNSS são utilizados para estimar os valores de VTEC e produzir mapas globais da ionosfera (GIM - *Global Ionospheric Maps*). O IGS deu início à produção dos GIMs em 1998 a partir do Grupo de Trabalho da Ionosfera (IGS IonoWG – *Ionosphere Working Group of the IGS*), formado por quatro centros de análise: CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*), JPL (*Jet Propulsory Laboratory*), UPC (*Universitat Politècnica de Catalunya*) e ESA (*European Space Agency*) (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2009). Dentre estes centros, o CODE desenvolveu o método disponível no software *Bernease*, tendo o VTEC modelado por meio da seguinte expansão em harmônicos esféricos (SCHAER, 1999):

$$VTEC = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin(\varphi_m^{ip})) [a_{nm} \cos(m\lambda^s) + b_{nm} \sin(m\lambda^s)], \quad (21)$$

com:

$$\lambda^s = \lambda_g^{ip} + UT - \pi, \quad (22)$$

sendo φ_m^{ip} a latitude geomagnética do IPP, λ^s é a longitude fixa do Sol no ponto penetrante na ionosfera e λ_g^{ip} a longitude geográfica do IPP na hora UT (*Universal Time*) dada em radianos, n_{max} é o máximo grau da expansão em série, a e b são os coeficientes dos harmônicos esféricos a serem estimados e $\tilde{P}_{nm}(x)$ representa os polinômios associados de Legendre normalizados, de grau n e ordem m .

O sistema de equação possui $(n_{max} + 1)^2$ parâmetros incógnitos que definem a superfície ionosférica e quando $m = 0$, não haverá coeficientes que representam b . O CODE utiliza a série harmônica expandida em 15 graus para a modelagem global e a evolução temporal do VTEC é imposta por meio de condições lineares nos coeficientes harmônicos.

Os polinômios normalizados são expressos por:

$$\tilde{P}_{nm}(x) = \Lambda P_{nm}(x), \quad (23)$$

com Λ denotando a função de normalização e $P_{nm}(x)$ os polinômios associados de Legendre. Para a normalização, defini-se δ como o delta de Kronecker e aplica-se (SCHAER, 1998):

$$\Lambda = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)(2-\delta_{0m})}{(n+m)!}}. \quad (24)$$

Os valores iniciais dos polinômios podem ser obtidos por (SEGURA; GIL, 1999):

$$P_{nm}(x) = (-1)^m (2m-1)!! (1-x^2)^{m/2}, \quad \text{para } n = m, \quad (25)$$

e

$$P_{n\ m+1}(x) = x(2m+1)P_{nm}(x). \quad (26)$$

Vale ressaltar que outros métodos podem ser aplicados para construir os GIMs. A UPC utiliza de técnicas de tomografia para dividir a ionosfera em duas camadas (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 1999), a ESA realiza uma modelagem tridimensional com base nas funções de Chapman (FELTENS, 1998) e o JPL representa a ionosfera em uma grade esférica a partir de *splines* bicúbicas (MANNUCCI et al., 1998). A partir destes, o IonoWG realiza uma combinação dos GIMs produzidos pelas quatro agências e disponibiliza os mapas globais do IGS.

Em outra escala, o termo regional pode ser utilizado quando a modelagem da ionosfera é realizada em uma específica área de cobertura (p. ex., Brasil), onde se pretende detectar estruturas de menor escala do VTEC. Diversas são as estratégias adotadas para representação do VTEC regionalmente. Destaca-se os métodos de interpolação, como o de *krigagem* (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 1999), o uso de séries trigonométricas (BRUNINI et al., 2004), ou também, séries do tipo Fourier (CAMARGO, 2009). Já no caso local, os mesmos conceitos da modelagem regional são aplicáveis, contudo, para pequenas vizinhas de uma ou mais estações GNSS. Mais detalhes sobre os modelos locais são apresentados por Mitch et al. (2013).

3.4.2 Funções Verticais

As funções verticais são utilizadas para descrever o comportamento da densidade eletrônica em diversas altitudes da ionosfera para uma dada posição e, usualmente, são representadas por funções matemáticas desenvolvidas a partir de dados observados. Dentre as várias funções verticais existentes, destaca-se o modelo Chapman, as funções utilizadas pelo IRI, e as Funções Ortogonais Empíricas (EOFs – *Empirical Orthogonal Functions*), como modelos extensamente aplicados na tomografia da ionosfera.

3.4.2.1 Modelo de Chapman

O modelo de Chapman caracteriza a ionosfera por meio de uma balança entre os processos de ionização e recombinação dos gases na ionosfera. O método foi deduzido relacionando o decréscimo exponencial dos gases neutros com o aumento exponencial da ionização solar, à medida que a altitude aumenta (Chapman, 1931).

De acordo com o modelo de Chapman, a função Chapman- α (perda quadrática) é adaptada para descrever as baixas altitudes da ionosfera, enquanto a função Chapman- β (perda linear) caracteriza as altas altitudes da ionosfera. A densidade eletrônica para uma altitude h é representada pela função Chapman- α com $\gamma = 0,5$ e Chapman- β com $\gamma = 1$, sendo:

$$ne = n_m e^{\gamma[1-z-e^{-z}]}, \quad (27)$$

com:

$$z = \frac{(h - h_m)}{H_s}, \quad (28)$$

em que n_m representa a densidade crítica para o perfil e h_m é a altura em que a n_m ocorre, H_s é o fator de escala da altura (*scale height*), sendo este um parâmetro essencial no modelo, pois descreve o formato (*shape*) do perfil.

Destaca-se que observações de perfis verticais vêm apresentando que a função Chapman- α é suficiente para descrever a densidade eletrônica nas diferentes altitudes da ionosfera (MEI; WAN, 2008). Além disso, uma variação da função Chapman- α vem sendo avaliada pelo IRI como um novo modelo para representar a ionosfera nas altas altitudes (*topside*). Esta nova função foi primeiramente proposta por Rishbeth e Garriott (1969), descrevendo a ionosfera com uma função que possui o fator de escala H_s variante com a altitude. Desta forma, tal função é identificada Vary-Chap (BILITZA et al., 2011).

3.4.2.2 Referência internacional da ionosfera

O modelo do IRI foi desenvolvido e continua sendo aprimorado pelo *Committeon Space Research* (COSPAR), pela *International Union of Radio Science* (URSI) e em conjunto com membros de várias nações. A principal intenção do IRI é obter componentes que descrevem a ionosfera, tais como a densidade dos elétrons e íons, temperatura, composição iônica (O^+ , H^+ , He^+ , O_2^+ , NO^+), velocidade do plasma, TEC e probabilidade de ocorrência da *Spread-F*. O IRI é um modelo empírico, baseado em diversas fontes de dados advindos de sondas espaciais e terrestres, de forma que a densidade eletrônica é representada por meio de funções analíticas, cujos parâmetros são organizados em tabelas (BILITZA et al., 2011).

O IRI é disponível em plataforma *online* por meio do seguinte endereço eletrônico: <http://iri.gsfc.nasa.gov>, onde o código fonte é disponível publicamente. No modelo, destaca-se alguns principais parâmetros de entrada, como o número de manchas solares (R12), o fluxo de radiação solar por unidade de frequência no comprimento de onda de 10,7 cm (F10.7), o índice global da ionosfera baseado em dados de ionossonda (IG12), bem como índices de tempestades geomagnéticas (Ap e Kp). Além destes, a frequência crítica da camada F₂ (foF2) e a razão entre a Máxima Frequência Utilizável (MUF) à uma distância de 3000 km e a foF2 (M(3000) F2), se destacam como parâmetros que definem o estado global da ionosfera.

Atualmente, a versão mais recente, IRI2012, descreve a densidade eletrônica para qualquer região da ionosfera, a partir da divisão do perfil da ionosfera em seis camadas (*topside*, F2-*bottomside*, camada F1, região intermediária, E-*valley*, E-*bottomside*/região D). As camadas em altitudes inferiores da ionosfera são calculadas por específicas funções, baseadas no parâmetro de espessura B0 e no parâmetro de forma B1. Nas altitudes mais elevadas, o modelo NeQuick (NAVA et al., 2008) descreve o *topside*. Mais detalhes sobre a construção dos perfis com o IRI2012 são apresentados por Bilitza et al. (2011), Bilitza et al. (2006), Reinisch e Huang (2000) e Bilitza (1990).

3.4.2.3 Funções ortogonais empíricas

A Análise de Componentes Principais (PCA – *Principal Components Analysis*) é uma técnica estatística muito utilizada em Meteorologia. A técnica tornou-se popular na análise de dados atmosféricos a partir de Lorenz (1956), que a nomeou como análise das Funções Ortogonais Empíricas (EOF - *Empirical Orthogonal Function*). Sua abordagem consiste em detectar os principais padrões espaciais de variabilidade de um conjunto de dados a partir da expansão dos dados em funções dependentes do tempo. Com isso, um dos principais propósitos da análise das EOFs é transformar um conjunto de dados, contendo um grande número de variáveis, em um número reduzido de novas variáveis não correlacionados no tempo e no espaço (HANNACHI, 2004).

Considerando um conjunto de dados que representa perfis da densidade eletrônica em diferentes instantes (t_1, t_2, \dots, t_Q) e altitudes (h_1, h_2, \dots, h_H), a matriz desse conjunto de dados pode ser formulada como (AMERIAN et al., 2010):

$$\mathbf{Ne} = \begin{bmatrix} n_e(t_1, h_1) & n_e(t_1, h_2) & \cdots & n_e(t_1, h_H) \\ n_e(t_2, h_1) & n_e(t_2, h_2) & \cdots & n_e(t_2, h_H) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ n_e(t_Q, h_1) & n_e(t_Q, h_2) & \cdots & n_e(t_Q, h_H) \end{bmatrix}_{Q \times H}, \quad (29)$$

e as EOFs podem ser expressa na seguinte forma (LORENZ, 1956):

$$\mathbf{Ne} = \mathbf{EQ}. \quad (30)$$

O termo \mathbf{E} representa a matriz que descreve a variação em altitude das EOFs e \mathbf{Q} representa a matriz que contém os coeficientes dependentes do tempo. A matriz original do conjunto de dados (\mathbf{Ne}) pode ser construída por meio de outras funções verticais (como o IRI) ou por meio de equipamentos que permitem observar o perfil da ionosfera, como a ionossonda. A partir deste conjunto de observações, as EOFs são determinadas a partir da estimativa das funções de base (\mathbf{E}).

Na estimativa das EOFs, deve-se realizar um pré-tratamento dos dados, removendo-lhes as tendências de menor importância. Isto pode ser feito calculando o valor médio de cada coluna da matriz \mathbf{Ne} e subtraindo cada média calculada pelos valores dos dados originais. O vetor médio de cada coluna pode ser obtido por:

$$\bar{N}e(h) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q ne(t_q, h). \quad (31)$$

A partir do vetor médio, tem-se o campo das anomalias:

$$\tilde{\mathbf{N}}\mathbf{e} = \begin{bmatrix} ne(t_1, h_1) - \bar{N}e(h_1) & \cdots & ne(t_1, h_H) - \bar{N}e(h_H) \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ ne(t_Q, h_1) - \bar{N}e(h_1) & \cdots & ne(t_Q, h_H) - \bar{N}e(h_H) \end{bmatrix}_{Q \times H} \quad (32)$$

As EOFs baseiam-se na Matriz Covariância (MC) da matriz anômala ($\tilde{\mathbf{N}}\mathbf{e}$), sendo que a MC pode ser calculada a partir da multiplicação da $\tilde{\mathbf{N}}\mathbf{e}$ por sua transposta (BJÖRNSSON; VENEGAS, 1997):

$$\Sigma_{\tilde{\mathbf{N}}_e} = \tilde{\mathbf{N}}_e^T \tilde{\mathbf{N}}_e. \quad (33)$$

Após construção da MC do campo das anomalias, é preciso determinar os valores próprios dos autovalores e autovetores da $\Sigma_{\tilde{\mathbf{N}}_e}$:

$$\Sigma_{\tilde{\mathbf{N}}_e} \mathbf{E} = \mathbf{E} \Lambda. \quad (34)$$

Os autovetores normalizados representam as EOFs (\mathbf{E}) e possuem a seguinte propriedade:

$$\mathbf{E}^T \mathbf{E} = \mathbf{I}, \quad (35)$$

o que torna as EOFs ortogonais no espaço, sendo que \mathbf{I} denota matriz identidade. Os autovalores (Λ) são representados pela matriz dos elementos não-diagonais que tendem a zero, tornando as EOFs ortogonais no tempo. Além disso, os coeficientes temporais (\mathbf{Q}) são estimados a partir da projeção de cada autovetor na matriz original dos dados.

É um procedimento usual ordenar os autovetores em ordem crescente de importância. Nesta organização, a primeira EOF (\mathbf{E}_1) é o autovetor com maior autovalor (mais importante), a segunda EOF (\mathbf{E}_2) possui o segundo maior autovalor, e assim por diante. Desta forma, cada autovetor representa um modo das EOFs, sendo a primeira EOF o modo que retém a maior quantidade de informação. Uma questão importante na análise das EOFs se refere a determinar quantos autovalores devem ser retidos, de forma a separar o que é significativo do que é ruído. Portanto, a real dimensão das EOFs será dada por uma matriz $\mathbf{H} \times k_{max}$, onde k_{max} representa o número de autovetores utilizados, ou seja, o número de modos das EOFs ($k = 1, \dots, k_{max}$). Destaca-se que nos modelos tomográficos, usualmente, utilizam-se de uma a quatro EOFs (MATERASSI; MITCHELL, 2005). Desta forma, a densidade eletrônica pode ser representada por meio da seguinte expressão:

$$ne(h, t) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \mathbf{E}_k(h) \mathbf{Q}_k(t), \quad (36)$$

e considerando observações que representam a densidade eletrônica em diferentes altitudes (H) em diferentes instantes (t), o TEC pode ser expandido em:

$$TEC(t) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{h=1}^H \mathbf{E}_k(h) \mathbf{Q}_k(t) dh, \quad (37)$$

onde dh é a distância entre sucessivas altitudes, k identifica o modo das EOFs, que se expande até o modo k_{max} , \mathbf{E}_k é o k -ésimo autovetor e \mathbf{Q}_k representa o respectivo vetor que descreve as variações temporais.

3.4.3 Funções Tridimensionais

Na modelagem da densidade eletrônica baseada em funções, para superar a dificuldade em solucionar o problema inverso ($L = \mathbf{A}\mathbf{X} + V$) por meio de observações do GNSS, uma matriz de mapeamento é utilizada para transformar o problema em um conjunto de funções de bases ortonormais, usualmente relacionado às funções verticais e horizontais. Agora o problema pode ser escrito por:

$$L = \mathbf{A}\mathbf{X}\mathbf{W} + V, \quad (38)$$

onde \mathbf{X} representa a matriz das funções base e \mathbf{W} é a contribuição relativa de cada função base, i.e., um vetor com um conjunto de coeficientes incógnitos. Para resolver este problema, a matriz de mapeamento (\mathbf{X}) é representada por uma função tridimensional, tal que $\mathbf{A}\mathbf{X}$ define a base de um conjunto de integrais. A densidade eletrônica é então estimada por: $X = \mathbf{X}\mathbf{W}$.

Neste sistema de equações, a densidade eletrônica pode ser parametrizada em termos de harmônicos esféricos e funções verticais a partir da seguinte expressão (BRUNINI et al., 2004):

$$ne = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n f(h) \tilde{P}_{nm}(\sin(\varphi_m^{ip})) [a_{nm} \cos(m\lambda^s) + b_{nm} \sin(m\lambda^s)], \quad (39)$$

em que $f(h)$ representa o modelo vertical que descreve a ionosfera sem adição dos conceitos das EOFs.

Visto que a relação entre a densidade eletrônica com as medidas GNSS é realizada por meio do TEC, deve-se integrar a Equação (39). Para realizar a integração de ne , define-se o TEC como uma somatória finita a partir da projeção de diversos pontos ao longo das camadas da ionosfera. Desta forma, a matriz \mathbf{A} é definida por meio do comprimento do sinal em cada célula da grade. Portanto, as observações de TEC são descritas por:

$$TEC = \int_r^s \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n f(h) \tilde{P}_{nm}(\sin(\varphi_m^{ip})) [a_{nm} \cos(m\lambda^s) + b_{nm} \sin(m\lambda^s)] ds, \quad (40)$$

ou então,

$$TEC = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n a_{nm} \int_r^s \{f(h) \tilde{P}_{nm}(\sin(\varphi_m^{ip})) \cos(m\lambda^s)\} ds + b_{nm} \int_r^s \{f(h) \tilde{P}_{nm}(\sin(\varphi_m^{ip})) \sin(m\lambda^s)\} ds. \quad (41)$$

A matriz \mathbf{A} é definida a partir do comprimento dos sinais que interceptam os *voxels* do sistema, \mathbf{X} é construído a partir da derivada parcial da equação em relação aos coeficientes e W representa os coeficientes a e b . Se algum método para calcular as funções verticais for definido previamente, a informação vertical pode ser utilizada diretamente sobre o modelo dado pela Equação (41) e o número de parâmetros é igual ao utilizado na modelagem com funções horizontais $(n_{max} + 1)^2$. Um processo de normalização pode ser aplicado nos perfis da ionosfera, onde a densidade crítica da correspondente posição será igual a um. Nesta normalização, os coeficientes estimados estão relacionados à densidade crítica e as variações temporais podem ser impostas por meio da linearidade, assim como nas funções horizontais.

Por outro lado, quando as EOFs são utilizadas, a função tridimensional torna-se (HOWE e RUNCIMAN, 1998):

$$TEC = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n a_{knm} \int_r^s \{ \mathbf{E}_k(h) \tilde{P}_{nm}(\sin(\varphi_m^{ip})) \cos(m\lambda^s) \} ds + \quad (42)$$

$$+ b_{knm} \int_r^s \{ \mathbf{E}_k(h) \tilde{P}_{nm}(\sin(\varphi_m^{ip})) \sin(m\lambda^s) \} ds$$

Se as EOFs são estimadas previamente, as informações verticais podem ser utilizadas diretamente no modelo por meio da imposição de injunções relacionadas aos autovalores. O sistema de equações possui $[(n_{max} + 1)^2] * k_{max}$ coeficientes e quando $k_{max} > 1$, o número de parâmetros será maior ao utilizado pelo modelo apresentado na Equação (41). Agora os coeficientes são relacionados à densidade crítica de cada modo das EOFs e as dependências temporais podem ser impostas como condições lineares.

Contudo, ao invés de utilizar a informação vertical diretamente sobre estes modelos, os parâmetros verticais necessários podem ser estimados por meio da imposição de injunções referentes a componente vertical da ionosfera. Uma solução detalhada deste sistema de equações é apresentada por Mitchell e Spencer (2003), onde a decomposição de valores singulares (SVD - *Singular Value Decomposition*) é aplicada e injunções são impostas sobre as EOFs para estas serem assumidas proporcionais a alguma outra função vertical, como a função de Chapman.

3.5 Considerações sobre as Técnicas de Tomografia da Ionosfera

Este Capítulo apresentou alguns dos conceitos utilizados na tomografia da ionosfera, contextualizando uma discussão sobre as técnicas baseadas em células e em funções. Existem duas principais etapas no uso dos métodos baseados em células: a definição do *background* da ionosfera e a aplicação de uma técnica algébrica a fim de estimar a densidade eletrônica em um conjunto de células a partir de observações de TEC. Uma vez que o número de parâmetros é igual ao número de células utilizadas para representar a grade ionosférica, este método envolve uma grande quantidade de operações. Contudo, observações de TEC são utilizadas diretamente sobre a grade ionosférica, tornando-o de interesse para analisar estruturas regionais da ionosfera. Vale ressaltar alguns problemas no imageamento da ionosfera com os métodos baseados em células, pois não há alteração dos valores da densidade eletrônica (obtidas do *background*) sobre as células não iluminadas.

Nos métodos baseados em funções, observou-se que funções horizontais e funções verticais reduzem as variações da ionosfera em um conjunto de coeficientes. A componente horizontal pode ser representada por observações advindas do GNSS, como pôde ser observado na formulação utilizada para a produção de GIMs. No entanto, informações externas ao GNSS devem ser incluídas para representar a componente vertical. É possível adquirir informações verticais a partir de modelos ionosféricos (como o IRI), ou então a partir de EOFs. Uma maior quantidade de operações é necessária na estimativa das EOFs, porém, permitem adicionar informações verticais a partir de observações (p. ex., de ionossondas).

Notou-se que diversas versões de técnicas para realizar a tomografia da ionosfera podem ser elaboradas. Por exemplo, diferentes técnicas podem ser utilizadas para a construção do *background* da ionosfera, bem como uma grande quantidade de técnicas algébricas podem ser aplicadas para realizar as iterações. Ademais, uma grande variedade de funções horizontais e verticais pode ser utilizada para representar a ionosfera, bem como diferentes imposições podem ser inseridas. Porém, em geral, a reconstrução tomográfica depende, sobretudo, da definição do *background* da ionosfera e/ou da função vertical. Isto, pois ambos os métodos (baseados em células ou funções) compartilham de uma mesma limitação: uma deficiência em representar as variações verticais da ionosfera utilizando apenas informações advindas do GNSS.

Verifica-se que, teoricamente, os métodos baseados em células permitem representar estruturas de menor escala da ionosfera em comparação aos baseados em funções. Isto, pois este último adéqua as observações advindas do GNSS a uma superfície pré-estabelecida por funções. Enquanto que as técnicas algébricas aplicam observações de TEC diretamente sobre a grade ionosférica. Vale ressaltar que a aplicação das técnicas baseadas em funções sobre o setor brasileiro podem ser encontradas em Muella et al. (2011). Desta forma, as posteriores análises são realizadas a fim de avaliar a eficiência das técnicas baseadas em células para o setor brasileiro.

4 DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO PARA A TOMOGRAFIA DA IONOSFERA

As técnicas ART e MART para realizar a tomografia da ionosfera foram desenvolvidas em linguagem de programação C/C++. Para isto, diversas classes foram implementadas, sendo elas:

- **Signal:** Cada objeto desta classe representa um sinal GNSS, relacionada a um receptor e um satélite GPS ou GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*). Esta classe é inicializada por meio da identificação do *Marker Name* da estação GNSS, das observações em L1 e L2 do código e da fase da portadora, do identificador do satélite, do DCB do receptor e do satélite, do instante de rastreamento das observações e da posição do satélite e do receptor para o instante de rastreamento e transmissão do sinal, respectivamente. Uma vez definido os parâmetros, esta classe possui funções para cálculo do atraso ionosférico, do TEC, de detecção de perdas de ciclo, de filtragem do código por meio da fase da onda portadora, cálculo do azimute e ângulo de elevação do sinal, e outras;
- **LLHgrid:** Esta classe possui todas as funções relacionadas com a grade de voxels utilizada para a reconstrução tomográfica. A grade de voxels é inicializada a partir da determinação das dimensões da grade tridimensional, ou seja, a inicialização se dá por meio da definição da latitude, longitude e altitude inicial da grade de voxels, bem como com a dimensão de cada voxel e o número de voxels para cada componente. Cada voxel é representado por um objeto definido por meio das funções da classe *Voxel_Pixel*. Uma vez inicializada a grade de voxels pode-se inserir valores da densidade eletrônica para cada voxel. A densidade eletrônica inicial de cada voxel pode ser definida utilizando o IRI. Em seguida, são adicionados os sinais GNSS com informações da posição do receptor, do valor de VTEC ou STEC previamente calculado, do azimute e do ângulo de elevação do respectivo sinal. Por fim, esta classe possui funções que

realizam o processo iterativo das técnicas ART e MART para percorrer todos os sinais GNSS adicionados e atualizar a densidade eletrônica dos voxels da grade que são interceptados pelos sinais GNSS. A LLHGrid inicializa objetos das classes Voxel_Pixel, Tomosignal, IPP e IRI.

- Voxel_Pixel: Esta classe é um controlador de cada voxel (ou pixel) da grade tomográfica. Cada objeto desta classe possui a informação da latitude, longitude, altitude e densidade eletrônica de cada voxel;
- Tomosignal: Esta classe possui informações dos sinais adicionados na grade de voxels. Cada objeto possui a informação da posição do receptor GNSS, azimute, ângulo de elevação, TEC advindo das observáveis GNSS, TEC atualizado após realizar a tomografia, TEC inicial, calculado com o IRI. Além disso, quando o objeto Tomosignal é inicializado, os IPPs são calculados para o trajeto do sinal GNSS, por meio das funções contidas na Classe IPP;
- IPP: Esta classe é destinada a realizar todos os cálculos necessários para projetar um IPP. A inicialização desta classe se dá por meio da definição da latitude e longitude do receptor GNSS, do ângulo de elevação, do azimute e da altitude onde o respectivo IPP será projetado;
- IRI: Essa classe realiza o cálculo da densidade eletrônica em uma dada posição a partir das rotinas do modelo IRI. Esta classe está disponível no seguinte endereço eletrônico:
<http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/>.

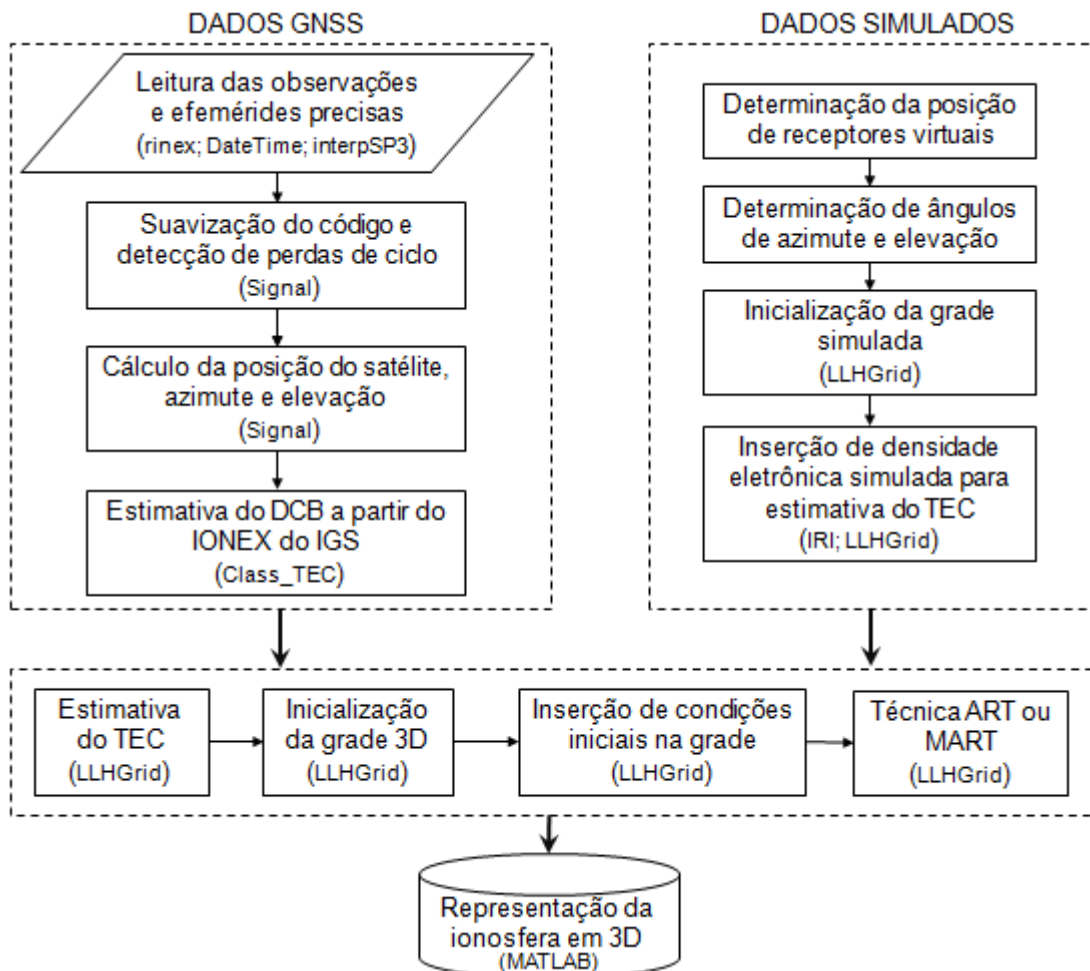
Além das classes desenvolvidas, foram utilizadas quatro outras classes, disponibilizadas pelo NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) no seguinte endereço: <http://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/exist.htm>.

- DateTime: Esta classe possui funções para conversão de datas em dias Juliano e/ou tempo GPS;

- rinex: Esta classe permite ler arquivos em formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*);
- interpSP3: Realiza a leitura de efemérides precisas e interpola a posição do satélite para o instante de transmissão do sinal GNSS;
- Class_TEC: Permite ler arquivos em formato IONEX e realiza a interpolação bilinear no espaço e tempo para a posição de um IPP.

Todas as classes foram devidamente utilizadas por meio de comandos de inserção de alguns parâmetros (SET) e recuperação de informações (GET). A partir deste conjunto de classes, os processos apresentados no fluxograma da Figura 12 foram realizados para produzir representações da ionosfera em três dimensões, seja utilizando dados advindos do GNSS ou a partir de dados simulados. Vale ressaltar que nesta pesquisa foi utilizado o MATLAB (*MATrix LABORatory*) para a visualização dos resultados.

Figura 12 – Fluxograma do aplicativo para representação da ionosfera a partir da tomografia.



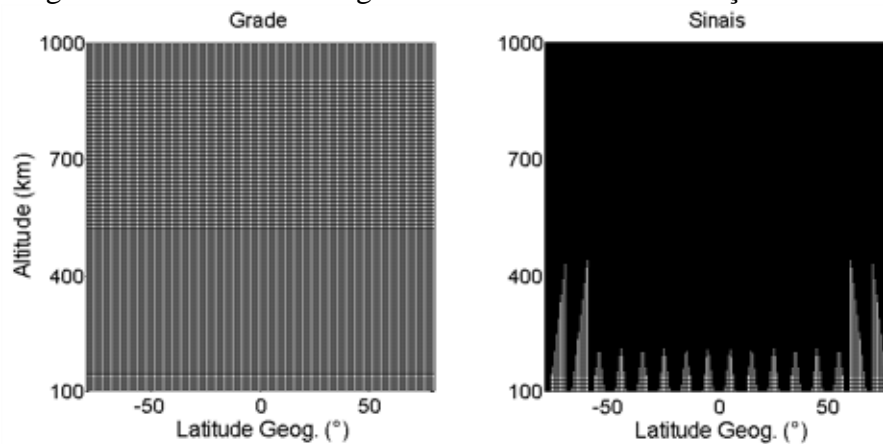
5 ANÁLISES DAS TÉCNICAS ALGÉBRICAS COM OBSERVAÇÕES SIMULADAS

Este Capítulo apresenta algumas das principais características dos modelos para reconstrução tomográfica da ionosfera a partir da geometria utilizada com receptores GNSS localizados sobre a superfície terrestre. As técnicas algébricas foram aplicadas tanto para o imageamento bidimensional quanto para o tridimensional, de forma que as observações foram extraídas por meio de casos simulados, permitindo identificar as possíveis visualizações da CIT. Além disso, análises foram feitas a partir da geometria do sistema tomográfico utilizando estações GNSS localizadas no setor brasileiro.

5.1 Análise das Técnicas Algébricas no Imageamento Bidimensional

Os métodos algébricos no imageamento bidimensional foram avaliados a partir de observações simuladas. As imagens iniciais (*background*) foram construídas com a função de Chapman e a partir desta, imagens simuladas foram produzidas a fim de proporcionar observações de TEC. As projeções de TEC foram construídas utilizando a geometria com sinais que contém satélites GNSS em órbita e receptores sob a superfície terrestre. Foram considerados casos em que há grande abundância de sinais rastreados, mesmo que a quantidade de inclinações dos sinais não seja possível na realidade atual. Para tanto, uma grade ionosférica foi estruturada com *pixels* de resolução de 1° em latitude por 10 km em altitude, onde foram inseridos receptores a cada 10° em latitude e sinais GNSS com ângulo de elevação variando de 10° a 90° , com intervalo de 1° . Os azimutes dos satélites foram determinados iguais a 0° ou 180° , tornando as simulações ideais para o caso bidimensional. A Figura 13 ilustra a geometria utilizada, onde nem todos os *pixels* foram seccionados e há apenas sinais em uma direção nas regiões de altas latitudes, casos que, comumente, ocorrem na prática.

Figura 13 – Geometria da grade e dos sinais nas simulações em 2D.



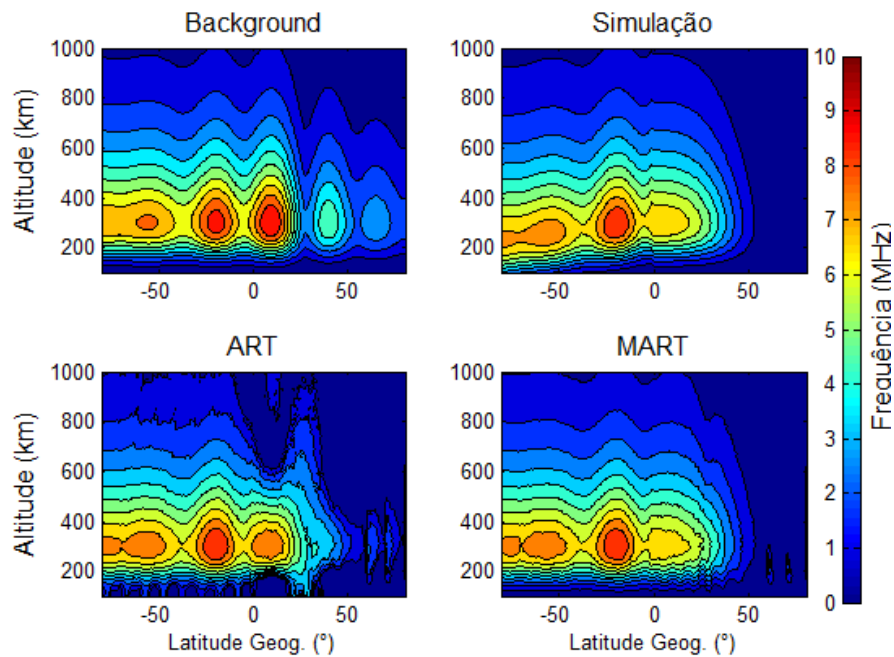
Com base em condições iniciais da densidade eletrônica para cada *pixel*, quatro casos específicos de simulação foram criados para avaliar o comportamento das técnicas algébricas:

- I. Variações geométricas;
- II. Maior densidade eletrônica;
- III. Menor densidade eletrônica;
- IV. Variações em altas altitudes.

Em cada caso, a reconstrução tomográfica foi realizada para os modelos algébricos ART e MART, descritos no Capítulo 3. As iterações foram realizadas até um número mínimo de trinta iterações, e adotou-se um valor de ponderação $w = 0,02$. Estes parâmetros foram determinados por meio de sucessivos testes, até a imagem resultante melhor se ajustar a imagem simulada. Vale ressaltar que Das e Shukla (2011) também utilizam o valor de ponderação igual a 0,02.

O caso I foi construído de forma a conter variações geométricas em altitude e em latitude (Figura 14). Para isso, a imagem inicial (*background*) é representada como um caso típico de Anomalia da Ionização Equatorial (EIA), porém, de altitude constante do pico da ionosfera. A imagem simulada contém uma inclinação em altitude na crista Sul da EIA, representando uma variação geométrica vertical, e uma variação geométrica horizontal na crista Norte da EIA. As observações de TEC foram obtidas a partir da imagem identificada Simulação. Para melhor visualização das imagens, a densidade eletrônica foi convertida em frequência de reflexão da ionosfera (f) por meio da seguinte equação: $f = 9 * 10^{-6}(ne)^{1/2}$.

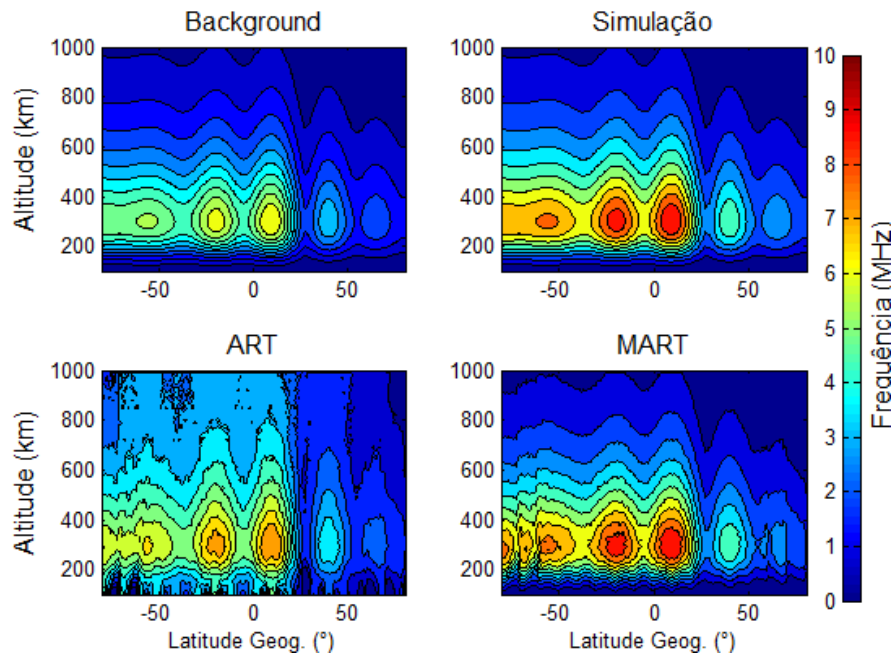
Figura 14 – Desempenho do modelo algébrico no caso I (Variações geométricas).



Nota-se na Figura 14 que os modelos algébricos, utilizando receptores GNSS localizados sobre a superfície terrestre, não reconstruíram as variações geométricas verticais (Crista Sul). Porém, a reconstrução das variações horizontais para diferentes altitudes na crista Norte foi notória. Além disso, a MART apresentou uma reconstrução mais coerente à técnica ART.

O caso II (Figura 15) foi desenvolvido de forma que a imagem simulada possui a mesma distribuição geométrica da densidade eletrônica da imagem inicial, porém, os valores simulados são dobrados.

Figura 15 – Desempenho do modelo algébrico no caso II (Maior densidade eletrônica).

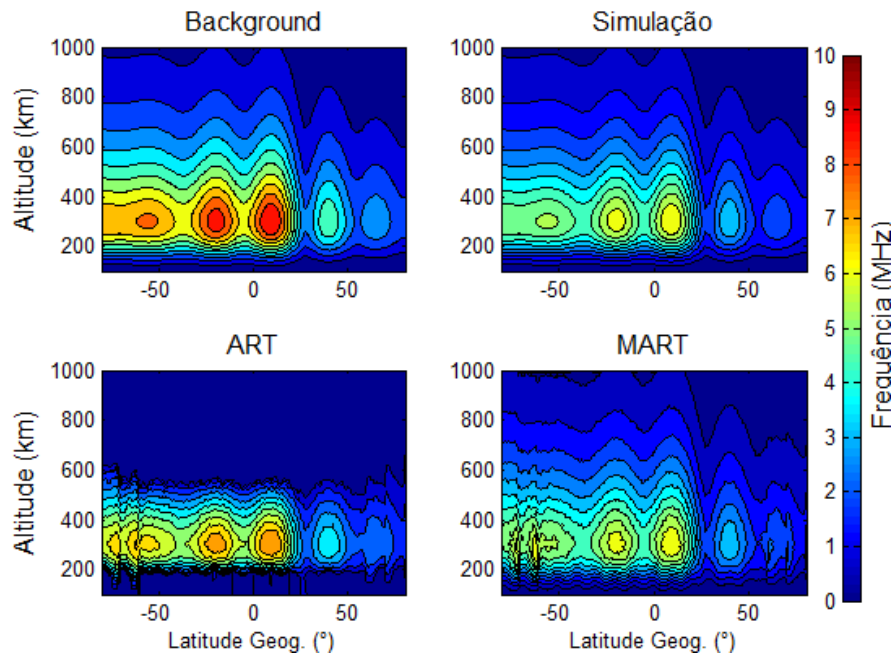


Verifica-se que a ART superestima a densidade eletrônica nas altas altitudes e subestima nas altitudes de pico, quando os valores medidos de TEC são superiores aos aproximados da imagem inicial. Isto ocorre em função da ponderação equivalente das diferenças (TEC medido e TEC inicial) para todas as altitudes. Fato que não ocorre na MART.

Em contrapartida, quando os valores medidos de TEC são inferiores aos valores iniciais, a ART atua de forma inversa ao caso II, subestimando a densidade eletrônica nas altas altitudes e superestimando nas altitudes de pico. Isto é apresentado no caso III (Menor densidade eletrônica), onde a imagem simulada possui o valor da densidade eletrônica igual à metade da imagem inicial (Figura 16). Já a MART reconstruiu a imagem com a dimensão das densidades eletrônicas próxima à imagem simulada.

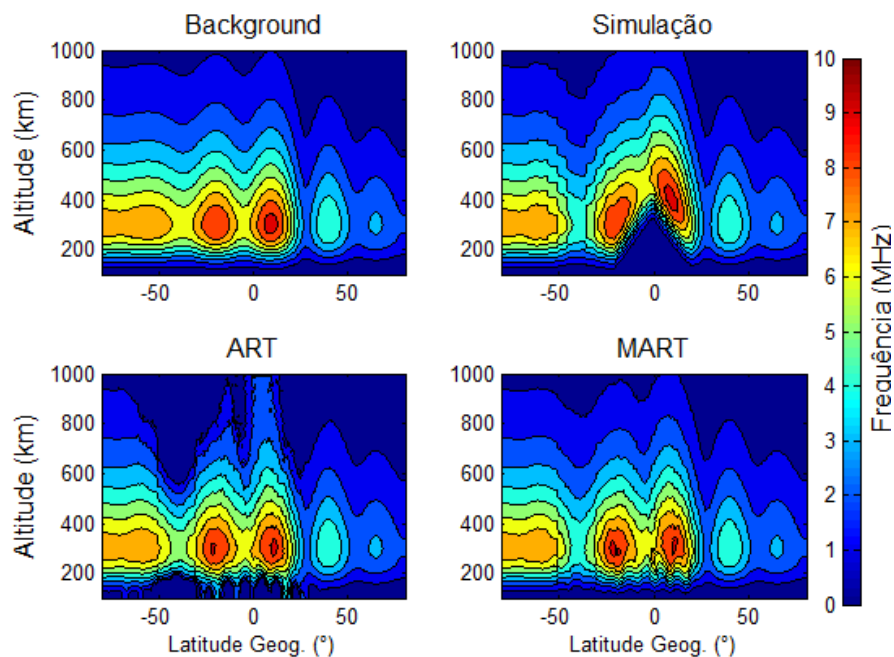
Ambas as técnicas nos casos II e III (Figuras 15 e 16) apresentaram irregularidades na reconstrução para as latitudes menores que -50° . Isto ocorreu, pois foram utilizados sinais projetados em apenas uma única direção nas regiões de altas latitudes, comprometendo a reconstrução tomográfica devido à falta de observações para estas regiões. Portanto, para uma reconstrução mais eficiente nas bordas da grade tomográfica é necessário que haja geometria adequada das observações.

Figura 16 – Desempenho do modelo algébrico no caso III (Menor densidade eletrônica).



O caso IV é apresentado na Figura 17, de forma que a imagem simulada possui a uma alta concentração eletrônica em altitudes elevadas. Este caso foi construído com o intuito de representar uma intensa deriva vertical para cima, um caso peculiar da região equatorial da ionosfera.

Figura 17 – Desempenho do modelo algébrico no caso IV (Variações em altas altitudes).



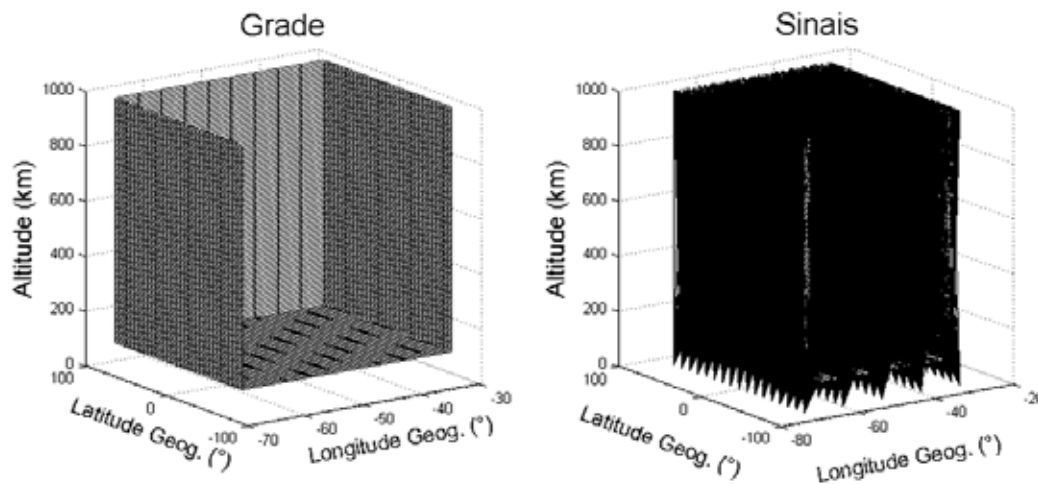
Neste experimento, nenhuma das técnicas detectou as variações em altas altitudes, reforçando as limitações do método em representar a altitude de pico da ionosfera. No entanto, quando há variações homogêneas em todas as altitudes, como entre as latitudes de -50° e -30° da Figura 17, a reconstrução assemelha-se à imagem simulada.

5.2 Análise das Técnicas Algébricas no Imageamento Tridimensional

Os métodos algébricos no imageamento tridimensional foram avaliados apenas com a técnica MART, pois mostrou melhor desempenho no caso bidimensional. As análises foram realizadas a fim de verificar o comportamento da reconstrução tridimensional para os mesmos casos do imageamento bidimensional.

A grade ionosférica foi estruturada com *voxels* de resolução de 4° em latitude por 4° em longitude e 10 km em altitude, onde foram inseridos receptores a cada 10° em latitude e 10° em longitude. Os sinais GNSS foram determinados com ângulo de elevação variando de 10° a 90° com intervalo de 5° e os azimutes dos satélites variam de 0° a 360° com intervalo de 30° . A resolução horizontal da grade é inferior ao caso bidimensional em função da elevada quantidade de informações no processamento computacional. A Figura 18 ilustra a geometria utilizada.

Figura 18 – Geometria da grade e dos sinais nas simulações em 3D.



As variações geométricas (Caso I), em densidade eletrônica (Caso II e III) e de deriva vertical (Caso IV), foram construídas na grade simulada de três dimensões. As análises são apresentadas nas Figuras 19 à 22.

Figura 19 – Desempenho da MART 3D no caso I (Variações geométricas).

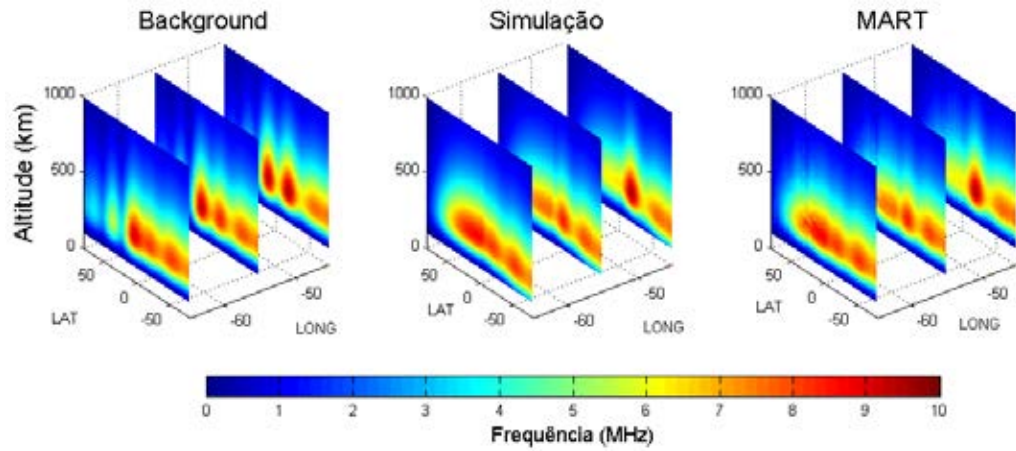


Figura 20 – Desempenho da MART 3D no caso II (Maior densidade eletrônica).

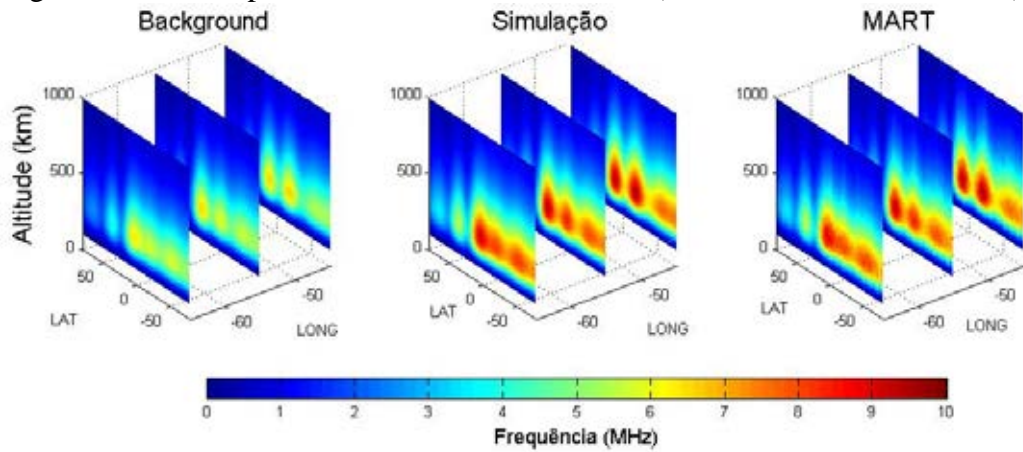


Figura 21 – Desempenho da MART 3D no caso III (Menor densidade eletrônica).

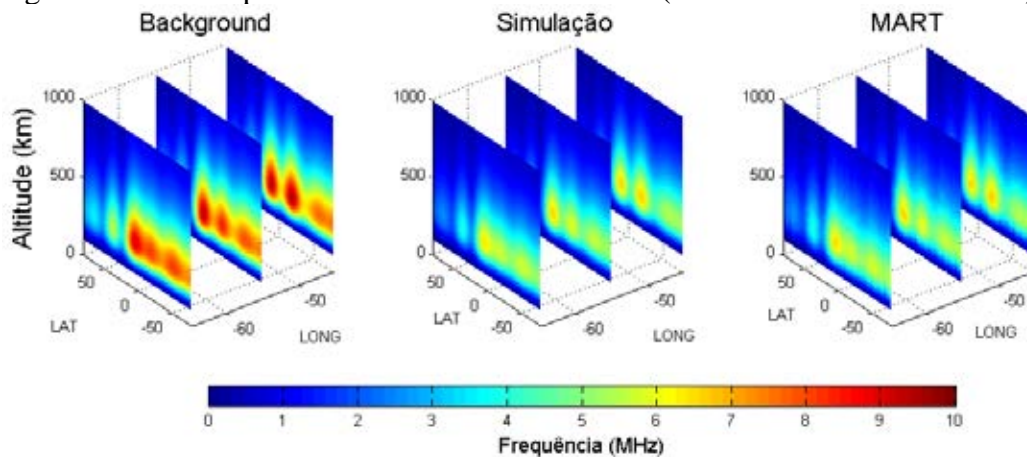
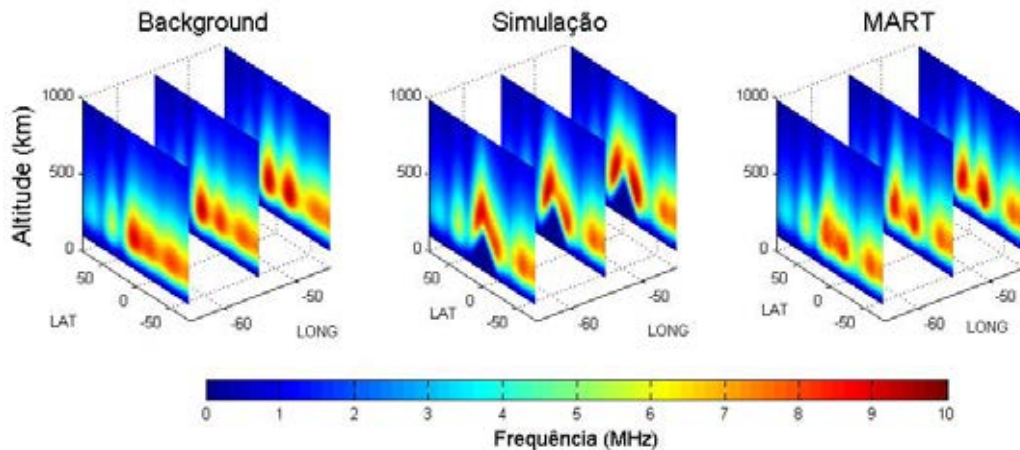


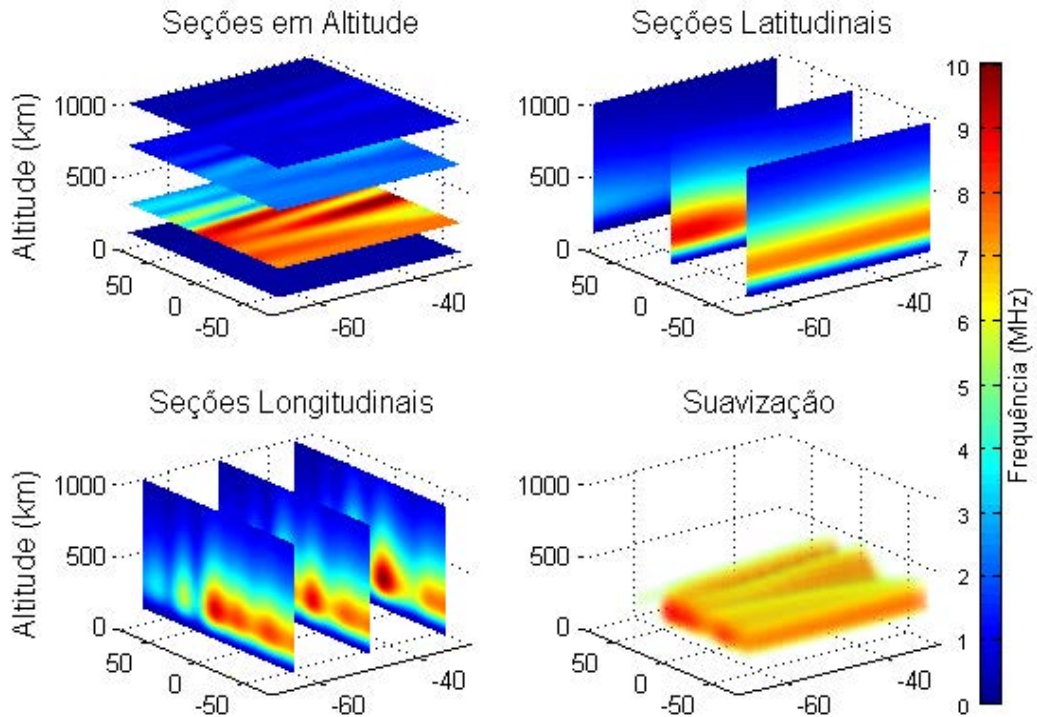
Figura 22 – Desempenho da MART 3D no caso IV (Variações em altas altitudes).



Nota-se que a MART, com uso da geometria com receptores GNSS localizados sobre a superfície terrestre, se mostrou eficiente quando se deseja detectar a distribuição horizontal da densidade eletrônica. No entanto, apesar da boa concordância de todas as reconstruções em comparação com as imagens simuladas, conclui-se que, assim como no imageamento bidimensional, a MART tridimensional não detectou as variações verticais (Figura 19) nem as variações localizadas nas altas altitudes (Figura 22). Portanto, mesmo com variações azimutais dos sinais que interceptam a grade ionosférica, são necessárias informações verticais da distribuição da densidade eletrônica para uma reconstrução mais eficiente.

É importante ressaltar que a reconstrução bidimensional permite utilizar uma grade ionosférica com maior resolução, no entanto, seu uso é mais conveniente quando são utilizados sinais projetados em apenas duas direções (p. ex., Norte e Sul). Caso sejam utilizados sinais em outras direções (p. ex., azimutes diferentes de 0° ou 180°), é mais recomendado realizar a modelagem tridimensional. Além disso, os sinais GNSS possuem diferentes direções, que variam com a posição do receptor e com a órbita do satélite, tornando o caso tridimensional mais apropriado. Outra vantagem da reconstrução tridimensional é que o modelo permite analisar a ionosfera sobre uma grande quantidade de pontos de vista, tornando mais intuitivo a compreensão das anomalias ionosféricas. A Figura 23 mostra possíveis representações da ionosfera a partir da CIT, sendo elas: seções em altitude; seções latitudinais (latitude por altitude); seções longitudinais (longitude por altitude); ou então uma suavização, apresentando os maiores valores de densidade eletrônica para a toda grade tomográfica.

Figura 23 – Diferentes pontos de vista proporcionados nos modelos tridimensionais para a imagem inicial do caso IV.

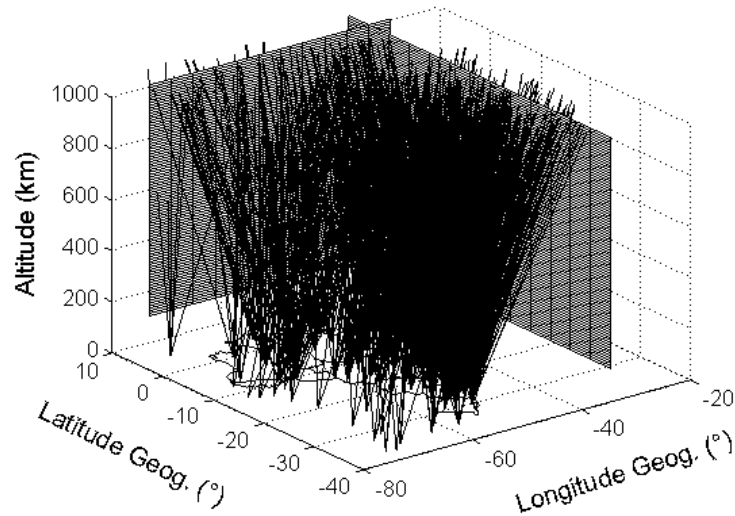


5.3 Análise do Imageamento da Ionosfera no Setor Brasileiro

Nesta análise, observações de TEC foram simuladas considerando a disposição da geometria das estações GNSS pertencentes à RBMC, ao IGS e localizadas na América do Sul e da rede LISN (*Low-latitude Ionospheric Sensor Network*). O dia 01/01/2014 foi selecionado com o intuito de averiguar a possibilidade em realizar o imageamento da ionosfera para dias durante os anos de pico do ciclo solar 24, visto que tal dia compreende uma época representativa no que diz respeito à quantidade de estações GNSS disponível para os anos de 2013 e 2014.

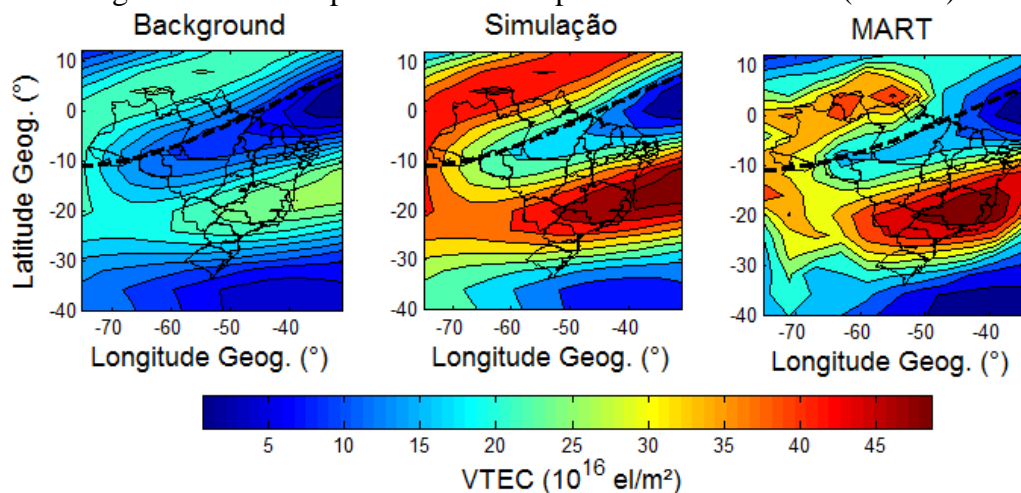
No total, 134 estações foram utilizadas e uma grade de *voxels* foi estruturada com uma resolução de 4° em latitude por 4° em longitude e 10 km em altitude. Vale ressaltar que testes foram realizados com uma maior resolução espacial, com, p. ex., 2° por 2° em latitude por longitude, porém isto conduziu à *voxels* não iluminados em regiões centrais do setor brasileiro. A geometria utilizada é apresentada na Figura 24, onde as efemérides precisas do IGS descreveram a órbita de todos os satélites GPS e GLONASS com uma máscara de elevação de 20° .

Figura 24 – Geometria do sistema tomográfico com uso das estações pertencentes à RBMC, IGS e LISN, bem como satélites GPS e GLONASS.



A partir da geometria apresentada na Figura 24, o algoritmo MART foi utilizado para reconstruir a ionosfera a partir de observações extraídas por meio de casos controlados (similares às simulações realizadas nas seções anteriores). Um exemplo do desempenho da MART para o setor brasileiro é apresentado na Figura 25. Utilizou-se o caso de variações na densidade eletrônica (caso II), de forma que as observações de TEC são duas vezes maiores que o TEC medido por meio da imagem inicial do *background*, tornando a visualização homogênea para toda a região.

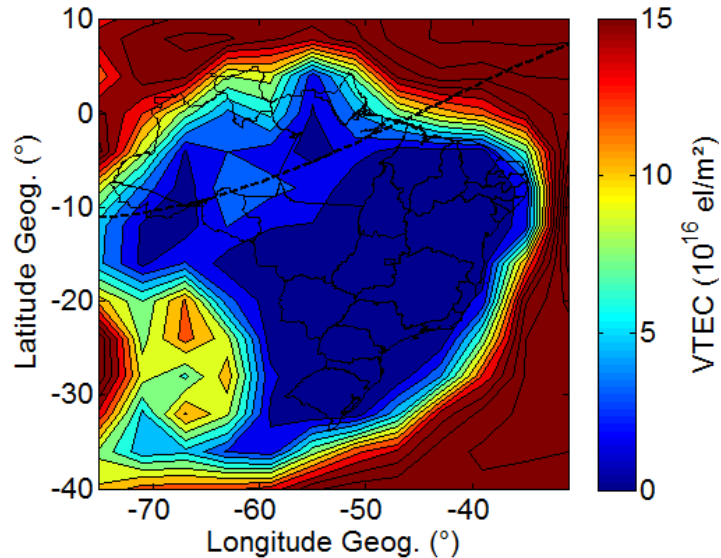
Figura 25 – Desempenho da MART para o setor brasileiro (Caso II).



Nota-se que a reconstrução obteve melhor desempenho em algumas regiões da parte central do setor brasileiro, o que se deve a geometria utilizada. Para definir as regiões

com melhor desempenho no imageamento da ionosfera para o setor brasileiro, calculou-se o RMSE (*Root Mean Square Error*) diário para o caso II, obtendo a Figura 26.

Figura 26 – RMSE diário do algoritmo MART para o setor brasileiro.

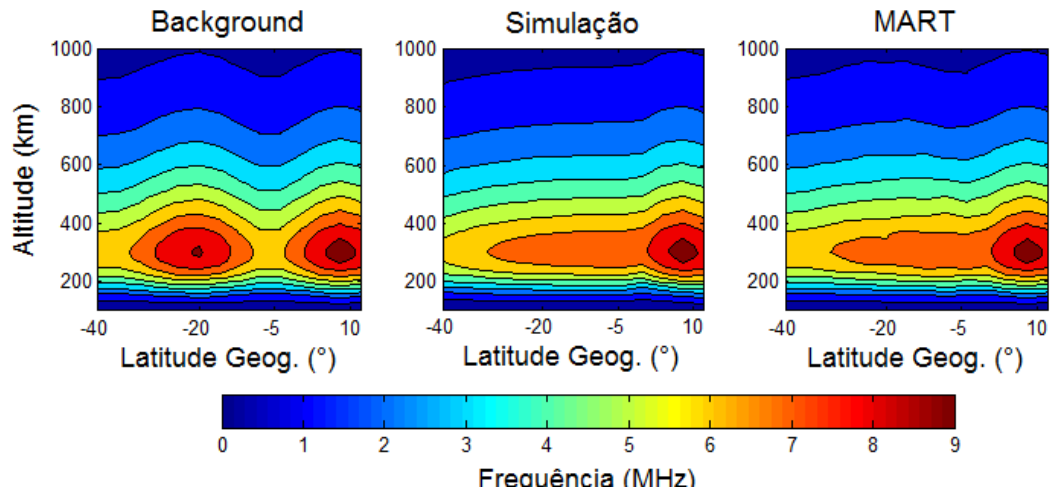


Analisando a Figura 26, o erro da reconstrução é inferior a duas unidades de VTEC em grande parte da região central e Sul do setor brasileiro. Regiões estas que coincidem com a crista Sul da EIA, como pode ser visto na Figura 25. No caso das regiões com pior desempenho, estas ocorrem próximas aos limites de fronteira da região brasileira com o Oceano Atlântico, pois apenas sinais projetados em poucas direções são utilizados. Como apresentado anteriormente (Seção 5.1), o uso de sinais projetados em algumas poucas direções torna tais regiões não adequadas para a reconstrução tomográfica. Além disso, para as regiões com pior desempenho, a imagem final manteve os valores próximos (ou iguais) às densidades eletrônicas calculadas pelo *background*, visto que a técnica algébrica não altera valores de densidade eletrônica para *voxels* não seccionado pelos sinais GNSS.

Ademais, os setores próximos à longitude -50° coincidem com as regiões que obtiveram menores erros na reconstrução e que permitem observar a crista Sul da EIA. Desta forma, a Figura 27 foi produzida a fim de verificar o desempenho da MART na reconstrução vertical da ionosfera para região da longitude -50° . A imagem simulada construída possui variações verticais, porém sem alteração na altitude de pico da ionosfera, uma vez que, como apresentado na seção 5.2, o algoritmo MART possui deficiência em representar as variações na altitude de pico da densidade eletrônica. As imagens são apresentadas em formato bidimensional, porém, toda a geometria tridimensional da Figura 24

foi utilizada. A reconstrução foi realizada para o instante de 00 horas UT, pois este se mostrou um instante com poucos sinais GNSS rastreados em comparação com os outros horários.

Figura 27 – Desempenho da MART para a longitude -50° do setor brasileiro para o caso de variações verticais sem considerar variações na altitude de pico ionosfera.



Nota-se na Figura 27 que, em geral, a imagem obtida por meio da MART ajustou-se de forma adequada. A reconstrução tomográfica para esta específica longitude de 50° W, portanto, pode ser utilizada para analisar o comportamento da crista Sul da EIA, bem como para estimar parâmetros que representam o formato (*shape*) da ionosfera. Por exemplo, a imagem inicial (*background*) foi construída a partir da função de Chapman; no entanto, após a reconstrução tomográfica, uma diferente função vertical pode ser mais bem ajustada à imagem resultante.

6 ANÁLISE DAS TÉCNICAS ALGÉBRICAS COM OBSERVAÇÕES DO GNSS

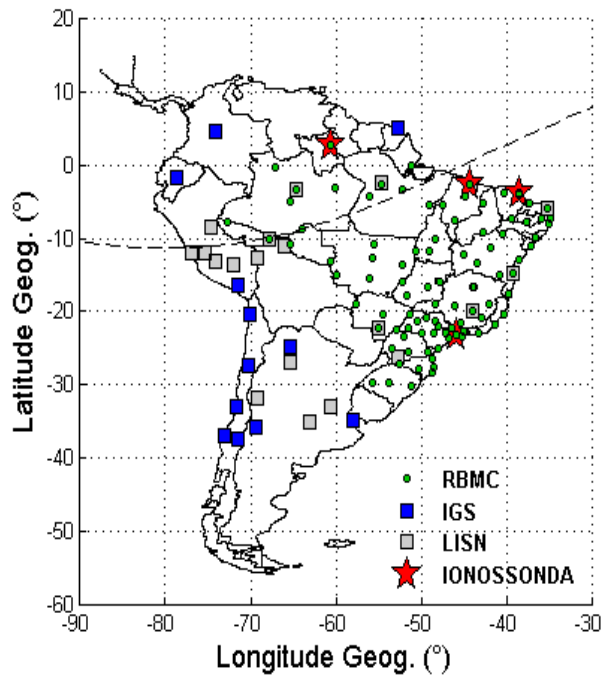
Este capítulo apresenta resultados e análises da aplicação da tomografia da ionosfera com o algoritmo MART utilizando observações advindas do GNSS e valores de referência advindos de ionossondas. No total, foram selecionados 24 dias ao longo dos anos de 2013 e 2014, com o intuito de avaliar a técnica de tomografia para o período de máxima atividade solar do ciclo 24. Os dias da análise foram distribuídos ao longo das quatro estações do ano, contemplando três dias para cada estação do ano de 2013 e outros três para cada estação do ano de 2014. Foram selecionados dias para os dois anos distintos, de forma que as análises considerem diferentes condições para a estimativa dos DCBs. A Tabela 1 apresenta os dias selecionados para as análises.

Tabela 1 – Dias selecionados para as análises.

Ano/Estação do ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera
2013	25/Jan.	15/Mai.	15/Ago.	05/Nov.
	02/Fev.	18/Mai.	21/Ago.	06/Nov.
	03/Fev.	19/Mai.	22/Ago.	25/Nov.
2014	05/Jan.	14/Mai.	25/Jul.	03/Out.
	15/Fev.	19/Mai.	26/Jul.	16/Out.
	20/Fev.	22/Mai.	28/Jul.	01/Nov.

Adotou-se um critério de seleção dos dias, baseando-se na quantidade de ionossondas pertencentes ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e disponíveis pelo EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial). Nos anos analisados, o EMBRACE disponibiliza dados de três ionossondas localizadas sobre o Brasil: São Luís (2,5° S e 44,3° W), Fortaleza (3,7° S e 38,5° W) e Boa Vista (2,8° N e 60,6° W). Visto a dificuldade em manter todas as ionossondas em pleno funcionamento, selecionaram-se os dias em que houve maior quantidade de dados rastreados pelas ionossondas. Também foram inseridos dados de uma ionossonda digital *Canadian Advanced Digital Ionossonde* (CADI) localizada em São José dos Campos (23,21° S e 45,86° W), pertencente à UNIVAP (Universidade do Vale do Paraíba). Para esta ionossonda, os dados de foF2 foram reduzidos manualmente a partir do programa UDIDA (*Univap Digital Ionossonde Data Analysis*), desenvolvido por Pillat et al. (2013). A localização das ionossondas utilizadas, bem como da rede de receptores GNSS das redes RBMC, IGS e LISN, é apresentada na Figura 28.

Figura 28 – Localização das estações GNSS e ionossondas utilizadas.



Uma vez selecionadas as estações GNSS e as ionossondas, bem como as épocas dos experimentos, foram realizadas quatro análises da aplicação da MART sobre o setor brasileiro. As duas primeiras foram realizadas com o intuito de verificar a acurácia da MART para a estimativa da frequência crítica da ionosfera (Seção 6.1) e do TEC inclinado (STEC – *Slant* TEC) (Seção 6.2). A terceira análise apresenta uma comparação entre perfis ionosféricos estimados com a MART, pelo IRI, e a partir das ionossondas (Seção 6.3). Por fim, são apresentados representações da ionosfera sobre o setor brasileiro (Seção 6.4).

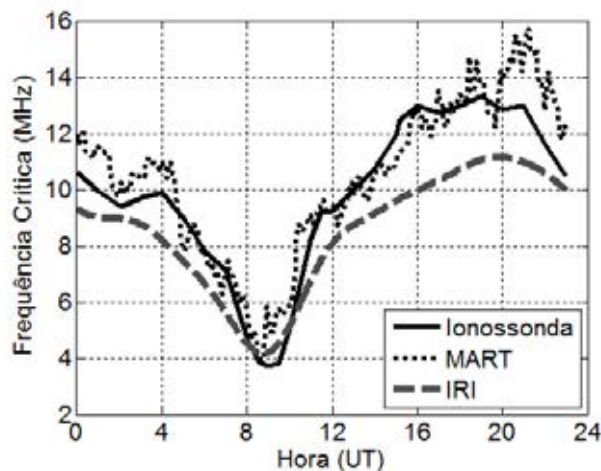
Todas as análises foram realizadas com as seguintes configurações de processamento: parâmetros da forma da Terra definidos pelas convenções do IERS (*International Earth Rotation and Reference System Service*); ITRF2008 (*International Terrestrial Reference Frame 2008*) como referencial adotado (PROL et al., 2014); observações de código C/A e P2; satélites da constelação GPS e GLONASS; máscara de elevação de 20°; órbitas precisas do IGS; DCBs estimados pelo método apresentado por Prol e Camargo (2014); minimização do ruído do código por meio do método de filtragem baseado em medidas Doppler (JIN, 1996); detecção de perdas de ciclo baseado no cálculo recursivo da ambiguidade da *widelane* (BLEWITT, 1990); algoritmo MART aplicado em uma grade de *voxels* com resolução de 4° por 4° em latitude por longitude e resolução vertical de 10 km em altitude; valores para a construção do *background* da ionosfera e da correção da plasmasfera foram calculados por meio do IRI2012, com o aplicativo disponibilizado em linguagem de

programação C/C++, disponível no seguinte endereço eletrônico: <http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/>. Para cada dia analisado, o IRI foi utilizado para a construção de um *background* distinto a cada 5 minutos.

6.1 Análise da Estimativa da Frequência Crítica

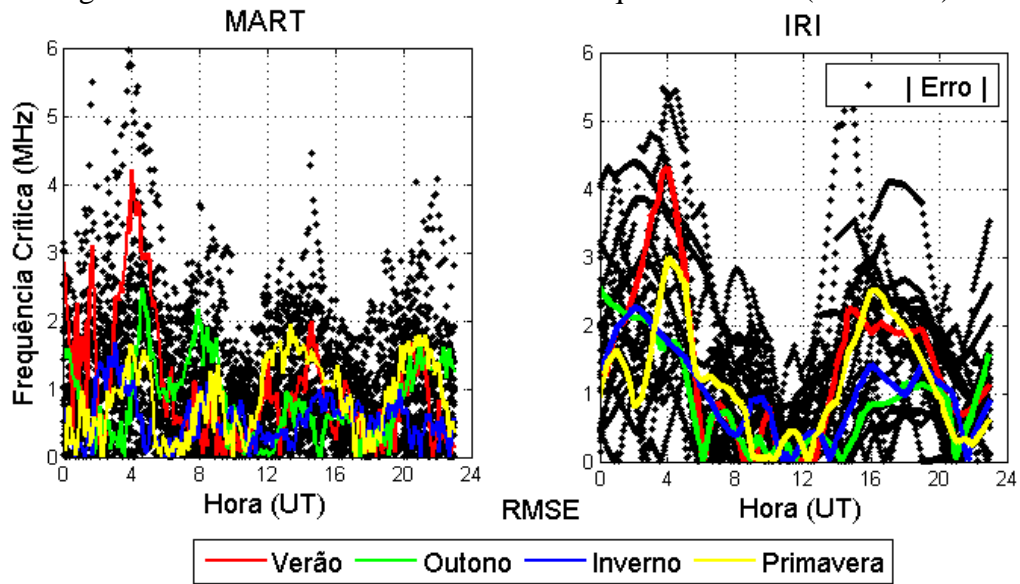
Na análise da estimativa da frequência crítica, valores de referência foram obtidos por meio das ionossondas e a estimativa da frequência crítica foi realizada com o algoritmo tomográfico para cada cinco minutos. Em instantes em que não foi possível reduzir os dados advindos dos ionogramas, fez-se uma interpolação linear. A Figura 29 apresenta um resultado comparativo entre a frequência crítica observada por meio da ionossonda localizada em Boa Vista, com o modelo IRI2012 e a estimada com o algoritmo tomográfico.

Figura 29 – Frequência crítica para a ionossonda em Boa Vista (dia 22/08/2013).



Nota-se uma melhor concordância do valor observado pela ionossonda com o estimado pela MART, em comparação com o IRI, em grande parte dos horários, apesar de uma melhor estimativa do IRI para instantes entre 8 e 10 horas UT. A fim de verificar a qualidade da frequência crítica estimada para diferentes dias, calculou-se o RMSE de cada instante observado para todos os dias analisados. A Figura 30 apresenta os resultados obtidos para a ionossonda localizada em Boa Vista, onde os pontos pretos representam o módulo da diferença entre o valor estimado por meio da tomografia (ou calculado pelo IRI) e o valor de referência.

Figura 30 – Módulo do erro e RMSE da frequência crítica (Boa Vista).



Percebe-se um melhor desempenho do método de tomografia em comparação com o IRI, em que o RMSE com a tomografia é inferior a 2 Mhz para grande parte das estimativas. O mesmo experimento foi realizado para as ionossondas localizadas em Fortaleza, São Luis e São José dos Campos, resultando nas Figuras 31, 32 e 33.

Figura 31 – Módulo do erro e RMSE da frequência crítica (Fortaleza).

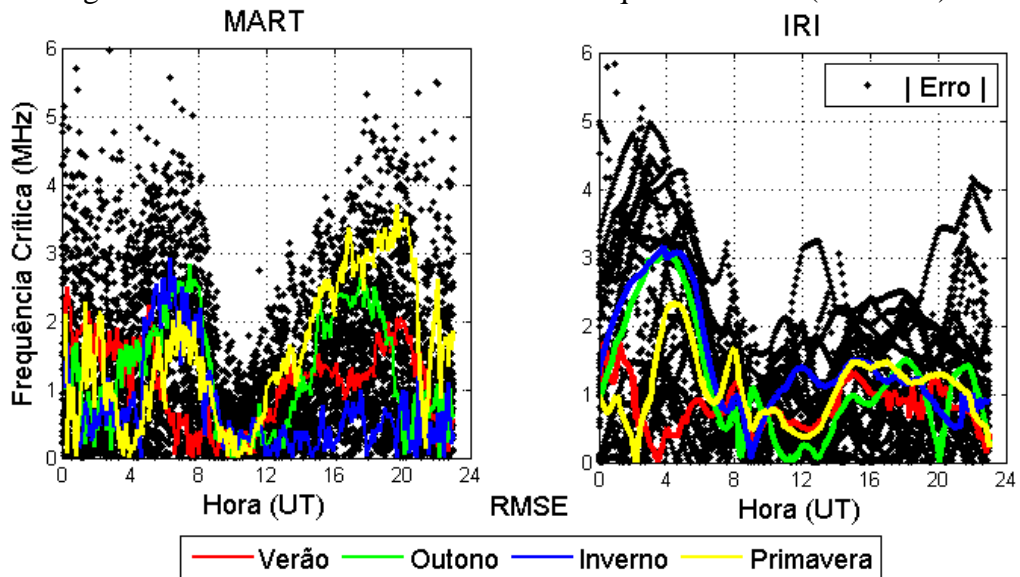


Figura 32 – Módulo do erro e RMSE da frequência crítica (São Luis).

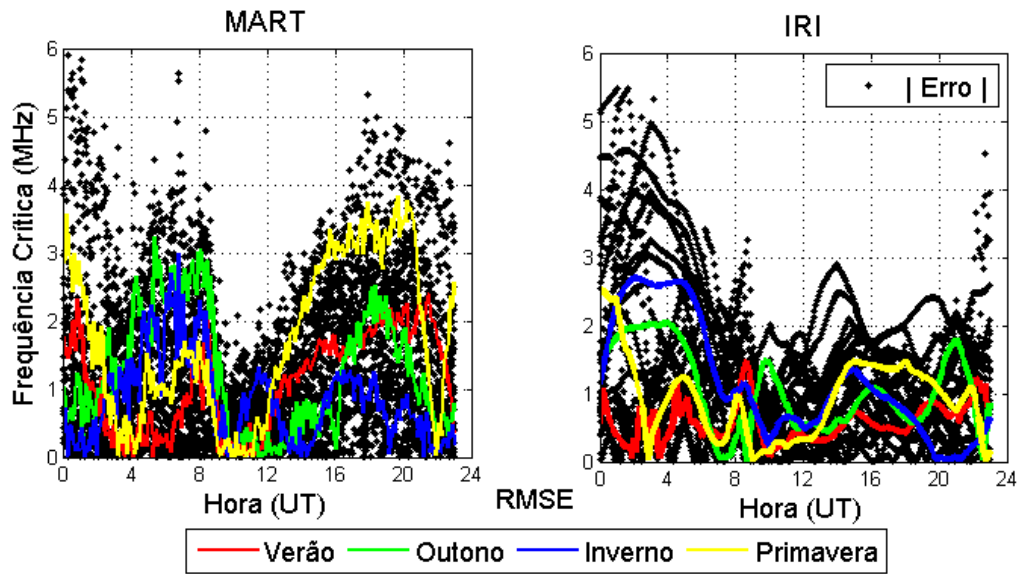
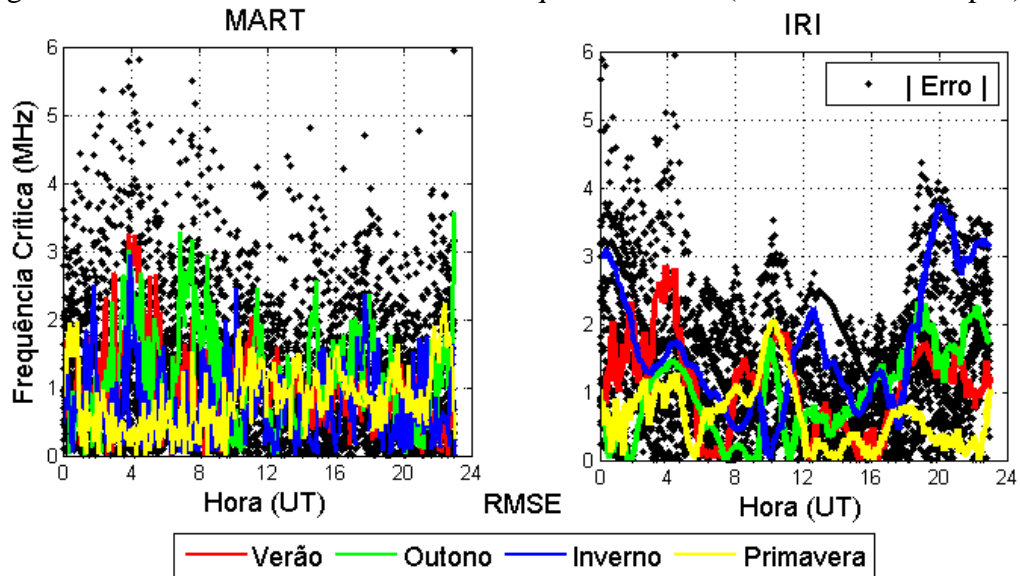


Figura 33 - Módulo do erro e RMSE da frequência crítica (São José dos Campos).



Os resultados das Figuras 31 e 32 mostram que a técnica de tomografia empregada para Fortaleza e São Luis apresentou maiores valores de RMSE em comparação aos valores calculados com o IRI para grande parte das estimativas. Vale destacar que estes maiores valores são devidos à própria distribuição das estações GNSS, onde as ionossondas localizadas em Fortaleza e São Luis coincidem com as regiões onde são utilizados sinais projetados com poucas diferenças de direção em relação à grade do sistema tomográfico. Nestes casos, foram utilizados muitos sinais projetados em direção ao Oceano Atlântico, pois não há estações GNSS localizadas fora da região continental e próxima do setor brasileiro,

tornando o sistema tomográfico não adequado para tais localidades. Em contrapartida, as ionossondas localizadas em Boa Vista e São José dos Campos mostraram menores valores de RMSE, pois estão sob uma região de melhor desempenho da MART em comparação com Fortaleza e São Luis. Vale destacar altos valores de RMSE da MART em comparação ao IRI para os instantes entre 07 e 10 horas UT para o Outono, em todas as ionossondas. Estes instantes coincidem com o amanhecer local, quando os raios solares incidem primeiramente nas altitudes superiores da atmosfera, de forma que as medidas de TEC aumentam antes que ocorra um aumento na frequência crítica da ionosfera. Adicionalmente, se percebe uma maior variação nos valores de RMSE para São José dos Campos, pois esta ionossonda é localizada sobre a crista Sul da EIA, onde as observações GNSS são afetadas com maior intensidade pelas irregularidades ionosféricas.

A Tabela 2 apresenta um resumo do desempenho do algoritmo de tomografia para a estimativa da frequência crítica sobre o setor brasileiro. O RMSE e a porcentagem média ($\bar{P}_{\%}$) de acerto na estimativa da frequência crítica foram calculados com todos os dados da respectiva ionossonda. A porcentagem de acerto foi calculada por meio da seguinte expressão: $P_{\%} = 100 (1 - |1 - (f_c^{MART} / f_c^{Iono})|)$, em que f_c é a frequência crítica estimada pelo método de tomografia (*MART*) e observada pela ionossonda (*Iono*).

Tabela 2 – RMSE (em Mhz) e porcentagem média de acerto do algoritmo de tomografia para a estimativa da frequência crítica.

Estação do ano Ionossonda	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	RMSE	$\bar{P}_{\%}$	RMSE	$\bar{P}_{\%}$	RMSE	$\bar{P}_{\%}$	RMSE	$\bar{P}_{\%}$
Boa Vista	1,66	88,92	1,13	88,69	1,06	86,62	1,48	89,10
Fortaleza	1,76	83,98	1,69	76,02	1,40	77,08	1,85	84,39
São Luis	1,81	82,18	1,62	74,91	1,35	76,92	2,09	83,23
São José dos Campos	1,52	87,25	1,89	67,48	1,35	72,95	1,41	88,35

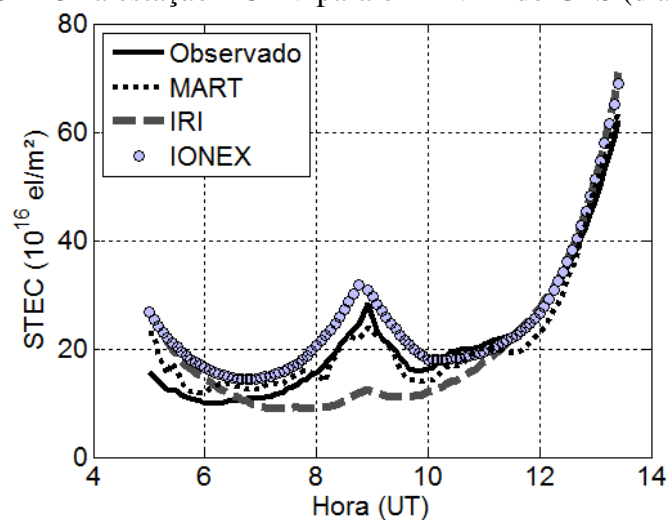
Em geral, o RMSE apresenta menores valores para o Inverno e uma maior porcentagem de acerto na estimativa da frequência crítica para o Verão e para a Primavera. Isto ocorre, pois a porcentagem do acerto considera as variações da frequência crítica observada pela ionossonda. Uma vez que há maiores valores da frequência crítica durante a Primavera e Verão, o RMSE tende a ser maior nestas épocas do ano. Portanto, apesar de um RMSE maior, o algoritmo de tomografia mostrou, em geral, uma eficiência similar na estimativa da frequência crítica para as diferentes estações do ano. Ao realizar uma comparação entre as ionossondas, verifica-se uma diferença no RMSE devido às localizações

das ionossondas, onde Boa Vista apresentou um RMSE médio igual a 1,33 MHz e São José dos Campos de 1,54 MHz, enquanto Fortaleza e São Luis apresentaram um RMSE médio superior, de 1,68 MHz e 1,72, respectivamente. Desta forma, a técnica de tomografia empregada permite realizar a estimativa da frequência crítica para diferentes condições das estações do ano, porém os resultados podem ser degradados devido à geometria das estações GNSS no entorno da posição em que se pretende mapear a ionosfera.

6.2 Análise da Estimativa do STEC

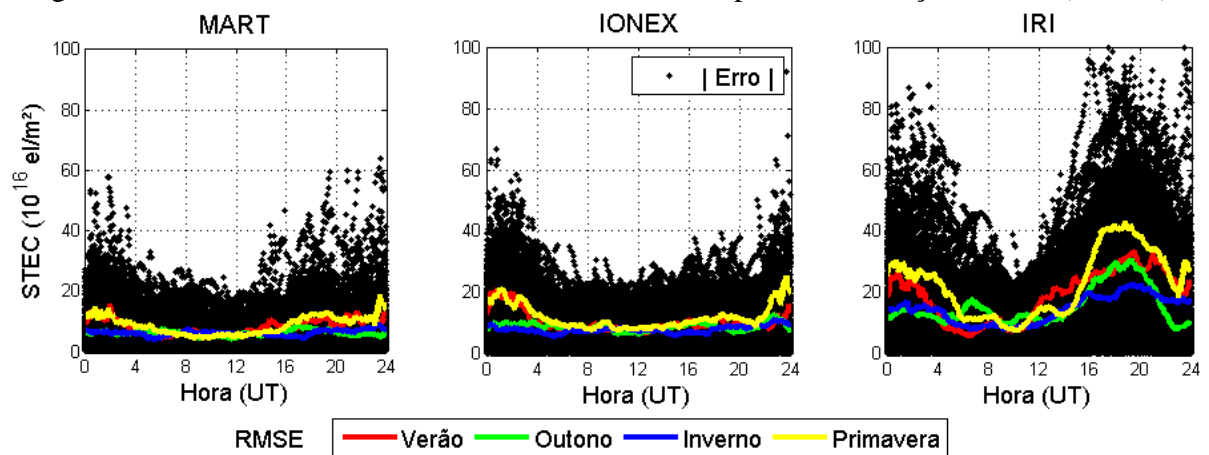
A partir do algoritmo tomográfico, é possível estimar a densidade eletrônica para diversas altitudes da ionosfera e, portanto, reconstruir o TEC inclinado (STEC) considerando-o como uma somatória finita da densidade eletrônica multiplicada pela distância do percurso do sinal GNSS ao interceptar os limites dos *voxels* do sistema tomográfico (Equação 9). A Figura 34 apresenta um resultado comparativo para mostrar a reconstrução do STEC por meio da tomografia. Os valores de referência são considerados os valores de STEC observados para a estação BOAV da RBMC (localizada em Boa Vista) e os valores do IONEX foram obtidos a partir dos Mapas Globais da Ionosfera disponibilizados pelo CODE, em que a função geométrica padrão foi utilizada para converter o VTEC em STEC. Além destes, fez-se o cálculo do STEC a partir do IRI, integrando a densidade eletrônica obtida pelo modelo ao longo do percurso do sinal GNSS. O satélite selecionado da constelação GPS foi o PRN (*Pseudo Random Noise*) 14.

Figura 34 – STEC na estação BOAV para o PRN 14 do GPS (dia 25/08/2013).



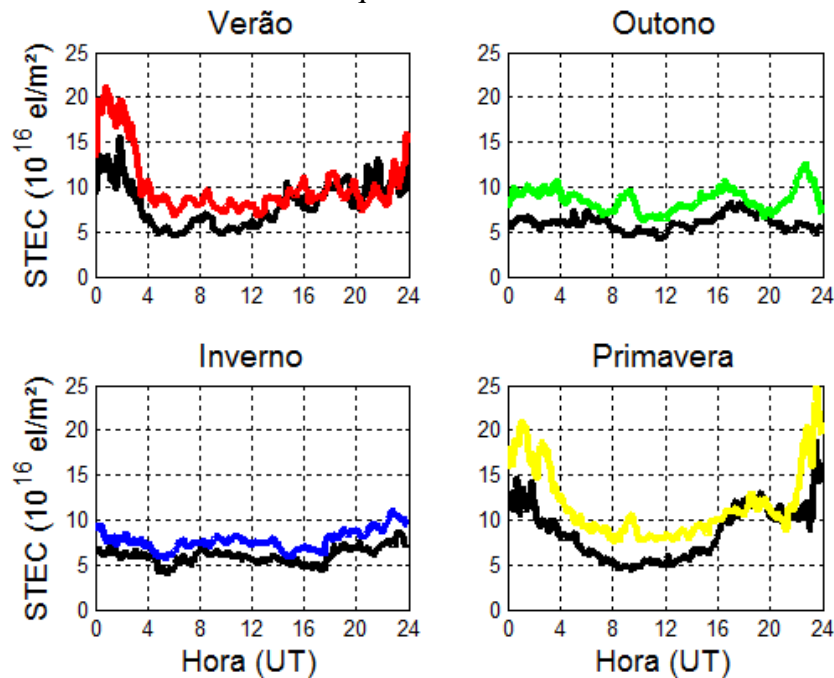
Nota-se que o STEC estimado por tomografia se manteve mais próximo ao valor de referência em comparação com o STEC calculado por meio do IONEX e pelo IRI. A fim de determinar a qualidade da estimativa do STEC para todos os dias analisados, bem como para todos os satélites rastreados da constelação GPS e GLONASS, calculou-se o erro e o RMSE horário do STEC para a técnica de tomografia, para o IRI2012 e para o IONEX. Os resultados são apresentados na Figura 35, onde o erro, em módulo, são os pontos pretos e representam todas as estimativas utilizadas na análise.

Figura 35 – Módulo do erro e RMSE horário do STEC para cada estação do ano (BOAV).



A partir de todos os valores estimados, o RMSE calculado foi de 7,92, 9,88 e 21,71 unidades de STEC para o modelo tomográfico, o IGS e o IRI, respectivamente, mostrando um melhor desempenho do modelo de tomografia. Nas primeiras horas do dia, até aproximadamente 12 horas UT, é possível notar na Figura 35 que o método de tomografia apresentou os menores valores de RMSE para todas as estações do ano. Contudo, para alguns instantes, maiores valores de RMSE foram estimados pela tomografia para as estações do ano de Primavera e Verão, ao se comparar com o RMSE calculado com os arquivos IONEX do CODE. Mais detalhes desta comparação são apresentados na Figura 36. As análises foram realizadas para o RMSE em cada respectiva estação dos anos de 2013 e 2014 e os resultados do IRI não foram inseridos, visto os altos valores.

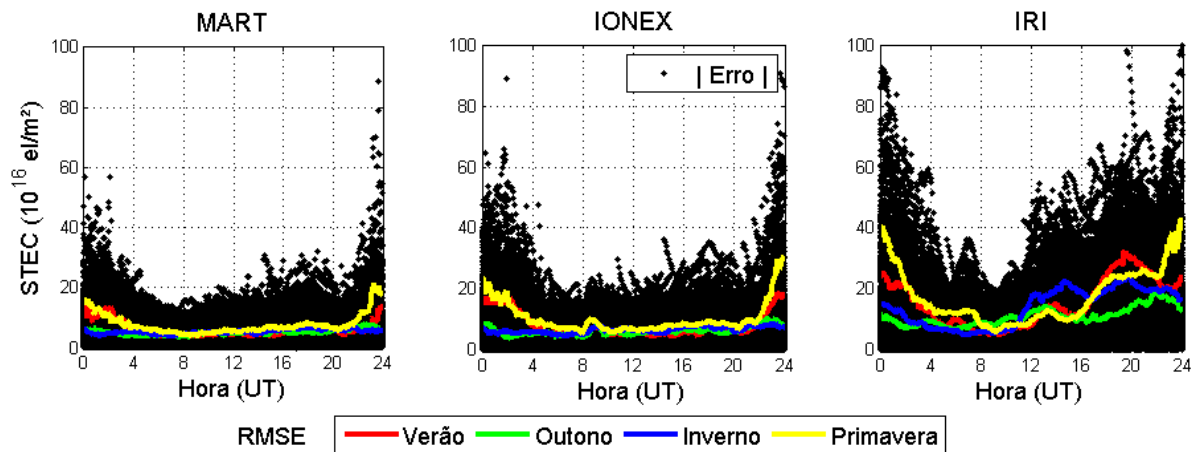
Figura 36 - RMSE horário do STEC para cada estação do ano (BOAV). As linhas pretas se referem às estimativas com a MART e as outras representam os valores de RMSE para os arquivos IONEX.



Verifica-se que o método de tomografia apresentou menores valores de RMSE para grande parte dos instantes analisados. Contudo, uma principal degradação do método de tomografia ocorre para os instantes entre 16 e 22 horas UT. Horários estes que coincidem com as 13 e 19 horas locais (LT - *Local Time*) e, conseqüentemente, atingem os maiores valores de TEC. Desta forma, o método tomográfico apresentou os melhores resultados para instantes com menores valores de TEC.

Ademais, apesar de o método de tomografia apresentar melhores resultados aos mapas do IGS na estimativa do STEC para a estação BOAV, esta ainda não está situada sobre a região de melhor desempenho do algoritmo tomográfico para o setor brasileiro. Com isto, fez-se a estimativa do STEC para a estação BRAZ (localizada em Brasília), situada em região onde o algoritmo tomográfico apresentou um dos melhores desempenhos a partir de observações simuladas (Figura 37).

Figura 37 – Módulo do erro e RMSE horário do STEC para cada estação do ano (BRAZ).



A partir dos valores estimados, o RMSE calculado foi de 6,45, 8,30 e 17,24 unidades STEC para o modelo tomográfico, o IGS e o IRI, respectivamente, mostrando, também, um melhor desempenho do modelo de tomografia. Uma comparação entre o STEC estimado pelo algoritmo tomográfico e o calculado a partir do arquivo IONEX do CODE é apresentada na Figura 38. Vale ressaltar que nesta análise, as observações GNSS da estação BRAZ foram utilizadas na reconstrução tomográfica, tornando evidente a melhor eficiência da tomografia em comparação com o mapa IONEX do CODE, o qual também utiliza observações da estação BRAZ na modelagem global. Além desta, uma segunda análise é apresentada na Figura 39, onde as observações GNSS da estação BRAZ não foram inseridas na reconstrução tomográfica.

Figura 38 - RMSE horário do STEC para cada estação do ano (BRAZ). As linhas pretas se referem às estimativas com a MART e as outras representam os valores de RMSE para os arquivos IONEX.

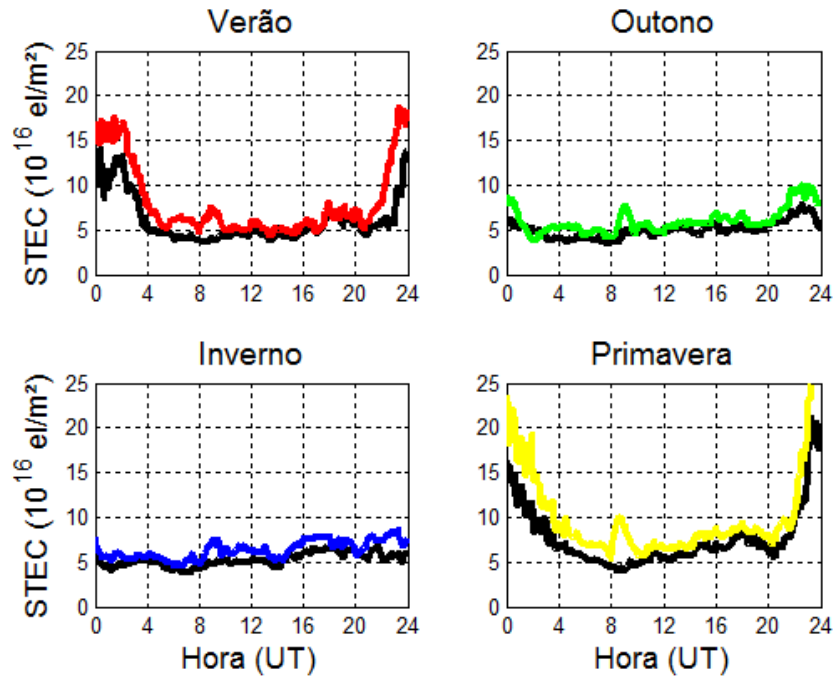
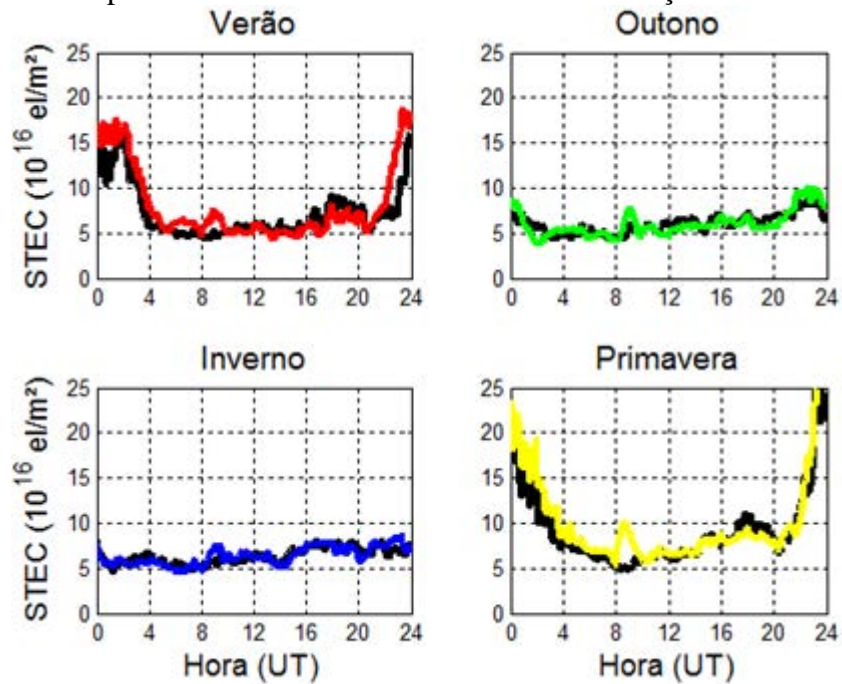
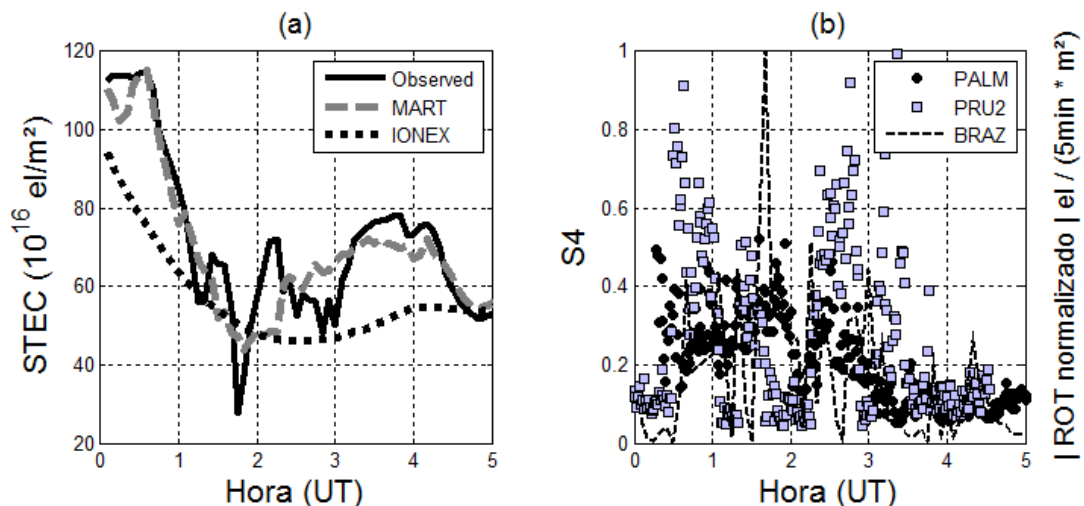


Figura 39 - RMSE horário do STEC para cada estação do ano (BRAZ). O STEC foi estimado por meio da tomografia (linhas pretas) sem utilizar observações GNSS de BRAZ. Enquanto o STEC a partir do IONEX foi estimado com observações de BRAZ.



De forma geral, nota-se que, em todos os instantes, o RMSE tende a ser menor para o algoritmo tomográfico, em comparação ao calculado a partir do IONEX - CODE, apresentando que a técnica proposta foi eficiente na estimativa do STEC com menor RMSE aos mapas ionosféricos do IGS. Ademais, os maiores valores de RMSE foram calculados para os instantes entre as 00 e 04 horas UT e entre as 22 e 24 horas UT, instantes que coincidem com evidências de cintilações no sinal GNSS devido às irregularidades da ionosfera. Nestes instantes, o algoritmo tomográfico apresentou os menores valores de RMSE em comparação ao IONEX, indicando que a técnica tomográfica detectou algumas irregularidades da ionosfera. Um exemplo do comportamento do STEC observado e reconstruído para um instante com irregularidades é apresentado na Figura 40. Nesta Figura, são apresentadas evidências de que houve cintilação a partir dos elevados valores do índice S4 em duas estações pertencentes à rede de estações monitoras de cintilação ionosférica (ISM - *Ionospheric Scintillation Monitor*) do projeto CALIBRA (*Countering GNSS High Accuracy Applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*). Foram utilizadas as estações PRU2 (Presidente Prudente) e PALM (Palmas), que fazem parte do projeto CALIBRA, pois são as estações mais próximas de BRAZ que proporcionaram o índice S4 para o dia analisado. Além do índice S4, a Figura 40 apresenta em linha tracejada, o módulo da taxa de variação do TEC (ROT - *Rate of TEC*) normalizado em relação ao maior valor de ROT calculado para os respectivos instantes analisados para a estação BRAZ e para o satélite PRN 1 da constelação GPS.

Figura 40 – Estimativa do STEC para instante com irregularidades na ionosfera. A Figura (a) apresenta o STEC para a estação BRAZ. A Figura (b) apresenta o S4 observado para PALM e PRU2, bem como o módulo da normalização do ROT para a estação BRAZ (dia 20/02/2014 para o satélite PRN 1 do GPS).

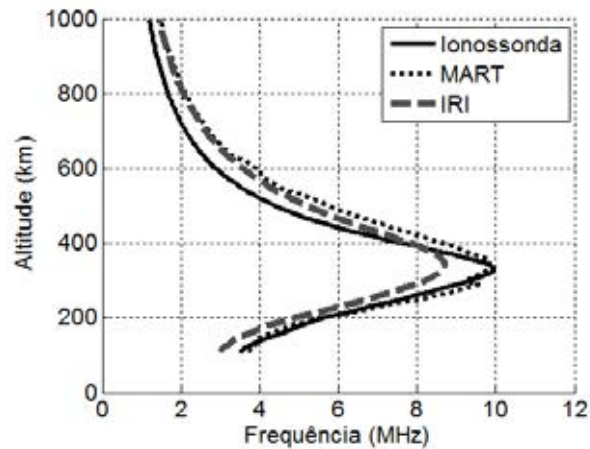


Desta forma, em instantes com irregularidades da ionosfera, a técnica utilizada para tomografia da ionosfera apresentou melhor desempenho aos mapas de ionosfera do CODE.

6.3 Comparação entre Perfis Ionosféricos

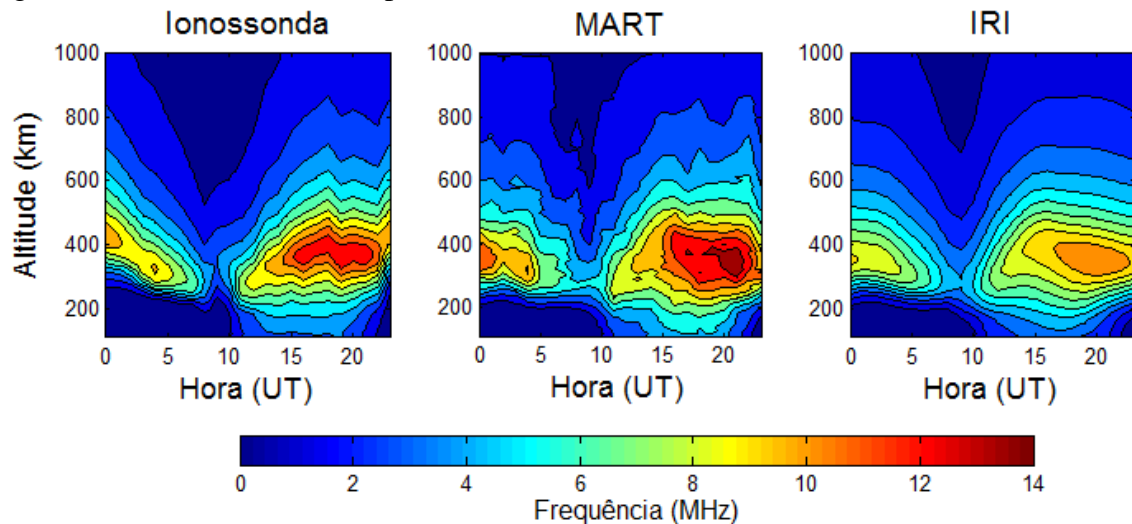
Esta seção apresenta as comparações entre os perfis ionosféricos observados com as ionossondas, calculados pelo IRI e os estimados a partir da tomografia da ionosfera. Os perfis obtidos por meio das ionossondas foram construídos a partir dos seguintes parâmetros disponibilizados pelo EMBRACE: foF2, foF1, foE, hmF2, hmF1, hmE, B0, B1 e M(3000)F2. Estes parâmetros foram utilizados para construir os perfis das ionossondas a partir das funções do IRI, permitindo calcular valores da frequência de reflexão da ionosfera para as altitudes superiores à altitude de pico. A Figura 41 apresenta uma comparação entre o perfil obtido a partir da ionossonda localizada em Boa Vista, calculado pelo modelo do IRI e estimado por tomografia. Nestas análises, apenas a ionossonda localizada em Boa Vista foi utilizada, pois está localizada em uma região com melhor desempenho da MART em comparação com as ionossondas de Fortaleza e São Luis (Seção 6.1) e porque foram obtidos apenas parâmetros de foF2 para a ionossonda localizada em São José dos Campos. No caso das regiões de pior desempenho da MART, os perfis ionosféricos assemelham-se aos perfis determinados pelo *background* da ionosfera (IRI), pois a geometria de estações GNSS não é adequada para a reconstrução tomográfica, tornando muitos *voxels* da grade não iluminados (ou iluminados por sinais com similares inclinações). Portanto, as regiões de pior desempenho da MART não foram incluídas nas análises.

Figura 41 – Perfis ionosféricos para a ionossonda localizada em Boa Vista (dia 22/08/2013 – 13 UT).



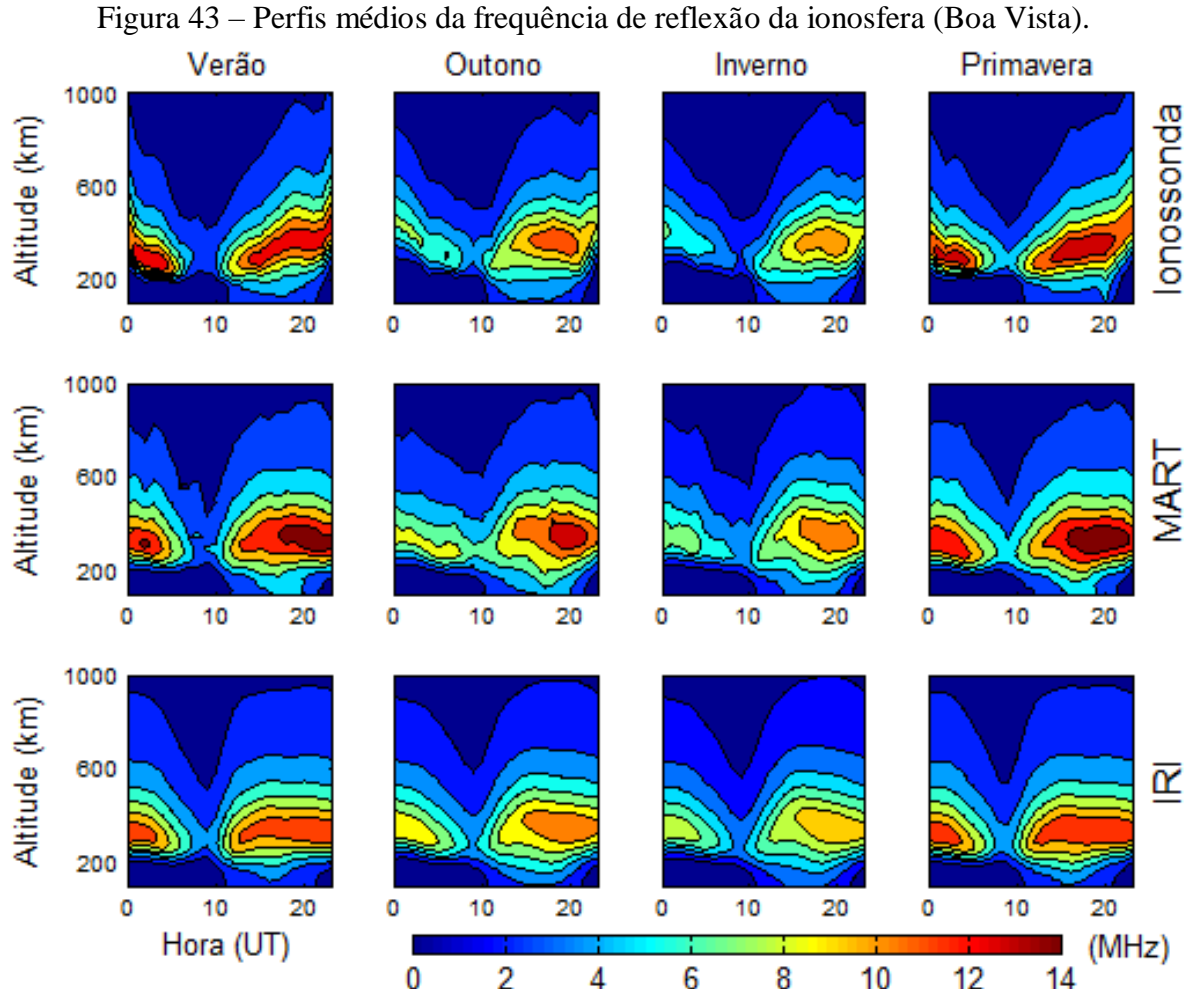
Verifica-se uma maior diferença entre a técnica MART e o modelo do IRI para altitudes próximas da altitude de pico, em que a MART obteve maior concordância com o perfil obtido pela ionossonda. Uma visualização diária da comparação dos perfis ionosféricos é apresentada na Figura 42, onde se nota que a reconstrução tomográfica, bem como a ionossonda, detectou maiores valores de densidade eletrônica em relação ao IRI para o correspondente dia.

Figura 42 - Perfis ionosféricos para a ionossonda localizada em Boa Vista (dia 22/08/2013).



Em relação às altitudes superiores à altura do pico, o perfil obtido por meio da ionossonda não é considerado como um valor de referência, pois não há observações de frequência refletida. Porém, a fim de verificar se há consideráveis diferenças entre os modelos e a tomografia, as altitudes superiores são apresentadas nas análises visuais. Neste sentido, a

Figura 43 apresenta o perfil médio de cada horário, calculado para cada estação do ano dos dias analisados em Boa Vista.



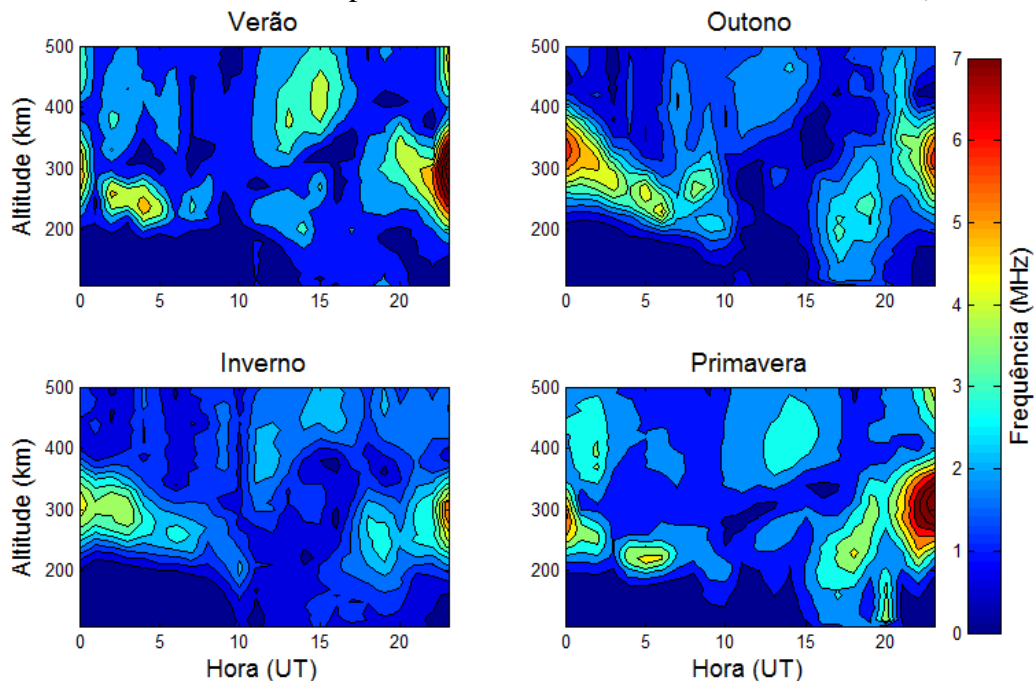
De forma geral, nota-se que o modelo de tomografia detectou variações diárias na ionosfera, indicando maiores valores de frequência do que o IRI, quando a ionossonda também indicou maior valores ao IRI. O inverso também foi verificado, em que a MART apresentou menores valores de densidade eletrônica do que o IRI, quando a ionossonda também indicou menores valores ao IRI. Contudo, nos casos em que tanto a ionossonda quanto a MART apresentam maior densidade eletrônica, a MART superestimou os valores de frequência, principalmente, nas altitudes de pico dos perfis ionosféricos. Isto pode ser explicado, pois a ionossonda não realiza medidas em altitudes superiores à altitude de pico, enquanto o TEC considera a densidade eletrônica por todo o percurso do sinal GNSS. Desta forma, uma maior densidade eletrônica nas altitudes superiores da ionosfera aliada à

limitação da geometria do GNSS e à correção da Plasmasfera pelo IRI, proporcionou uma superestimação da densidade eletrônica para as altitudes de pico da ionosfera.

Dentre as estações dos anos, verifica-se que os perfis obtidos pela MART no Inverno são mais próximos aos perfis da ionossonda, em comparação com o IRI. Durante o Verão, houve uma superestimação da frequência para a MART. Além disso, no período entre 10 e 20 horas UT do Verão, os perfis observados pela ionossonda possuem um achatamento não representado nos mapas obtidos pela MART. Contudo, o achatamento nos perfis de ionossonda para a estação de Outono (nos instantes entre 00 e 05 horas UT) foi detectado pela MART, o qual não foi representado pelo IRI. Em relação à altitude do pico da ionosfera, a tomografia manteve-se com valores próximos ao do IRI, não identificando a elevação da ionosfera, devido, p. ex., à deriva vertical.

No caso de análises quantitativas, é conveniente desconsiderar as altas altitudes da ionosfera, visto que as ionossondas não realizam observações nestas altitudes. Neste sentido, a Figura 44 apresenta o RMSE calculado para todos os dias analisados dos anos de 2013 e 2014, na localização da ionossonda de Boa Vista. O RMSE da frequência de reflexão foi calculado em cada hora do dia e para cada altitude (até 500 km) com o algoritmo de tomografia.

Figura 44 - RMSE horário dos perfis ionosféricos estimados com a MART (Boa Vista).

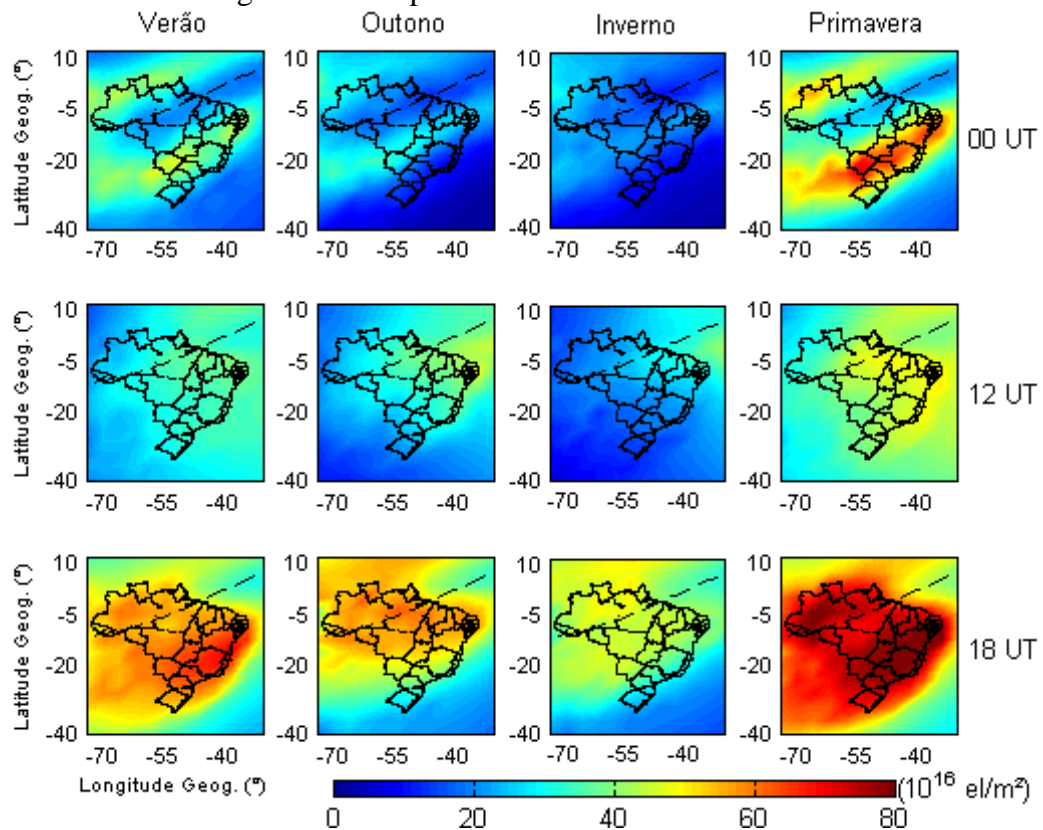


Na Figura 44, nota-se um maior valor de RMSE para os horários entre 00 e 01 horas UT, bem como ao final do dia, após 21 horas UT. Ou seja, maiores erros ocorreram entre 18 e 22 horas locais. Estes maiores valores de RMSE são devidos à elevação da ionosfera em função da deriva vertical que ocorre no pôr do Sol. O modelo do IRI não proporcionou uma estimativa eficiente da altitude de pico da ionosfera para os instantes da deriva vertical para cima e esta altitude foi usada como *background* na reconstrução tomográfica. Devido às limitações do sistema tomográfico, a altitude de pico foi estimada com similar precisão à altitude de pico do IRI, proporcionando os maiores valores de RMSE nestas altitudes. Além disso, os menores valores de RMSE foram calculados durante o Inverno. No Outono, observaram-se maiores valores de RMSE nos instantes após o pôr do Sol e, em contra partida, no Verão e na Primavera, maiores valores de RMSE foram observados durante o dia. De forma geral, o RMSE se manteve abaixo de 2 MHz para as diferentes altitudes, porém com alguns valores entre 3 e 5 MHz nas altitudes próximas ao pico da frequência crítica, e máximos valores de RMSE nos instantes do pico de pré-reversão.

6.4 Representação da Ionosfera sobre o Setor Brasileiro

Nesta seção são apresentadas algumas representações da ionosfera sobre o setor brasileiro a partir do algoritmo tomográfico desenvolvido. Na Figura 45 são apresentados mapas médios de VTEC, com o intuito de visualizar a variação latitudinal e longitudinal da ionosfera para as diferentes estações dos anos de 2013 e 2014. Esta figura apresenta mapas médios de VTEC para todos os dias utilizados nos experimentos. São apresentados instantes com irregularidades ionosféricas (00 UT), após o nascer do Sol (12 UT) e instantes de máximo diário (18 UT).

Figura 45 – Mapas médios diários de VTEC.



Durante a Primavera, a ionosfera apresentou maior variabilidade, se comparado com as demais estações do ano. Vale lembrar que a posição zenital do Sol incide diretamente sobre a região analisada para esta época do ano (a Primavera marca o equinócio da passagem do Sol para o hemisfério Sul). Ademais, em comparação com o Verão, a atividade solar foi mais intensa durante a Primavera, tendo um marco principal quando foi detectado a maior mancha solar do ciclo 24 em Outubro de 2014. Verifica-se ainda, uma intensificação da EIA para os instantes próximos às 00 horas UT para todas as estações do ano, sendo mais evidenciado o efeito fonte durante a Primavera devido à maior atividade solar.

Apesar de descrever de forma resumida a variabilidade ionosférica para os dias dos experimentos, os mapas médios de VTEC apresentam uma suavização do comportamento ionosférico, atenuando as irregularidades. Neste sentido, com o intuito de representar as variações diárias da ionosfera, as Figuras 46 e 47 apresentam os mapas diários de VTEC, reconstruídos a partir da MART para dois dias: um no Inverno (22/08/2013) e outro na Primavera (16/10/2014).

Figura 46 – Mapas de VTEC para o dia 22/08/2013 (Inverno).

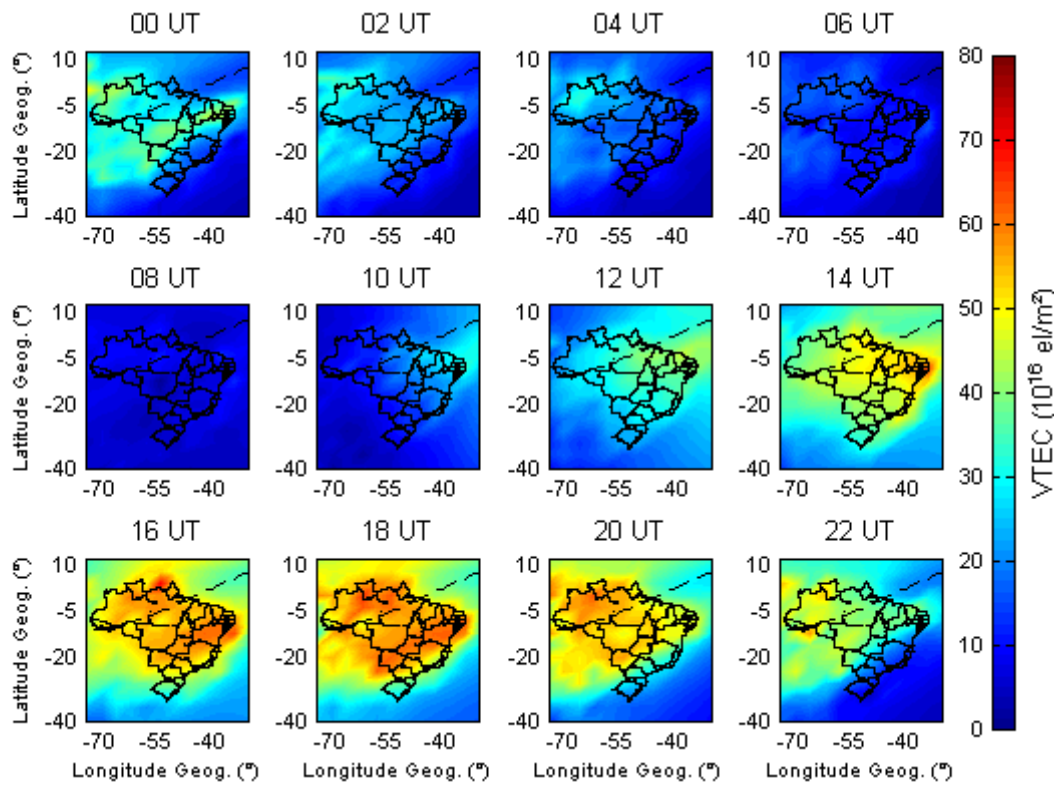
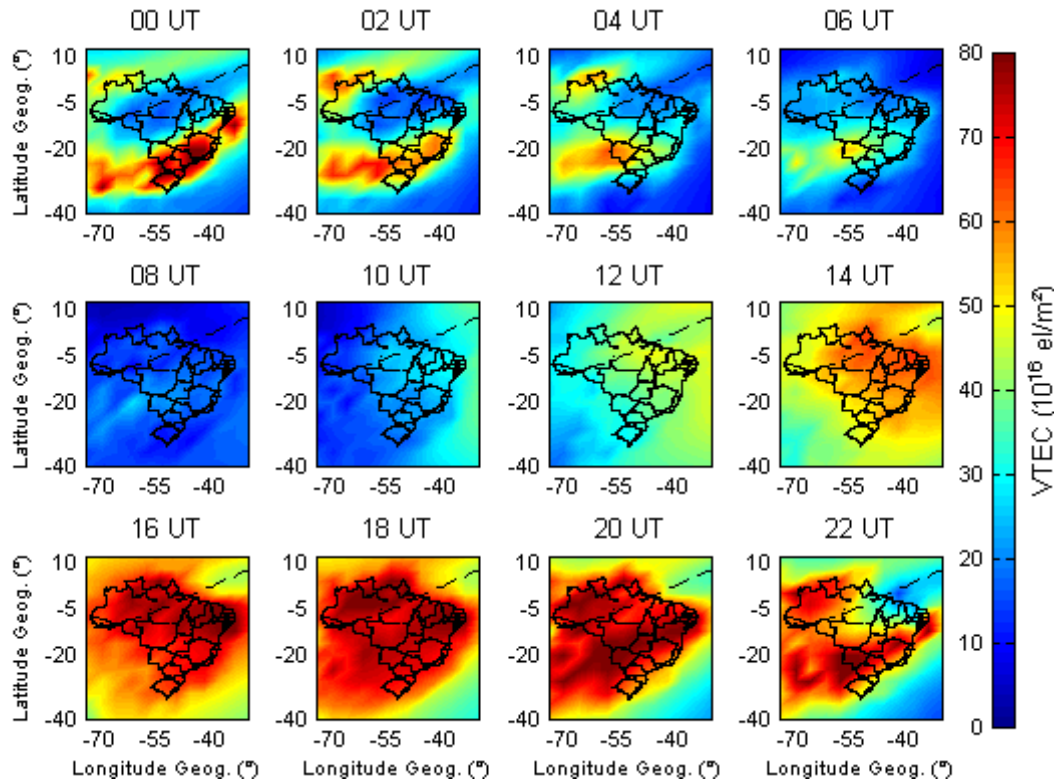


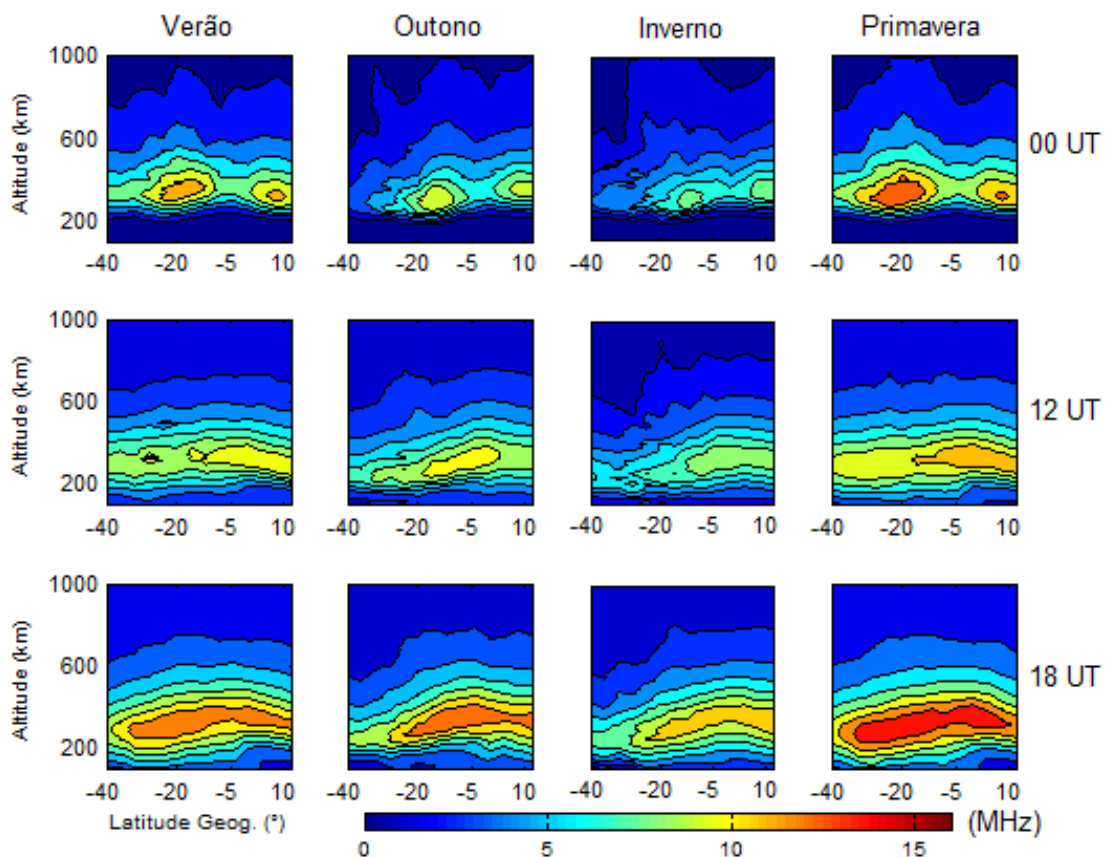
Figura 47 - Mapas de VTEC para o dia 16/10/2014 (Primavera).



Verifica-se que o VTEC atinge mínimos valores próximos ao período de 08 horas UT e máximos valores próximos ao período de 18 horas UT, estando de acordo o esperado, em que a máxima ionização ionosférica ocorre por volta de 14 horas locais e a mínima em torno de 05 horas locais. Destaca-se que grande parte das regiões mapeadas é situada na zona GMT (*Greenwich Mean Time*) -03 horas UT. A EIA se apresentou com maior intensidade no dia analisado para a Primavera, principalmente nos períodos entre 22 e 04 horas UT. Sendo estes instantes mais favoráveis para a ocorrência de cintilações nos sinais GNSS devido às irregularidades ionosféricas. Ademais, os valores máximos de VTEC para o dia de Inverno foram estimados em torno de 55 TECU, enquanto que para o dia de Primavera obteve-se cerca de 80 TECU.

Além dos mapas de VTEC, a tomografia permite analisar o comportamento da ionosfera nas diversas altitudes. Para tanto, a Figura 48 apresenta médias das seções longitudinais (latitude por altitude) para os mesmos instantes analisados na Figura 45. Foi utilizada a longitude de 50° W, visto que esta região obteve bom desempenho da tomografia com observações simuladas e permite analisar a crista Sul da EIA.

Figura 48 – Médias diárias da frequência de reflexão da ionosfera para seção longitudinal em 50° W com o algoritmo MART.



Da mesma maneira que nos mapas médios de VTEC, durante a Primavera observou-se maior densidade eletrônica e no Inverno verificou-se os menores valores, em comparação com as outras estações do ano. Nota-se uma intensificação da EIA para 00 horas UT, evidenciando a presença das cristas Norte e Sul da EIA, devido a deriva vertical para cima após o pôr do Sol. A partir do ponto de vista propiciado pela tomografia em seções longitudinais, verifica-se que a ionosfera se eleva para maiores altitudes durante o anoitecer, enquanto a ionosfera retorna para altitudes mais baixas em outros instantes. Além disso, uma inclinação vertical ocorre nos períodos de 12 e 18 horas UT, em que, a ionosfera possui uma menor elevação nas latitudes mais ao Sul do setor brasileiro, em comparação com a ionosfera equatorial. Mais detalhes das variações diárias da ionosfera para seções latitudinais podem ser analisados nas Figuras 49 e 50.

Figura 49 - Frequência de reflexão da ionosfera para a seção longitudinal em 50° W no dia 22/08/2013 (Inverno).

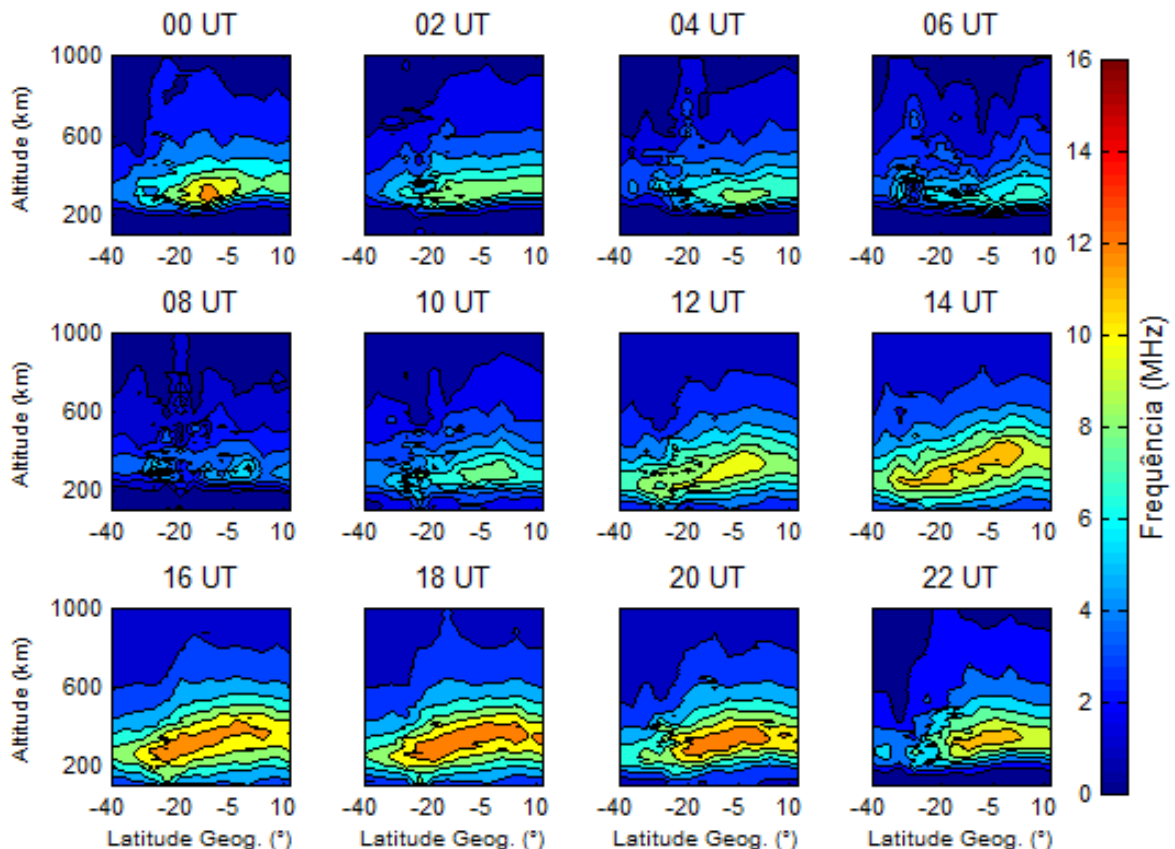
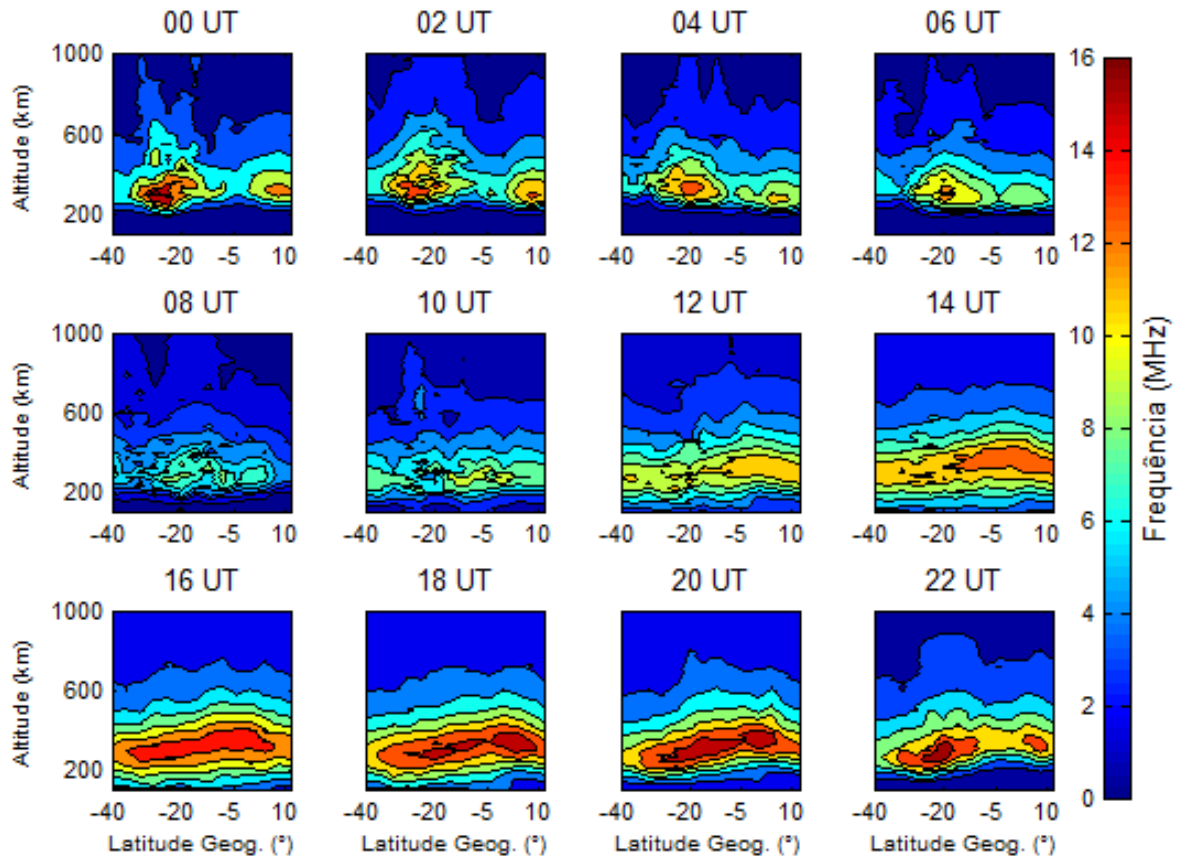


Figura 50 – Frequência de reflexão da ionosfera para a seção longitudinal em 50° W no dia 16/10/2014 (Primavera).



Nos mapas diários (Figuras 49 e 50), a crista Sul da EIA se eleva para altitudes superiores após 22 horas UT (19 horas locais), retornando para altitudes mais baixas próximo de 06 horas UT (03 horas locais). Durante o inverno, o pico da altitude da ionosfera foi estimado em torno de 300 km e 350 km para a noite. Ao longo do dia do Inverno, há uma considerável variação da altitude do pico de acordo com a variação em latitude, onde a altitude de pico é calculada em aproximadamente 300 km e 350 km no equador geomagnético e a altitude de pico é estimada entre aproximadamente 200 km e 300 km para baixas latitudes. Já durante a Primavera, há uma elevação da altitude de pico em comparação com o Inverno. Durante o dia de Primavera, a altitude de pico da ionosfera se mantém entre 350 km e 400 km, com um aumento da altitude de pico para a região do equador. Entretanto, durante o anoitecer, o pico da ionosfera foi estimado em elevadas altitudes para as diferentes latitudes, evidenciando uma intensificação da deriva vertical que, por sua vez, pode conduzir a geração de irregularidades. Por exemplo, em 00 horas UT, a altitude de pico foi representada em altas altitudes, próximo a 400 km, bem como fora evidenciado uma intensificação da EIA e a presença de irregularidades nos mapas de VTEC. Além disso, durante a noite, verifica-se uma

maior concentração de densidade eletrônica próximo a região de pico da ionosfera, o que pode ser explicado com o desaparecimento da região E e camada F_1 nestes instantes.

Assim, verifica-se a facilidade de interpretação do comportamento da ionosfera utilizando os algoritmos tomográficos, apresentando tanto as variações horizontais quanto verticais da ionosfera, bem como algumas irregularidades da ionosfera. Vale ressaltar que a altitude de pico foi reconstruída com grande similaridade ao que o IRI calcula, pois como analisado com observações simuladas, a tomografia possui limitações na estimativa do pico de altitude da ionosfera quando utilizando a geometria de estações GNSS localizadas na superfície terrestre. Contudo, como visto em seções anteriores, consideráveis diferenças são obtidas para os valores de TEC entre o modelo do IRI e o método de tomografia, tornando esta última de interesse para avaliação de, por exemplo, variações diárias da ionosfera.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou os conceitos empregados nas técnicas de reconstrução tomográfica da ionosfera a partir de observações advindas de uma rede de receptores GNSS. Foram apresentados os métodos baseados em funções (*function-based*) e os baseados em células (*grid-based*). Os baseados em funções já foram avaliados sobre o setor brasileiro em pesquisas anteriores; desta forma neste trabalho investigou-se a eficiência de dois dos principais métodos baseados em células (as técnicas ART e MART), bem como uma avaliação das técnicas algébricas sobre o setor brasileiro.

7.1 Conclusões

Os algoritmos ART e MART foram avaliados sobre diferentes casos com observações extraídas a partir de simulações da ionosfera. A técnica MART mostrou melhor desempenho em relação à ART e os resultados apresentaram que a MART é eficiente na reconstrução das variações da densidade eletrônica, exceto com uma principal limitação na estimativa das variações em altitude da ionosfera. Esta limitação ocorreu devido ao um número reduzido de sinais com inclinações no sentido horizontal em relação ao sistema tomográfico, visto que foram utilizadas observações de TEC considerando receptores GNSS localizados na superfície terrestre. Ademais, considerando a geometria disponibilizada pela rede de receptores da RBMC, da rede LISN e das estações do IGS localizadas na América do Sul, observações extraídas dos casos simulados permitiram aplicar as técnicas de tomografia da ionosfera para o setor brasileiro. A partir desta geometria, definiu-se uma grade ionosférica de 4° por 4° em latitude por longitude e resolução vertical de 10 km em altitude. Nesta grade de *voxels*, as técnicas tomográficas permitiram reconstruir a ionosfera com RMSE diário inferior a dois TECU nas melhores regiões dos casos simulados. Os maiores valores de RMSE foram identificados na costa brasileira, em consequência da inexistência de receptores pertencentes à RBMC, IGS ou LISN localizados no Oceano Atlântico e próximos ao Brasil. A seção longitudinal em 50° W foi então selecionada com uma região interessante para realizar análises sobre tomogramas, visto que possui uma das maiores densidades de receptores GNSS para diferentes latitudes, bem como permite analisar a crista Sul da Anomalia da Ionização Equatorial.

A partir de observações GNSS, o TEC foi estimado para diversas estações das redes RBMC, LISN e IGS. Foram selecionados 24 dias distribuídos ao longo dos anos de

2013 e 2014, anos que correspondem ao pico da atividade solar do ciclo 24. Assim, as análises da aplicação da MART sobre o setor brasileiro foram organizadas nas quatro estações do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera), cada uma com seis dias. Além das estações GNSS, utilizaram-se ionossondas localizadas sobre o território brasileiro, sendo três pertencentes ao INPE (São Luis, Fortaleza e Boa Vista) e uma pertencente à UNIVAP (São José dos Campos), para a validação de alguns parâmetros ionosféricos. Em comparação com a frequência crítica da região F2 da ionosfera (f_oF_2), a MART apresentou menor RMSE (1,35 MHz) em comparação com o RMSE do IRI (1,75 MHz) para a ionossonda localizada em Boa Vista. Em São José dos Campos, o RMSE da MART foi de 1,56 MHz e do IRI de 1,63 MHz. Nos demais casos (Fortaleza e São Luis) a estimativa da frequência crítica por meio da MART foi afetada pela localização das estações GNSS no entorno das ionossondas, tornando a quantidade de inclinações dos sinais GNSS não adequada para a reconstrução tomográfica. O RMSE estimado com a MART para a f_oF_2 foi de 1,68 MHz em Fortaleza e 1,74 MHz em São Luis e o RMSE calculado pelo IRI foi de 1,76 MHz em Fortaleza e 1,62 MHz em São Luis.

Além da f_oF_2 , fez-se uma análise de qualidade do perfil estimado por meio da MART sobre o setor brasileiro. Os resultados apresentaram maiores valores de RMSE para o Verão e Primavera e menores para o Inverno, sendo o RMSE maior quando foram estimados maiores valores de densidade eletrônica para os perfis ionosféricos. Notou-se que, independentemente da estação do ano, o RMSE se manteve maior (em torno de 3 a 5 MHz) nos instantes entre 21 e 01 horas UT. Isto, pois estes horários coincidem com os instantes que evidenciam uma intensificação da deriva vertical da ionosfera pelo pico de pré-reversão. Ademais, análises foram realizadas a fim de verificar a estimativa de perfis ionosféricos obtidos pelo IRI, com a MART e com a ionossonda localizada em Boa Vista. De forma geral, a MART foi mais eficiente que o IRI na representação de variações diárias da densidade eletrônica para os perfis ionosféricos, apesar de ambos não representarem as variações devido às elevações da ionosfera, como p. ex., a deriva vertical.

No caso do posicionamento GNSS, a tomografia da ionosfera permite estimar diretamente o STEC, sem a necessidade de utilizar uma função de mapeamento. Desta forma, experimentos foram realizados para comparar o STEC utilizando o algoritmo tomográfico com o STEC obtido de mapas do IGS, utilizando a função geométrica padrão. Vale ressaltar que a MART apresentou melhor desempenho na estimativa do STEC em comparação com o IRI. Este resultado já era esperado, pois observações de TEC foram

utilizadas nos modelos tomográficos, enquanto o IRI foi desenvolvido a partir de observações de outros parâmetros, tais como observações de foF2 e hmF2. Para as análises em comparação com os mapas do IGS (CODE), foram selecionadas duas estações da RBMC (BOAV e BRAZ). A estação BOAV foi selecionada, pois está próxima à localização da ionossonda Boa Vista, de forma que as observações de TEC foram determinadas como valores de referência para o cálculo do RMSE. No caso de BRAZ, esta foi selecionada por estar localizada sobre uma região em que houve um dos melhores desempenhos da MART quando utilizando observações simuladas. Os resultados mostraram que a tomografia proporcionou uma estimativa do STEC com menor RMSE do que os mapas de ionosfera do CODE para todos os dados analisados, exceto em alguns instantes com altos valores de STEC para a estação BOAV. Apesar de nestes instantes a diferença do RMSE entre o CODE e a MART ser inferior a 1,0 TECU, deduz-se que o sistema tomográfico foi afetado pela reduzida quantidade de estações GNSS no entorno da estação BOAV, os quais afetaram a estimativa do STEC. Conclui-se isto, pois a estação BRAZ apresentou menores valores de RMSE na estimativa do STEC para praticamente todos os instantes analisados, apesar de estar localizada sobre região da crista da Anomalia da Ionização Equatorial. De forma geral, o RMSE do STEC estimado por tomografia na estação BRAZ foi de 6,45 TECU enquanto que para os mapas do CODE foi de 8,30 TECU.

Em virtude das análises realizadas, conclui-se que, com uso de receptores da RBMC, do IGS, da rede LISN e uma grade de *voxels* com resolução espacial de $4^\circ \times 4^\circ \times 10$ km em latitude, longitude e altitude, respectivamente, a aplicação do algoritmo MART nos experimentos realizados proporcionou: a estimativa da foF2 de qualidade igual ou superior à qualidade do IRI (em região com geometria adequada para o sistema tomográfico); mapas de VTEC e perfis ionosféricos que representam as variações diárias da densidade eletrônica, exceto no caso da estimativa das variações da altitude de pico; bem como o RMSE da estimativa do STEC inferior ao RMSE do STEC obtido por meio de mapas da ionosfera do CODE. Com isso, o método empregado para tomografia da ionosfera permite representar a ionosfera em três dimensões ao nível de qualidade dos modelos internacionalmente aceitos pelas comunidades usuárias. Contudo, como foi utilizado um modelo regional, o método permite uma melhor representação no que diz respeito às variações diárias da ionosfera, tornando possível, p. ex., analisar a intensificação da EIA com o aumento na velocidade da deriva vertical para cima bem como com irregularidades ionosféricas. Vale ressaltar que a representação da deriva vertical é inerente ao *background* utilizado para realizar as técnicas

algébricas, devido à reconstrução tomográfica ser comprometida pela geometria disponível pelo GNSS.

7.2 Recomendações

A seguir são enumeradas algumas recomendações para trabalhos futuros que podem dar continuidade no desenvolvimento de técnicas algébricas para realizar a reconstrução tomográfica da ionosfera sobre o setor brasileiro. A partir do método proposto, recomenda-se:

- Assimilar informações provenientes de diferentes fontes além daquelas obtidas por meio de receptores GNSS localizados sobre a superfície terrestre. Espera-se que a assimilação de observações advindas Rádio-Ocultação e ionossondas permitam uma melhor reconstrução das variações da altitude do pico da ionosfera;
- Aplicar modelos regionais, ao invés do IRI, na determinação do *background* da ionosfera;
- Inclusão de observações advindas dos diferentes sistemas GNSS, como o GALILEO e BEIDOU. A partir da inclusão dos diferentes sistemas GNSS, é interessante avaliar a possibilidade em aplicar as técnicas tomográficas em uma grade de *voxels* com melhor resolução espacial para o setor brasileiro, p. ex., de $2^\circ \times 2^\circ$ em latitude por longitude;
- Utilizar observações de fase da onda portadora do GNSS durante períodos sem perdas de ciclo;
- Avaliar o impacto do atraso ionosférico estimado por meio da tomografia no posicionamento GNSS. Atualmente, parte das aplicações de posicionamento GNSS utilizam mapas de VTEC, porém estes são suscetíveis a erros na projeção do STEC para a direção vertical de um IPP. No caso dos mapas tridimensionais proporcionados pela tomografia da ionosfera, os erros da projeção do STEC em VTEC serão minimizados;
- Desenvolver um formato de arquivo para utilizar os mapas tridimensionais da ionosfera no posicionamento GNSS.

REFERÊNCIAS

- ABDU, M. A. Equatorial ionosphere-thermosphere system: Electrodynamics and irregularities. *Advances in Space Research*, v. 35, n.5, p. 771-787, 2005.
- ALFONSI, L.; SPOGLI, L.; TONG, J. R.; DE FRANCESCHI, G.; ROMANO, V.; BOURDILLON, A.; LE HUY, M.; MITCHELL, C. N. GPS scintillation and TEC gradients at equatorial latitudes in April 2006. *Advances in Space Research*, v. 47, p. 1750–1757, 2011.
- AMERIAN, Y.; HOSSAINALI, M. M.; VOOSOGHI, B.; GHAFARI, M. R. Tomographic reconstruction of the ionospheric electron density in terms of wavelets. *Journal of Aerospace Science and Technology*, v. 7, p. 19-29, 2010.
- ANDERSON, A. H.; KAK, A. C. Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): a superior implementation of the ART algorithm. *Ultrasonic Imaging*, v. 6, p. 81–94, 1984.
- AUSTEN, J. R.; FRANKE, S. J.; LIU, C. H. Ionospheric imaging using computerized tomography. *Radio Science*, v. 23, p. 299–307, 1988.
- BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; MACDOUGALL, J.; SOUZA, J. R. Long term trends in the frequency of occurrence of the F-3 layer over Fortaleza, Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar- Terrestrial Physics*, v. 64, n. 12-14, p. 1409-1412, 2002.
- BILITZA, D. *International Reference Ionosphere 1990*. Greenbelt: National Space Science Data Center, 1990. Disponível em: <<http://nssdc.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 16 Jan. 2015.
- BILITZA, D.; REINISCH, B. W.; RADICELLA, S. M.; PULINETS, S.; GULYAEVA, T.; TRISKOVA, L. Improvements of the International Reference Ionosphere model for the topside electron density profile. *Radio Science*, v. 41, 2006.
- BILITZA, D.; MCKINNEL, L. A.; REINISCH, B.; FULLER-ROWELL, T. The international reference ionosphere today and in the future. *Journal of Geodesy*, v. 85, p. 909-920, 2011.
- BJÖRNSSON, H.; VENEGAS, S. A. *A manual for EOF and SVD analysis of climatic data*. 1997. 52 f. Manual - McGill University, Montreal.
- BLEWITT, G. An automated editing algorithm for GPS data. *Geophys. Res. Lett.*, v. 17, n. 3, p. 199-202, 1990.
- BRUNINI, C.; MEZA, A.; AZPILICUETA, F.; VAN ZELE, M. A.; GENDE, M.; DÍAZ A. A new ionosphere monitoring technology based on GPS. *Astrophysics and Space Science*, v. 290, p. 415–429, 2004.
- BRUNINI, C.; CAMILION, E.; AZPILICUETA, F. Simulation study of the influence of the ionospheric layer height in the thin layer ionospheric model. *Journal of Geodesy*, v. 85, p. 637-645, 2011.
- BUST, G. S.; MITCHELL, C. N. History, current state, and future directions of ionospheric imaging. *Reviews of Geophysics*, v.46, RG1003, 2008.
- CAMARGO, P. O. Quality of TEC estimated with Mod_Ion using GPS and GLONASS data. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2009, 16 pages, 2009.

CHAPMAN, S. The absorption and dissociative or ionising effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating Earth. *Proceedings of the Physical Society*, v. 43, p. 26–45, 1931.

CHARTIER, A. T. et al. Ionospheric imaging in Africa. *Radio Science*, v. 49, p. 19–27, 2014.

CUEVA, R. Y. L. C. *Eletrodinâmica das irregularidades ionosféricas em baixas latitudes e caracterização das plumas em três setores de longitude*. 2013. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

DAS, S. K.; SHUKLA, A. K. Two-dimensional ionospheric tomography over the low-latitude Indian region: An intercomparison of ART and MART algorithms. *Radio Science*, v. 46, n. 2, p. 1-13, 2011.

DAVIES, K. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990, 580 p.

FELTENS, J. Chapman profile approach for 3-D global TEC representation. *Proceedings of the 1998 IGS analysis centers workshop*, Darmstadt, Germany, p. 285-297, 1998.

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

GORDON, R.; BENDER, R.; HERMAN, G. T. Algebraic Reconstruction Techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography. *Journal of Theoretical Biology*, v. 29, p. 471-481, 1970.

HANNACHI, A. *A primer for the EOF analysis of climate data*. 2004. 33 f. Trabalho Acadêmico - Department of Meteorology, University of Reading, Reading.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J. New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 61, p. 1237-1247, 1999.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; COLOMBO, O. L. Application of ionospheric tomography to real-time GPS carrier-phase ambiguities resolution, at scales of 400–1000 km, and with high geomagnetic activity. *Geophys. Res. Lett.*, v. 27, n. 13, p. 2009-2012, 2000.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; ORUS, R.; GARCÍA-RIGO, A.; FELTENS, J.; KOMJATHY, A.; SCHAER, S. C.; KRANKOWSKI, A. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *Journal of Geodesy*, v. 83, p. 263-275, 2009.

HOBIGER, T.; KONDO, T.; KOYAMA, Y. Constrained simultaneous algebraic reconstruction technique (C-SART) - a new and simple algorithm applied to ionospheric tomography. *Earth, Planets and Space*, v. 60, p. 727-735, 2008.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. *Positioning System: theory and practice*. 5. ed. New York: Springer-Verlag, 2001, 382p.

HOUNSFIELD, G. N. *A method and apparatus for examination of a body by radiation such as X or Gamma radiation*. Patent Specification, 1283915, London, England, 1972.

HOWE, B. M.; RUNCIMAN, K.; SECAN, J. A. Tomography of the ionosphere: Four-dimensional simulations. *Radio Science*, v. 33, p. 109-128, 1998.

JAKOWSKI, N.; LEITINGER, R.; ANGLING, M. Radio occultation techniques for probing the ionosphere. *Annals of Geophysics*, v. 47, p. 1049–1066, 2004.

JIN, X. X. *Theory of carrier adjusted DGPS positioning approach and some experimental results*. 1996. PhD Thesis – Delft University of Technology, Delft.

KACZMARZ, S. Angenaberte auflösung von systemen linearer gleichungen. *Bulletin International de l'Académie Polonaise des Sciences et des Lettres*, v. 35, p. 355-357, 1937.

KELLEY, M. C. *The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics*. 2. ed. San Diego: Elsevier, 2009.

KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. *Introduction to Space Physics*. New York: Cambridge University Press, 1995, 568 p.

LEICK, A. *GPS Satellite Surveying*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

LORENZ, E. N. *Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction*. 1956. 48 f. Scientific Report (Statistical Forecasting Project) - MIT, Cambridge.

MANNUCCI, A. J.; WILSON, B. D.; YUAN, D. N.; HO, C. H.; LINDQWISTER, U. J.; RUNGE, T. F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Science*, v. 33, p. 565–582, 1998.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. RINEX_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files. *GPS Solutions* (Heidelberg), v. 15, p. 305-314, 2011.

MATERASSI, M.; MITCHELL, C. N. A simulation study into constructing of the sample space for ionospheric imaging. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 67, p. 1085-1091, 2005.

MCNAMARA, L. F. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Krieger Publishing Company, 1991, 237 p.

MEI, B.; WAN, W. X. An empirical orthogonal function (EOF) analysis of ionospheric electron density profiles based on the observation of incoherent scatter radar at Millstone Hill. *Chinese Journal of Geophysics*, v. 51, p. 12–19, 2008.

MITCH, R. H.; PSIAKI, M. L.; TONG, D. M. Local ionosphere model estimation from dual-frequency global navigation satellite system observables. *Radio science*, v. 48, p. 671–684, 2013.

MITCHELL, C. N.; KERSLEY, L.; HEATON, J. A. T.; PRYSE, S. E. Determination of the vertical electron-density profile in ionospheric tomography: Experimental results. *Annals of Geophysics*, v. 15, p. 747–752, 1997.

- MITCHELL, C. N.; SPENCER, P. S. A three-dimensional time-dependent algorithm for ionospheric imaging using GPS. *Annals of Geophysics*, v. 46, p. 687–696, 2003.
- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: editora UNESP, 2008, 476 p.
- MUELLA, M. T. A. H.; DE PAULA, E. R.; MITCHELL, C. N.; KINTNER, P. M.; PAES, R.; BATISTA, I. S. Tomographic imaging of the equatorial and low-latitude ionosphere over central-eastern Brazil. *Earth, Planets and Space*, v. 63, p. 129-138, 2011.
- NACHO R. New CC2NONCC (v 6.1). Online, 2008. Disponível em: <<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2008/msg00150.html>>. Acesso em: Agosto, 2014.
- NAVA, B.; COÏSSON, P.; RADICELLA, S. M. A new version of the Nequick ionosphere electron density model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 70, p. 1856–1862, 2008.
- OUZOUNOV, D.; PULINETS, S.; ROMANOV, A.; ROMANOV, A.; TSYBULYA, K.; DAVIDENKO, D.; KAFATOS, M.; TAYLOR, P. Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi-instrument space-borne and ground observations: Preliminary results. *Earthquake Science*, v. 24, p. 557–564, 2011.
- PELLINEN, R.; BREKKE, A. Introduction “The history of ionospheric radars”. *Hist. Geo Space Sci.*, v. 2, p. 113–114, 2011.
- PILLAT, V. G.; GUIMARÃES, L. N. F.; FAGUNDES, P. R.; DA SILVA, J. D. S. A computational tool for ionosonde CADI's ionogram analysis. *Computers & Geosciences*, v. 52, p. 372-378, 2013.
- POKHOTELOV, D.; JAYACHANDRAN, P. T.; MITCHELL, C. N.; MACDOUGALL, J. W.; DENTON, M. H. GPS tomography in the polar cap: comparison with ionosondes and in situ spacecraft data. *GPS Solutions*, v. 15, p. 79–87, 2011.
- PROL, F. S.; CAMARGO, P. O. Estimativa da tendência diferencial do código nos receptores GNSS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 20, n. 4, p. 735-749, 2014.
- PROL, F. S.; MARCATO JUNIOR, J.; NIEVINSK, F. G.; GOMES, R. L.; PARANHOS FILHO, A. C. Transformação entre referenciais e cálculo de velocidades através do aplicativo web TREVel. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 66, n. 3, p. 569-579, 2014.
- PRYSE, S. E.; KERSLEY, L.; MITCHELL, C. N.; SPENCER, P. S. J.; WILLIAMS, M. J. A comparison of reconstruction techniques used in ionospheric tomography. *Radio Science*, v. 33, p. 1767–1779, 1998.
- REINISCH, B. W.; HUANG, X. Redefining the IRI F1 layer profile. *Advances in Space Research*, v. 25, p. 81-88, 2000.
- RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. *Introduction to ionospheric physics*. New York: Academic Press, 1969.
- RISHBETH, H. Polarization fields produced by winds in the equatorial F-region. *Planet. Space Sci.*, v. 19, p. 357-369, 1971.

ROSE, J. A. R.; TONG, J. R.; ALLAIN, D. J.; MITCHELL, C. N. The use of ionospheric tomography and elevation masks to reduce the overall error in single-frequency GPS timing applications. *Advances in Space Research*, v. 47, p. 276–288, 2011.

SCHAER, S; GURTNER, W. IONEX: The IONosphere map EXchange Format Version 1. *Proceedings of the IGS AC Workshop*, Darmstadt, Germany, 1998.

SCHAER, S. *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System*. 1999. PhD Thesis, Astronomical Institute, University of Berne, Berne.

SCHUNK, R.; NAGY, A. *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. New York: Cambridge university press, 2000.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy: foundations, methods and applications*. 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co., 2003, 589 p.

SEGURA, J.; GIL, A. Evaluation of associated Legendre functions off the cut and parabolic cylinder functions. *Electronic Transactions on Numerical Analysis*, v. 9, p. 137-146, 1999.

SHARMA, S.; DASHORA, N.; GALAV, P.; PANDEY, R. Cycle slip detection, correction and phase leveling of RINEX formatted GPS observables. *Current Science*, v. 100, p. 205-212, 2011.

SHUKLA, A. K.; SIVARAMAN, M. R.; BANDYOPADHYAY, K. A comparison study of voxel based multi and two layer tomography models over Indian region using GPS data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 31, p. 2535–2549, 2010.

SKONE, S. *TECANALYSTM*. 2002. Operating Manual - Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary.

SMITH, S. W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 2. ed. San Diego: California Technical Publishing, 1999.

VAN DE KAMP, M. M. J. L. Medium-scale 4-D ionospheric tomography using a dense GPS network. *Annals of Geophysics*, v. 31, p. 75–89, 2013.

WEN, D.; LIU, S. A new ionospheric tomographic algorithm-constrained multiplicative algebraic reconstruction technique (CMART). *Journal of Earth System Science*, v. 119, p. 489-496, 2010.

WEN, D.; WANG, Y.; NORMAN, R. A new two-step algorithm for ionospheric tomography solution. *GPS Solutions*, v. 16, p. 89–94, 2012.

ZHANG, Y.-T.; LI, L. Nightside Martian ionosphere produced by electron impact ionization. *Chin. Phys. Lett.*, v. 26, n. 6, 2009.

ZOLESI, B.; CANDLER, L. R. *Ionospheric Prediction and Forecasting*. Berlin: Springer-Verlag, 2014, 240 p.