

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIENCIAS EXATAS E TECNOLOGICAS
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

**ALGORITMO *ANÁLISE DE PICO A PICO POSITIVO* PARA DETECÇÃO DE
IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS COM DADOS DE SATÉLITES C/NOFS E
GPS**

EDUARDO NUNES SILVA

UEMA
São Luís-Maranhão
2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIENCIAS EXATAS E TECNOLOGICAS
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

EDUARDO NUNES SILVA

**ALGORITMO ANÁLISE DE PICO A PICO POSITIVO PARA DETECÇÃO DE
IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS COM DADOS DE SATÉLITES C/NOFS E
GPS**

Trabalho apresentado ao curso de Mestrado Profissional em Engenharia da Computação e Sistemas na Universidade Estadual do Maranhão como pré-requisito para obtenção do título de Mestre sob orientação do Prof. Dr. Luís Carlos Costa Fonseca.

UEMA
São Luís-Maranhão
2018

Dedico este trabalho a minha mãe

Maria José Moraes Nunes

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao Grandioso Deus pela saúde e força para continuar e progredir nos estudos. Apesar das dificuldades e adversidades ele sempre esteve presente em minha vida, dando-me forças para lutar pelos meus objetivos e nunca desistir.

Meus mais profundos agradecimentos à minha mãe, Maria José Moraes Nunes, pela boa educação, pelas oportunidades e condições suficientes para que pudesse prosseguir nos estudos, pela força motriz que me faz continuar lutando e por deixar de realizar seus sonhos para realizar os meus.

Meus mais sinceros agradecimentos ao Dr. Ricardo Yvan de La Cruz Cueva pelos ensinamentos e orientação. Agradeço imensamente ao Prof. Dr. Luís Carlos Costa Fonseca por ter aceitado orientar-me em momentos de dificuldade e em condições adversas para ajudar-me a concluir o mestrado.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Maranhão (FAPEMA) pelos meses de bolsa concedida, que permitiram que após meu ingresso no PECS eu pudesse me manter e aos meus estudos.

Meus sinceros agradecimentos a todos os meus professores do PECS em especial a Dra. Áurea Celeste da Costa Ribeiro e ao Dr. Henrique Mariano Costa do Amaral, pela amizade, companheirismo e confiança ao longo dos três anos de mestrado.

Agradecer a todos os meus colegas de turma do PECS, em especial a Marta Raquel pela amizade e incentivo, ao Denner Araujo Costa pela ajuda nos momentos de dificuldades e a amiga Anna Dulce Espindola Fonseca Rocha pelas caronas e amizade.

Agradecer a toda minha família e amigos em especial meus irmãos David Moraes Nunes Barros e Edvan do Nascimento Silva Junior, meus avós Albertina Moraes Nunes e José Ribamar Nunes, minhas tias Ana Paula Moraes Nunes, Silvia Raquel Moraes Nunes e Julia Rosa Moraes Nunes, a meu pai Edvan do Nascimento Silva, aos amigos Ronildo Campos Silva, Thiago Teixeira de Oliveira e Leomar Campelo Costa pelo apoio e incentivo.

“Com Copérnico, o homem deixou de estar no centro do universo. Com Darwin, o homem deixou de ser o centro do reino animal. Com Marx, o homem deixou de ser o centro da história (que aliás, não possui um centro). Com Freud, o homem deixou de ser o centro de si mesmo.”

(Eduardo Prado Coelho)

RESUMO

Sabe-se que a ionosfera pode apresentar irregularidades, que são perturbações na densidade do plasma ionosférico e que elas induzem consideráveis níveis de ruído e falhas nos sinais transmitidos nos sistemas de telecomunicações e nos sistemas globais de navegação e posicionamento. Também chamadas de bolhas ionosféricas ou depleções do plasma ionosférico, cuja geração se dar pela Instabilidade Rayleigh-Taylor. O termo depleção do plasma é frequentemente usado quando a detecção de irregularidade é por meio de instrumentos a bordo de satélites, consistindo numa redução brusca do plasma seguido por uma posterior recuperação para um valor próximo ao anterior a redução. Apresenta-se neste trabalho um algoritmo desenvolvido para detecção de depleções do plasma ionosférico, que é usado para um estudo da eletrodinâmica da ionosfera equatorial de baixas latitudes. O algoritmo usa os dados do instrumento PLP (*Planar Langmuir Probe*) a bordo do satélite C/NOFS (*Communications/Navigation Outage Forecasting System*) e dos receptores em solo GPS (*Global Positioning System*). Para o qual dispõe-se de dados TEC (Total Electron Content) das redes GPS espalhadas na América do Sul, e densidade in situ do satélite C/NOFS, em conjunto com parâmetros geomagnéticos. O algoritmo primeiro extrai as variações de densidade eletrônica (para dados do PLP – C/NOFS) ou variações do TEC (para dados dos receptores GPS), que são submetidas a filtragem com Filtro Passa Banda (FPB) e Fast Fourier Transform (FFT). O resultado da filtragem são oscilações, que são analisadas pelo algoritmo fazendo-se as medições das distâncias de cada pico positivo das oscilações a todos os picos subsequentes. O algoritmo apresenta bom custo computacional, capaz de detectar depleções do plasma com dados do PLP-C/NOFS e receptores GPS. Usando 182 estações de receptores GPS localizadas no continente Sul Americano, fez-se um estudo da variabilidade dia-a-dia das irregularidades ionosféricas, assim como o estudo da sazonalidade das irregularidades no mês de janeiro de 2010, mostrando a validação e viabilidade do algoritmo. Afim de enfatizar a validade do algoritmo apresenta-se, ionogramas referentes as digissondas de Fortaleza e São Luís. Expõe-se os cálculos da medida de tempo de execução do algoritmo, sendo assim, possível medir sua eficiência para comparação com outros algoritmos.

ALGORITHM ANALYSIS OF PEAK TO PEAK POSITIVE OF OSCILLATIONS FOR DETECTION OF IONOSPHERIC IRREGULARITIES WITH SATELLITE DATA C/NOFS AND GPS

ABSTRACT

It is known that the ionosphere may exhibit irregularities, which are perturbations in ionospheric plasma density, and that they induce considerable noise levels and signal failure in telecommunications systems and in global navigation and positioning systems. Also called ionospheric bubbles or ionospheric plasma depletions, which are generated by the Rayleigh-Taylor Instability. The term plasma depletion is often used when the detection of irregularity is by means of instruments on board satellites, consisting of a reduction of plasma abruptness followed by a subsequent recovery to a value close to the previous reduction. This work presents an algorithm developed for the detection of ionospheric plasma depletion, which is used for a study of the electrodynamics of the low latitude equatorial ionosphere. The algorithm uses data from the PLP (Planar Langmuir Probe) instrument on the C/NOFS (Communications/Navigation Outage Forecasting System) satellite and receivers on GPS (Global Positioning System). For this, TEC (Total Electron Content) data of the GPS networks scattered in South America and in situ density of the satellite C/NOFS, together with geomagnetic parameters are available. The algorithm first extracts the variations of electronic density (for PLP - C/NOFS data) or variations of the TEC (for GPS receiver data), which are filtered through Band Pass Filter (BPF) and Fast Fourier Transform (FFT). The result of the filtering are oscillations, which are analyzed by the algorithm by measuring the distances of each positive peak of the oscillations at all subsequent peaks. The algorithm presents good computational cost, capable of detecting plasma depletions with PLP-C/NOFS data and GPS receivers. Using 182 GPS receiver stations located on the South American continent, a study of the day-to-day variability of ionospheric irregularities was carried out, as well as the study of the seasonality of the irregularities in January 2010, thus showing the validation and feasibility of the algorithm. In order to emphasize the validity of the algorithm, we present ionograms referring to the digisondas of Fortaleza and São Luís. The calculations of the execution time measure of the algorithm are exposed, so it is possible to measure its efficiency for comparison with other algorithms.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1** - Perfil da densidade eletrônica da ionosfera que mostra a formação do pico de ionização, segundo a função de Chapman. FONTE: Rodrigues, F. S. (2003).....**22**
- Figura 2.2** - Perfil da densidade eletrônica da ionosfera nos períodos diurno e noturno. FONTE: Rodrigues, F. S. (2003).....**22**
- Figura 2.3** - Perfil da Anomalia de Appleton. FONTE: modelo IRI – 2012.....**24**
- Figura 2.4** - Derivas zonais de plasma da região F equatorial para várias estações e condições solares. FONTE: Kelley (1989).....**27**
- Figura 2.5** - Componente vertical da deriva, positiva para movimentos verticais para cima. FONTE: Kelley (1989).....**27**
- Figura 2.6** - Ilustração didática da evolução de uma instabilidade gerando as bolhas ionosféricas segundo a teoria linear Rayleigh-Taylor. FONTE: Kelley (1989).....**28**
- Figura 2.7** - Nos relewa a morfologia global das cintilações em sinais de rádio durante anos de solar máximo (globo à esquerda) e mínimo (globo a direita). Fonte: Rodrigues (2008), abud Basu et al. (1988).....**32**
- Figura 2.8** - Mostra o satélite C/NOFS em orbita. FONTE: *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*.**33**
- Figura 2.9** - A Figura esquerda ilustra um satélite GPS e a direita a constelação de satélites GPS. FONTE: Rede Escola**35**
- Figura 2.10** - Ionogramas obtidos com a Digissonda de São Luís no dia 2 de janeiro de 2010. O painel da esquerda mostra o ionograma sem a presença do Spread F e o da direita com a presença do Spread F.....**37**
- Figura 2.11** - Digisonde™ Portable Sounder (DPS).....**38**
- Figura 3.1** - O primeiro painel da figura mostra a curva da densidade eletrônica em vermelho e o ajuste suave dela em azul. O segundo painel apresenta as variações obtidas pela diferença dos dados reais de densidade eletrônica com seu ajuste suave. O terceiro painel mostra a saída do sistema que tem como núcleo um filtro Passa Banda e filtragem dos dados baseados em FFT.....**43**
- Figura 3.2** - Resposta de Magnitude ou Amplitude do Filtro Passa Banda com suas correspondentes restrições de frequências; esta figura mostra as frequências normalizadas no eixo horizontal e a magnitude em dB no eixo vertical.....**44**
- Figura 3.3** - Resposta de Fase do Filtro Passa Banda; no eixo horizontal está as frequências normalizadas e no vertical o ângulo de fase em radianos.....**45**

Figura 3.4 - Resposta ao Impulso do Filtro Passa Banda FIR, projetado com as devidas restrições de frequência e magnitude.....	46
Figura 3.5 - Resposta ao Impulso do Sistema, que faz a filtragem dos dados usando o método baseado em FFT de overlap-add.....	47
Figura 3.6 - Apresentação didática da análise de pico a pico das oscilações.....	49
Figura 3.7 - O primeiro painel da figura mostra um esgotamento da densidade eletrônica seguido por uma recuperação a uma altitude de aproximadamente 400 km. O segundo quadro mostra o percurso do satélite C/NOFS no dia 159 de 2011.....	53
Figura 3.8 - O primeiro painel da figura mostra a densidade eletrônica obtida pelo instrumento PLP do C/NOFS (curva em vermelho) e a altura que o satélite estava em vários momentos enquanto percorria o globo terrestre. O segundo quadro mostra o percurso do satélite C/NOFS no dia 274 de 2011 (linha azul), a linha de campo geomagnético da Terra (linha rosa) e detecção de bolhas de plasma.....	54
Figura 3.9 - Ionogramas obtidos pela Digissonda da Estação de Fortaleza - FZ no dia 274 de 2011 no horário de 22:10 UT e 22:20 UT, mostrando o espalhamento da camada F (Spread F). Fonte: http://ulcar.uml.edu/	55
Figura 3.10 - O primeiro painel da figura mostra a densidade eletrônica obtida pelo instrumento PLP do C/NOFS (curva em vermelho) e a altura que o satélite estava em vários momentos enquanto percorria o globo terrestre. O segundo quadro mostra o percurso do satélite C/NOFS no dia 275 de 2011 (linha azul), a linha de campo geomagnético da Terra (linha rosa) e detecção de bolhas de plasma.....	56
Figura 3.11 - Ionogramas obtidos pela Digissonda da Estação de Fortaleza - FZ no dia 275 de 2011 no horário de 22:20 UT e 22:30 UT, mostrando o espalhamento da camada F (Spread F). Fonte: http://ulcar.uml.edu/	57
Figura 3.12 - O primeiro painel da figura mostra a densidade eletrônica obtida pelo instrumento PLP do C/NOFS (curva em vermelho) e a altura que o satélite estava em vários momentos enquanto percorria o globo terrestre. O segundo quadro mostra o percurso do satélite C/NOFS no dia 276 de 2011 (linha azul), a linha de campo geomagnético da Terra (linha rosa) e detecção de bolhas de plasma.....	58
Figura 3.13 - Ionogramas obtidos pela Digissonda da Estação de Fortaleza - FZ no dia 276 de 2011 no horário de 22:30 UT e 22:40 UT, mostrando o espalhamento da camada F (Spread F). Fonte: http://ulcar.uml.edu/	59
Figura 3.14 - O primeiro painel da figura mostra a densidade eletrônica obtida pelo instrumento PLP do C/NOFS (curva em vermelho) e a altura que o satélite estava em vários momentos enquanto percorria o globo terrestre. O segundo quadro mostra o percurso do satélite C/NOFS no dia 277 de 2011 (linha azul), a linha de campo geomagnético da Terra (linha rosa) e detecção de bolhas de plasma.....	60

Figura 3.15 - Ionogramas obtidos pela Digissonda da Estação de Fortaleza - FZ no dia 277 de 2011 no horário de 22:40 UT e 22:50 UT, mostrando o espalhamento da camada F (Spread F). Fonte: http://ulcar.uml.edu/	61
Figura 3.16 - Geometria da trajetória do sinal GPS na ionosfera. Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof et al. (2001).....	63
Figura 3.17 - Efeito causado por satélites de baixa elevação no cálculo do VTEC. No primeiro painel foram utilizados dados de satélite com elevação maiores que 10°. No segundo painel foram utilizados apenas valores de satélites com elevação maiores que 50°.....	64
Figura 3.18 - O primeiro painel da figura mostra a curva de VTEC do satélite de PRN 7 em vermelho e as variações obtidas pela diferença entre a curva original de valores VTEC com a sua curva ajustada suavemente. O segundo painel mostra a saída do sistema que tem como núcleo um filtro Passa Banda e filtragem dos dados baseados em FFT. O terceiro painel ilustra a bolha ionosférica detectada pela análise de picos.....	65
Figura 3.19 - O primeiro painel da figura mostra a curva de VTEC do satélite de PRN 25 em vermelho e as variações obtidas pela diferença entre a curva original de valores VTEC com a sua curva ajustada suavemente. O segundo painel mostra a saída do sistema que tem como núcleo um filtro Passa Banda e filtragem dos dados baseados em FFT. O terceiro painel ilustra a bolha ionosférica detectada pela análise de picos.....	66
Figura 4.1. Ocorrências de depleções do plasma ionosférico no mês de janeiro de 2010.....	70
Figura 4.2. Ocorrências de depleções do plasma ionosférico no mês de fevereiro de 2010.....	71
Figura 4.3. Ocorrências de depleções do plasma ionosférico no mês de setembro de 2010.....	72
Figura 4.4. Ocorrências de depleções do plasma ionosférico no mês de novembro de 2010.....	73
Figura 4.5 - Mostra as passagens do C/NOFS para os dias 3, 4, 9 e 10 de janeiro de 2010, apresentando a posição e tempo das irregularidades ionosféricas encontradas, fazendo uma correspondência com as variações dos dados VTEC dos receptores GPS localizados próximo da irregularidade encontrada durante cada um dos dias e no mesmo meridiano magnético.....	76
Figura 4.6 - Ionogramas obtidos pelas estações de São Luís (dias 3, 4 e 10 de 2010) e Fortaleza (dia 9 de 2010), mostrando o espalhamento da camada F para os dias 3, 4, 9 e 10 de 2010, correlacionado a Figura 31 , mostra que as irregularidades encontradas com os dados do C/NOFS usando-se a técnica que faz a análise de picos, discutida nesse trabalho de mestrado, correspondem ao espalhamento da camada F.....	77

Figura 4.7 - Apresenta as detecções de depleções do plasma ionosférico para cada um dos PRNs das estações GPS bomj (dia 3 e 4 de 2010), ceeu (dia 9 de 2010) e mapa (dia 10 de 2010). O primeiro painel da figura mostra a curva VTEC de cada uma das estações de todos os PRNs com ângulo de elevação maior que 30°, todos os outros painéis mostram as curvas VTEC para cada um dos PRN, cujos números são mostrados em azul a direita da figura.....	78
Figura 4.8 - Gráfico da América do Sul, mostrando o equador magnético da Terra (linha rosa) e a estação GPS de Arapiraca no Brasil (alar – bolinha verde).....	79
Figura 4.9 - Apresenta as detecções de depleções do plasma ionosférico para cada um dos PRNs que passam sobre a estação GPS alar nos dias 1, 2, 3 e 4 de Janeiro de 2010. O primeiro painel da figura mostra a curva VTEC de cada uma das estações de todos os PRNs com ângulo de elevação maior que 30°, todos os outros painéis mostram as curvas VTEC para cada um dos PRN que atravessaram depleções do plasma, cujos números são mostrados em azul a direita da figura.....	80
Figura 4.10 - Apresenta as depleções de plasma detectadas da Figura 40, comparando a posição das depleções com o meridiano geográfico (reta azul) e o meridiano magnético (reta rosa). Na figura é mostrado um pedaço do mapa da América do Sul, a circunferência que representa o ângulo de elevação de 30° da estação alar e os meridianos geográfico e magnético da estação. É mostrado os percursos dos satélites (linhas vermelhas), representados por seus PRNs, e as depleções do plasma (bolinhas coloridas).....	81
Figura 4.11 - Ilustração das estações GPS ativas na América do Sul no mês de janeiro de 2010.....	83
Figura 4.12 - Apresenta a densidade de Bolhas de Plasma para os dias 2, 3 e 4 de janeiro de 2010.....	84
Figura 4.13 - Apresenta a densidade de Bolhas de Plasma para os dias 9, 10 e 11 de janeiro de 2010.....	85
Figura 4.14 - Apresenta a densidade de Bolhas de Plasma para os dias 20, 21 e 22 de janeiro de 2010.....	86
Figura 4.15 - Dominação assintótica de $f(n)$ sobre $g(n)$	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Medidas reais de tempo do algoritmo que detecta bolhas de plasma..91

LISTA DE PROGRAMAS

Programa 4.1 Síntese do algoritmo para detecção de bolhas de plasma.**89**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AE-E	- Atmospheric Explorer - E
AFRL	- Air Force Research Laboratory
C/NOFS	- Communications/Navigation Outage Forecasting System
FFT	- Fast Fourier Transform
FIR	- Finite Impulse Response
FPB	- Filtro Passa Banda
GPS	- Global Positioning System
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRI	- International Reference Ionosphere
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
PLP	- Planar Langmuir Probe
PRN	- Pseudo Random Noise
ROJ	- Rádio Observatório de Jicamarca
RT	- Rayleigh Taylor
TEC	- Total Electron Content
VTEC	- Vertical Total Electron Content
FTZ	- Fortaleza

Sumário

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivo	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. Física da Ionosfera	20
2.1.1. Atmosfera Ionizada	20
2.1.2. Eletrodinâmica da Região F.....	23
2.1.3. Irregularidades Ionosféricas na Região F.....	27
2.1.4. Efeito da Ionosfera em Sinais de Satélites.....	29
2.2. Instrumentação	33
2.2.1. Satélite C/NOFS – PLP	33
2.2.2. Satélites GPS.....	35
2.2.3. Digissonda	36
2.3. Trabalhos Correlatados	39
2.3.1. Análise de Irregularidades Ionosféricas Segundo Valladares et al., (2004) e Seemala et al., (2011).	39
2.3.2. Análise de Irregularidades Ionosféricas Segundo Rodrigues et al. (2009).	40
3. DESENVOLVIMENTO	42
3.1. Algoritmo Análise de Pico a Pico Positivo na Detecção de Irregularidades Ionosféricas com Dados do Instrumento PLP do C/NOFS.	42
3.1.1. Ocorrência de Depleção no Dia 274 de 2011	53
3.1.2. Ocorrência de Depleção no Dia 275 de 2011	55
3.1.3. Ocorrência de Depleção no Dia 276 de 2011	57
3.1.4. Ocorrência de Depleção no Dia 277 de 2011	59
3.2. Algoritmo Análise de Pico a Pico Positivo na Detecção de Irregularidades Ionosféricas com Dados de Receptores dos Satélites GPS.	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1. Variabilidade Sazonal das Depleções do Plasma Ionosférico	68

4.1.1.	Ocorrência de depleções em janeiro de 2010	69
4.1.2.	Ocorrência de depleções em fevereiro de 2010.....	70
4.1.3.	Ocorrência de depleções em setembro de 2010.....	71
4.2.	Concordância de Resultados do Algoritmo nos Dados de Receptores GPS e Dados do PLP-C/NOFS em Quatro Dias do Mês de Janeiro de 2010.	73
4.3.	Algoritmo Aplicado ao Estudo da Variabilidade Dia-a-Dia das Depleções do Plasma Ionosférico da Estação GPS de Arapiraca Brasil para os Quatro Primeiros Dias de Janeiro de 2010.	79
4.4.	Algoritmo Aplicado a 182 Estações GPS Localizadas na América do Sul no Mês de Janeiro de 2010.	82
4.5.	Medidas do Tempo de Execução do Algoritmo/Eficiência do Algoritmo <i>Análise de Pico a Pico Positivo</i>/Análise do Algoritmo <i>Análise de Pico a Pico Positivo</i>.	87
5.	CONCLUSÃO	92
6.	REFERÊNCIAS	94

1. INTRODUÇÃO

A ionosfera é uma camada de gases ionizados cuja extensão está em torno de 60 km a 1000 km de altitude. A principal fonte de ionização advém da fotoionização dos componentes neutros atmosféricos. Fontes secundárias de ionização constituem-se de processos colisionais entre partículas, sejam elas, íons, elétrons, e moléculas neutras principalmente (**Bertoni, 2004**).

A ionosfera por ser a camada ionizada da atmosfera terrestre, podendo ser descrita como um plasma magnetizado, distribuído não homogeneamente em altitude. Tem muitos fenômenos físicos capazes de interferir nos canais de telecomunicações ionosféricas e transionosféricas, além das diversas aplicações espaciais utilizando satélites (**Denardini, 2003; Cândido, 2008**). Assim, a ionosfera é ponto de convergência de muitos fenômenos de interesses científico e tecnológico. Do ponto de vista científico, é objeto de inúmeras pesquisas por sua grande variedade de fenômenos. Do ponto de vista tecnológico desempenha importante papel nos sistemas de telecomunicações e nos sistemas globais de navegação e posicionamento, visto que, quando há ocorrência de irregularidades do plasma ionosférico são induzidos consideráveis níveis de ruído e falhas nos sinais transmitidos. Surge, a grande necessidade de se identificar e conhecer as irregularidades ionosféricas, pois cientificamente o estudo de seus fenômenos é de grande relevância, assim como, o estudo de sua climatologia é importante do ponto de vista tecnológico, para obter soluções que minimizem os prejuízos nas áreas de telecomunicações e nos sistemas globais de navegação e posicionamento. As irregularidades podem ser detectadas usando radares de espalhamento coerente e incoerente, equipamentos de sondagem in-situ, experimentos de rádio-propagação e cintilação, detectores de emissões airglow e digissondas. Embora as irregularidades representem um contínuo de escalas, cada técnica de sondagem é sensível a um tamanho de escala particular (**Sobral et al., 1980; Abdu et al., 1991**).

Este trabalho de mestrado foca-se na região equatorial do globo terrestre, pelos processos físicos particulares dessa faixa de latitudes. Os processos físicos peculiares na região equatorial nascem devido à inclinação baixa das linhas de campo geomagnético conectada a região F da ionosfera, e devido a fração relativamente larga da radiação solar absorvida em comparação a outras latitudes (50% de toda

radiação solar incidente na terra é absorvida dentro de $\pm 30^\circ$ latitude com o equador) **(Abdu et al., 2005)**.

As irregularidades ionosféricas são perturbações na densidade do plasma ionosférico e se originam através de processos de instabilidade de plasma do tipo Rayleigh-Taylor que ocorrem na ionosfera equatorial, irregularidades cuja ordem de tamanho variam desde alguns centímetros até centenas de quilômetros **(Kelley, 1989)**. Vários esforços vêm sendo realizados para se compreender melhor os processos eletrodinâmicos na geração de irregularidades ionosféricas.

Um grande conjunto de dados tem sido coletados por intermédio do instrumento PLP (*Planar Langmuir Probe*) do satélite C/NOFS (*Communications/Navigation Outage Forecasting System*) e receptores em solo GPS (*Global Positioning System*), por grupos de pesquisas que estudam ionosfera. O atual trabalho tem por objetivo estudar a eletrodinâmica da ionosfera de baixas latitudes na região equatorial usando-se os dados do instrumento PLP do C/NOFS e receptores em solo GPS. Assim como, desenvolver técnicas usando processamento digital de sinais que sejam capazes de identificar irregularidades na ionosfera equatorial de baixas latitudes.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um algoritmo para detecção automática de depleções do plasma ionosférico, que pudesse ser utilizado para dados de vários tipos de satélites. Os métodos até então existentes para detecção de depleções do plasma ionosférico dispõem de um sistema muito complexo, além de serem limitados a um único tipo de dados de satélites.

O algoritmo foi desenvolvido e testado utilizando-se os dados de densidade eletrônica do instrumento PLP do satélite C/NOFS e com dados TEC dos receptores dos satélites GPS. O algoritmo faz a análise das oscilações obtidas da filtragem com FPB e FFT das variações de densidade eletrônica (com dados do PLP-C/NOFS) e TEC (dados de receptores GPS). A análise das oscilações pelo algoritmo, faz medições de cada pico positivo da oscilação a seus picos positivos subsequentes, avaliando se elas correspondem ou não a depleções do plasma ionosférico.

Mostrou-se nesse trabalho de mestrado o estudo da complexidade computacional do algoritmo, que apresenta excelente custo computacional e mostra-

se eficaz na detecção de bolhas ionosféricas. A criação e metodologia do algoritmo foi fortemente influenciada pelos trabalhos de **Rodrigues et al. (2009)** e **Seemala et al. (2011)**, que são técnicas de detecção de irregularidades na ionosfera, que possuem um enfoque teórico muito rico, usando argumentos científicos da área de processamento de sinais, que possibilitam ampliar os estudos ionosféricos e tem ênfase em um fenômeno de muito interesse para cientistas que estudam ionosfera e buscam constantemente a compreensão e previsão do fenômeno de bolhas ionosféricas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Física da Ionosfera

2.1.1. Atmosfera Ionizada

A ionosfera é a camada altamente condutiva da atmosfera da Terra, situada entre aproximadamente 60-1000 km. Nessa região a densidade de íons e elétrons é suficientemente alta de modo a afetar a propagação de ondas de rádio (**Rishbeth e Garriott, 1969**). Conseqüentemente, uma onda eletromagnética que atravessa essa camada, tem direção e velocidade de propagação alteradas. Esta propriedade caracteriza a ionosfera como um meio dispersivo, onde a velocidade de propagação da onda é função do índice de refração do meio, permitindo determinar o atraso na modulação de grupo de sinal, que é diretamente proporcional ao número de elétrons presentes na trajetória de propagação do sinal, definido pelo Conteúdo Eletrônico Total abreviado de TEC (Total Electron Content). O TEC é um importante parâmetro a ser medido na ionosfera e, por ser altamente dependente da radiação solar, apresenta variações diurnas e noturnas, sazonais e geográficas, assim como variações relacionadas ao nível de atividade solar e tempestades magnéticas (**Fedrizzi, 1999**).

A formação da ionosfera está diretamente relacionada com a radiação solar. Porém processos físicos e químicos afetam essa região provocando variabilidade diária, variação sazonal, além de processos ainda não tão bem compreendidos. A ionização da atmosfera surge basicamente devido a radiação ultravioleta e raios-X solares (**Rishbeth e Garriott, 1969**). A região ionizada apresenta variações na densidade eletrônica, responsáveis pelas diferentes camadas, chamadas de regiões D, E, F (**Alvalá, 1990**).

A região D é a parte mais baixa da ionosfera. Constituída de um plasma fracamente ionizado, que se inicia por volta de 60 km e estende-se por volta de 90 km. A máxima densidade eletrônica ocorre próximo de 85 km, devido principalmente ao óxido nítrico (NO), um constituinte minoritário, ionizado pela radiação Lyman α solar. A região E estende-se desde 90 km até aproximadamente 150 km, com seu pico de densidade eletrônica em torno de 115 km. Suas principais fontes de ionização

são a radiação Lyman β , raios X moles e ultravioletas solares, formando NO^+ , O_2^+ e O^+ , como principais íons. A região F se subdivide durante o dia em duas regiões F1 e F2. A primeira situada entre 150 e 200 km, com um máximo de densidade eletrônica em torno de 180 km. Sendo a radiação ultravioleta a principal fonte de ionização do oxigênio atômico (O). A região F2 estende-se acima da F1 até cerca de 1.000 km, com seu pico ocorrendo em torno de 250 km. Neste pico ocorre a máxima densidade eletrônica no perfil vertical da ionosfera (**Alvalá, 1990**).

Um parâmetro do ambiente ionosférico de grande importância é a densidade eletrônica durante o dia e também durante a noite. A **Figura 2.1** ilustra a formação da ionosfera e a presença de um pico de ionização. Este perfil foi equacionado segundo a teoria desenvolvida por Chapman em 1931, através da função Chapman para a taxa de produção iônica Q , ilustrada na **Equação 1** (**Kivelson e Russel, 1995**).

$$Q = Q_m \exp \left[1 + \left(\frac{h_m - h}{H_n} \right) - \exp \left(\frac{h_m - h}{H_n} \right) \right] \quad \text{Equação 1}$$

onde h é a altura e H a altura de escala do gás.

A radiação solar decresce em intensidade devido à absorção a medida que penetra na atmosfera mais densa. Por outro lado, a densidade neutra incrementa exponencialmente com o decréscimo da altitude. A combinação desses dois efeitos é responsável pela formação da típica estrutura que apresenta a ionosfera (**conforme Figuras 2.1 e 2.2**) (**Cueva, 2013**). Assim, uma forma de explicação qualitativa para a presença de um pico de ionização no perfil vertical de densidade é resultado do produto entre uma crescente intensidade de radiação ionizante com a altura e uma decrescente quantidade de elementos ionizáveis (**Rodrigues, 2003; Cândido, 2008**). A **Figura 2.2** apresenta qualitativamente o perfil vertical da densidade eletrônica na ionosfera durante o dia e durante a noite, observa-se que durante a noite a distinção das camadas E e F é bem mais perceptível.

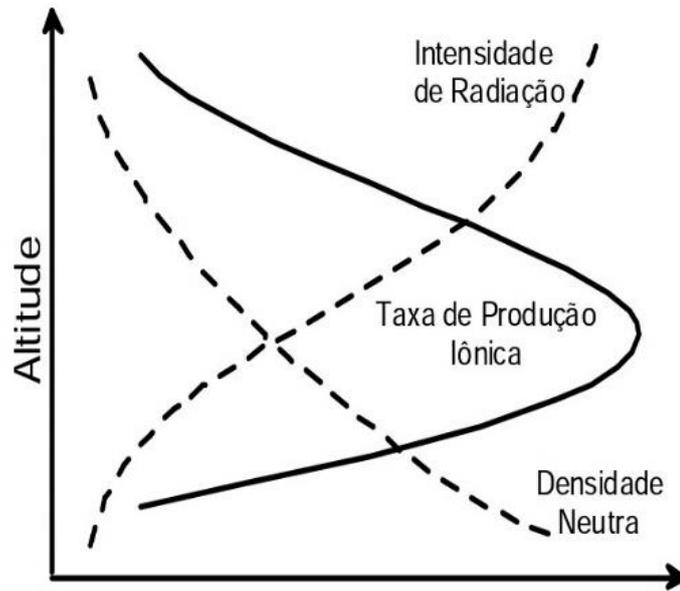


Figura 2.1 Ilustração qualitativa do perfil da ionosfera segundo a função de Chapman. FONTE: Rodrigues, F. S. (2003).

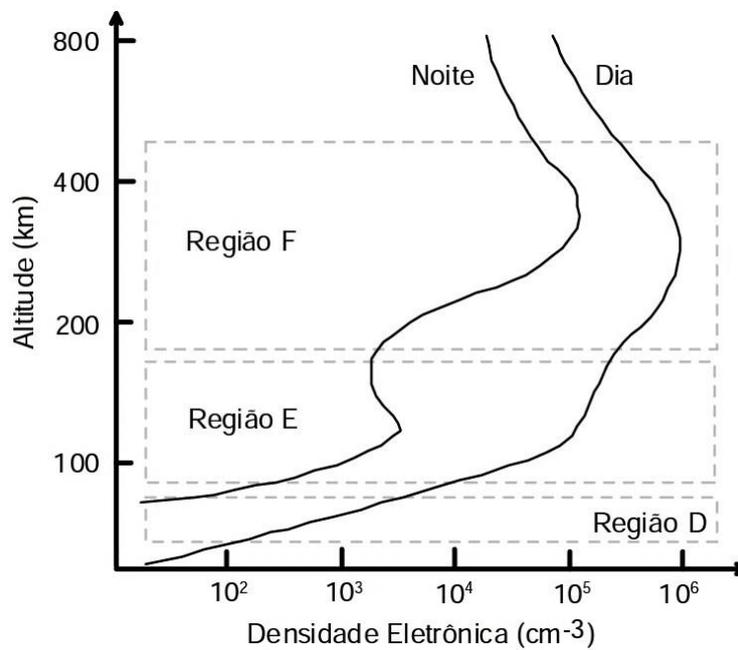


Figura 2.2 Perfil da densidade eletrônica da ionosfera nos períodos diurno e noturno. FONTE: Rodrigues, F. S. (2003).

2.1.2. Eletrodinâmica da Região F

A região F é subdividida em F1 e F2. A região F1 é a região inferior onde predominam processos fotoquímicos e onde o elemento majoritário é o íon oxigênio atômico, O^+ . As reações químicas importantes são a fotoionização do oxigênio atômico e processos de perda em reações com o N^2 e O^2 (**Alvalá, 1990**). Durante a noite, quando inexiste o processo de fotoionização a região F1 desaparece. A região F2 é caracterizada pela importância dos processos de transporte como difusão e as derivas ao longo das linhas de campo (induzidas por ventos neutros) e na direção perpendicular às mesmas (**$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$**). A densidade de íons da região F2 é dez vezes maior que a da região E, e ainda, a densidade neutra é cem vezes maior que a iônica, de modo que o plasma é parcialmente ionizado, o que torna importantes as colisões entre partículas carregadas e entre partículas que estão carregadas com partículas neutras (**Cândido, 2008**).

O aquecimento solar promove gradientes horizontais de pressão o que por sua vez induz o surgimento de ventos termosféricos horizontais. A ação de ventos termosféricos consiste na indução de movimentos de partículas carregadas na região F, precisamente ao longo das linhas de campo geomagnético com intensidade igual à componente do vento na direção do campo. O movimento principal é dos íons e elétrons, existindo um movimento na direção perpendicular tanto às linhas de campo quanto ao vento, resultante da ação conjunta **$\mathbf{U} \times \mathbf{B}$** , sendo esse movimento bem menos intenso. Devido ao sinal oposto das cargas, os íons se movimentam no sentido **$\mathbf{U} \times \mathbf{B}$** e os elétrons em sentido contrário, originando, assim, correntes elétricas. As linhas de campo são altamente condutoras, de modo que, qualquer convergência ou divergência nas correntes darão origem a campos elétricos de polarização. Durante o dia quando a condutividade da região E é alta, o circuito é fechado. No entanto, ao anoitecer, quando a região E começa a desaparecer, surgem campos de polarização mais elevados de modo a manter a divergência do fluxo de corrente nula (**Rishbet e Garriot (1969); Kelley, 1989; Fejer et al., 1979; Fejer et al., 1981; Fejer et al., 1999**).

A ação conjunta dos campos elétrico e magnético provoca a deriva eletromagnética vertical para cima do plasma **$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$** durante o dia, e para baixo durante a noite, sendo essas velocidades de deriva em torno de 10 m/s na região equatorial

(Cândido, 2008). Ocorre, então, a difusão do plasma para baixo ao longo das linhas e para longe do equador devido à ação da gravidade. Este movimento assemelha-se ao movimento de uma fonte, motivo pelo qual lhe foi atribuída a denominação de Efeito Fonte. O Efeito Fonte provoca um fenômeno bem conhecido e estudado denominado Anomalia Equatorial ou Anomalia de Appleton (**Figura 2.3**), que representa o aumento da densidade de plasma, ou dos picos de ionização, em ambos os lados do equador magnético, assimetricamente, conforme mostra a **Figura 2.3** (Rishbet e Garriot (1969); Kelley, 1989; Fejer et al., 1979; Fejer et al., 1981; Fejer et al., 1999).

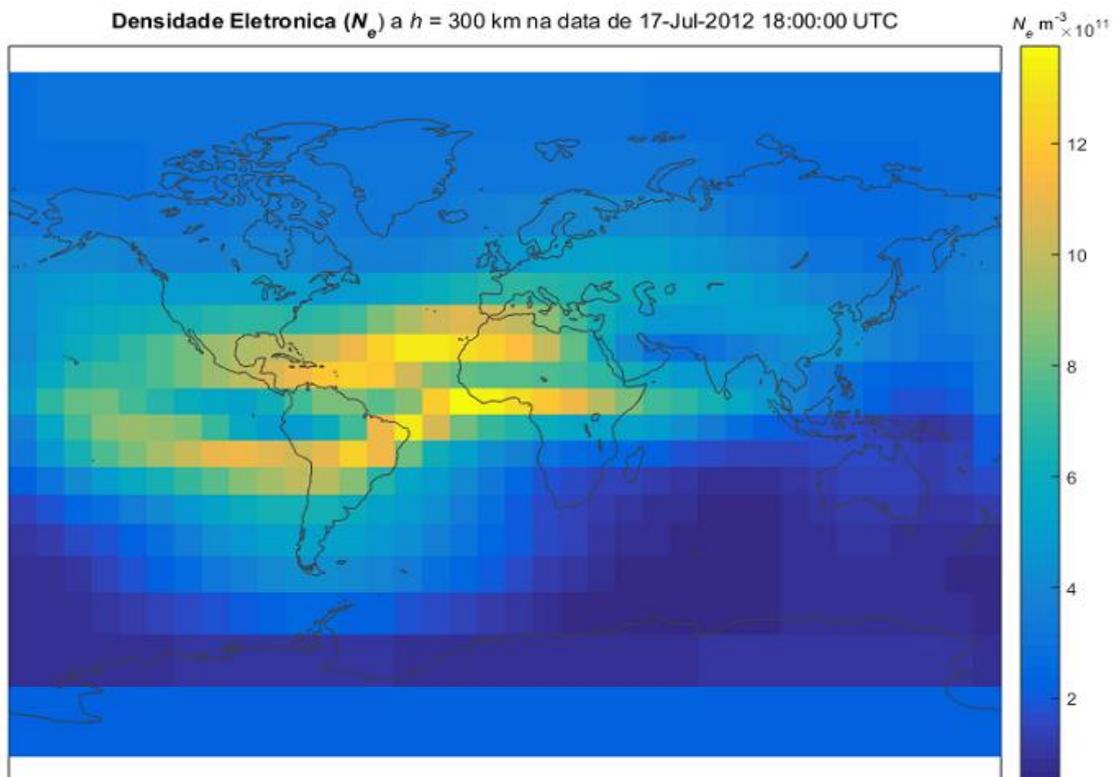


Figura 2.3 Perfil da Anomalia de Appleton. FONTE: modelo IRI – 2012.

Os campos elétricos ionosféricos são extremamente importantes no movimento do plasma da região F em baixas latitudes. O campo elétrico da região F é menor do que o campo da região E e além disso, durante o dia, ele pode ser descarregado por correntes que fluem ao longo das linhas de campo geomagnético, que funcionam como ótimas condutoras, fechando circuitos na região E; por outro

lado, já que ao longo das linhas de campo tem-se alta condutividade, elas podem ser consideradas como linhas equipotenciais e, com isso, os campos elétricos da região E podem ser mapeados para região F praticamente sem atenuação (**Rishbet e Garriot (1969); Kelley, 1989; Fejer et al., 1979; Fejer et al., 1981; Fejer et al., 1999; Abdu et al., 2005**).

As **Figuras 2.4 e 2.5** mostram o comportamento das derivas zonais e verticais do plasma ionosférico obtidas com o radar de espalhamento incoerente do Rádio Observatório de Jicamarca (ROJ). Os eixos verticais das **Figuras 2.4 e 2.5** mostram as velocidades de derivas. Na **Figura 2.4** a parte da curva que está na parte positiva do eixo vertical é a deriva zonal para leste a noite e a parte negativa da curva de deriva zonal é a deriva para oeste que acontece durante o dia. Na **Figura 2.5** a parte da curva que está na parte positiva do eixo vertical é referente as derivas para cima durante o dia e a parte da curva na parte negativa do eixo é referentes as derivas durante a noite.

As principais características das derivas são (**Kelley, 1989**):

- a) A deriva para leste a noite é duas vezes maior que a deriva para oeste durante o dia.
- b) As derivas zonais são muito maiores que as verticais, compare as velocidades de derivas nos eixos verticais das **Figuras 2.4 e 2.5**.
- c) A velocidade de deriva vertical apresenta um pico logo após o anoitecer chamado pico pré-reversão, observado na **Figura 2.5** por volta das 19 horas no tempo local, embora o mesmo não se observe ao amanhecer.
- d) Pela **Figura 2.5** verifica-se a influência do ciclo solar nas derivas verticais com variações sazonais significantes do pico pré-reversão.

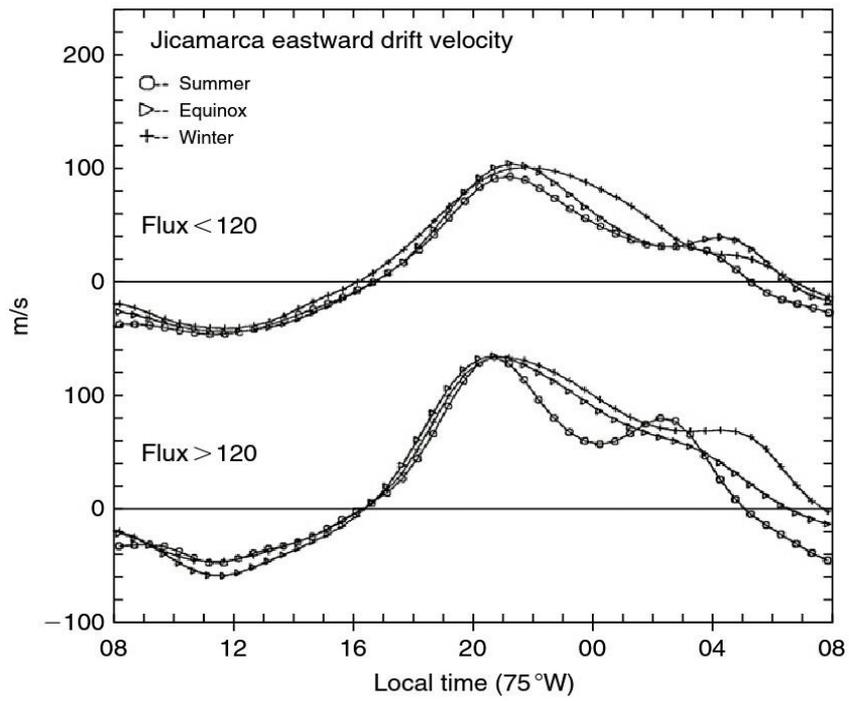


Figura 2.4 Derivas zonais de plasma da região F equatorial para várias estações e condições solares. FONTE: Kelley (1989).

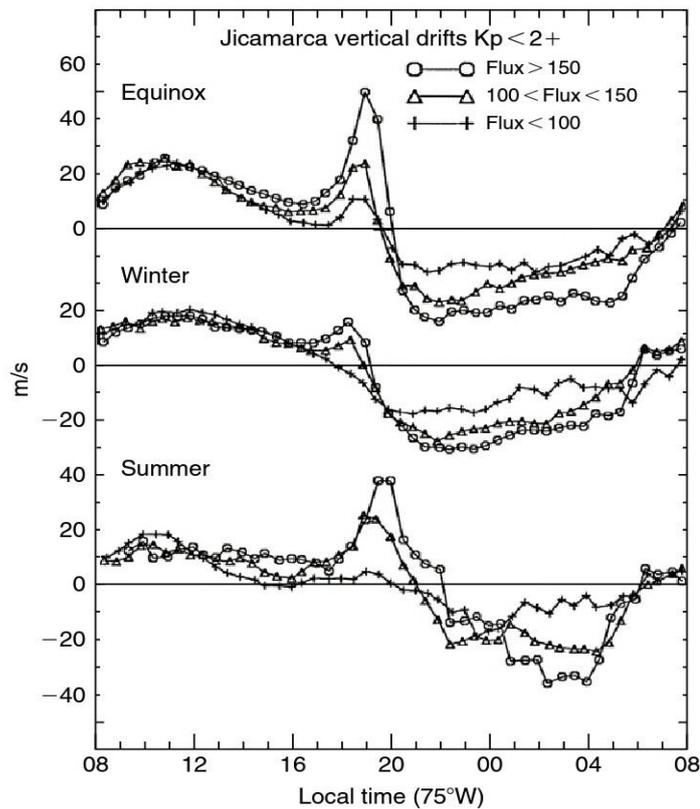


Figura 2.5 Componente vertical da deriva, positiva para movimentos verticais para cima. FONTE: Kelley (1989); Fejer et al., 1991; Abdu et al., 2005.

2.1.3. Irregularidades Ionosféricas na Região F

A ionosfera pode apresentar irregularidades que são perturbações na densidade do plasma ionosférico e há varias teorias capazes de explicar o surgimento dessas irregularidades, sendo algumas chamadas de bolhas ionosféricas. A teoria mais aceita é a de Rayleigh-Taylor (RT) (**Kelley, 1989**), que explica como uma pequena perturbação na base da região F da ionosfera pode gerar as irregularidades ionosféricas, com um amplo espectro de escalas de tamanho que vão desde alguns centímetros até centenas de quilômetros.

A **Figura 2.6** mostra de forma ideal, fazendo-se uma analogia com a instabilidade hidrodinâmica Rayleigh-Taylor (RT), como se dá a formação de bolhas

ionosféricas, temos um meio de maior densidade sendo sustentado por um meio com menor densidade. Sob a ação da gravidade, esta configuração da ionosfera é de equilíbrio instável, uma perturbação na base da região pode romper o equilíbrio, introduzindo uma pequena instabilidade que pode evoluir, gerando as bolhas ionosféricas.

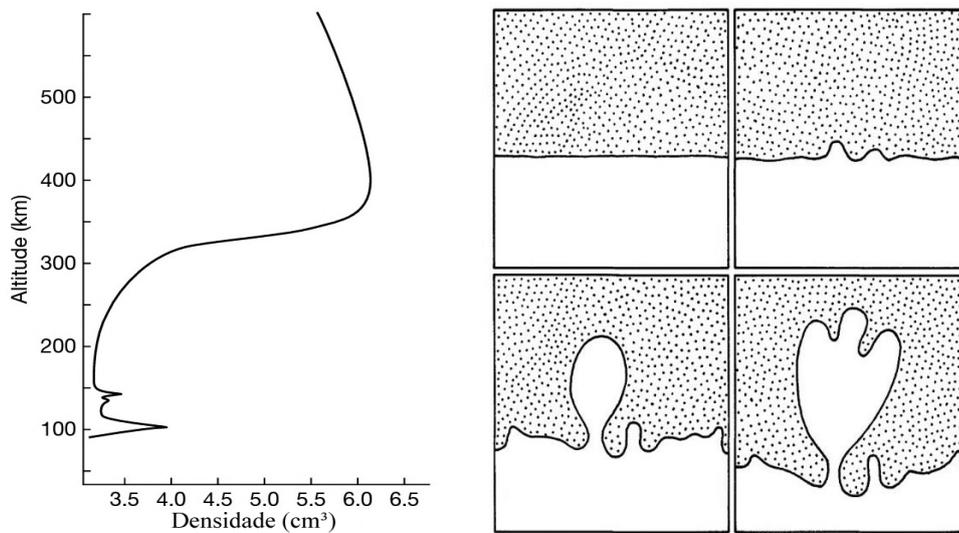


Figura 2.6 Ilustração didática da evolução de uma instabilidade gerando as bolhas ionosféricas segundo a teoria linear Rayleigh-Taylor (RT). FONTE: Kelley (1989).

As dimensões das bolhas de plasma variam de dezenas de centímetros a centenas de quilômetros na direção leste-oeste e a sua extensão norte-sul pode variar significativamente dependendo da altura que a irregularidade atinge no equador (**Mendilo e Tyler, 1983; Kelley et al., 2002; Pimenta et al., 2003; Cândido, 2008**). As bolhas ionosféricas ocorrem desde alturas da região F até alturas em torno de 1.000 km. Para **Weber et al., (1996)** a densidade média do plasma dentro das bolhas é reduzida de 1 a 4 ordens de grandeza em relação à região exterior à irregularidade. Quanto às principais características dinâmicas, deve-se mencionar que em baixas latitudes as bolhas de plasma se deslocam de modo geral de oeste para leste com a mesma velocidade de deriva zonal do plasma ionosférico, com velocidades que podem variar de 100 m/s a 200 m/s antes da meia-noite local diminuindo após este horário para 50 m/s (**Sobral et al., 1990, 1991; Cândido, 2008**).

Neste trabalho estuda-se a propagação de bolhas ionosféricas com o uso de dados TEC de receptores GPS e de dados de densidade eletrônica coletadas pelo instrumento PLP do satélite C/NOFS quando as passagens são sobre as regiões de interesse. **Valladares et al. (2004)** inferiram que a ocorrência de cintilações GPS, correspondem a bolhas de plasma, ou depleções do TEC, que consistem em uma redução brusca do TEC seguido por uma recuperação para um nível próximo do valor TEC anterior à exaustão. No entanto, processos não-bolhas podem produzir variações rápidas no TEC, levando a uma identificação equivocada de depleções TEC, processos tais como a decadência noturna da camada F e a redistribuição da densidade causado pelo efeito fonte também podem diminuir o valor do TEC, entretanto, estes tipos de processos tem ausência do segmento de recuperação.

A ocorrência de bolhas apresenta grandes variações. Além da variabilidade diária do campo elétrico responsável pelo crescimento da instabilidade, observa-se ainda variabilidade sazonal, com o ciclo solar, com a longitude e com a atividade magnética.

2.1.4. Efeito da Ionosfera em Sinais de Satélites

A primeira teoria de propagação foi desenvolvida na década de 1920 por Appleton. A característica de deslocamento da onda eletromagnética pelo espaço, é um fenômeno muito complexo, sujeito a muitas variáveis, algumas próprias da onda (frequência, polarização, etc.), dos equipamentos e antenas (ruído, ganho, potência, etc.) e outras do meio (elétrons livres, campo magnético, atividade solar, etc.) (**Baroni, 2009; Carbajal, 2008**).

Como já falado anteriormente a parte superior da atmosfera terrestre onde íons e elétrons existem em quantidades suficientes para afetar a propagação de ondas de rádio é denominada ionosfera. Os sinais emitidos por satélites são afetados pela ionosfera, ao se propagarem através desse meio. Este fato é uma decorrência da natureza dispersiva da ionosfera onde a velocidade de propagação de onda eletromagnética depende de sua frequência, parâmetro fundamental para análise do comportamento de ondas eletromagnéticas.

Segundo **Machado (2002)** e **Nussenzveig (1997)** a propagação de ondas eletromagnéticas através de um meio deve satisfazer as equações de Maxwell, as quais relacionam o campo elétrico com o magnético, que podem ser descritas na forma apresentadas na **Equação 2 (Jackson, 1966)**:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot D &= \rho \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times H &= J + \partial D / \partial t \\ \nabla \times E &= -\partial B / \partial t\end{aligned}\tag{Equação 2}$$

Onde D é o vetor deslocamento, ρ é a densidade de carga, B é o vetor indução magnética, H é o vetor campo magnético, J é o vetor densidade de corrente e E é o vetor campo elétrico. De onde se obtém segundo **Carbajal (2008)** a equação de onda:

$$\nabla^2 E - \mu \varepsilon \nabla^2 E / \partial t^2 - \mu \sigma \partial E / \partial t = 0\tag{Equação 3}$$

Onde ε é a permissividade do meio, μ é a permeabilidade e σ condutividade do meio.

Da **Equação 3** obtemos parâmetros importantes do sinal do satélite como a velocidade de propagação, índice de refração, polarização, dentre outros.

A influência da ionosfera sobre a propagação de ondas de rádio é descrita principalmente através do índice de refração. Na ionosfera, por ser um meio dispersivo, a velocidade de fase varia de acordo com a frequência da onda que a atrasa. A velocidade de fase corresponde a velocidade de uma onda senoidal pura, enquanto que a velocidade de propagação da modulação de uma onda é denominada velocidade de grupo, sendo essas velocidades distintas na ionosfera. Demonstra-se que o efeito da ionosfera sobre as velocidades de fase e de grupo é aproximadamente igual em magnitude, porém com sinais contrários (**Fedrizzi, 1999; Carbajal, 2008; Kintner et al., 2004**).

Quando uma onda vai de um ponto na superfície terrestre ou próximo dela a outro ponto no espaço atravessando a ionosfera ou vice-versa. Os principais efeitos da ionosfera na propagação incluem a rotação de Faraday do plano de polarização da onda, dispersão por irregularidade, absorção na região D, atraso de tempo, diferença

de fase, frequência de ressonância, flutuações de amplitude ou cintilação, refração, etc., **(Sousa, 1992; Carbajal, 2008)**.

A presença da ionosfera na trajetória de propagação das ondas de rádio transmitidas pelos satélites causa um desvio destes sinais em relação ao caminho geométrico retilíneo entre o satélite e receptor, além de afetar a velocidade de propagação do sinal. Considerando-se que, no vácuo, uma onda eletromagnética propaga-se com a velocidade da luz, o intervalo de tempo necessário para o sinal percorrer a distância satélite-receptor será diferente daquele onde a ionosfera encontra-se presente na trajetória de propagação de onda **(Kintner et al., 2004; Carbajal, 2008; Baroni, 2009)**.

O efeito da refração ionosférica é diretamente proporcional ao número de elétrons presentes ao longo da trajetória de uma onda eletromagnética, o que define o conteúdo eletrônico total (TEC, Total Electron Content). Os elétrons livres provenientes da ionização da ionosfera causam um atraso na propagação do sinal com relação à sua velocidade no vácuo. O atraso ionosférico depende do TEC ao longo do caminho do sinal e da frequência usada. O TEC é função do fluxo solar, atividade magnética da Terra, hora local, estação do ano, etc.

As depleções na densidade eletrônica do meio ionosférico, cujas densidade média do plasma é reduzida de 1 a 4 ordens de grandeza em relação a densidade de plasma exterior a depleção, onde as paredes e interior das depleções são caracterizados por flutuações de densidade eletrônica ionosférica **(Weber et al., 1996)**, geradas por instabilidades no plasma na ionosfera equatorial após o pôr-do-Sol, são acompanhadas de intensas variações aleatórias na densidade eletrônica abrangendo um amplo espectro de escalas. Quando o sinal de rádio atravessa este meio com irregularidades do plasma (depleções), experimenta espalhamentos e flutuações aleatórias em sua fase e amplitude o que se denomina de cintilação do sinal, que de acordo com **Kintner et al. (2001)** possuem magnitude dependente da distribuição espacial e da amplitude das irregularidades de densidade. A ocorrência de cintilação em um sinal transionosférico é um indicador da presença de irregularidades na linha de visada deste sinal, enquanto que, a partir do efeito de refração sobre estes sinais é possível obter-se o TEC ao longo do caminho percorrido pelo sinal **(Rodrigues, 2008; Cueva, 2013)**.

A **Figura 2.7** ilustra as principais regiões de ocorrência de cintilação, para anos de máximo solar (globo da esquerda) e anos de mínimo solar (globo da direita).

Observa-se da **Figura 2.7** que as cintilações acontecem predominantemente em três regiões **Rodrigues et al. 2008 abut Basu et al. (1988)**, na parte equatorial do globo terrestre no período após o pôr-do-Sol, o lado noturno da região da oval auroral e o lado diurno do vértice polar, e por último a região mais interna da calota polar, onde é possível se observar cintilações em qualquer hora local. Observa-se também que a maior intensidade de cintilações correspondem as regiões de pico da anomalia equatorial (**Rodrigues, 2008**).

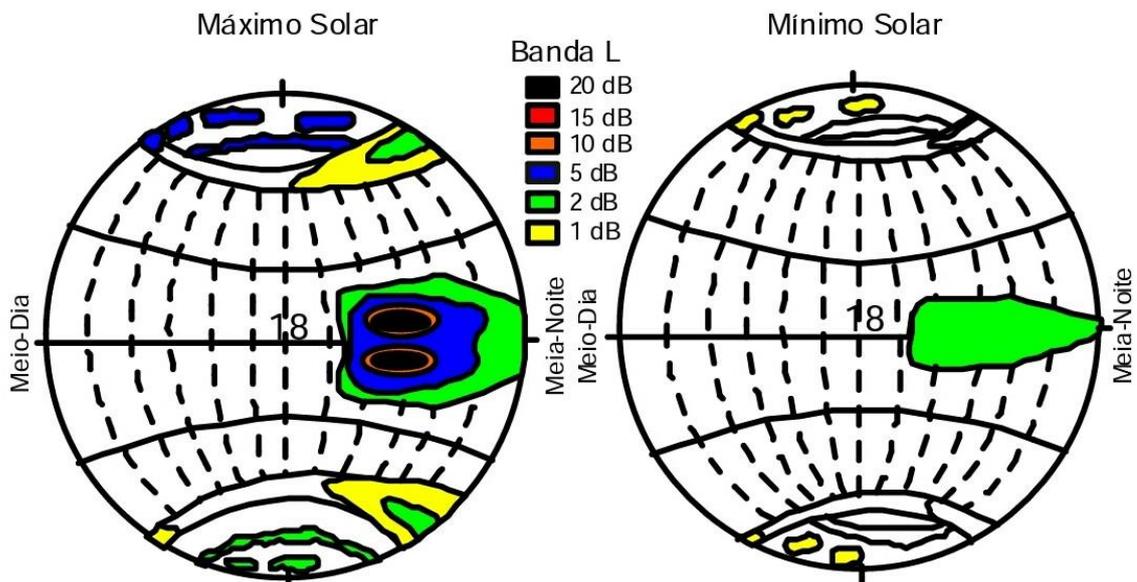


Figura 2.7 Nos releva a morfologia global das cintilações em sinais de rádio durante anos de solar máximo (globo à esquerda) e mínimo (globo a direita).
 Fonte: Rodrigues (2008), abud Basu et al. (1988).

2.2. Instrumentação

2.2.1. Satélite C/NOFS – PLP

O **C/NOFS** (acrônimo em inglês para: *Communications/Navigation Outage Forecasting System*) é um satélite desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisas da Força Aérea dos Estados Unidos para investigar e para prever cintilações na ionosfera superior. É projetado para demonstrar a monitorização e previsão da cintilação ionosférica em tempo real e em escala global (**de La Bejaudiere et al., 2004; de La Bejaudiere et al., 2009**). Um objetivo é detecção das condições que poderiam criar as cintilações em determinadas regiões, portanto, fornecendo as previsões para frequências de comunicação que são afetadas pela ionosfera e a degradação do sinal GPS. A **Figura 2.8** mostra o satélite C/NOFS.



Figura 2.8 Mostra o satélite C/NOFS em órbita. FONTE: National Aeronautics and Space Administration (NASA).

O satélite C/NOFS é equipado com um conjunto de instrumentos (sensores) para medições ionosféricas. O Vector Electric Field Instrument (VEFI) faz medições de campos elétricos e magnéticos relacionados a depleções do plasma

ionosférico. O pacote de instrumentos CINDI (Coupled Ion-Neutral Dynamics Investigation) que consiste em dois instrumentos o IVM (Ion Velocity Meter) para medições da composição iônica, temperatura e deriva do plasma, e o NWM (Neutral Wind Meter) para medidas da densidade e velocidades dos elementos neutros. O satélite também possui um receptor de rádio ocultação para detecção e especificação ionosférica CORISS (C/NOFS Occultation Receiver for Ionospheric Sensing and Specification), assim como o DIDM (Digital Ion Drift Meter) para medidas in situ da distribuição de íons e seus momentos dentro da ionosfera. O C/NOFS está equipado com o instrumento CERTO (Coherent Radio Topography Experiment) para medições de perfis de densidade de plasma e cintilação de fase e amplitude. Além disso, o C/NOFS está equipado com um pacote de instrumentos Planar Langmuir Probe (PLP) para medidas de densidade iônica e temperatura eletrônica. Tem uma inclinação orbital de 13°, perigeu de 405 km, apogeu de 833 km, e um período de aproximadamente 93 minutos. Tem variadas taxas de amostragem de modos de operação que permitem medições e estudos de irregularidades ionosféricas de escalas de tamanho variados **(de La Bejaudiere et al., 2004; de La Bejaudiere et al., 2009; Retterer, 2005; Rodrigues et al., 2009; Thampi et al., 2009)**.

O C/NOFS tem como objetivos principais a compreensão dos processos físicos ativos no meio ionosféricos e termosféricos no qual o plasma se desenvolve, a identificação dos mecanismos de geração das irregularidades do plasma responsável pela degradação do sinal e a determinação de como as irregularidades do plasma afetam a propagação de ondas eletromagnéticas.

Este trabalho teve como principal ferramenta o *Planar Langmuir Probe* (PLP), construído pelo Laboratório de Pesquisa da Força Aérea (AFRL), é um instrumento do satélite C/NOFS sendo uma sonda Langmuir e um detector de íons, consistindo em um elemento coletor de corrente através de uma pilha de redes de metal polarizado, que foi otimizado para medir a densidade iônica. Este dispositivo fornece dados auxiliares necessários para interpretar as medições de íons de deriva. As quantidades que podem ser derivadas a partir das amostras do PLP são potencial S/C, temperatura e densidade de plasma **(Rodrigues et al., 2009)**. Neste trabalho utilizou-se a baixa taxa de amostragem de densidade eletrônica (1Hz) do instrumento PLP.

2.2.2. Satélites GPS

O sistema de Posicionamento Global ou GPS (*Global Positioning System*) é um sistema de posicionamento ou navegação por satélite com cobertura global pelo qual um usuário pode determinar sua posição e tempo em qualquer ponto da superfície terrestre ou próxima a ela (**Rodrigues, 2003; Fedrizzi, 1999; Baroni, 2009**). Segundo **Rodrigues (2003), Fedrizzi (1999) e Baroni (2009)**, o segmento espacial do GPS é constituído de 24 satélites distribuídos em 6 planos orbitais igualmente espaçados com inclinação de 55° em relação ao equador geográfico, com 4 satélites em cada plano, a 20.200 km de altitude e período orbital de aproximadamente 12 horas siderais; essa configuração garante que, no mínimo, 4 satélites estejam visíveis em qualquer ponto da Terra. A **Figura 2.9** mostra um satélite GPS e a constelação de satélites em torno da Terra. Cada satélite gera uma mensagem de navegação e um conjunto próprio de códigos, que consiste de uma sequência pseudo-aleatória conhecida como PRN (Pseudo Random Noise) e que é modulado sobre as portadoras. Cada satélite GPS é identificado pelo seu código PRN transmitido (**Monico, 2000; Fedrizzi, 1999; Rodrigues, 2003**).

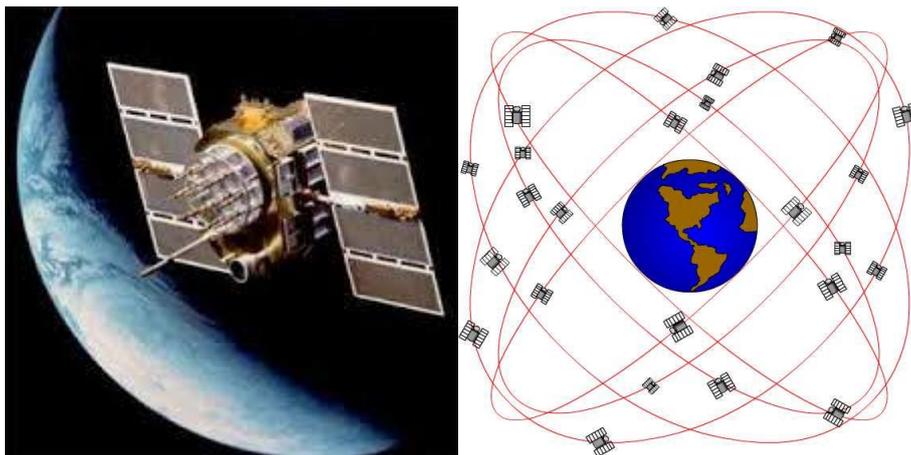


Figura 2.9 A Figura esquerda ilustra um satélite GPS e a direita a constelação de satélites GPS. FONTE: Rede Escola

Um receptor GPS genérico consiste das seguintes seções: (1) antena; (2) pré-amplificador; (3) oscilador de referência; (4) sintetizador de frequência; (5) “*downconverter*”; (6) seção de frequência intermediária (FI); (7) processamento de sinais; e (8) processamento aplicado. Nem todos os receptores GPS são dedicados à navegação. Alguns são dedicados à transferência de tempo ou simplesmente coletam dados. Desta forma, a última função do receptor é denominada de processamento aplicado, cobrindo um amplo conjunto de aplicações **(Rodrigues et al., 2003)**.

A seção de processamento de sinal é a alma de um receptor GPS, pois realiza funções tais como, distribuição do sinal para o processamento simultâneo de vários satélites; geração dos códigos PRN; extrair medidas de fase e frequência do sinal; informação da razão sinal-ruído dos sinais; dentre outras **(Fedrizzi, 1999; Rodrigues et al., 2003)**.

2.2.3. Digissonda

A Digissonda é, essencialmente, um radar pulsado no qual as frequências de estudo podem ser variadas de 1 a 40 MHz. Esse equipamento usa as propriedades da reflexão de um pulso de onda de rádio na ionosfera, em função da frequência de onda, e é constituído de transmissor, receptor, chaveador de antenas, computadores internos, periféricos e antenas transmissoras e receptoras e opera basicamente, transmitindo verticalmente pulsos de alta frequência.

A Digissonda dispensa um operador no local para colher os dados. Além da armazenagem, esse equipamento dispõe os dados para acesso em tempo real via internet, permitindo uma análise da ionosfera local à distância. Por causa da influência que os parâmetros físicos do plasma ionosférico têm na propagação de ondas, deixando-as passar ou não através do gás ionizado, é possível medir esses parâmetros para valores discretos de altura e frequências e mapear a estrutura do plasma da ionosfera.

Os ionogramas são representações gráficas produzidas pelas Digissondas que mostram a variação da altura em função da frequência onde observa-se a reflexão. A **Figura 2.10** mostra dois ionogramas obtidos através do instrumento localizado em São Luís. No painel esquerdo da **Figura 2.10**, ver-se um ionograma

sem a presença do espalhamento da camada F (Spread F), já no painel direito observa-se a presença do Spread F. Na abscissa de cada painel representa-se a frequência, na ordenada a altura de reflexão, a amplitude do sinal é representada pela intensidade do espalhamento do sinal. A linha preta dos ionogramas é o perfil da ionosfera calculado a partir das medições (**Ely, 2010**).

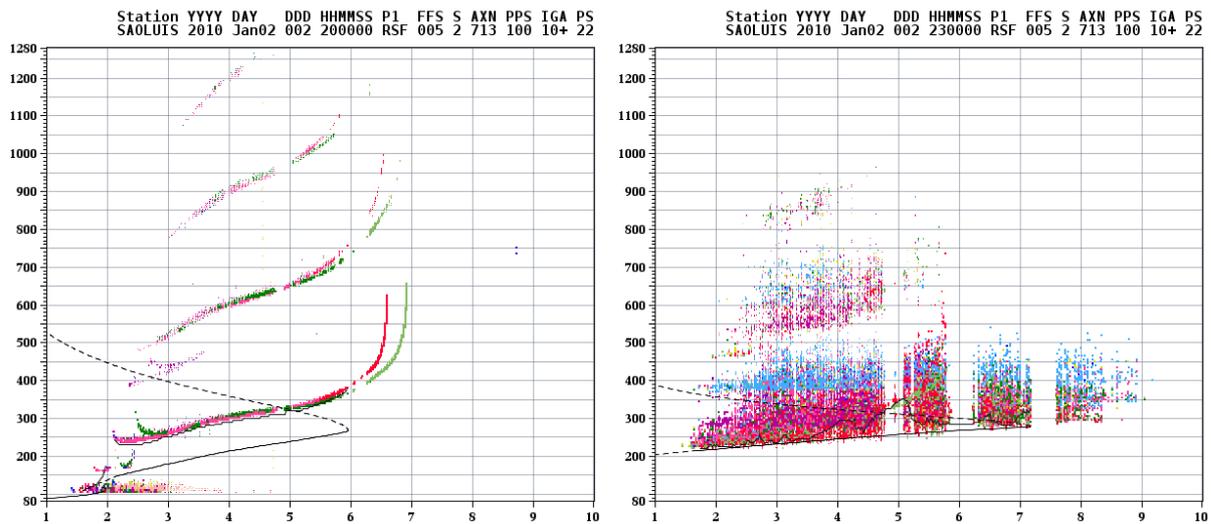


Figura 2.10 Ionogramas obtidos com a Digissonda de São Luís no dia 2 de janeiro de 2010. O painel da esquerda mostra o ionograma sem a presença do Spread F e o da direita com a presença do Spread F.

São sete os parâmetros observáveis que podem ser medidos simultaneamente dos sinais refletidos na ionosfera: 1) frequência; 2) a altura no caso de medida vertical; 3) a amplitude; 4) a fase da onda; 5) o desvio Doppler e o espalhamento; 6) o ângulo de chegada; e 7) a polarização da onda (**Ely, 2010**).

A **Figura 2.11** mostra o *Digisonde™ Portable Sounder* (DPS) em operação, que é produzido pelo Centro de Estudos Atmosféricos da Universidade de Massachusetts Lowell, EUA, que é uma versão em miniatura das *Digisonde™*, com objetivo de tirar o máximo de informações da ionosfera com o mínimo de gastos de energia e que automatizasse a coleta e análise dos dados.

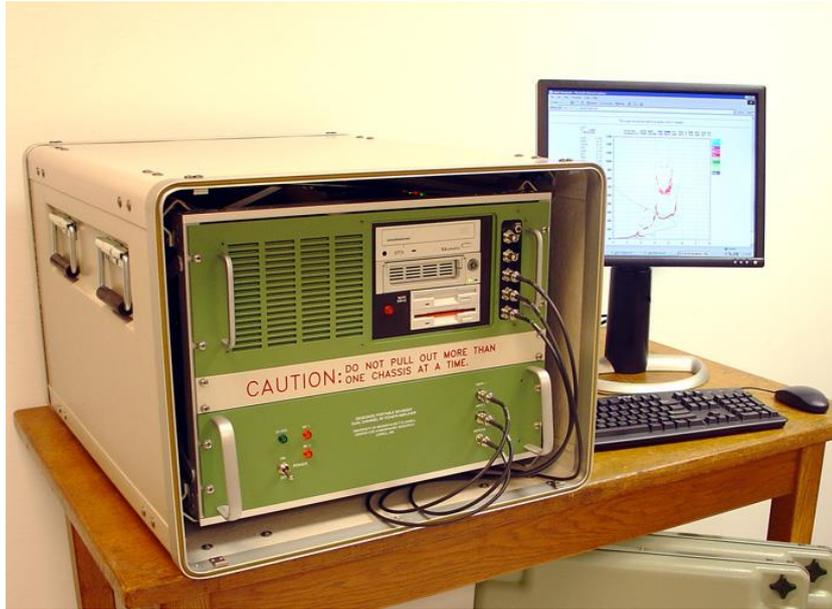


Figura 2.11 Digisonde™ Portable Sounder (DPS).
Fonte: <http://ulcar.uml.edu/>

2.3. Trabalhos Correlatados

Nesta parte do trabalho apresenta-se duas técnicas de detecção de irregularidades ionosféricas por possuírem um enfoque teórico e prático muito rico, visto que, a primeira a ser apresentada utiliza dados de receptores GPS, desenvolvida por **Seemala et al. (2011)** e **Valladares et al. (2004)**, a segunda usa dados do instrumento PLP do C/NOFS desenvolvida por **Rodrigues et al. (2009)**.

2.3.1. Análise de Irregularidades Ionosféricas Segundo Valladares et al., (2004) e Seemala et al., (2011).

Valladares et al. (2004) e **Seemala et al. (2011)** desenvolveram um algoritmo numérico para detectar automaticamente depleções de TEC que são produzidas pelo movimento de bolhas de plasma equatoriais. Utilizando medidas de valores TEC com dados de 127 receptores GPS que operavam na América do Sul em 2008, sendo que, um único receptor GPS mede o TEC numa linha de visão de 6 a 12 satélites GPS simultaneamente e de forma contínua. **Valladares et al. (2004)** utilizaram uma cadeia de 12 receptores GPS da América do Sul para encontrar perfis latitudinais TEC em ambos os lados do equador magnético. As depleções TEC consistem em reduções bruscas no valor do TEC que duram de 10 min a 60 min, que são comumente seguidos por uma recuperação do valor TEC igual ao anterior à depleção.

Valladares et al. (2004) e **Seemala et al. (2011)** implementaram um código de software capaz de identificar automaticamente as depleções TEC, o algoritmo identifica depleções separando o espectro de estruturas de depleções a partir de um correspondente à variabilidade do TEC não perturbado. As depleções são detectadas utilizando dois Filtros Passa Banda (FPB) Digitais, um para obter estruturas de depleções cujas durações observadas são entre 3 min e 40 min e o segundo FPB para detectar depleções mais amplas com durações entre 25 min e 120 min. Estes valores para o tempo de duração das depleções são equivalentes as frequências de corte de

ambos os filtros entre $1,4 \times 10^{-4}$ Hz e $6,7 \times 10^{-4}$ Hz para o primeiro FPB e $4,2 \times 10^{-4}$ Hz e 56×10^{-4} Hz para o segundo FPB. Segundo **Valladades et al. (2004)** e **Seemala et al. (2011)** esta separação de uma gama de espectro de 3 a 120 min em dois espectros de estruturas em sobreposição evita a falsa detecção de depleções das estruturas que são causadas por gradientes íngremes no TEC e é também útil para enfatizar depleções individuais estreitas e mais amplas, aumentando os seus limiares em cada caso para facilitar a detecção. As depleções, são detectadas a partir das amplitudes filtradas cujos valores de limiar se situam abaixo de -1 TEC e -0,6 unidades TEC, respectivamente para depleções estreitas e largas. A detecção de bolhas é confirmada se o ângulo de elevação de observação estiver acima de 30° e o TEC recupera um valor muito próximo do TEC de partida.

2.3.2. Análise de Irregularidades Ionosféricas Segundo Rodrigues et al. (2009).

Rodrigues et al. (2009) apresentam resultados de uma análise da taxa de amostragem de medições feitas pelo instrumento PLP a bordo do satélite C/NOFS. Concentrando-se na análise de irregularidades com escalas de tamanho no domínio intermediário (1-10 km) e transitório (10-100 m) observados quando o satélite estava voando através de uma grande depleção na noite 09-10 de outubro de 2008 na América do Sul, segundo uma trajetória praticamente perpendicular ao campo geomagnético.

Segundo Rodrigues et al. (2009) o procedimento utilizado para a análise dos dados do instrumento PLP é semelhante ao utilizado por Kil e Heelis (1998) para a análise espectral dos dados de densidade de íons AE-E (*Atmospheric Explorer - E*). Dois segundos ou 1024 pontos de dados de densidade de íons coletados pelo PLP foram espectralmente analisadas, utilizando o algoritmo *Fast Fourier Transform* (FFT). O FFT é aplicado ao desvio normalizado da densidade, que é calculado usando o ajuste quadrático para os dados. Uma janela de Hanning é aplicado ao conjunto de dados antes de calcular a FFT para evitar artefatos espectrais. A análise espectral no espectro de densidade de íons indicará a presença ou ausência de irregularidades ionosféricas. Os resultados desta análise de medições de alta taxa de amostragem de

densidade iônica feitas pelo instrumento PLP do satélite C/NOFS, mostram que o satélite atravessou uma grande depleção.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Algoritmo *Análise de Pico a Pico Positivo* na Detecção de Irregularidades Ionosféricas com Dados do Instrumento PLP do C/NOFS.

O algoritmo análise de pico a pico positivo, usado para detecção de depleções do plasma ionosférico (bolhas ionosféricas) com os dados do instrumento PLP do satélite C/NOFS e dos receptores em solo GPS, foi baseada em duas técnicas de identificação de irregularidades ionosféricas, uma desenvolvida por **Seemala et al. (2011)** e **Valladares et al. (2004)**, a segunda desenvolvida por **Rodrigues et al. (2009)**.

Quando o satélite C/NOFS atravessa a camada F ionosférica com depleção do plasma, os dados de densidade coletados pelo instrumento PLP apresentam fortes perturbações, consistindo em uma redução brusca da densidade de íons, que é seguida por uma recuperação para um nível próximo do valor de densidade anterior à depleção (Valladares et al., 2004). Além disso, os sinais emitidos pelo satélite sofrem o efeito de cintilação. As depleções ionosféricas têm densidades reduzidas de 1 a 4 ordens de grandeza em relação ao nível anterior do plasma (Weber et al., 1996) e deslocam-se de oeste para leste (Sobral et al., 1990, 1991). E estão mapeadas ao longo do tubo de fluxo, que é perpendicular ao equador geomagnético terrestre, o que é importante para observar depleções fora do equador geomagnético.

Com o objetivo de analisar as perturbações nos dados de densidade do instrumento PLP, para fazer detecção automática de irregularidades ionosféricas, o algoritmo procede fazendo um ajuste suave dos dados de densidade eletrônica do instrumento PLP do C/NOFS. O painel superior da **Figura 3.1** mostra em vermelho a curva de densidade eletrônica e em azul o seu ajuste suave. Extraem-se as variações da densidade eletrônica fazendo-se a diferença entre a curva original e a ajustada para obter as variações dos dados em relação ao ajuste, que são mostradas no painel intermediário da **Figura 3.1**.

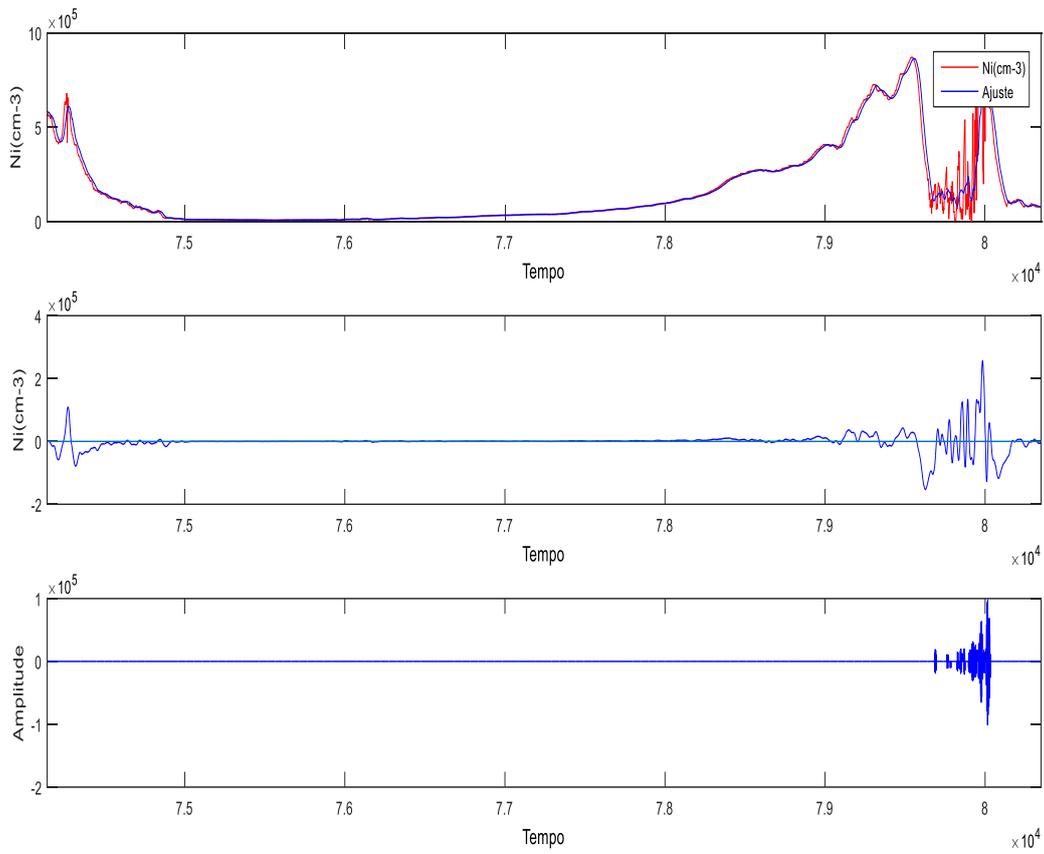


Figura 3.1 O painel superior da figura mostra a curva da densidade eletrônica, obtidas do instrumento PLP do C/NOFS, em vermelho e o ajuste suave dela em azul. O painel do meio apresenta as variações obtidas pela diferença dos dados reais de densidade eletrônica com seu ajuste suave. O painel inferior mostra as oscilações obtidas da resposta a filtragem dos dados de densidade eletrônica com FPB e FFT. Os eixos horizontais dos painéis da figura denominados de “Tempo” correspondem as amostras de densidade eletrônica. Os eixos verticais dos painéis superior, do meio e inferior da figura são, respectivamente, densidade eletrônica por centímetros cúbicos, a variação da densidade eletrônica também em unidade de densidade por centímetro cúbico e a amplitude das oscilações.

Usou-se um Filtro Passa Banda FIR (Finite Impulse Response) que fornece os coeficientes necessários para a filtragem dos dados de densidade eletrônica com FFT de overlap-add. Após a aplicação dos filtros FPB e FFT overlap-add obtém-se as oscilações mostradas no painel inferior da **Figura 3.1**. As restrições de frequências do Filtro Passa Banda (FPB), são aquelas nas quais os picos positivos das oscilações geradas pela filtragem, estejam distantes um do outro a um valor que corresponde à quantidade de amostras equivalente ao tamanho mínimo de irregularidade que o

instrumento PLP do C/NOFS permita fazer medições, que para 1 Hz de amostragem, é uma irregularidade com extensão zonal de 10 km. Para a baixa taxa de amostragem (1 Hz) do instrumento PLP do C/NOFS, o FPB tem frequências de banda passante normalizadas de $0,45 \pi$ rad/s e $0,55 \pi$ rad/s e frequências de banda de parada normalizadas de $0,35 \pi$ rad/s e $0,65 \pi$ rad/s. A **Figura 3.2** apresenta graficamente a Resposta de Magnitude ou Amplitude do Filtro Passa Banda FIR, exibindo suas frequências de corte. O eixo horizontal é a frequência normalizada e o vertical é a magnitude do filtro em dB. A **Figura 3.3** apresenta a Resposta de Fase do FPB, com o eixo horizontal sendo a frequência normalizada e o eixo vertical é o ângulo de fase em radianos. A **Figura 3.4** é a Resposta ao Impulso do FPB.

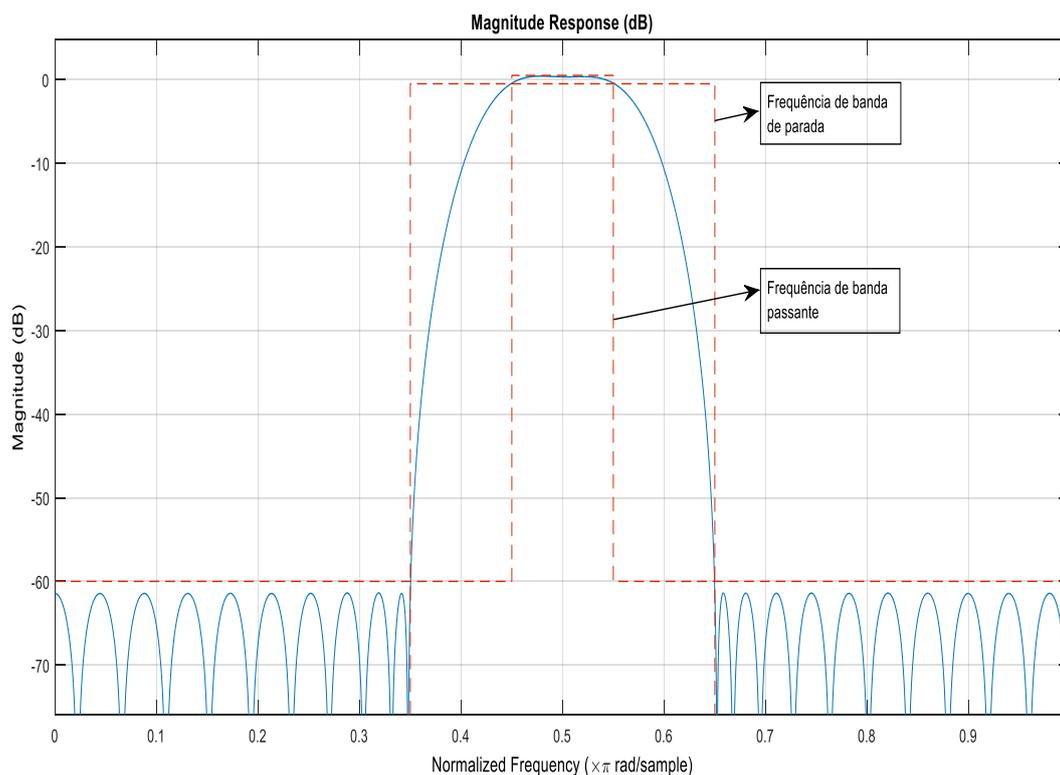


Figura 3.2 Resposta de Magnitude ou Amplitude do Filtro Passa Banda com suas correspondentes restrições de frequências; esta figura mostra as frequências normalizadas no eixo horizontal e a magnitude em dB no eixo vertical.

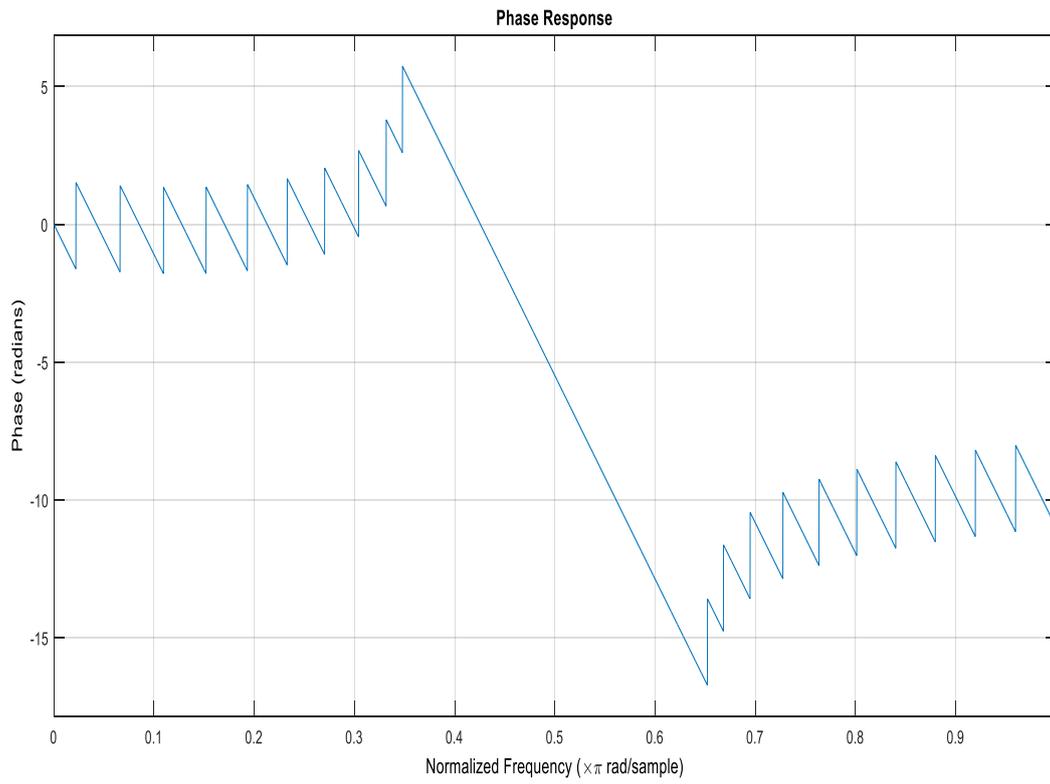


Figura 3.3 Resposta de Fase do Filtro Passa Banda; no eixo horizontal estar as frequências normalizadas e no vertical o ângulo de fase em radianos.

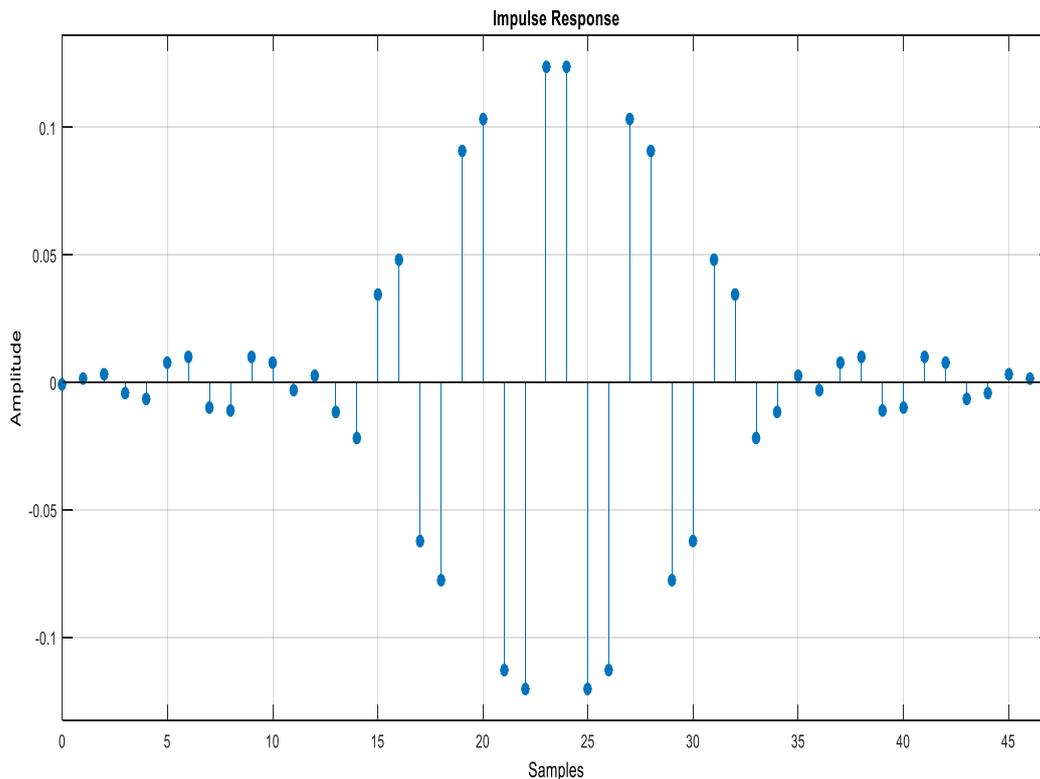


Figura 3.4 Resposta ao Impulso do Filtro Passa Banda FIR, projetado com as devidas restrições de frequência e magnitude.

Com o FPB acima descrito, faz-se a filtragem dos dados usando FFT de overlap-add (uma técnica de filtragem de domínio de frequência, que funciona apenas para filtros FIR), que faz a filtragem dos dados de densidade eletrônica pelo vetor de coeficientes obtidos no Filtro Passa Banda FIR, com as devidas restrições de frequências apresentadas acima. A operação realizada é descrita no domínio do tempo pela equação de diferença (**Equação 4**):

$$y(n) = b(1)x(n) + b(2)x(n-1) + \dots + b(n+1)x(n-n) \quad \text{Equação 4}$$

onde n é o tempo, x os dados de densidade iônica e b os coeficientes do Filtro Passa Banda FIR.

No processamento de sinais o método overlap-add é uma forma eficiente de avaliar a convolução discreta de um sinal muito longo com um filtro de resposta ao impulso finito (FIR). Para esse tipo de filtragem a resposta ao impulso nos dados de

densidade eletrônica do instrumento PLP do C/NOFS no dia 159 de 2011 é apresentada na **Figura 3.5**, onde temos no eixo horizontal as amostras e no eixo vertical a amplitude da resposta ao impulso em dB.

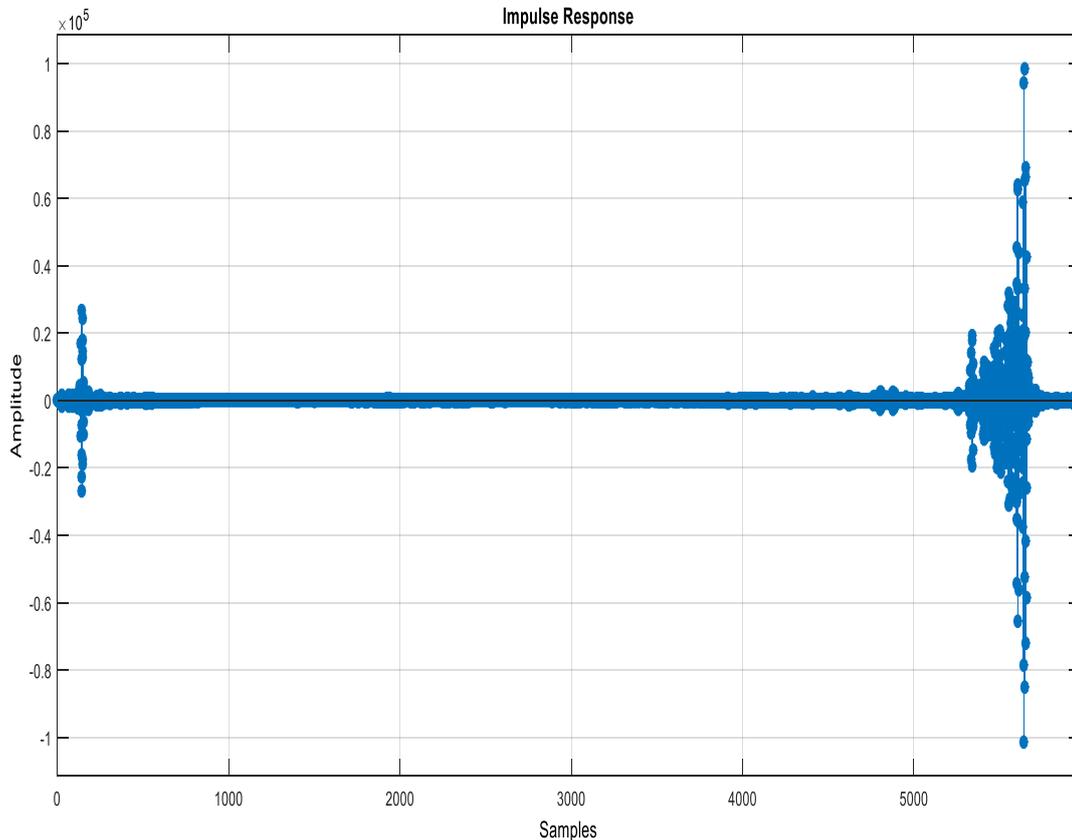


Figura 3.5 Resposta ao Impulso da filtragem com FPB e FFT de overlap-add nos dados de densidade eletrônica do instrumento PLP do C/NOFS no dia 159 de 2011.

O algoritmo analisa se as oscilações correspondem ou não a uma depleção, baseado nos critérios físicos acima explanados. Medindo a distância (quantidade de amostras) de cada pico positivo da oscilação aos seus picos positivos subsequentes (daqui em diante o termo pico significará unicamente pico positivo), começando pela medida da distância do primeiro pico ao último pico da oscilação, depois do primeiro pico ao penúltimo pico, do primeiro pico ao antepenúltimo e assim sucessivamente. Posteriormente mede as distâncias do segundo pico a todos os picos subsequentes a ele, de modo análogo ao feito para o primeiro pico. Assim a análise é feita para todos os picos.

O algoritmo avalia a existência ou não de depleções do plasma, se a quantidade de amostras ou distância entre uma dessas medidas de pico a pico, estiver dentro de um intervalo correspondente aos limites inferior e superior do tamanho leste-oeste das depleções que se deseja detectar. Que considerando a amostragem de 1 Hz do instrumento PLP do C/NOFS, a velocidade média do satélite e a velocidade das depleções ionosféricas que podem variar de 200 m/s a 100 m/s antes da meia noite, diminuindo após esse horário para 50 m/s, acompanhando as derivas do plasma ionosférico de oeste para o leste (Sobral et al., 1990, 1991). Calcula-se os valores máximo e mínimo das quantidades de amostras que a distância entre um pico e outro devem possuir para que o algoritmo classifique a oscilação como depleção do plasma ionosférico. Para irregularidades que estão entre 10 km a 1.000 km, a quantidade de amostra deve ter valores entre 1,5 e 150 amostras, se as quantidades de amostras não estiverem nesse intervalo de valores, as oscilações não serão diagnosticadas como irregularidades ionosféricas.

O algoritmo é projetado para fazer as medidas das distâncias de pico a pico de todos os picos encontrados nas oscilações. Isto permite que grupos de oscilações diferentes, possam ser tidos como diferentes detecções de depleções do plasma, ou que um grupo de oscilações possa ser depleção e outro grupo de oscilação não. Mostra-se didaticamente na **Figura 3.6** como realiza-se a análise das oscilações, que se procede fazendo as medições das distâncias de pico a pico. O painel **(a)** apresenta as medidas das distâncias do primeiro pico da oscilação a três picos subsequentes a ele, começando pela distância do primeiro ao último pico, depois ao penúltimo e assim sucessivamente como indica a numeração no painel **(a)**. É mostrado no painel **(b)** da **Figura 3.6** as medições do segundo pico da oscilação a três picos subsequentes, analogamente ao painel **(a)**. No painel **(c)** as medidas das distâncias são a partir do terceiro pico, no painel **(d)** a partir do quarto pico.

Vale salientar que na **Figura 3.6** foi mostrado as medições de cada pico à apenas três picos subsequentes, mas a análise se estende a todos os picos. Observa-se dessa figura, que é uma ampliação de uma parte da oscilação mostrada no painel inferior da **Figura 3.1**, que as distâncias de pico a pico sempre estão no intervalo de 1,5 a 150 amostras, logo essa oscilação é correspondente a uma depleção do plasma ionosférico.

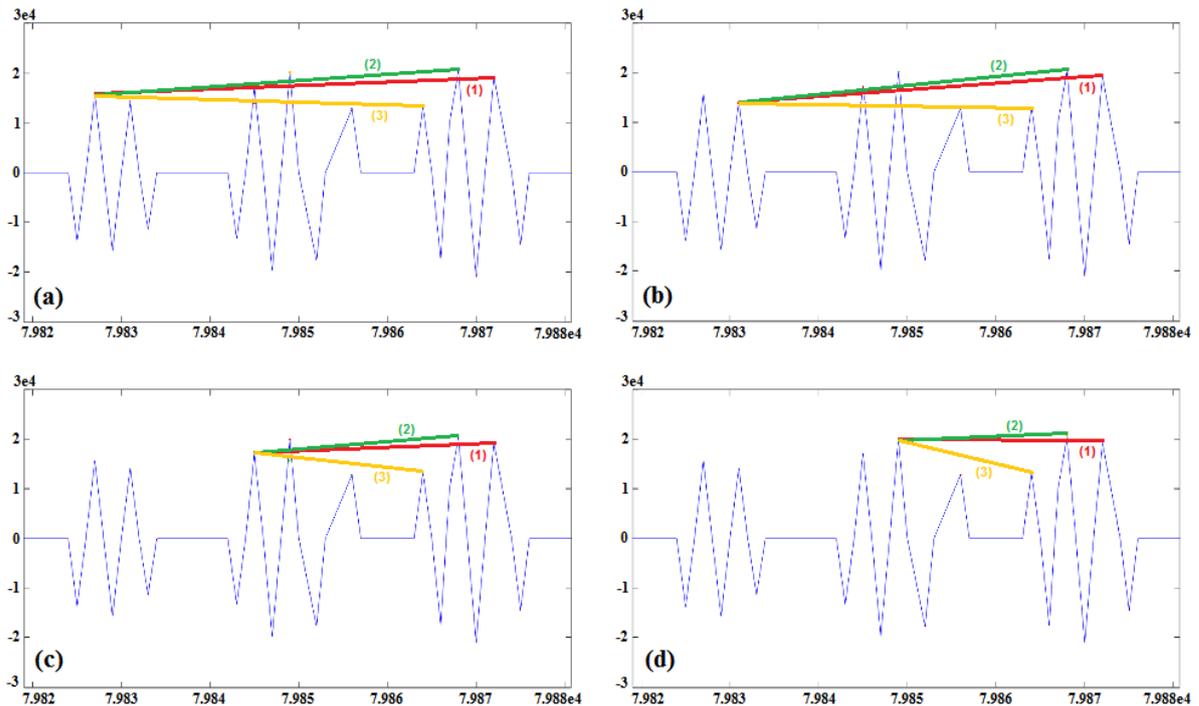


Figura 3.6. Apresentação didática da análise de pico a pico das oscilações.

Para a baixa taxa de amostragem 1Hz do instrumento PLP do satélite C/NOFS, que a cada segundo coleta um dado de densidade iônica da ionosfera. Considera-se a média de aproximadamente 6.000 dados para um período (tempo que o satélite leva para completar uma volta em torno da Terra), sendo que o período do C/NOFS em torno da Terra é de aproximadamente 97 minutos.

O C/NOFS tem uma órbita elíptica com um perigeu de 405 km e apogeu de 853 km. Através da equação $v = \sqrt{\frac{u}{r}}$ pode-se calcular a velocidade orbital do C/NOFS no perigeu v_p e no apogeu v_a , onde $u = GM$, G é a constante gravitacional, M é a massa da Terra e r é a distância do satélite ao centro da Terra. Logo conhecendo-se G , M e o raio da Terra, calculou-se v_p e v_a , também calculou-se a média dessas duas velocidades para obter aproximadamente a velocidade média v_m do satélite ao longo de sua órbita. Obtem-se $v_p = 7,4 \text{ km/s}$, $v_a = 7,2 \text{ km/s}$ e $v_m = 7,3 \text{ km/s}$.

As irregularidades ionosféricas que o satélite C/NOFS é capaz de identificar, estão na escala de 10 cm a 1000 km. Conhecendo-se as dimensões das

bolhas e a velocidade do C/NOFS, somos capazes de calcular quanto tempo o C/NOFS leva para atravessar uma bolha ionosférica, ou quantas amostras ele coleta, já que sua amostragem é de 1Hz.

Usando a formula da velocidade $v_m = \frac{d}{t}$, onde v_m é a velocidade orbital média do C/NOFS, d o comprimento leste-oeste da bolha e t o tempo que o satélite leva para atravessar a bolha (ou a quantidade de dados coletados). Considerando ainda, para cálculo da relatividade (usando as transformações de Galileu), a velocidade das bolhas ionosféricas, que podem variar de $100km/s$ a $200km/s$ antes da meia noite local diminuindo após esse horário para $50km/s$ (**Sobral et al., 1990, 1991; Cândido, 2008**). Obtém-se **1,5 s** como tempo que o satélite leva para a travessar uma bolha com extensão zonal da ordem de 10 km e **150 s** para bolhas da ordem de 1.000 km. Os cálculos acima revelam os valores máximo e mínimo que as distâncias de cada pico a seus picos subsequentes devem possuir, para que o algoritmo classifique a oscilação como depleção do plasma ionosférico. Para irregularidades que estão entre 10 km a 1.000 km, esses devem ter valores entre 1,5 e 150 amostras, caso as distâncias não estiverem nesse intervalo de valores, as oscilações não serão diagnosticadas como irregularidades ionosféricas.

Os valores de **1,5 s** e **150 s** usados como intervalos na análise de picos servem para detectar irregularidades entre 10 km a 1000 km. Os valores de tempo **1,5 s** e **150 s** também são a quantidade de dados coletados ao atravessar a irregularidade, visto que a frequência de amostragem é de 1Hz.

Os valores de **1,5 s** e **150 s** podem também ser encontrados de outra forma, com base no comprimento da orbita do satélite e da quantidade de dados que ele coleta em uma volta completa em torno da Terra. O comprimento da orbita do satélite é aproximadamente 44.000 km, e coleta em média 6.000 amostras ao completar uma volta completa em torno da Terra. Por regra de três simples obteremos os valores aproximados de **1,5** e **150** amostras, levando-se em consideração o comprimento relativo devido à velocidade de deriva das bolhas ionosféricas.

Seja S a saída do sistema que faz a filtragem dos dados de densidade iônica; f uma função que encontra somente o tempo em que os picos de S se encontram, assim $N = f(S)$ é um vetor que representa os valores de tempo em que os picos de S se encontram.

$$N = [N(1), N(2), N(3), N(4), \dots, N(n)] \quad \text{Equação 5}$$

onde $N(1)$ representa o valor de tempo para o primeiro pico; $N(2)$ representa o valor de tempo para o segundo pico; $N(n)$ representa o valor de tempo para o n -ésimo pico de S com $n=1,2,3,4,\dots$. Nesta demonstração matemática, usou-se a distância de cada pico a seus três picos consecutivos, para uma melhor compreensão da análise, mas reforça-se que as medições de distâncias de pico a pico, é de cada pico à todos os picos subsequentes. Então a análise de pico a pico é explicada pelo vetor

$$Z(n) = \begin{bmatrix} e = N(n+1) - N(n) \\ f = N(n+2) - N(n) \\ g = N(n+3) - N(n) \\ h = N(n+4) - N(n) \end{bmatrix} \quad \text{Equação 6}$$

onde $n=1,2,3,4,\dots$, age com um valor discreto de cada vez no vetor $Z(n)$, as componentes **e**, **f**, **g** e **h** de $Z(n)$, são respectivamente as projeções dos vetores que ligam cada pico a seus picos consecutivos sobre o eixo horizontal. Assim para $n=1$, a **Equação 6** fica

$$Z(1) = \begin{bmatrix} e = N(2) - N(1) \\ f = N(3) - N(1) \\ g = N(4) - N(1) \\ h = N(5) - N(1) \end{bmatrix} \quad \text{Equação 7}$$

Que, representa as medidas de distâncias do primeiro pico encontrado de S aos seus três primeiros picos consecutivos. Para $n=2$,

$$Z(2) = \begin{bmatrix} e = N(3) - N(2) \\ f = N(4) - N(2) \\ g = N(5) - N(2) \\ h = N(6) - N(2) \end{bmatrix} \quad \text{Equação 8}$$

Que, são as medidas do segundo pico encontrado em S aos seus três primeiros picos consecutivos. Para $n = 3$,

$$Z(3) = \begin{bmatrix} e = N(4) - N(3) \\ f = N(5) - N(3) \\ g = N(6) - N(3) \\ h = N(7) - N(3) \end{bmatrix}$$

Equação 9

Que são as respectivas medidas de distâncias do terceiro pico aos três primeiros picos consecutivos a ele. E o processo continua para todos os valores de $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

Se qualquer componente do vetor $Z(n)$ estiver no intervalo de **1,5 a 150** existirá bolha de plasma, caso contrário não existirá bolhas ionosféricas. Matematicamente é possível notar que se pelo menos uma das componentes do vetor $Z(n)$ estiver no intervalo, implica na existência de bolhas de plasma.

A **Figura 3.7** apresenta a síntese dos dados analisados pelo algoritmo na **Figura 3.1**, correspondente ao dia 159 de 2011. É mostrado no painel superior da **Figura 3.7**, a curva de densidade eletrônica (linha contínua vermelha) em um período do C/NOFS em torno do globo terrestre e a altitude do satélite C/NOFS (linha tracejada verde). No painel inferior da **Figura 3.7** é apresentado o mapa do globo terrestre, a curva que representa o equador geomagnético da Terra (linha rosa), o percurso do satélite C/NOFS (linha tracejada em azul) e a depleções do plasma ionosférico (círculos coloridos). Para esse dia de análise o algoritmo detectou registro de depleções do plasma ionosférico próximo às 22:00 UT, a uma altitude de aproximadamente 400 km. Pode-se observar que a densidade de plasma sofre uma redução brusca e depois retornou a um valor próximo ao que possuía anterior a sua diminuição. Isso acontece porque o satélite ao atravessar a depleção encontra uma região de baixa densidade eletrônica, onde sua densidade pode ser reduzida entre 1 a 4 ordens de grandeza no interior da depleção, como mostra a **Figura 3.7** (Weber et al., 1996). Nota-se ainda, que a depleção do plasma é bem desenvolvida, com uma queda de densidade bem acentuada, sendo que o satélite atravessou a estrutura entre 312° a 337° longitude, significando que a depleção está mapeada sobre o mar, ao longo do tubo de fluxo, que leva em consideração o meridiano magnético da irregularidade.

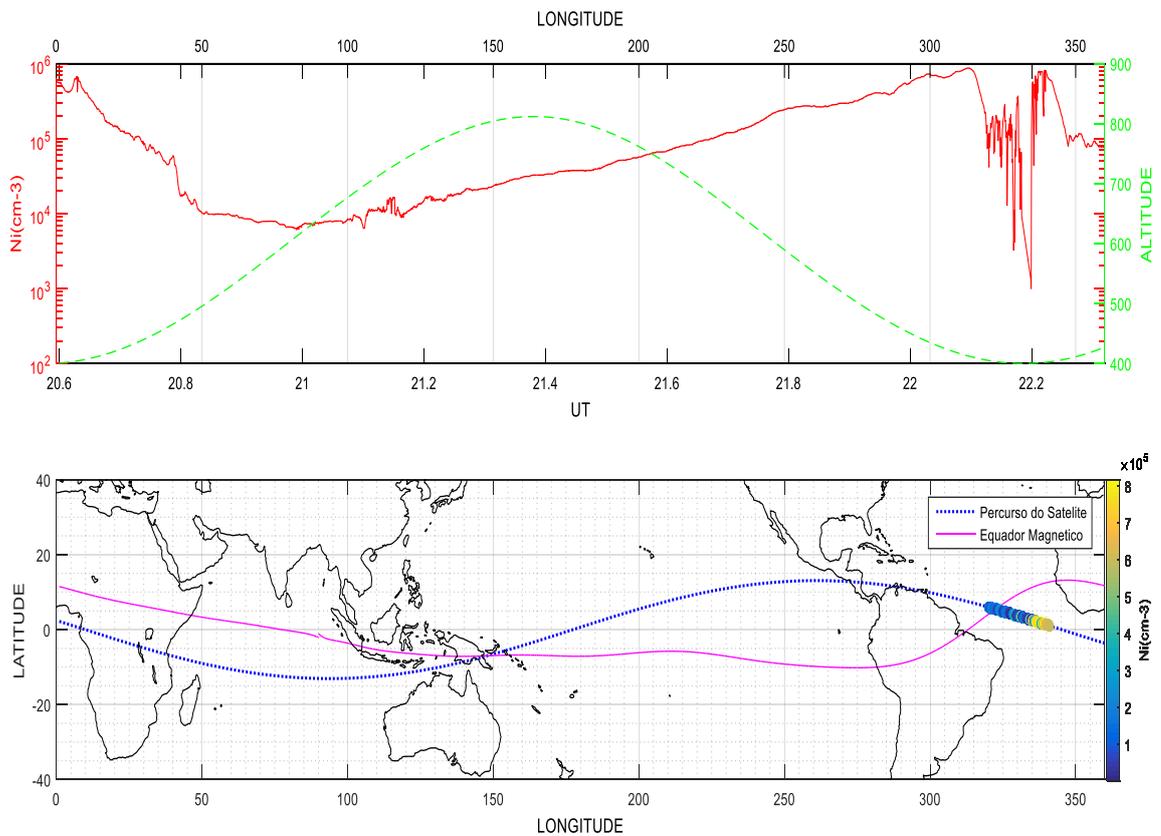


Figura 3.7 O painel superior da figura mostra uma redução da densidade eletrônica seguida por uma recuperação a uma altitude de aproximadamente 400 km. O painel inferior mostra o percurso do satélite C/NOFS no dia 159 de 2011 e as depleções do plasma detectadas pelo algoritmo.

3.1.1. Ocorrência de Depleção no Dia 274 de 2011

A **Figura 3.8** apresenta o resultado do algoritmo para o dia 274 de 2011 com os dados do instrumento PLP do C/NOFS. Para esse dia o algoritmo encontra depleção do plasma ionosférico entre aproximadamente 22:10 UT e 22:20 UT. No painel superior da **Figura 3.8** observa-se que a curva de densidade eletrônica em vermelho sofre uma perturbação entre aproximadamente 20:30 UT a 20:50 UT, que o algoritmo corretamente não registra como depleção do plasma, visto que essa perturbação acontece durante o período diurno por volta das 10:00 Tempo Local.

Utilizando ionogramas obtidos pela Digissonda de Fortaleza – FTZ, que está mais próxima da irregularidade detectada pelo algoritmo e no mesmo meridiano magnético, conforme mostrado na **Figura 3.8**, conduzimos estudos comparativos que mostram a validade do algoritmo para detecção de depleções do plasma.

A **Figura 3.9** apresenta os ionogramas obtidos pela digissonda de Fortaleza – FTZ no dia 274 de 2011, respectivamente nos horários 22:10 UT e 22:20 UT, ilustrando a presença de espalhamento da camada F (spread F) causado por irregularidades de plasma, que está em concordância com o resultado exposto na **Figura 3.8**.

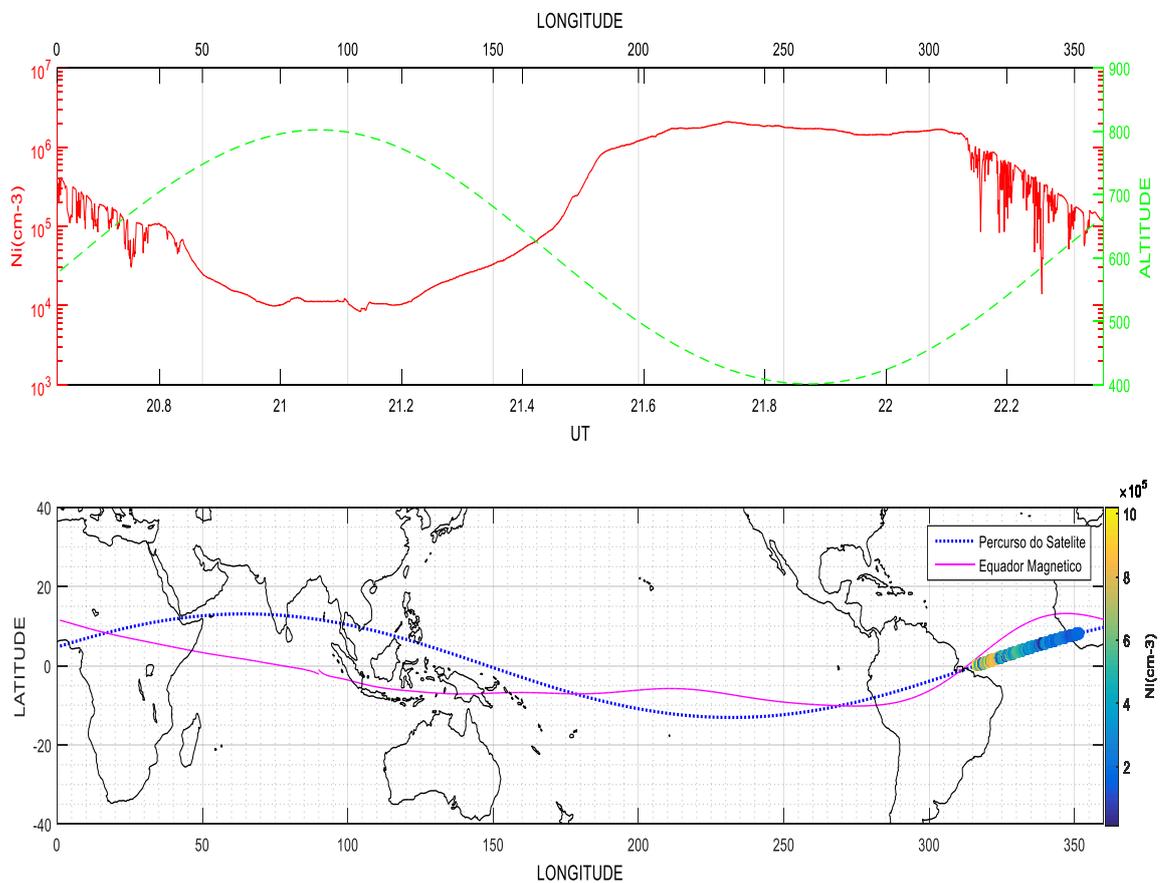


Figura 3.8 O painel superior da figura mostra a densidade eletrônica obtida pelo instrumento PLP do C/NOFS (curva em vermelho) e a altura que o satélite estava em vários momentos enquanto percorria o globo terrestre. O painel inferior mostra o percurso do satélite C/NOFS no dia 274 de 2011 (linha azul), a linha de campo geomagnético da Terra (linha rosa) e detecção de bolhas de plasma.

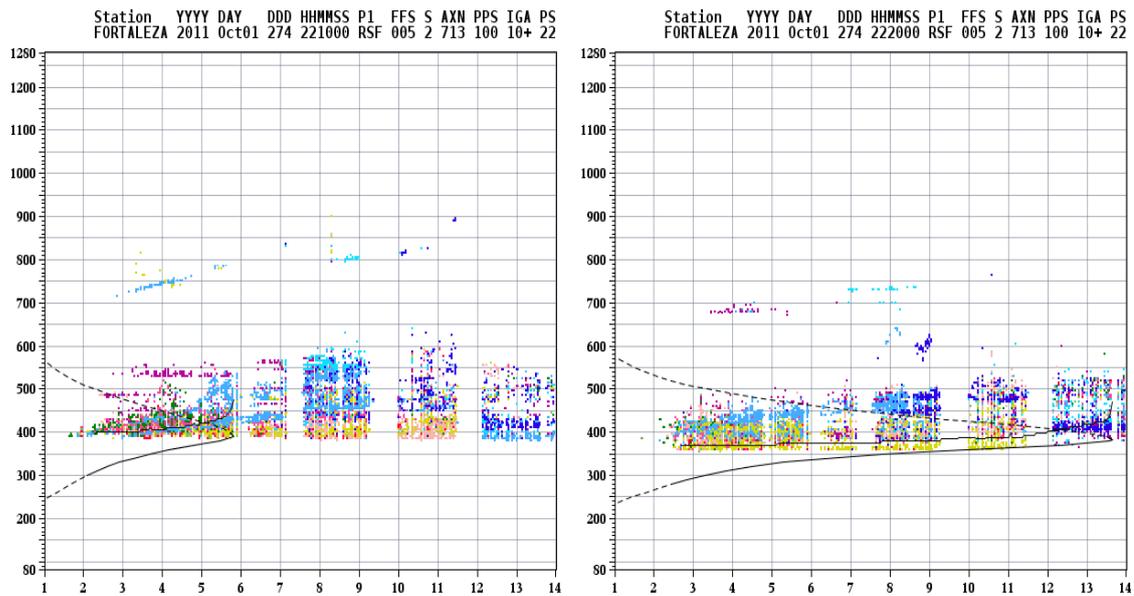


Figura 3.9 Ionogramas obtidos pela Digissonda da Estação de Fortaleza - FTZ no dia 274 de 2011 no horário de 22:10 UT e 22:20 UT, mostrando o espalhamento da camada F (Spread F). **Fonte:** <http://ulcar.uml.edu/>

3.1.2. Ocorrência de Depleção no Dia 275 de 2011

A **Figura 3.10** ilustra a aplicação do algoritmo aos dados de densidade eletrônica do instrumento PLP do C/NOFS no dia 275 de 2011, a depleção do plasma foi detectada no horário de aproximadamente 22:20 UT à 22:35 UT, quase no mesmo momento em que foram coletados os ionogramas da Digissonda de Fortaleza – FTZ, localizada nas proximidades do local em que a irregularidade foi observada e no mesmo meridiano magnético. A **Figura 3.11** apresenta os ionogramas obtidos da Digissonda de Fortaleza nos horários de 22:20 UT e 22:30 UT, respectivamente, mostrando que houve espalhamento da camada F ionosférica (spread F).

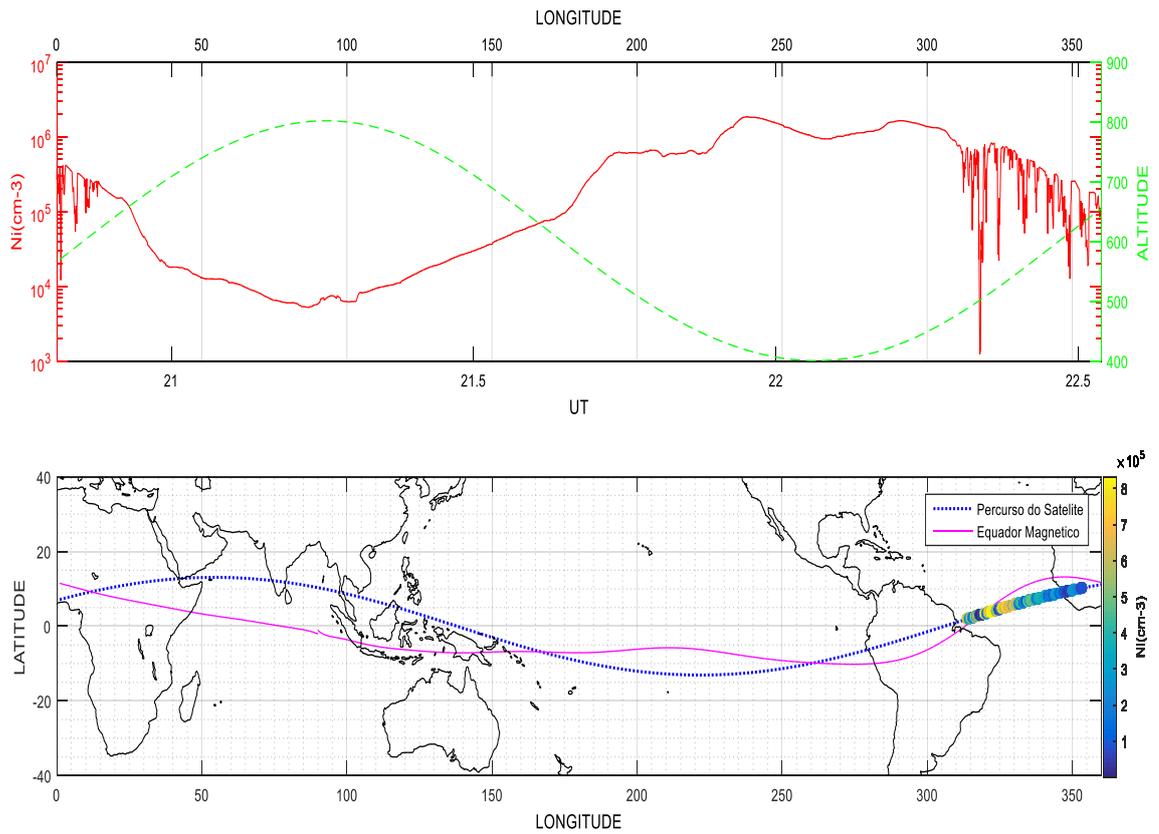


Figura 3.10 O painel superior da figura mostra a densidade eletrônica obtida pelo instrumento PLP do C/NOFS (curva em vermelho) e a altura que o satélite estava em vários momentos enquanto percorria o globo terrestre. O painel inferior mostra o percurso do satélite C/NOFS no dia 275 de 2011 (linha azul), a linha de campo geomagnético da Terra (linha rosa) e detecção de bolhas de plasma.

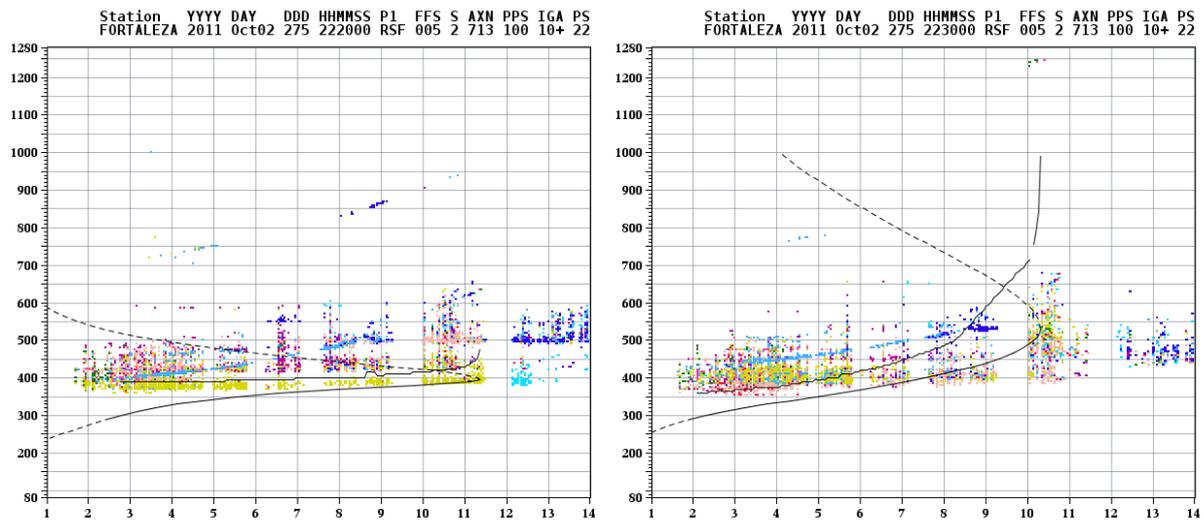


Figura 3.11 Ionogramas obtidos pela Digissonda da Estação de Fortaleza - FTZ no dia 275 de 2011 no horário de 22:20 UT e 22:30 UT, mostrando o espalhamento da camada F (Spread F). **Fonte:** <http://ulcar.uml.edu/>

3.1.3. Ocorrência de Depleção no Dia 276 de 2011

A **Figura 3.12** apresenta a depleção do plasma detectado pelo algoritmo com os dados do instrumento PLP do satélite C/NOFS do dia 276 de 2011, observa-se dessa figura que as depleções encontradas correspondem ao spread F mostrados na **Figura 3.13** com ionogramas da Digissonda de Fortaleza – FTZ.

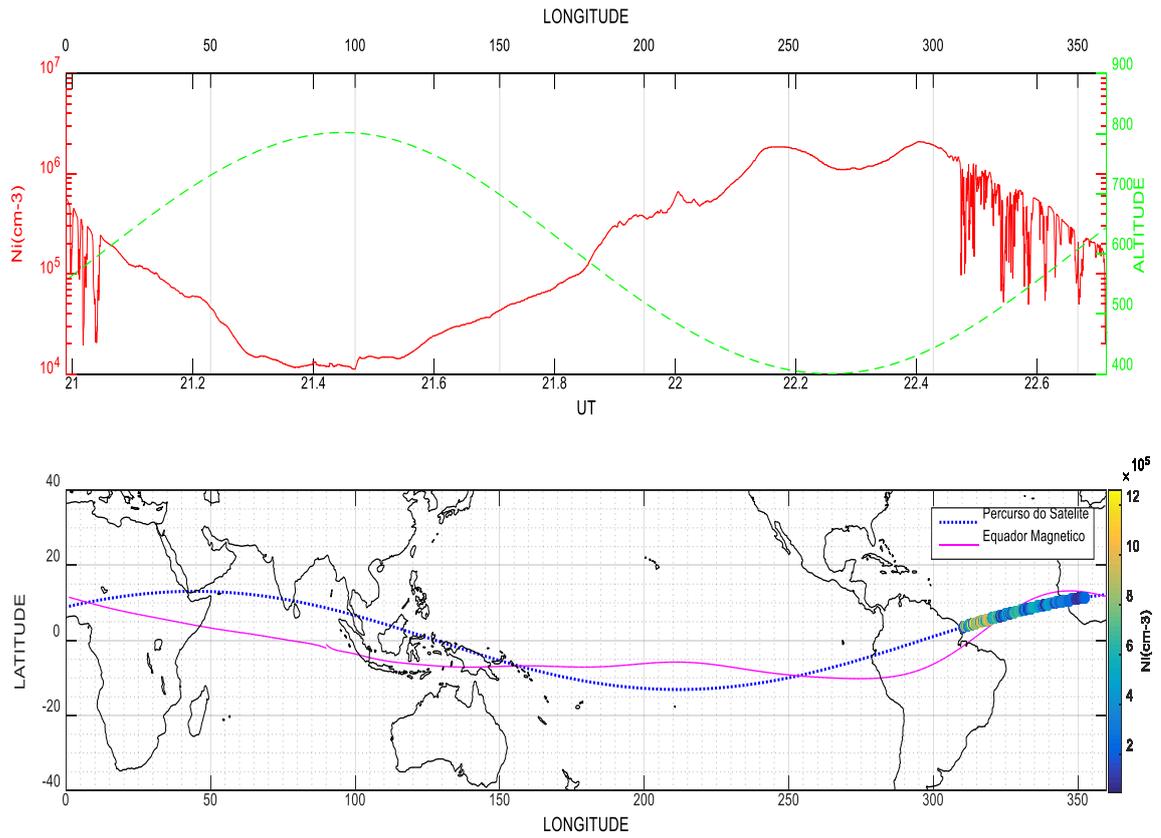


Figura 3.12 O painel superior da figura mostra a densidade eletrônica obtida pelo instrumento PLP do C/NOFS (curva em vermelho) e a altura que o satélite estava em vários momentos enquanto percorria o globo terrestre. O painel inferior mostra o percurso do satélite C/NOFS no dia 276 de 2011 (linha azul), a linha de campo geomagnético da Terra (linha rosa) e detecção de bolhas de plasma.

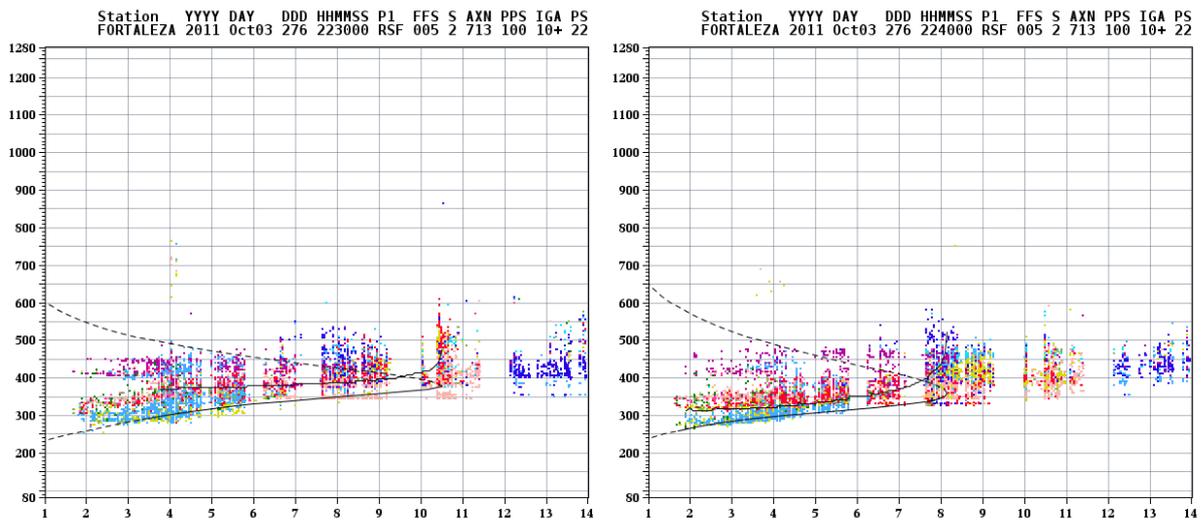


Figura 3.13 Ionogramas obtidos pela Digisonda da Estação de Fortaleza - FTZ no dia 276 de 2011 no horário de 22:30 UT e 22:40 UT, mostrando o espalhamento da camada F (Spread F). **Fonte:** <http://ulcar.uml.edu/>

3.1.4. Ocorrência de Depleção no Dia 277 de 2011

Na **Figura 3.14** é mostrado o resultado da aplicação do algoritmo nos dados do C/NOFS para o dia 277 de 2011, novamente mostrando-se especial concordância entre as depleções do plasma detectadas e o spread F mostrados pelos ionogramas da Digisonda de Fortaleza – FTZ (**Veja Figura 3.15**).

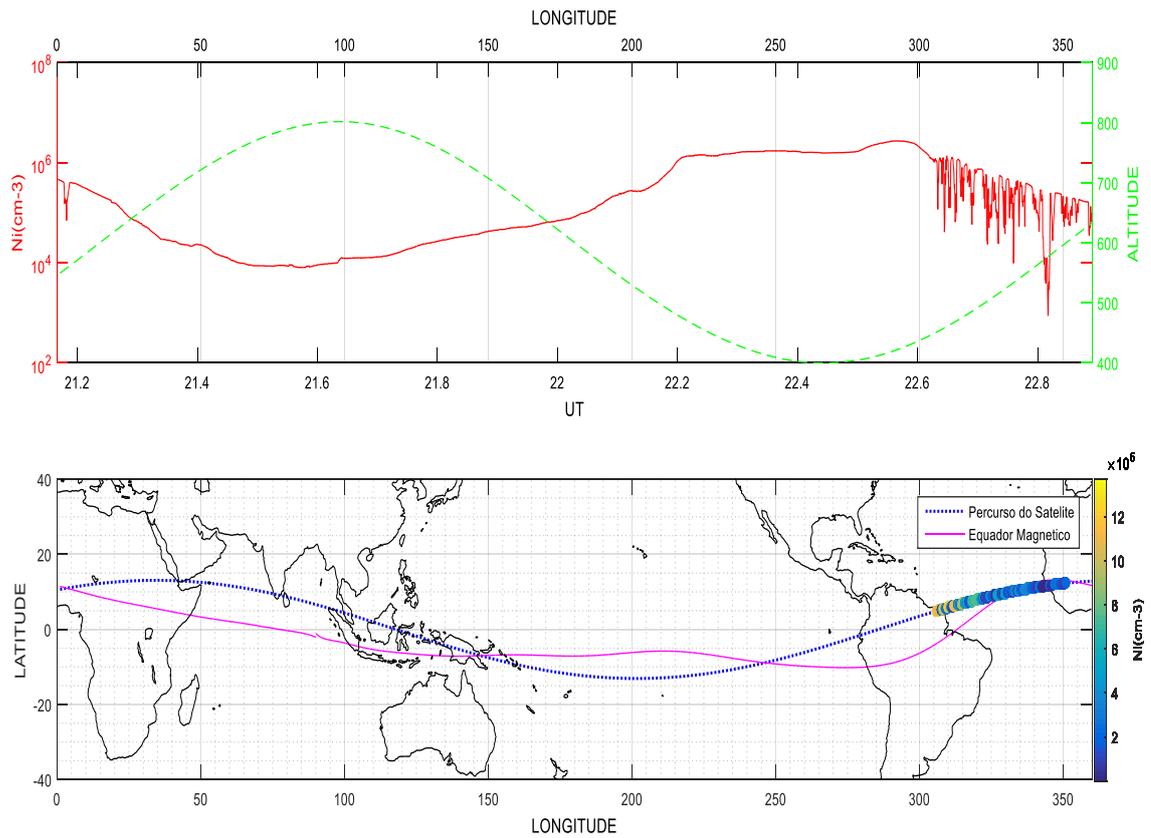


Figura 3.14 O painel superior da figura mostra a densidade eletrônica obtida pelo instrumento PLP do C/NOFS (curva em vermelho) e a altura que o satélite estava em vários momentos enquanto percorria o globo terrestre. O painel inferior mostra o percurso do satélite C/NOFS no dia 27 de 2011 (linha azul), a linha de campo geomagnético da Terra (linha rosa) e detecção de bolhas de plasma.

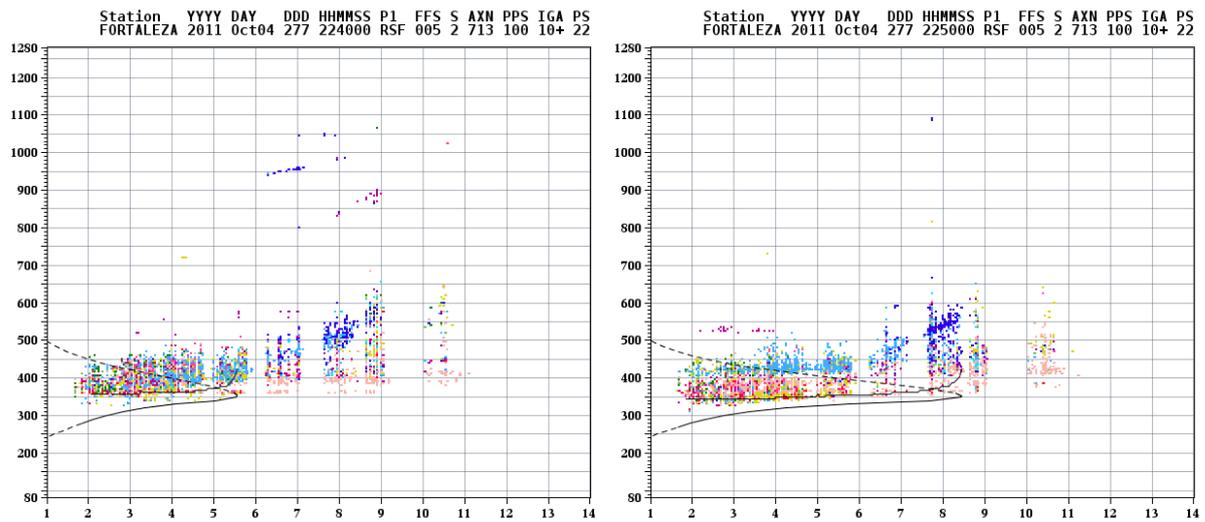


Figura 3.15 Ionogramas obtidos pela Digissonda da Estação de Fortaleza - FTZ no dia 277 de 2011 no horário de 22:40 UT e 22:50 UT, mostrando o espalhamento da camada F (Spread F). **Fonte:** <http://ulcar.uml.edu/>

3.2. Algoritmo Análise de Pico a Pico Positivo na Detecção de Irregularidades Ionosféricas com Dados de Receptores dos Satélites GPS.

Para os dados dos receptores em solo GPS, o algoritmo faz os mesmos procedimentos feitos para os dados do instrumento PLP do satélite C/NOFS, o algoritmo é o mesmo com as particularidades que os diferentes tipos de dados trazem no seu manuseio. Infelizmente para os dados dos receptores dos satélites GPS, o programa ainda falha na detecção de bolhas ionosféricas. Mas prosseguiu-se fazendo as detecções mesmo com as falhas recorrentes.

Nos dados dos receptores em solo GPS, os principais parâmetros a serem investigados são os dados do TEC vertical (VTEC), pois com suas medidas pode-se estudar o TEC sobre um certo local. Considerando-se uma ionosfera estratificada, o VTEC pode ser tomado como a projeção do TEC na vertical do ponto sub-ionosférico situado no caminho do sinal, entre o satélite e o receptor (**Fedrizzi, 1999**). O TEC é dado ao longo da direção entre o satélite e o receptor, matematicamente o VTEC pode ser definido como a multiplicação entre o TEC e a função de mapeamento geométrico $\cos(z)$, onde o valor z representa o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico (**Matsuoka et al, 2009**), localizado em uma camada de altura média de 400 km, pois a ocorrência de bolhas ionosféricas se dá predominantemente a essa altitude, que representa a média do pico do perfil vertical da densidade de elétrons na ionosfera. A **Figura 3.16** ilustra as quantidades envolvidas na obtenção do VTEC.

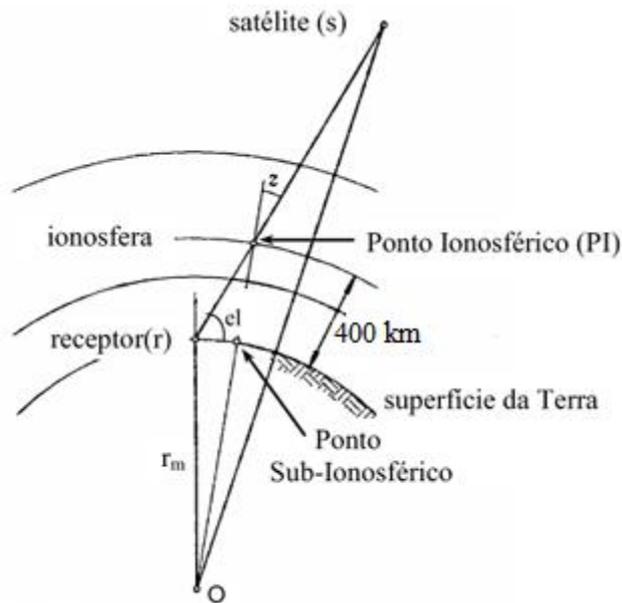


Figura 3.16 Geometria da trajetória do sinal GPS na ionosfera. Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof et al. (2001).

Na **Figura 3.16**, r_m é o raio médio da Terra e “el” é o ângulo de elevação do satélite que também tem grande importância em nosso estudo de detecção de irregularidades na ionosfera.

O algoritmo desconsidera em sua análise todos os dados de satélites com elevação menor que 30° , para evitar influências no VTEC causadas por gradientes espaciais de densidade. Cabe lembrar que o método utilizado para a obtenção do VTEC considera uma ionosfera estratificada sem gradientes (**Rodrigues, 2008**). Os valores maiores que 30° para o ângulo de elevação servem para evitar o erro do multicaminho, no qual o sinal GPS chega à antena do receptor por caminhos secundários, ocorrendo quando o receptor capta o sinal refletido em superfícies próximas, como construções, árvores, superfícies aquáticas entre outras (**Baroni, 2009**).

No painel superior da **Figura 3.17** é exibido as curvas de variação do VTEC obtidas a partir de todos os satélites com elevação maiores que 10° para um receptor em solo GPS. O painel inferior da figura, mostra as mesmas variações dentro de um cone de elevação maior que 30° . Observa-se que no painel inferior a densidade de curva VTEC é reduzida, isso porque todos aqueles dados que vierem de PRNs

(satélites), que estiverem sobre um ângulo de elevação menor que 30° são excluídos, para evitar o erro de multicaminho.

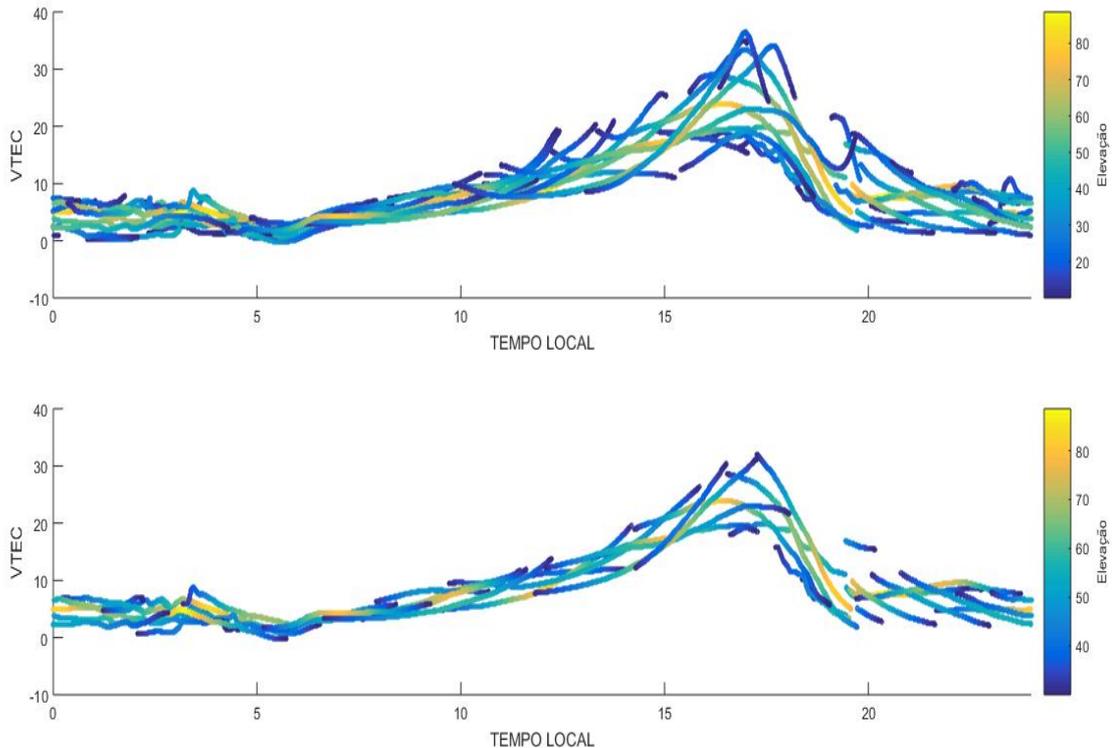


Figura 3.17 Efeito causado por satélites de baixa elevação no cálculo do VTEC. No painel superior foram utilizados dados de satélite com elevação maiores que 10° . No painel inferior foram utilizados apenas valores de satélites com elevação maiores que 30° . Dados da Estação de receptores GPS LINS de Alumbreira Argentina, de 1º de abril de 2009.

O algoritmo faz a análise para todos satélites encontrados, representados pelos seus PRNs. E anula todos os dados VTEC dos receptores GPS que estiverem no horário das 6h às 18h local, pois como dito anteriormente o fenômeno de bolhas ionosféricas não acontece no período diurno.

Os dados VTEC dos receptores GPS são mostrados pela curva em vermelho nos painéis superiores das **Figuras 3.18 e 3.19**. Extraímos as variações do VTEC fazendo-se a diferença entre a curva original dos dados e seu ajuste suave, tais variações são mostradas pela curva de cor verde nas **Figura 3.18 e 3.19**, essas

figuras mostram apenas os valores dos dados obtidos, respectivamente, pelos satélites de PRN 7 e PRN 25.

Usou-se um Filtro Passa Banda FIR que fornece os coeficientes necessários para a filtragem com FFT de overlap-add. As restrições de frequência do FPB, são aquelas nas quais os picos das oscilações geradas pela filtragem estejam distantes um do outro a um valor que corresponde à quantidade de amostras que tem no tempo de 10 min. Para os dados dos receptores GPS LINS, o FPB tem frequências de banda passante de $0,45 \pi$ rad/s e $0,55 \pi$ rad/s e frequências de banda de parada de $0,1 \pi$ rad/s e $0,9 \pi$ rad/s. Após a aplicação dos filtros FPB e FFT de overlap-add obtém-se oscilações mostradas nos painéis intermediários das **Figuras 3.18 e 3.19**).

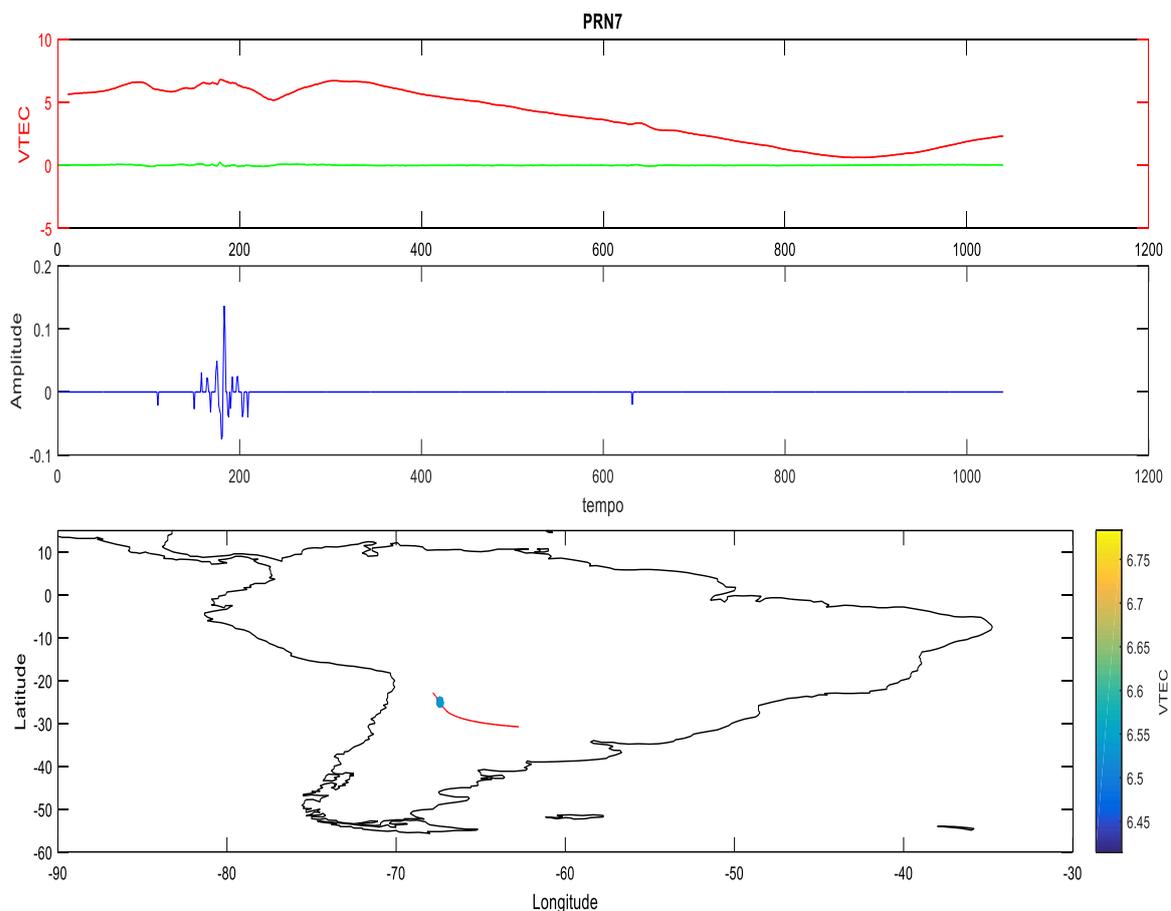


Figura 3.18 O painel superior da figura mostra a curva de VTEC do satélite de PRN 7 em vermelho e as variações obtidas pela diferença entre a curva original de valores VTEC com a sua curva ajustada suavemente. O painel intermediário mostra as oscilações obtidas da filtragem com FPB e FFT de overlap-add. O painel inferior ilustra a bolha ionosférica detectada pelo algoritmo. Os dados usados foram coletados pela estação de receptores GPS LINS em Alubrera Argentina, no dia 1^o de abril de 2009.

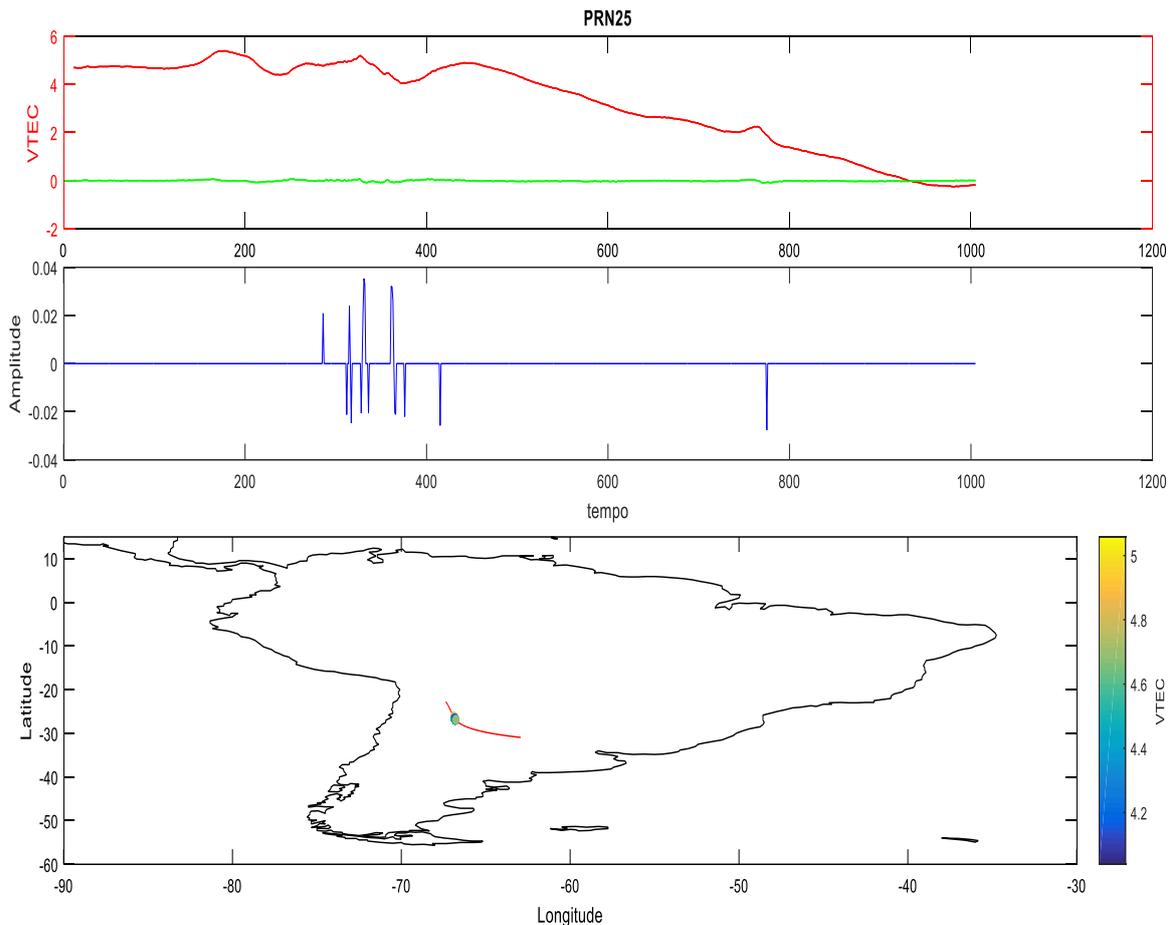


Figura 3.19 O painel superior da figura mostra a curva de VTEC do satélite de PRN 25 em vermelho e as variações obtidas pela diferença entre a curva original de valores VTEC com a sua curva ajustada suavemente. O painel intermediário mostra as oscilações obtidas da filtragem com FPB e FFT de overlap-add. O painel inferior ilustra a bolha ionosférica detectada pelo algoritmo. Os dados usados foram coletados pela estação de receptores GPS LINS em Alumbreira Argentina, no dia 1º de abril de 2009.

O algoritmo investiga se as oscilações geradas pela filtragem com FPB e FFT de overlap-add, correspondem ou não a depleções do plasma ionosférico, fazendo-se as medições de pico a pico das oscilações, procedendo de forma idêntica à explicada para os dados do instrumento PLP do satélite C/NOFS. O algoritmo avalia a existência ou não de depleções do plasma, se a quantidade de amostras ou distância entre uma dessas medidas de pico a pico, estiver dentro de um intervalo correspondente aos limites inferior e superior do tamanho leste-oeste das depleções que se deseja detectar (observe novamente as **Figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10**).

Para os dados VTEC de receptores em solo GPS, os valores correspondentes aos limites devem ser maiores que 40 e menores que 240 amostras, para que as oscilações sejam consideradas depleções do plasma. As durações das bolhas ionosféricas são compreendidas na maioria das vezes entre 10 a 60 min (**Seemala et al., 2011 e Valladares et al., 2004**), a amostragem usada dos receptores GPS é de 0,56 Hz, o intervalo de tempo para coletar dois dados é de aproximadamente 0.3 min. Com regra de três simples obtemos a quantidade de dados que é coletado durante 10 min e 60 min, que corresponde a respectivamente 40 e 240 amostras. Então, já que a duração de bolhas de plasma é compreendida entre 10 a 60 min, os limites inferior e superior da quantidade de amostras na análise de pico a pico devem estar entre os valores de 40 a 240 amostras, para que as oscilações correspondam a bolhas de plasma.

No painel inferior da **Figura 3.18** observa-se que o algoritmo faz a detecção de bolha ionosférica (círculo colorido) com o satélite de PRN 7, um pequeno traço em vermelho mostra a trajetória do satélite. O painel inferior da **Figura 3.19** mostra que o algoritmo também detecta a mesma bolha de plasma (círculo colorido) com o satélite de PRN 25.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No estado da arte observa-se que os métodos existentes para detecção de depleções do plasma ionosférico são aplicáveis para um único tipo de dados de satélites, por exemplo, no trabalho de **Rodrigues et al. (2009)** a técnica aplicada usa unicamente os dados do instrumento PLP do C/NOFS e o processo criado por **Seemala et al. (2011)** é usado somente para valores TEC de receptores GPS. O algoritmo apresentado neste trabalho de mestrado é importante e apresenta uma inovação porque foi testado seu funcionamento para duas variedades de dados, para os do instrumento PLP do C/NOFS e os dados TEC dos receptores GPS, incentivando também a possibilidade de ser aplicado para outras variedades de dados existentes, assim como, para outros estudos científicos que necessitem de investigação de irregularidades.

Neste capítulo da dissertação apresentamos alguns resultados importantes que se obteve ao fazer a aplicação do algoritmo aos dados do instrumento PLP do C/NOFS e aos valores TEC dos receptores GPS. Fez-se o estudo da variabilidade sazonal das depleções do plasma ionosférico com dados do instrumento PLP do C/NOFS para alguns meses importantes do ano de 2010, para mostrar que o algoritmo concorda com a teoria. Compara-se as detecções feitas pelo algoritmo com os dados do PLP do C/NOFS às feitas com os dados TEC dos receptores GPS, além de apresentar o spread F das regiões onde foram feitas as detecções, deixando evidente a concordância na detecção de depleções do plasma com esses três instrumentos. Aplicou-se o algoritmo aos quatro primeiros dias do mês de janeiro de 2010, usando dados da estação GPS de Arapiraca Brasil, para um estudo da variabilidade dia-a-dia das depleções do plasma. Fez-se o estudo longitudinal da densidade de depleções do plasma sobre o continente Sul Americano para o mês de janeiro de 2010, utilizando 182 estações GPS distribuídas na América do Sul, para mostrar que a maior densidade de plasma ocorre no Brasil Oriental para essa época do ano, como comprovado em **Seemala et al. (2011)**.

O algoritmo faz um processo simples para detecção de depleções do plasma. Como as variações nos valores de densidade iônica, coletados pelo instrumento PLP do C/NOFS, são grandes no interior de uma bolha de plasma, encontrar a posição exata das irregularidades foi mais imediato. Os dados TEC dos receptores GPS são mais difíceis de trabalhar, a maioria das variações nos dados TEC não são abruptas, tem-se que contar ainda com variações indesejáveis que não são bolhas ionosféricas por não recuperarem o valor TEC semelhante ao valor anterior a depleção. Como mostrado na última sessão deste capítulo o algoritmo apresenta bom custo computacional, o que possibilitou detectar em apenas uma semana as bolhas de plasma ionosféricas para todo o mês de janeiro de 2010, utilizando-se 182 estações GPS distribuídas na América do Sul.

4.1. Variabilidade Sazonal das Depleções do Plasma Ionosférico

Seemala et al. (2011) estudaram a variabilidade sazonal e longitudinal das depleções no continente Sul Americano, observada com 127 receptores GPS operando na América do Sul. Este capítulo estuda a sazonalidade das ocorrências de

depleções do plasma ionosférico, para todo o mês de janeiro, fevereiro, setembro e novembro de 2010, com dados de densidade iônica do satélite C/NOFS. Segundo Seemala et al. (2011) a declinação magnética do campo magnético da Terra varia fortemente em toda a América do Sul, conseqüentemente, o grau de alinhamento entre o terminador solar e o campo magnético mostra uma morfologia sazonal marcadamente diferente nas costas ocidental e leste do continente. No solstício de verão, que se inicia no hemisfério Sul em 21 de dezembro, a ocorrência de irregularidades se maximiza no Brasil Oriental e as depleções são observadas com maior probabilidade na costa oeste da América do Sul durante os equinócios (Seemala et al., 2011). Utilizou-se os meses de janeiro, fevereiro, setembro e novembro de 2010, no qual o satélite C/NOFS fez várias passagens pelo continente Sul Americano no período noturno, onde se verifica a ocorrência de depleções do plasma ionosférico (Kelley, 1989).

4.1.1. Ocorrência de depleções em janeiro de 2010

A **Figura 4.1** mostra as ocorrências de irregularidades detectadas pelo algoritmo na passagem do C/NOFS pela América do Sul, no mês de janeiro de 2010. Observa-se que essas irregularidades ocorreram predominantemente na parte leste do continente (Brasil Oriental). Observa-se que o C/NOFS no dia 10 de janeiro de 2010, passou quase alinhado com a linha do equador geomagnético da Terra. No dia 4 de janeiro de 2010, a depleção do plasma, apresenta maior extensão zonal que as depleções observadas para outros dias de janeiro de 2010.

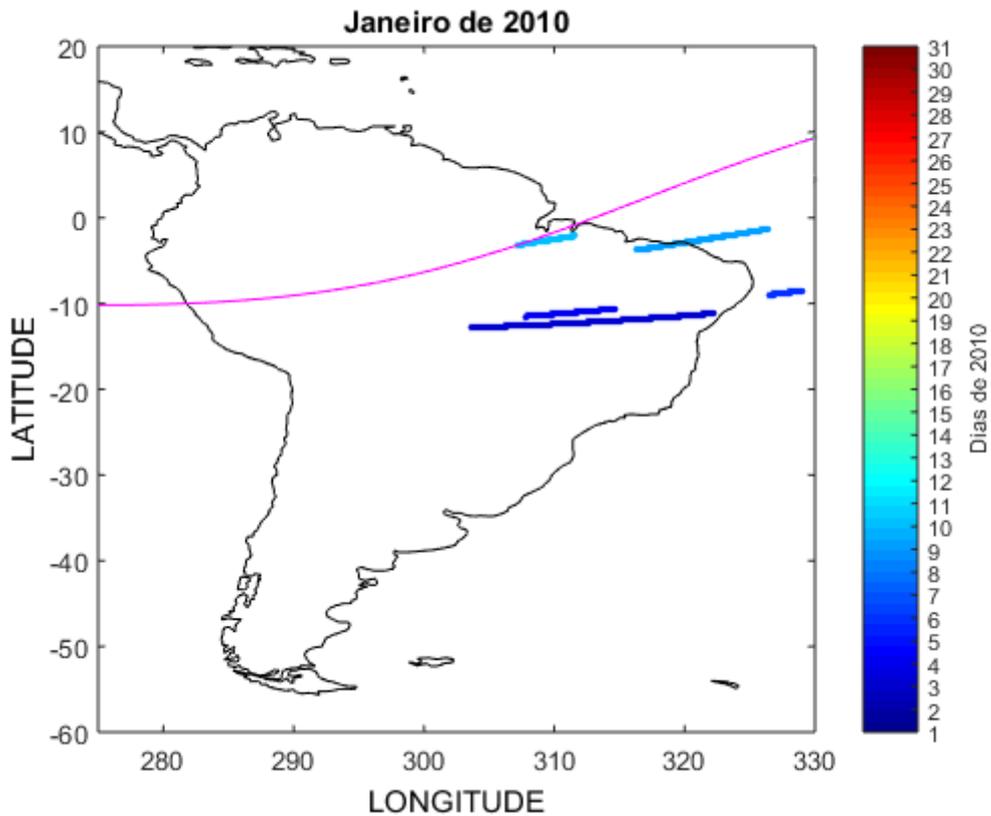


Figura 4.1. Ocorrências de depleções do plasma ionosférico no mês de janeiro de 2010.

4.1.2. Ocorrência de depleções em fevereiro de 2010

A **Figura 4.2** apresenta as depleções do plasma ionosférico, detectada pelo algoritmo que mede as distâncias de pico a pico das oscilações, no mês de fevereiro de 2010 na América do Sul, observa-se que as irregularidades ocorreram na parte leste do continente Sul Americano no nordeste e norte do Brasil, nota-se que todas as depleções estão associadas a grandes amplitudes leste-oeste, representando irregularidades bem desenvolvidas.

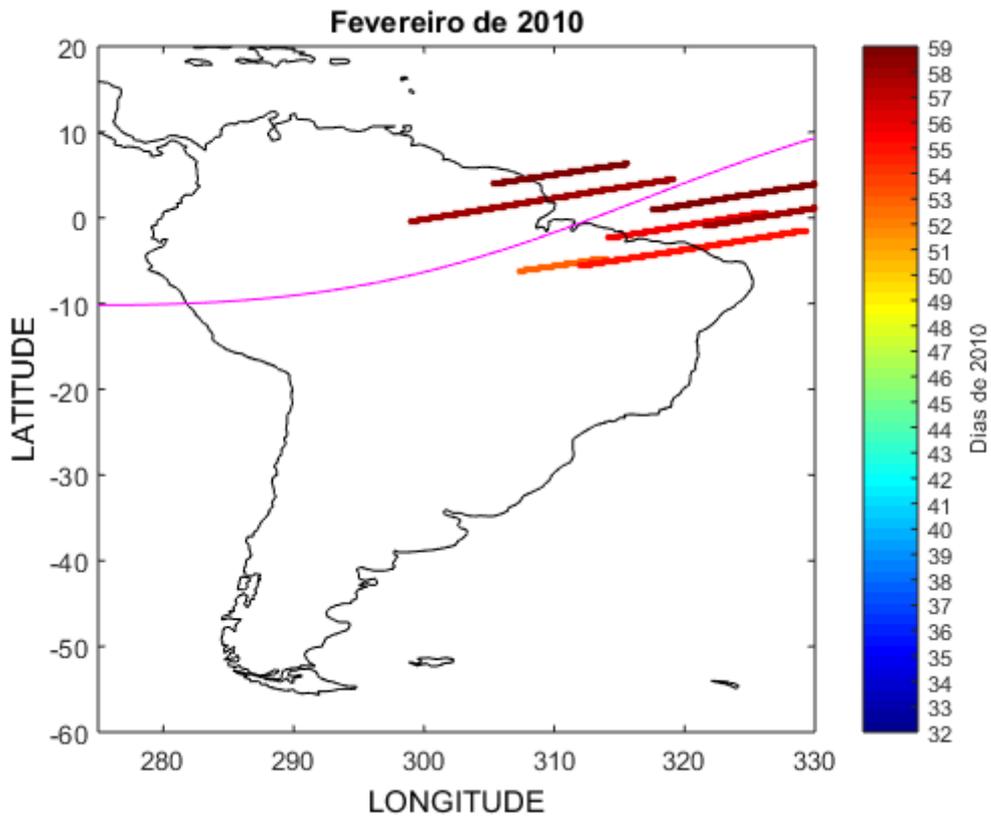


Figura 4.2. Ocorrências de depleções do plasma ionosférico no mês de fevereiro de 2010.

4.1.3. Ocorrência de depleções em setembro de 2010

Na estação dos equinócios a maior probabilidade de ocorrências de depleções do plasma é na costa oeste da América do Sul, mas a variabilidade diária é altamente dinâmica, podendo ser observado irregularidades em todas as estações do ano e estendendo-se por todo continente (Seemala, et al., 2011). Na **Figura 4.3** mostra-se as irregularidades observadas pelo algoritmo com os dados de densidade iônica do C/NOFS em suas passagens pelo Continente Sul Americano no mês de fevereiro de 2010. Observa-se que as irregularidades não estão concentradas na costa oeste ou leste, considerando-se as passagens do C/NOFS no período noturno, onde há presença de irregularidade, nos dias do mês de setembro de 2010. Nota-se uma depleção do plasma bem desenvolvida, detectada pelo algoritmo na passagem do C/NOFS pelo continente Sul Americano, no dia 26 de setembro de 2010. Observa-se que essa depleção ocorreu no Brasil Ocidental.

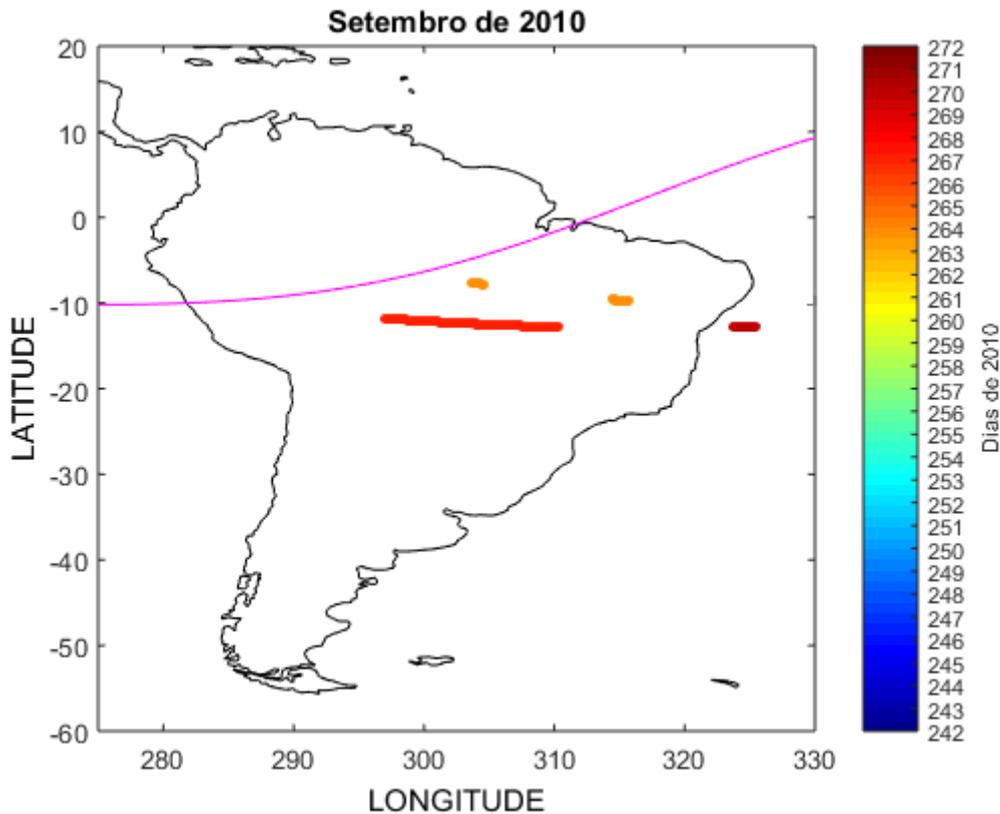


Figura 4.3. Ocorrências de depleções do plasma ionosférico no mês de setembro de 2010.

4.1.4. Ocorrência de depleções em novembro de 2010

Para o mês de novembro, período em que o solstício de verão está a se iniciar, é esperado maior ocorrência de depleções do plasma ionosférico na parte leste do continente Sul Americano. A **Figura 4.4**, mostra que o mês de novembro tem a maior ocorrência de depleções ionosféricas de todos os meses estudados neste capítulo do artigo, observa-se também que as ocorrências de irregularidades, estão concentradas na costa leste do continente, confirmando a estatística de Seemala et al. (2011), que usou 127 receptores GPS distribuídos na América do Sul para estudar a variabilidade sazonal e longitudinal das depleções ionosféricas.

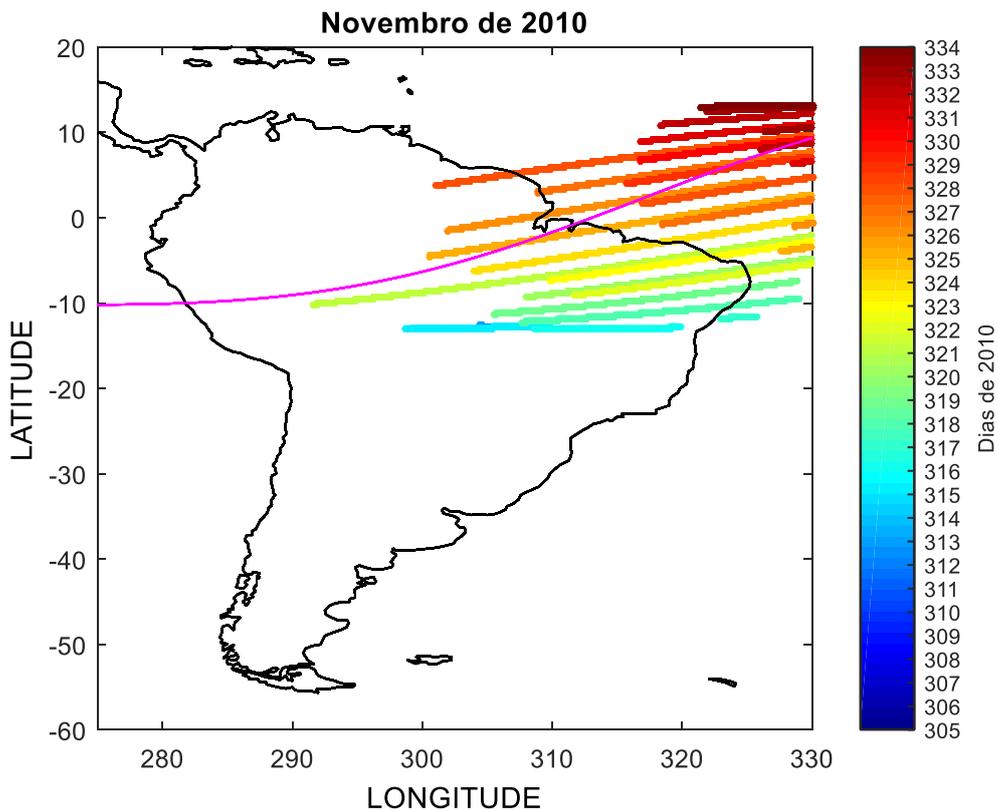


Figura 4.4. Ocorrências de depleções do plasma ionosférico no mês de novembro de 2010.

4.2. Concordância de Resultados do Algoritmo nos Dados de Receptores GPS e Dados do PLP-C/NOFS em Quatro Dias do Mês de Janeiro de 2010.

A **Figura 4.5** apresenta a passagem do satélite C/NOFS para quatro dias do mês de janeiro de 2010 na região da América do Sul (dias 3, 4, 9 e 10 de 2010) mostrando as detecções realizadas pelo algoritmo. As curvas de densidade iônica obtidas do instrumento PLP do C/NOFS são mostradas nos painéis superiores de **(a)**, **(b)**, **(c)** e **(d)** da **Figura 4.5**. Nos painéis intermediário de **(a)**, **(b)**, **(c)** e **(d)** da **Figura 6.5** é apresentado o mapa do continente Sul Americano, a curva do equador geomagnético terrestre (curva rosa), o percurso do satélite C/NOFS (linha pontilhada em azul), a detecção de depleções do plasma ionosférico feitas pelo algoritmo na passagem do C/NOFS pela América do Sul (círculos coloridos) e a localização de uma estação de receptores GPS para cada dia estudado que está mais próxima possível

da localização da irregularidade detectada pelo algoritmo com os dados do C/NOFS e sobre o mesmo meridiano magnético da irregularidade. Nos painéis inferiores de **(a)**, **(b)**, **(c)** e **(d)** da **Figura 4.5** é exibido as curvas VTEC da estação GPS usada para cada um dos dias de passagem do C/NOFS, exibindo as variações VTEC. A parte **(a)** da **Figura 4.5** é referente ao dia 3 de janeiro de 2010 e a estação GPS usada para comparação, localizada nas proximidades da depleção do plasma detectada pela análise dos dados do C/NOFS, foi **bomj** (em Bom Jesus da Lapa, Brasil), **(b)** da **Figura 4.5** é referente ao dia 4 de janeiro de 2010, e também usa a estação GPS **bomj**. Em **(c)** é mostrado a passagem do C/NOFS sobre a América do Sul no dia 9 de janeiro de 2010, a estação GPS usada para comparação foi **ceeu** (em Eusébio, Brasil), por estar nas proximidades da Bolha detectada pelo C/NOFS com uso do algoritmo estudado neste trabalho, também por estar no meridiano magnético da irregularidade. O dia 10 de janeiro de 2010 está em **(d)**, a estação GPS utilizada foi **mapa** (em Macapá, Brasil).

A **Figura 4.6** ilustra para os dias 3, 4, 9 e 10 de janeiro de 2010 os ionogramas das estações de Digissonada mais próximas das irregularidades ionosféricas encontradas pelo C/NOFS e no mesmo meridiano magnético. Para os dias 3, 4 e 10 de janeiro 2010 foi utilizado a estação Digissonda de São Luís, cujo espalhamento da camada F ionosférica é ilustrado em **(a)**, **(b)** e **(d)** na **Figura 4.6**, respectivamente. No dia 9 de janeiro de 2010, foi utilizado a estação de Fortaleza (painel **(c)** da **Figura 4.5**), visto que a estação de São Luís não estava no mesmo meridiano magnético que a irregularidade ionosférica detectada, a estação de Fortaleza estava tanto mais próxima da irregularidade, quanto no mesmo meridiano magnético.

A **Figura 4.6** confirma a detecção de bolhas pelo algoritmo na passagem do satélite C/NOFS pela América do Sul nos dias 3, 4, 9 e 10 de janeiro de 2010, pois mostra o espalhamento da camada F (Spread F) para esses dias, nos mesmos horários e nas proximidades das bolhas detectadas pelo algoritmo.

A **Figura 4.7** apresenta as detecções de depleções do plasma ionosférico do algoritmo para cada um dos PNRs que fizeram passagens sobre as estações GPS **bomj** (dias 3 e 4 de 2010), **ceeu** (dia 9 de 2010) e **mapa** (dia 10 de 2010) para um ângulo de elevação maior que 30° , para evitar o efeito do multicaminho. Na **Figura 4.7** é apresentado as curvas VTEC das estações GPS. O painel superior exhibe as curvas VTEC de todos os satélites que passam pelas estações e os demais painéis

as curvas VTEC de cada um dos satélites que passaram pelas estações GPS no decorrer do dia. No eixo horizontal está o tempo local, no eixo vertical de cada um dos painéis da figura é o VTEC. No lado direito da **Figura 4.7** foi devidamente posicionado ao lado do respectivo painel a numeração do PRN no qual a curva VTEC corresponde. Na **Figura 4.7** está colocado também a localização da bolha ionosférica (círculos coloridos), exibindo que PRN passou pela irregularidade.

As **Figuras 4.5, 4.6 e 4.7** ilustram de forma clara e precisa a eficácia do algoritmo, expondo que para os dias analisados o algoritmo fez a detecção de bolhas tanto para dados do C/NOFS quanto para os dados dos receptores GPS. Foi visto que as detecções de irregularidades eram compatíveis com o espalhamento da camada F (Spread F). A **Figura 4.7** releva de forma clara quais PRNs fizeram passagens pelas bolhas de plasma detectadas.

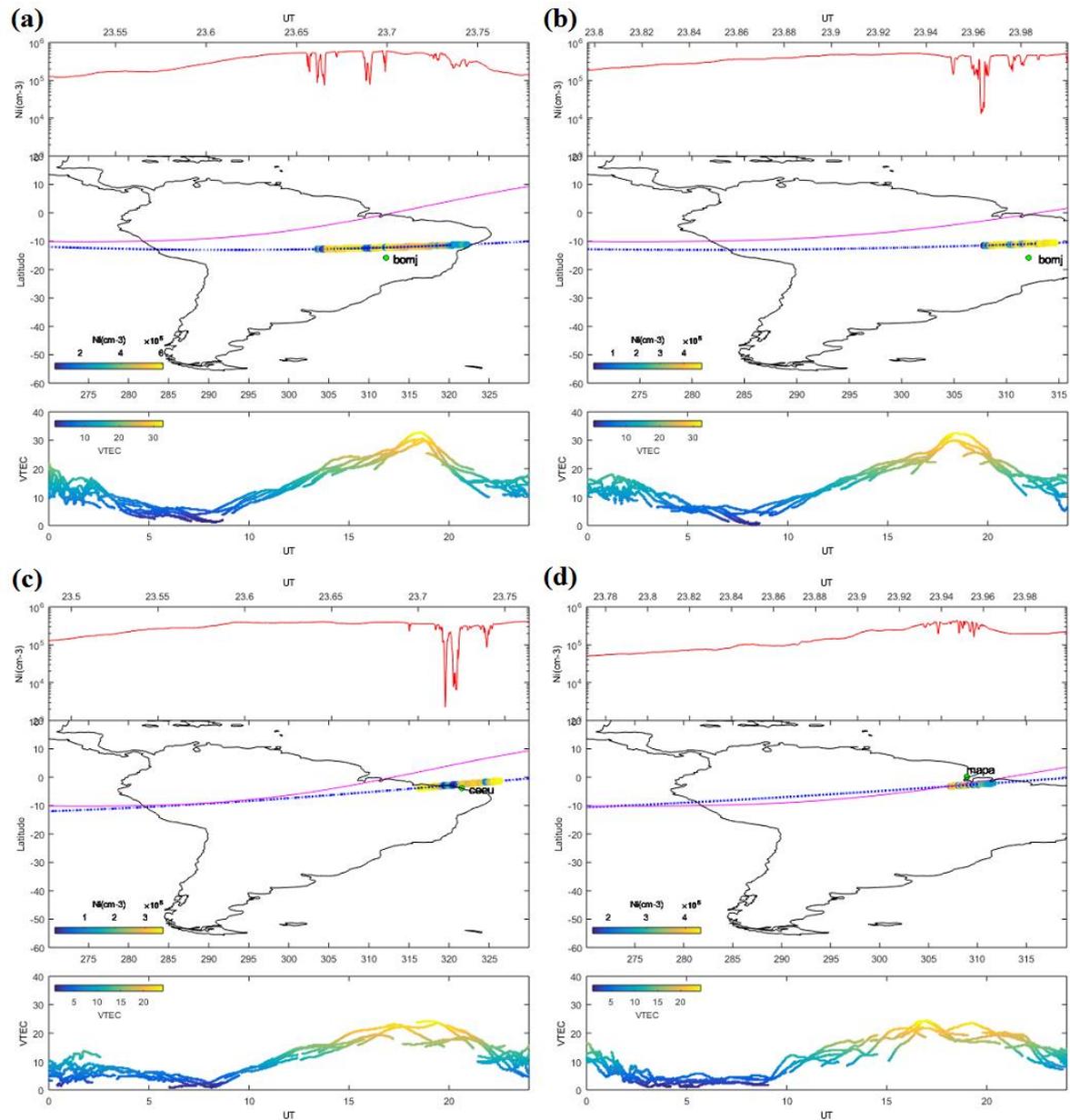


Figura 4.5 Mostra as passagens do C/NOFS para os dias 3, 4, 9 e 10 de janeiro de 2010, apresentando a posição e tempo das irregularidades ionosféricas encontradas, fazendo uma correspondência com as variações dos dados VTEC dos receptores GPS localizados próximo da irregularidade encontrada durante cada um dos dias e no mesmo meridiano magnético.

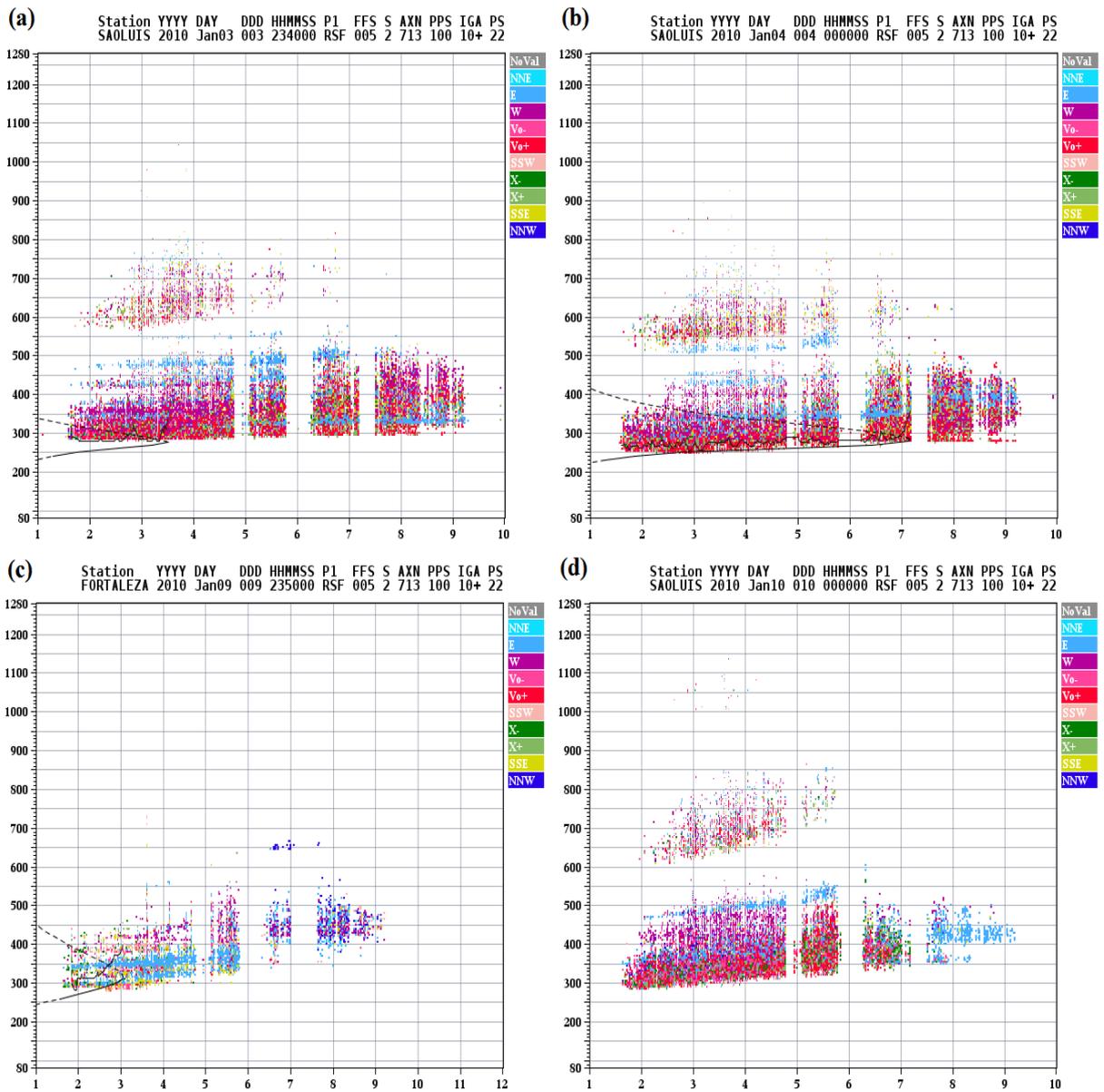


Figura 4.6 Ionogramas obtidos pelas estações de São Luís (dias 3, 4 e 10 de 2010) e Fortaleza (dia 9 de 2010), mostrando o espalhamento da camada F para os dias 3, 4, 9 e 10 de 2010 que comprova que as irregularidades encontradas com os dados do C/NOFS usando-se o algoritmo, correspondem ao espalhamento da camada F.

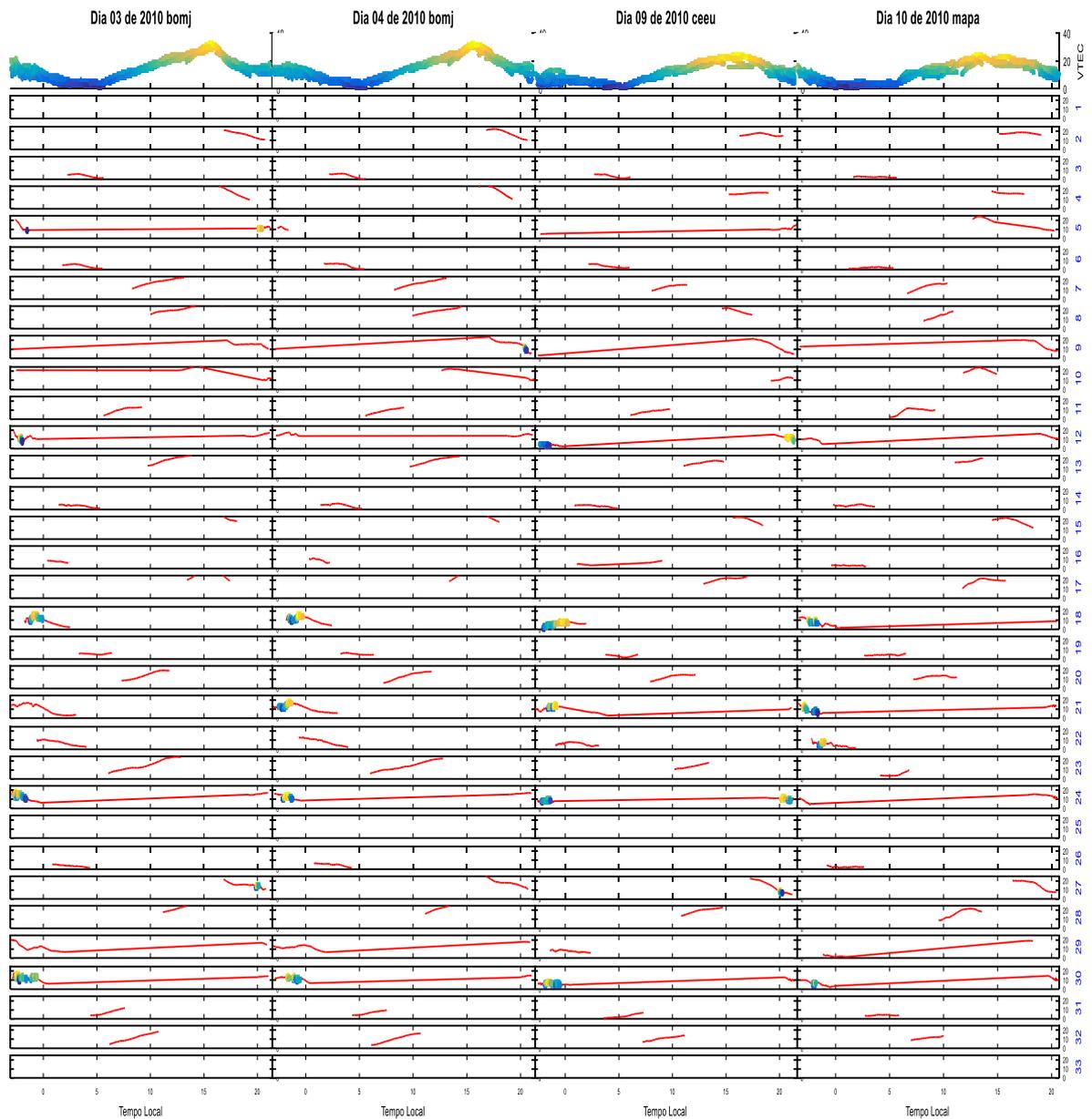


Figura 4.7 Apresenta as detecções de depleções do plasma ionosférico para cada um dos PRNs das estações GPS bomj (dia 3 e 4 de 2010), ceeu (dia 9 de 2010) e mapa (dia 10 de 2010). O painel superior mostra a curva VTEC de cada uma das estações de todos os PRNs com ângulo de elevação maior que 30° , os outros painéis mostram as curvas VTEC para cada um dos PRN, cujos números são mostrados em azul a direita da figura.

4.3. Algoritmo Aplicado ao Estudo da Variabilidade Dia-a-Dia das Depleções do Plasma Ionosférico da Estação GPS de Arapiraca Brasil para os Quatro Primeiros Dias de Janeiro de 2010.

Usou-se para esse estudo, visando tornar mais evidente a viabilidade do algoritmo, os dados da estação GPS de Arapiraca Brasil, localizada no continente Sul Americano (Brasil Oriental) a $-36,65^\circ$ de longitude e $-9,69^\circ$ de latitude em relação ao meridiano de Greenwich, como nos mostra a **Figura 4.8**, que apresenta a estação por um círculo verde denominado **alar** (sigla que representa a estação de Arapiraca, Brasil). Na **Figura 4.8** a curva de cor rosa é o equador magnético da Terra, observe-se que a estação **alar** está localizada no pico sul de ionização (a 20° Sul de latitude magnética) devido à anomalia equatorial. Demos preferência a estação de **alar** para esse estudo, visto que nesse mês a ocorrência de depleções do plasma ionosférico se maximiza no Brasil oriental (**Seemala et al, 2011**), localidade da estação.

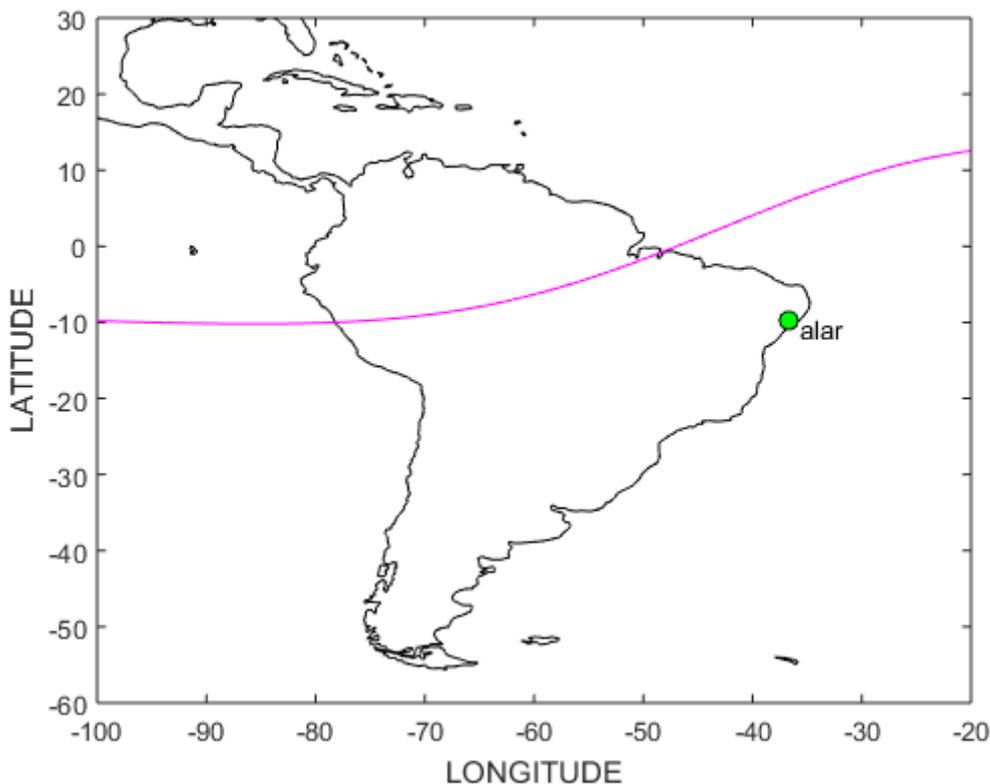


Figura 4.8 Gráfico da América do Sul, mostrando o equador magnético da Terra (linha rosa) e a estação GPS de Arapiraca no Brasil (alar – círculo verde).

A variabilidade dia-a-dia das ocorrências de depleções do plasma ionosférico é fonte de grande interesse no estudo das irregularidades ionosféricas. Nesta parte da Dissertação são apresentados resultados de detecção de depleções do plasma ionosférico para os dias 01, 02, 03 e 04 de janeiro de 2010, com dados obtidos da estação GPS **alar**.

A **Figura 4.9** ilustra a detecção de depleções do plasma ionosférico para cada um dos satélites GPS, representados pelos seus PRNs, que passaram sobre a estação GPS **alar** nos dias 01, 02, 03 e 04 de 2010. O painel superior da **Figura 4.9** é exibido a curva VTEC obtido pela estação **alar** para cada um dos dias estudados (**ver Figura 4.9**) com ângulo de elevação maior que 30° , para evitar o efeito do multicaminho. Os demais painéis ilustram a curva VTEC obtida de cada um dos satélites que passaram por depleções do plasma ionosférico sobre a estação **alar**, nesses painéis também está colocado a localização das depleções de plasma (círculos coloridos sobre as curvas VTEC em vermelho de cada satélite). No eixo horizontal da **Figura 4.9** é tempo local, no eixo vertical de cada um dos painéis é dado o VTEC, que no painel superior tem limites inferiores e superiores de 0 e 40 unidades de VTEC, os demais painéis tem no eixo vertical limites de 0 a 25 unidades VTEC. No lado direito da **Figura 4.9** está mostrado em azul os números correspondentes a cada PRN, devidamente posicionados ao lado do respectivo painel.

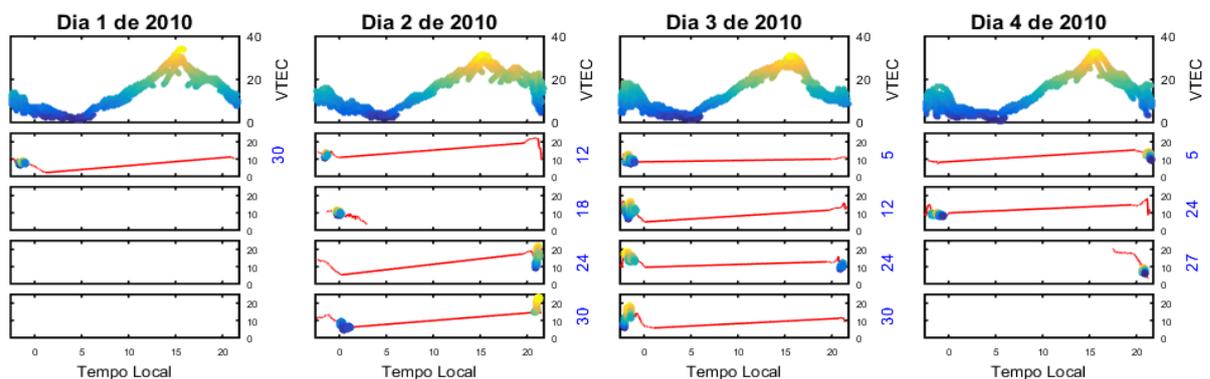


Figura 4.9 Apresenta as detecções de depleções do plasma ionosférico para cada um dos PRNs que passam sobre a estação GPS **alar** nos dias 1, 2, 3 e 4 de janeiro de 2010. O painel superior da figura mostra a curva VTEC de cada uma das estações de todos os PRNs, os demais painéis mostram as curvas VTEC para cada um dos PRN que atravessaram depleções do plasma, cujos números são mostrados em azul a direita da figura.

Para as detecções de depleções do plasma ionosférico, a **Figura 4.10** apresenta de forma clara como as depleções sofreram variações dia-a-dia em relação as suas posições ao meridiano geográfico e ao meridiano magnético que passam pela estação **alar**. Na **Figura 4.10** a circunferência em verde representa um ângulo de elevação de 30° , a reta rosa que passa pela estação **alar** representa o meridiano magnético, que é perpendicular à linha do equador magnético; a reta em azul é o meridiano geográfico que passa pela estação **alar**, perpendicular ao equador geográfico da Terra. Mostra também as depleções do plasma detectadas por cada um dos PRNs que as detectaram, cujas curvas foram mostradas em função do tempo na **Figura 4.9**.

Mostra-se com riqueza de detalhes na **Figura 4.10**, a localização das depleções em relação ao meridiano geográfico e magnético, além de traçarmos os percursos dos satélites GPS (linhas vermelhas) nos quais houve detecção de depleções do plasma, observa-se que em todos os dias analisados existiu depleções no sudoeste do meridiano magnético que passa pela estação **alar** e no oeste do meridiano geográfico. Os dias 02, 03 e 04 de janeiro de 2010 apresentaram depleções do plasma a nordeste do meridiano magnético e a leste do geográfico. Conclui-se que para os quatro dias a ocorrência de depleções do plasma deu-se em maior parte a sudoeste do meridiano magnético e a oeste do meridiano geográfico da estação GPS **alar**.

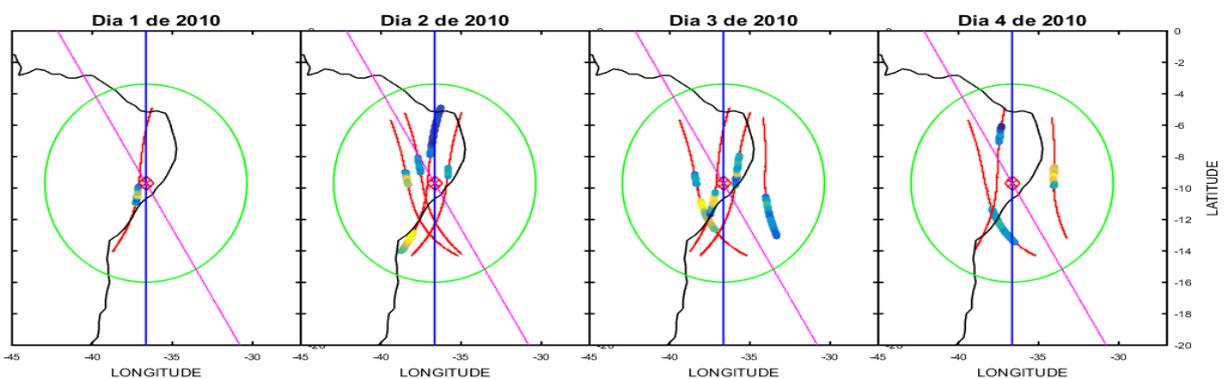


Figura 4.10 Apresenta as depleções de plasma detectadas, comparando a posição das depleções com o meridiano geográfico (reta azul) e o meridiano magnético (reta rosa). Na figura é mostrado uma parte do mapa da América do Sul, a circunferência que representa o ângulo de elevação de 30° da estação **alar**, e os meridianos geográfico e magnético da estação. É mostrado os percursos dos satélites (linhas vermelhas) e as depleções do plasma (círculos coloridos).

4.4. Algoritmo Aplicado a 182 Estações GPS Localizadas na América do Sul no Mês de Janeiro de 2010.

Uma outra forma de mostrar a validade do algoritmo que usa as medidas das distâncias dos picos das oscilações junto a um processo de filtragem para detecção de depleções no plasma ionosférico, é com base no estudo da sazonalidade das ocorrências de depleções do plasma ionosférico sobre o continente Sul Americano. Segundo **Seemala et al. (2011)** a declinação magnética do campo magnético da Terra varia fortemente em toda a América do Sul, conseqüentemente, o grau de alinhamento entre o terminador solar e o campo magnético mostra uma morfologia sazonal marcadamente diferente nas costas ocidental e leste do continente.

Quando o Sol atinge o ponto mais baixo no Céu em relação a Terra no hemisfério Sul em 21 de dezembro, período chamado de solstício de verão, que marca a chegada da estação, a ocorrência de irregularidades maximizará no Brasil Oriental (**Seemala et al., 2011**).

Neste trabalho fez-se o estudo longitudinal da densidade de depleções do VTEC sobre a América do Sul para alguns dias do mês de janeiro de 2010 (no verão), utilizando-se dos dados de VTEC de 182 estação distribuídas na América do Sul. A **Figura 4.11** revela todas as estações GPS disponíveis para estudo no mês de janeiro de 2010, cada bolinha verde corresponde a uma estação GPS na América do Sul, a curva rosa é o equador magnético terrestre, o eixo horizontal da figura é a longitude e o eixo vertical a latitude.

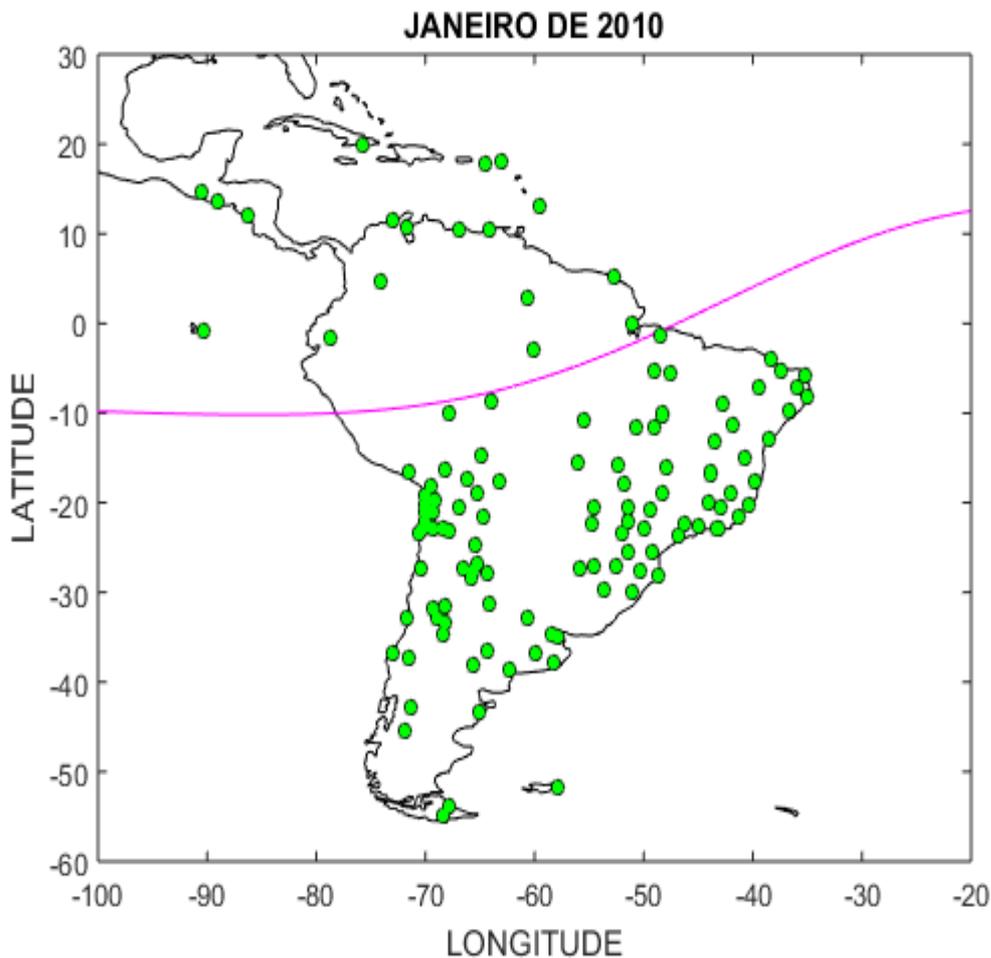


Figura 4.11 Ilustração das estações GPS ativas na América do Sul no mês de janeiro de 2010.

As **Figuras 4.12, 4.13 e 4.14** apresentam as ocorrências de depleções do plasma ionosférico para alguns dias de janeiro de 2010. A **Figura 4.12** mostra as bolhas dos dias 2, 3 e 4; a **Figura 4.13** exibe as bolhas dos dias 9, 10 e 11; a **Figura 4.14** apresenta as bolhas dos dias 20, 21 e 22. Observe que cada painel das figuras apresentam o mapa do continente Sul Americano com as depleções do plasma ionosférico de cada dia.

Observa-se pela análise das **Figura 4.12, 4.13 e 4.14**, que existe uma maior concentração de bolhas de plasma na região leste da América do Sul, no Brasil Oriental, como disse **Seemala et al. (2011)**, dando validade ao algoritmo de detecção de bolhas apresentado neste trabalho de mestrado.

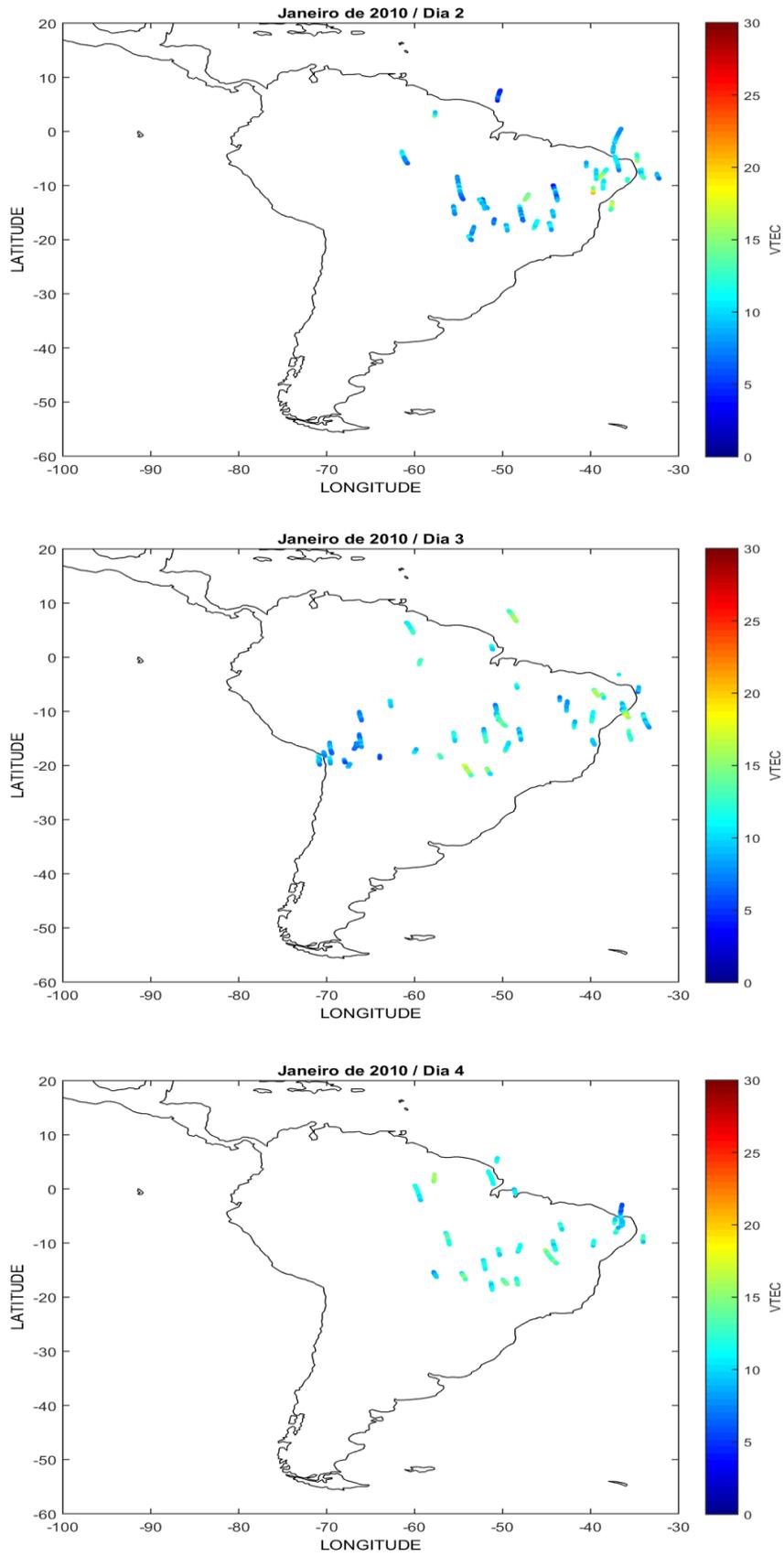


Figura 4.12 Apresenta a densidade de Bolhas de Plasma para os dias 2, 3 e 4 de janeiro de 2010.

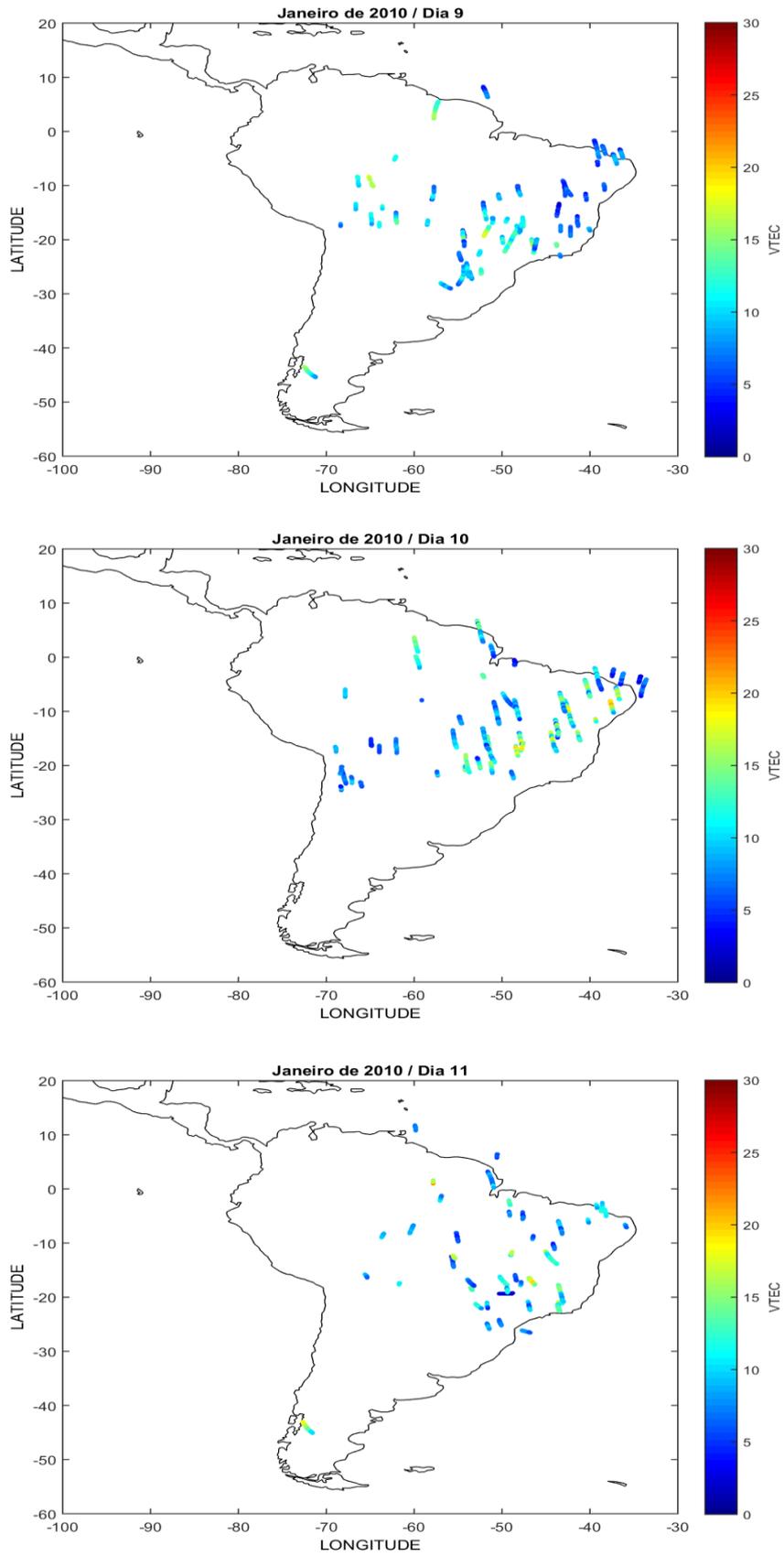


Figura 4.13 Apresenta a densidade de Bolhas de Plasma para os dias 9, 10 e 11 de janeiro de 2010.

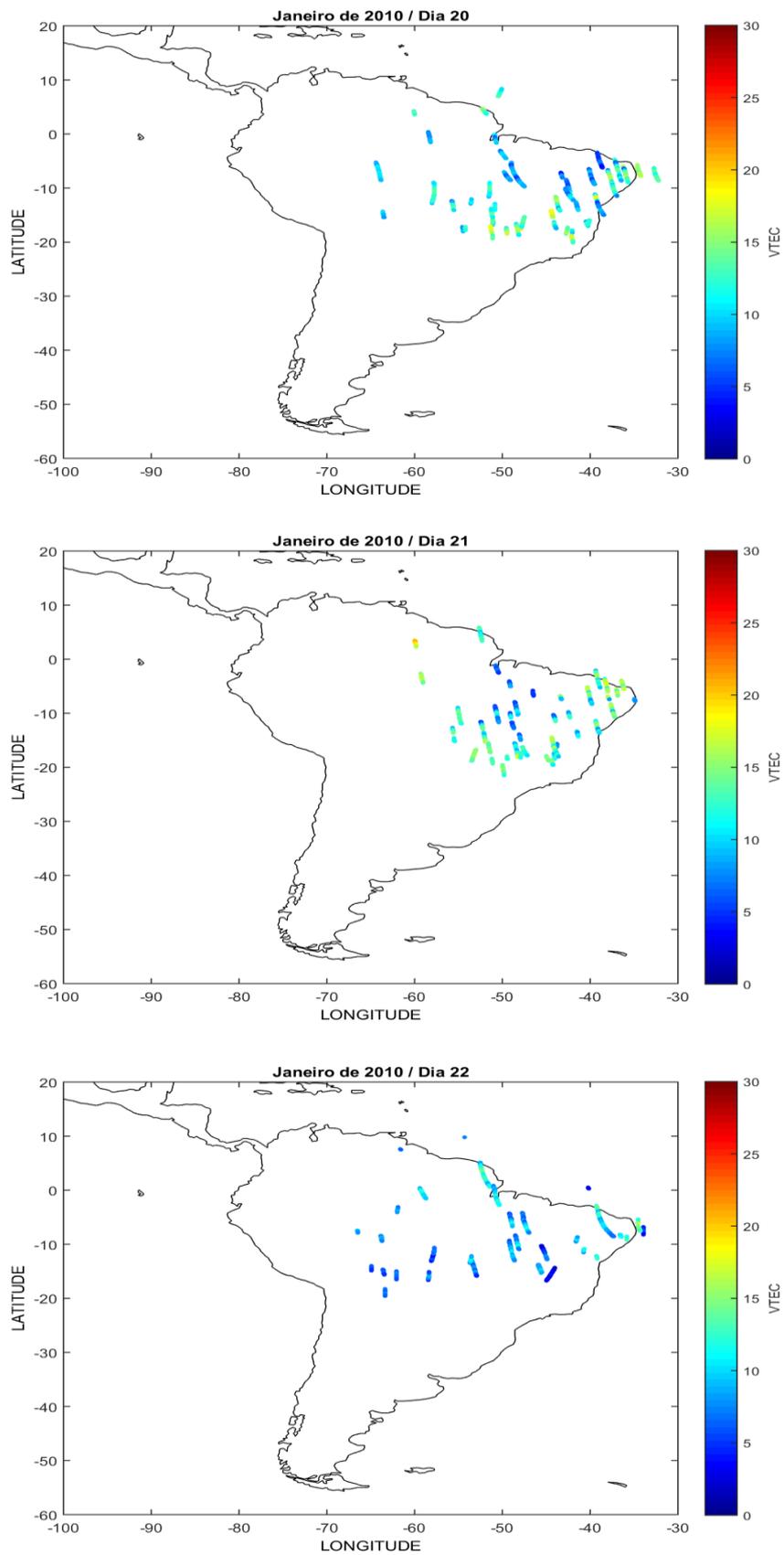


Figura 4.14 Apresenta a densidade de Bolhas de Plasma para os dias 20, 21 e 22 de janeiro de 2010.

4.5. Medidas do Tempo de Execução do Algoritmo/Eficiência do Algoritmo *Análise de Pico a Pico Positivo*/Análise do Algoritmo *Análise de Pico a Pico Positivo*.

Na análise do algoritmo, características importantes são investigadas. Faz-se aqui uma análise do número de vezes que cada parte do algoritmo deve ser executada, conseguindo, desse modo, determinar o seu custo computacional, sendo assim, possível medir sua eficiência para comparação com outros algoritmos que vierem a existir para resolver o mesmo problema, que é identificar bolhas ionosféricas através dos dados obtidos pelo instrumento PLP do satélite C/NOFS e de receptores em solo dos satélites GPS.

Para medir o custo de execução do algoritmo define-se uma função de custo ou **função de complexidade** f , em que $f(n)$ é a medida do tempo necessário para executar um algoritmo para um problema de tamanho n . (Ziviani, 2011)

Para o problema específico de encontrar irregularidades na ionosfera $f(n)$ é o número de vezes que determinada operação considerada relevante é executada e n é a entrada do sistema, no caso n são os dados de densidade eletrônica.

O custo de execução do algoritmo além de depender principalmente do tamanho da entrada dos dados, é função também de uma entrada de dados particular de densidade iônica, visto que, se os dados de densidade eletrônica apresentarem certa regularidade o algoritmo trabalhará menos de que se os dados de densidade forem bastante perturbados. Nesse caso distingue-se três cenários: O melhor caso que corresponde ao menor tempo de execução sobre todas as possíveis entradas de tamanho n ; o pior caso correspondente ao maior tempo de execução sobre todas as possíveis entradas de tamanho n e o caso médio que corresponde à média dos tempos de execução de todas as entradas de tamanho n . (Ziviani, 2011). Para o cálculo de custo do algoritmo NC, f é uma função de complexidade baseada na análise do pior caso, então o custo de aplicar o algoritmo nunca será maior do que $f(n)$.

A medida de custo ou medida de complexidade relata o crescimento assintótico da operação considerada.

Definição: Uma função $f(n)$ domina assintoticamente outra função $g(n)$ se existem duas constantes positivas c e m tais que, para $n \geq m$, temos $|g(n)| \leq c \times |f(n)|$.

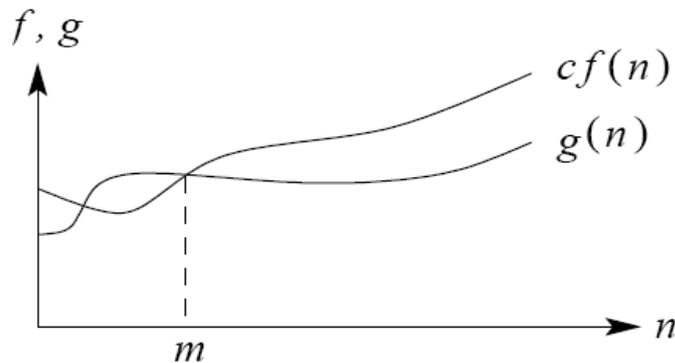


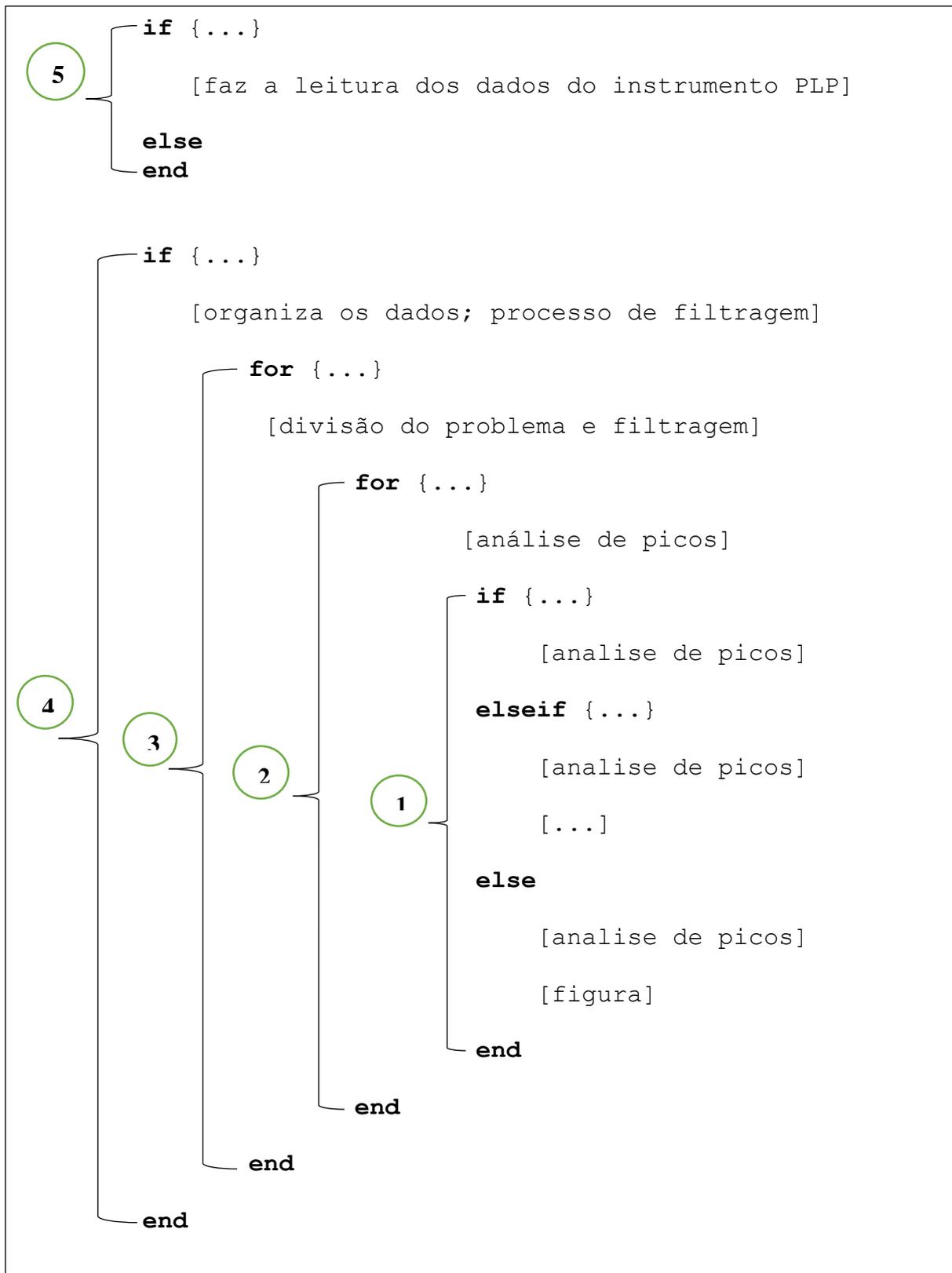
Figura 4.15 Dominação assintótica de $f(n)$ sobre $g(n)$.

O comportamento assintótico de $f(n)$ representa o limite do comportamento do custo quando n cresce. Para expressar que $f(n)$ domina assintoticamente $g(n)$, como mostrado na **Figura 4.15**, escreve-se $g(n) = O(f(n))$, em que se lê $g(n)$ é da ordem no máximo de $f(n)$. (Ziviani, 2011)

O algoritmo é avaliado por meio de suas funções de complexidade, negligenciando as constantes de proporcionalidade. Pois a determinação da ordem do tempo de execução de um programa, sem haver preocupação com o valor da constante envolvida é uma abordagem matemática mais simples e muito útil para problemas bastante complexos. Utiliza-se para o cálculo do custo computacional do algoritmo a notação O e suas propriedades.

Com o propósito de ilustrar sucintamente os passos para encontrar a complexidade computacional do algoritmo, que faz a detecção de bolhas ionosféricas com os dados do instrumento PLP do C/NOFS. Apresenta-se um resumo do programa usado.

Programa 4.1 Síntese do algoritmo para detecção de bolhas de plasma



O **Programa 4.1**, mostra uma síntese da implementação do algoritmo de detecção de bolhas. O programa começa com um comando de decisão que faz a leitura dos dados do instrumento PLP do C/NOFS. Na sequência vem outro comando condicional para organização e filtragem dos dados, estando no corpo deste comando três anéis, que dividem o problema, faz filtragem dos dados e faz a análise de picos.

Nesse programa, devemos iniciar a análise pelo anel mais interno, enumerado com (2), no **Programa 4.1**, que contém um comando de decisão (1). O corpo do comando de decisão (1), assim como sua condição são analisados, considerando-se o pior caso para se obter o seu tempo de execução, conforme a regra da soma para a notação O , o tempo de execução é $O(\log n)$.

Como o número de iterações do anel (2) é $O(\log n)$ e seus comandos de atribuição que estão acima do comando de decisão (1) tem um tempo de execução constante $O(1)$; o tempo gasto no anel (2), conforme as regras de soma e do produto para a notação O , é $O(\log^2 n)$.

O corpo do anel mais externo (3) mostrado no **Programa 4.1** contém, além do anel mais interno (2), seus comando e funções nativas do Matlab, que organizam o problema e faz processos de filtragem. O corpo do anel (3) devido as regras de soma da notação O , tem tempo de execução $O(n)$. Como o número de iterações deste anel é da ordem $O(\log n)$ pela regra do produto da notação O , o anel (3) tem tempo de execução $O(n \log n)$.

O corpo do comando condicional (4) contém, além de suas funções e comandos o anel (3), que pela regra da soma da notação O , tem-se como tempo de execução $O(n \log n)$. Esse tempo de execução somado ao tempo de execução da estrutura condicional (5), que faz a leitura dos arquivos.dat de dados de densidade eletrônica do instrumento PLP do C/NOFS, segundo a regra de soma da notação O , fornece como complexidade computacional ou custo computacional do algoritmo, $O(n \log n)$.

Feita a análise para o pior caso, $O(n \log n)$ é a complexidade computacional ou complexidade de tempo, ou ainda, o tempo de execução do algoritmo para detecção de bolhas, que representa também o comportamento assintótico do algoritmo.

Um algoritmo de complexidade $O(n \log n)$ ocorre tipicamente em algoritmos que resolvem um problema quebrando-o em problemas menores, resolvendo cada um deles independentemente e depois juntando as soluções. **(Ziviani, 2011)**

O custo de utilização do algoritmo pode ser medido de diversas maneiras. Uma delas é mediante a execução do programa em um computador real específico, sendo o tempo de execução medido diretamente. Medidas que jamais devem ser generalizadas pois são bastante inadequadas, já que a medida de tempo obtida dessa forma varia muito de computador para computador. Apesar disso, apresenta-se medidas de tempo reais para esse caso particular, obtidas em um computador com processador **Intel - CORE i3**. Os custos computacionais reais estão apresentadas na **Tabela 4.1**, que ilustra os tempos medidos pela CPU do computador e o tempo que se observa usando um cronômetro, quando se tem aproximadamente 85.000 dados de densidade eletrônica (dados de entrada n).

Medidas Reais de Tempo	
$n \approx 85.000$	
Tempo da CPU	15,2 segundos
Tempo do Cronômetro	13,8 segundos

Tabela 4.1 Medidas reais de tempo do algoritmo que detecta bolhas de plasma.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho de mestrado apresentou-se uma nova ferramenta para o estudo da climatologia ionosférica. Foi revelado um algoritmo que através de processos simples é capaz de fazer detecções de depleções do plasma ionosférico, utilizando-se dados de densidade in situ do instrumento PLP do satélite C/NOFS e dados das redes de receptores GPS LINS. Explicou-se que para ambos os dados, o algoritmo realiza a filtragem com FPB e FFT de overlap-add, que tem como respostas oscilações, cujas medidas das distâncias entre seus picos, conduzem o algoritmo a concluir se as oscilações correspondem ou não a depleções do plasma ionosférico. O método que o algoritmo utiliza, de fazer as medições de distâncias de cada pico aos seus picos consecutivos é uma novidade. Conclui-se que um novo método de análise de dados ionosféricos foi criado, podendo ser aprimorado para detecção de irregularidades ionosféricas com dados de outros instrumentos e até mesmo outros fenômenos ionosféricos importantes.

Fez-se uma análise do número de vezes que cada parte do algoritmo deve ser executada, para determinar o seu custo computacional, permitindo medir sua eficiência para comparação com outros algoritmos que vierem a existir para resolver o mesmo tipo de problema. Obteve-se como resposta, um custo computacional excelente, da ordem $O(n \log n)$ que representa também o comportamento assintótico do algoritmo.

Para este trabalho de mestrado, cujo objetivo inicial era o estudo de irregularidades ionosféricas, o algoritmo foi peça fundamental para que os objetivos fossem alcançados. Os resultados aqui apresentados além de mostrar a viabilidade do algoritmo para dois tipos de dados, também foram importantes para uma breve apresentação do estudo da variabilidade dia-a-dia das irregularidades ionosféricas, assim como, o estudo da sazonalidade das ocorrências de depleções do plasma ionosférico sobre o continente Sul Americano, que foi desenvolvido no mês de janeiro (no verão), usando-se 182 estações GPS distribuídas por toda América do Sul. Mostrando-nos que a máxima ocorrência de irregularidades do plasma se dar na parte de leste do continente (Brasil oriental).

O algoritmo inicialmente foi desenvolvido para ser aplicado aos dados de densidade eletrônica do instrumento PLP do satélite C/NOFS, mas tem a particularidade especial de detectar oscilações geradas pela depleção da densidade do plasma ionosférico, que é a queda do valor da densidade do plasma seguida por uma recuperação para um valor próximo ao anterior a redução. O que possibilitou a aplicação nos dados TEC dos receptores GPS, nos levando a varias possibilidades de aplicar o algoritmo em dados de outros tipos de satélites in situ e redes globais de posicionamento como GNSS, entre outros campos de pesquisas.

6. REFERÊNCIAS

- 1) ABDU M.A., R.T. de MEDEIROS and Y. Nakamura (1983a), **Latitudinal and magnetic flux tube extension of the equatorial spread F irregularities**, *J. Geophys. Res.*, 88(A6), Pages 4861-4868, doi:10.1029/JA088iA06p04861.
- 2) ABDU, M. A., SOBRAL, J. H. A., de PAULA, E. R., BATISTA, I. S., **Magnetospheric disturbance effects on equatorial ionization anomaly (EIA): an overview**. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 53, n. 8, p. 757771, 1991.
- 3) ALVALÁ, P. C., **Estudo Comparativo de Sinais de VLF na região Sub-Antártica e na Saga/Plínio Carlos Alvalá**. Dissertação (Mestrado) – São José dos Campos: INPE, 1990.
- 4) CÂNDIDO, C. M. N., **Estudos de irregularidades no plasma da Camada Ionosférica F Equatorial e de baixas latitudes no Setor Longitudinal Brasileiro/ Cláudia Maria Nicoli Cândido**. Tese (Doutorado) – São José dos Campos: INPE, 2008.
- 5) CARRASCO, A. J., **O pico pré-inversão na deriva vertical de plasma e a camada E esporádica / A. J. Carrasco**. Tese (Doutorado) - São José dos Campos: INPE, 2005.
- 6) CUEVA, R. Y. C., **Eletrodinâmica das irregularidades ionosféricas em baixas latitudes e caracterização das plumas em três setores de longitude / Ricardo Yvan de La Cruz Cueva**. Tese (Doutorado) – São José dos Campos : INPE, 2013.
- 7) CUEVA, R. Y. C., **Estudo da eletrodinâmica da ionosfera de baixas latitudes, e a detecção dos mecanismos de geração de irregularidades ionosféricas / Ricardo Yvan de La Cruz Cueva**. Projeto de Pesquisa em andamento – São Luís/Ma – UEMA, 2015.
- 8) BARONI, L., **Algoritmos de navegação em tempo real para um sistema GPS de posicionamento relativo de precisão / Leandro Baroni**. Tese (Doutorado) – São José dos Campos : INPE, 2009.
- 9) BERTONI, F. C. P., **Derivas ionosféricas em latitudes equatoriais: observações e modelagem / F. C. P. Bertoni**. Tese (Doutorado) – São José dos Campos: INPE, 2004.

- 10) DENARDINI, C. M., **Estudo da eletrodinâmica durante o período de máxima atividade solar (1999-2002) / C. M. Denardini.** Tese (Doutorado) – São José dos Campos: INPE, 2003.
- 11) DE LA BEAUJARDIÈRE, O., et al. (2004), **C/NOFS: A mission to forecast scintillations**, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 66(17), 1573.
- 12) DE LA BEAUJARDIÈRE, O., et al. (2009), **C/NOFS observations of deep plasma depletions at dawn**, Geophys. Res. Lett., 36, L00C06, doi:10.1029/2009GL038884.
- 13) ELY, C. V., **Estudo da ionosfera da região brasileira com dados dos satélites FORMOSAT-3/COSMIC e de Digissondas / Cláudia Vogel Ely.** Dissertação (Mestrado) – São José dos Campos: INPE, 2010.
- 14) FEDRIZZI, M., **Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS/M. Fedrizzi.** Dissertação (Mestrado) – São José dos Campos: INPE, 1999.
- 15) FEJER, B. G.; FARLEY, D. T.; WOODMAN, R. F.; CALDERON, C. **Dependence of equatorial f region vertical drifts on season and solar cycle.** J. Geophys. Res., v. 84, n. A10, p. 57925796, 1979.
- 16) FEJER, B. G.; FARLEY, D.; GONZALES, C.; WOODMAN, R.; CALDERON, C. **F region east-west drifts at jicamarca.** Geophys. Res. Lett., v. 86, n. A1, p. 215–218, 1981.
- 17) FEJER, B.G., L. SCHERLIESS and E.R. DE PAULA (1999), **Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F**, J. Geophys. Res., 104(A9), Pages 19,859-19,869.
- 18) HSU, HWEI P. **Sinais e sistemas / Hwei P. Hsu; tradução técnica: Anatólio Laschuk.** – 2. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2012.
- 19) KELLEY, M. C. (1989), **The Earth's Ionosphere**, Academic Press, San Diego, CA.

- 20) KELLEY, M. C. AND MAKELA, J. J. **Resolution of the discrepancy between experiment and theory of midlatitude F-region structures.** Geophysical Research Letters, v. 28, n. 13, p. 2589-2592, 2001.
- 21) KELLEY, M. C.; MAKELA, J. J.; VLASOV, M. N., SUR, A. **Further studies of the Perkins stability during Space Weather Month.** Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, v. 65, n. 10, p. 1071-1075, 2003.
- 22) KELLEY, M. C.; MAKELA, J. J.; DE LA BEAUJARDIERE, O. **Convective ionospheric storms: a major space weather problem.** Space Weather-the International Journal of Research and Applications, v. 4, n. 2, p. 1-5, 2006.
- 23) KIVELSON, M.G.; RUSSEL, C.T. **Introduction to Space Physics.** Cambridge, England: Cambridge University, 1995. 568p.
- 24) LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares / B. P. Lathi; tradução Gustavo Guimarães Parma.** – 2. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2007.
- 25) MASCARENHAS, M. **Estudo de irregularidades ionosféricas em períodos de baixa ocorrência em baixas latitudes sob condições calmas/Matheus Mascarenhas.** Dissertação (Mestrado) - São José dos Campos: INPE, 2005.
- 26) MENDILLO, M. and TYLER, A. **Geometry of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere.** Journal of Geophysical Research, v. 88, n. A7, p. 5778-5782, 1983.
- 27) MONICO, J. F. G. **Posicionamento por ponto de alta precisão: Uma ferramenta para a geodinâmica.** Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, RJ, v. 18, n. 1, p. 39–48, 2000.
- 28) National Aeronautics and Space Administration (NASA). **C/NOFS.** Disponível em:
<http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/missions/mission_cindi.html>.
Acesso em: Nov. 2016.
- 29) OPPENHEIM, A. V. **Sinais e Sistemas / Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky com S. Hamid Nawab; tradução Daniel Vieira; revisão técnica Marcio Eisencraft; Maria D. Miranda.** – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

- 30) PIMENTA, A. A.; FAGUNDES, P. R.; SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J. A.; ABALDE, J. R. **Equatorial F-region plasma depletion drifts: latitudinal and seasonal variations**. *Annales Geophysicae*, v. 21, p. 2315-2322, 2003.
- 31) PIMENTA, A. A.; BITTENCOURT, J. A.; FAGUNDES, P. R.; SAHAI, Y.; BURITI, R. A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J. **Ionospheric plasma bubble zonal drifts over the tropical region: A study using OI 630 nm emission all-sky images**. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 65, p. 1117-1126, 2003.
- 32) Rede Escola. **GPS - Global Positioning System**. Disponível em: http://www.redescola.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=304:gps-&catid=42:documentos. Acesso em: Nov, 2016.
- 33) RETTERER, J. M. (2005), **Physics-based forecasts of equatorial radio scintillation for the Communication and Navigation Outage Forecasting System (C/NOFS)**, *Space Weather*, 3, S12C03, doi:10.1029/2005SW000146.
- 34) RISHBETH, H. (1971), **Polarization fields produced by winds in the equatorial F region**, *Planet. Space.*, 19, 357-369.
- 35) RISHBETH, H.; GARRIOT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**, New York: Academic Press, 1969. 331 p.
- 36) RODRIGUES, F. S. **Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando GPS/Fabiano da Silveira Rodrigues**. Dissertação (Mestrado) - São José dos Campos: INPE, 2003.
- 37) RODRIGUES, F. S., M. C. KELLEY, P. A. RODDY, D. E. HUNTON, R. F. PFAFF, O. DE LA BEAUJARDIÈRE, AND G. S. BUST (2009), **C/NOFS observations of intermediate and transitional scale-size equatorial spread F irregularities**, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L00C05, doi:10.1029/2009GL038905.
- 38) SEEMALA, G. K., AND C. E. VALLADARES (2011), **Statistics of total electron content depletions observed over the South American continent for the year 2008**, *Radio Sci.*, 46, RS5019, doi:10.1029/2011RS004722.
- 39) SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; ZAMLUTTI, C. J.; Batista, I. S. **Association between plasma bubble irregularities and airglow disturbances over Brazilian low latitudes**. *Geophysical Research Letters*, v. 7, n. 11, p. 980- 982, 1980.

- 40) SOUSA, J. R., **Estudo do conteúdo eletrônico total ionosférico/ J. R. Sousa**. Dissertação (Mestrado) – São José dos Campos: INPE, 1992.
- 41) THAMPI, S.V. et al. (2009), **First observations of large-scale wave structure and equatorial spread F using CERTO radio beacon on the C/NOFS satellite**, Geophys. Res. Lett., 36, L18111, doi:10.1029/2009GL039887.
- 42) VALLADARES, C. E., S. BASU, K. GROVES, M. HAGAN, D. HYSELL, A. MAZZELLA JR., AND R. SHEEHAN (2001), **Measurement of the latitudinal distributions of total electron content during equatorial spread F events**, J. Geophys. Res., 106, 29,133–29,152, doi:10.1029/2000JA000426.
- 43) VALLADARES, C. E., J. VILLALOBOS, R. SHEEHAN, AND M. P. HAGAN (2004), **Latitudinal extension of low-latitude scintillations measured with a network of GPS receivers**, Ann. Geophys., 22, 3155 –3175, doi:10.5194/angeo-22-3155-2004.
- 44) WEBER, E. J., BASU, S., BULLETT, T. W., et al.: **Equatorial plasma depletion precursor signatures and onset observed at 11° south of the magnetic equator**, J. Geophys. Res., 101, 26829, 1996.
- 45) ZIVIANI, N. **Projeto de algoritmos: com implementação em Java e C++ / Nivio Ziviani; consultoria em Java e C++ de Fabiano Cupertino Botelho.** – São Paulo: Cengage Learning, 2011.