

# Estimativa e análise de perfis de densidade de elétrons para a região brasileira: integração de informações provenientes de rádio ocultação e de estações terrestres GNSS

Estimation and analysis of electron density profiles for the Brazilian region: integration of information from GNSS radio occultation and ground-based stations

Gabriel Oliveira Jerez<sup>1</sup>

Daniele Barroca Marra Alves<sup>2</sup>

Manuel Hernández-Pajares<sup>3</sup>

João Francisco Galera Monico<sup>4</sup>

*Recebido 02 de janeiro de 2025; aceito 20 de junho de 2025*

## RESUMO

A rádio ocultação (RO) é utilizada há mais de seis décadas para a sondagem da atmosfera de outros planetas. O advento dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) e das missões com satélites de baixa órbita, permitiram novas possibilidades de investigações da atmosfera terrestre, entre elas a aplicação da RO-GNSS. A influência exercida pela atmosfera no sinal transmitido pelo GNSS permite a recuperação de informações atmosféricas. Porém, a inversa de Abel, comumente empregada para a recuperação desses perfis, tem seu desempenho degradado para alguns casos devido à imposição da condição de simetria esférica da atmosfera. Visando superar essa limitação, diversas pesquisas vêm

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil, e-mail: [gabrielojerez@gmail.com](mailto:gabrielojerez@gmail.com).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6893-2144>

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil, e-mail: [daniele.barroca@unesp.br](mailto:daniele.barroca@unesp.br).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9033-8499>

<sup>3</sup> Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha, e-mail: [manuel.hernandez@upc.edu](mailto:manuel.hernandez@upc.edu).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9687-5850>

<sup>4</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil, e-mail: [galera.monico@unesp.br](mailto:galera.monico@unesp.br).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4101-9261>

propondo abordagens alternativas, entres essas, a utilização da inversa de Abel com o auxílio de produtos ionosféricos se mostrou promissora. No entanto, algumas limitações foram observadas em regiões com maior variabilidade na distribuição de elétrons, como é o caso do Brasil. Neste contexto, a pesquisa teve por objetivo desenvolver uma metodologia para realizar a recuperação de perfis de densidade de elétrons utilizando dados de RO, empregando a inversa de Abel com o auxílio de mapas ionosféricos. A metodologia foi implementada no *software* utilizado para uma das principais missões de RO da atualidade. No estudo, foram propostas diversas metodologias de avaliação de mapas ionosféricos, considerando produtos regionais, globais e híbridos. De forma geral, dois produtos globais apresentaram os melhores resultados, assim, as metodologias de recuperação de perfis de RO foram testadas considerando mapas globais. As avaliações consideraram: medidas *in situ*, onde os produtos com melhor desempenho variaram de acordo com o cenário considerado; e dados de ionossondas, onde o produto derivado da metodologia proposta obteve melhor desempenho.

Palavras-chave: *Rádio ocultação, perfis de densidade de elétrons, mapas ionosféricos, ionosfera brasileira.*

## **ABSTRACT**

Radio occultation (RO) has been used for more than six decades to probe the atmosphere of other planets. The advent of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and low-orbit satellite missions has opened up new possibilities for investigating the Earth's atmosphere, including the use of GNSS-RO. The influence of the atmosphere on the signal transmitted by GNSS allows the retrieval of atmospheric information. However, the Abel inverse, commonly used to retrieve such profiles, has its performance degraded in some cases due to the imposition of the condition of spherical symmetry of the atmosphere. In order to overcome this limitation, several studies have proposed alternative approaches, among which the use of the Abel inverse aided by ionospheric products has shown promising results. However, some limitations have been observed in regions with greater variability in electron distribution, as is the case in Brazil. In this context, the aim of this research is to develop a methodology for retrieving electron density profiles using RO data, using Abel's inverse with aided by ionospheric maps. The methodology was implemented in the software used for one of today's main RO missions. The study proposed various methodologies for evaluating ionospheric maps, considering regional, global and hybrid products. In general, two global products showed the best results, so the methodologies for retrieving RO profiles are tested using such global maps. The evaluations considered: *in situ* measurements, where the best performing products varies according to the scenario considered; and ionosonde data, where the product derived from the proposed methodology perform best.

Key words: *Radio occultation, electron density profiles, ionospheric maps, Brazilian ionosphere.*

## RESUMEN

La radio ocultación (RO) se ha utilizado durante más de seis décadas para el sondeo de la atmósfera de otros planetas. El advenimiento de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) y de las misiones con satélites de órbita baja han permitido nuevas posibilidades de investigación de la atmósfera terrestre, entre ellas la aplicación de RO-GNSS. La influencia ejercida por la atmósfera en la señal transmitida por el GNSS permite la recuperación de informaciones atmosféricas. Sin embargo, la inversa de Abel, comúnmente empleada para la recuperación de estos perfiles, ve su desempeño degradado en algunos casos debido a la imposición de la condición de simetría esférica de la atmósfera. Con el objetivo de superar esta limitación, diversas investigaciones han propuesto enfoques alternativos, entre ellos, el uso de la inversa de Abel con la ayuda de productos ionosféricos ha demostrado ser prometedor. No obstante, se observaron algunas limitaciones en regiones con mayor variabilidad en la distribución de electrones, como es el caso de Brasil. En este contexto, la investigación tuvo como objetivo desarrollar una metodología para realizar la recuperación de perfiles de densidad de electrones utilizando datos de RO, empleando la inversa de Abel con la ayuda de mapas ionosféricos. La metodología fue implementada en el *software* utilizado para una de las principales misiones de RO de la actualidad. En el estudio, se propusieron diversas metodologías de evaluación de mapas ionosféricos, considerando productos regionales, globales y híbrido. En general, dos productos globales presentaron los mejores resultados, por lo que las metodologías de recuperación de perfiles de RO fueron probadas considerando mapas globales. Las evaluaciones consideraron: medidas *in situ*, donde los productos con mejor desempeño variaron de acuerdo con el escenario considerado; y datos de ionosondas, donde el producto derivado de la metodología propuesta obtuvo mejor desempeño.

Palabras clave: *Radio ocultación, perfiles de densidad de electrones, mapas ionosféricos, ionosfera brasileña.*

## 1. Introdução

A ocultação, fenômeno pelo qual um corpo celeste deixa de ser visto em razão da sobreposição de outro, começou a fazer parte de missões para exploração e sondagem de atmosferas planetárias na década de 1960 (Fjeldbo e Eshleman, 1968). Com o advento do GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e dos satélites LEO (*Low Earth Orbit*), a rádio ocultação (RO) se tornou uma importante ferramenta para investigações da atmosfera terrestre. Uma das principais missões de RO-GNSS foi a COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate*), lançada como missão experimental, mas que resultou em dados operacionais, cuja continuidade está atualmente em operação, COSMIC-2.

A RO-GNSS parte do princípio de que os sinais enviados pelos satélites GNSS e recebidos pelos satélites LEO sofrem os efeitos da atmosfera neutra e da

ionosfera ao atravessarem essas camadas, afetando a fase e a amplitude dos sinais. A refração sofrida pela propagação do sinal permite o cálculo dos índices de refração, que possuem diversas informações da composição da atmosfera terrestre. A partir desses índices é possível extrair, por exemplo, perfis de umidade, pressão, temperatura e densidade de elétrons (Kursinski *et al.*, 2000).

Um método comumente empregado para a recuperação dos índices de refração é a inversa de Abel, que em geral assume simetria esférica da atmosfera. Com isso, a técnica pode levar a perfis menos acurados principalmente quando se considera a recuperação de perfis de densidade de elétrons. Essa generalização é ainda mais problemática quando são consideradas regiões com grande variação no gradiente horizontal da densidade de elétrons, como é o caso do Brasil. Em trabalhos como Hernández-Pajares, Juan e Sanz (2000), Garcia-Fernandez *et al.* (2005) e Pedatella, Yue e Schreiner (2015) são apresentadas abordagens alternativas para a recuperação de perfis de densidade de elétrons a partir da RO com a inclusão de dados de outras fontes, como os provenientes de estações GNSS terrestres ou produtos ionosféricos. Em geral, apesar de serem obtidos melhores resultados em comparação à técnica tradicional, limitações foram observadas em relação à resolução dos produtos ionosféricos utilizados, e aplicação dos métodos em períodos ou regiões com maior variabilidade na distribuição de elétrons da ionosfera.

Este cenário indica o crescente interesse por pesquisas relacionadas ao uso da técnica de RO para a investigação da ionosfera. Conforme verificado em alguns trabalhos, a aplicação da inversa de Abel com auxílio de mapas globais ionosféricos (*Global Ionospheric Maps - GIMs*) tem se mostrado uma metodologia promissora, mas ainda com limitações, em especial para regiões com comportamento mais irregular da ionosfera, como é o caso do Brasil. Com isso, uma possibilidade de investigação é a aplicação da inversa de Abel com auxílio de informações locais, para melhor representar a variação horizontal da ionosfera, considerando as características de regiões com atividade ionosférica mais intensa. Entre as possíveis fontes de dados para esta abordagem existem os mapas ionosféricos com maior resolução, como por exemplo, mapas regionais ionosféricos (*Regional Ionospheric Maps - RIMs*) e, ainda, a inclusão de dados de estações GNSS de regiões críticas nos modelos utilizados.

A partir do exposto, a hipótese do presente trabalho é que: “Em regiões com intensa variabilidade no gradiente horizontal da densidade de elétrons, a utilização de mapas ionosféricos e informações regionais como auxílio aos dados de rádio ocultação constitui uma abordagem mais eficiente para a recuperação de perfis de densidade de elétrons”. Para a investigação desta hipótese o presente projeto buscou reunir esforços para avaliar a técnica de recuperação de perfis de densidade de elétrons utilizando dados de RO-GNSS. Primeiramente foram avaliados os mapas ionosféricos disponíveis para a região brasileira, considerando modelos globais, regionais e híbridos. Posteriormente foi realizado um estudo da disponibilidade de dados ionosféricos provenientes de RO e sua cobertura em relação à região brasileira. Por fim, foram desenvolvidas e avaliadas metodologias de recuperação de perfis de densidades

de elétrons com a utilização de mapas ionosféricos e informações regionais, que fossem aplicáveis ao cenário brasileiro. A metodologia proposta foi implementada e testada no *software* CDAAC (*Cosmic Data Analysis and Archive Center*), desenvolvido para o processamento dos dados da missão COSMIC. As metodologias foram avaliadas considerando medições *in situ* e observações de solo por meio de ionossondas. A seção 2 apresenta as metodologias para a avaliação de mapas ionosféricos de VTEC (*Vertical Total Electron Content*). A seção 3 aborda estudos sobre a recuperação de perfis ionosféricos a partir da RO-GNSS. E, por fim, na seção 4 são apresentadas as considerações finais.

## 2. Metodologias de validação de mapas ionosféricos

Os elétrons livres na atmosfera terrestre podem impactar significativamente a propagação de ondas de rádio, afetando aplicações baseadas em sistemas como o GNSS. Nos estudos da ionosfera, o efeito dos elétrons na propagação de ondas eletromagnéticas é, na maioria das vezes, baseado nas observáveis GNSS. Essas observáveis podem fornecer o número de elétrons ao longo da trajetória do sinal entre o receptor e o satélite. Desde 1998 diversos centros pertencentes aos IAACs (*Ionosphere Associate Analysis Centers*) do IGS (*International GNSS Service*) têm desenvolvido métodos para a estimativa de valores de VTEC e fornecido esses dados por meio dos GIMs (Hernández-Pajares *et al.*, 2009). Esses produtos são disseminados em formato IONEX (*IONosphere EXchange format*), consistindo em mapas de valores de VTEC fornecidos em grids regulares (Schaer *et al.*, 1998).

Os mapas regionais podem ser fornecidos com resoluções espacial e temporal bastante distintas, dependendo do centro responsável pelo desenvolvimento dos mesmos. Entre os mapas disponíveis para a região brasileira, atualmente, têm-se os produtos do INPE e do SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para las Américas). Os RIMs do INPE vêm sendo desenvolvidos no contexto do projeto EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Especial) desde 2013 (Takahashi *et al.*, 2016). Os produtos SIRGAS não foram utilizados na pesquisa devido ao período de disponibilidade dos mesmos. Por meio de uma parceria com um pesquisador do DGFI-TUM, foi possível a aplicação da metodologia utilizada para mapas regionais de alta resolução da região da Europa para dados da região brasileira, com os produtos: OTHR e OVHR (Goss *et al.*, 2019).

Os mapas ionosféricos híbridos utilizados neste estudo não são produtos oficiais de nenhum centro. Durante o desenvolvimento do experimento que será apresentado na seção 2.3, foi observado um comportamento atípico. Alguns produtos regionais com boa performance nas avaliações utilizando dados de ionossondas, tiveram seu desempenho degradado significativamente quando aplicados no posicionamento GNSS. A causa desse comportamento é a utilização pelo *software* de posicionamento dos valores nulos fora da área de cobertura dos mapas regionais, o que tem maior impacto em estações próximas às regiões de borda. Para evitar esse problema, foram gerados produtos resultantes da combinação de mapas regionais e globais. Esta aplicação foi realizada para os mapas OTHR (regional) e OTHG (global), ambos do DGFI-TUM, resultando nos produtos aqui chamados OTRG.

## 2.1 Validação de mapas globais ionosféricos com dados de ionossondas

A avaliação da qualidade de modelos ionosféricos é normalmente baseada em comparações com valores de referência provenientes de modelos consolidados como o *International Reference Ionosphere* (IRI) (Kilifarska e Uzunov, 2001), de outros modelos globais (Liu *et al.*, 2019), dados de ionossondas (García-Fernández *et al.*, 2005) ou de valores de VTEC provenientes de altímetros e dados GNSS (Hernández-Pajares *et al.*, 2017). No caso dos GIMs, a maioria dos métodos de avaliação são baseadas na comparação com duas fontes complementares de dados de referência: medidas de VTEC proveniente de altímetros e a variabilidade do STEC obtidos a partir de estações GNSS independentes (Hernández-Pajares *et al.*, 2017).

Uma fonte complementar de avaliação que pode beneficiar os indicadores de qualidade da acurácia dos GIMs é a utilização de medições de ionossondas como referência da ionosfera. A densidade de pico da camada F2 ( $NmF_2$ ) é comumente medida por ionossondas a partir das frequências críticas associadas ( $foF_2$ ), que são especialmente confiáveis quando manualmente estimadas (Araujo-Pradere *et al.*, 2019). Alguns estudos relacionados a estimativa da  $foF_2$  podem ser encontrados em Altinay *et al.* (1997). Apesar de diversos trabalhos sobre o assunto, ainda existe uma vasta gama de possibilidades de investigações e aplicações, especificamente em relação ao desenvolvimento de um método sistemático para a avaliação da qualidade de GIMs utilizando medidas de  $foF_2$ .

A metodologia desenvolvida nessa pesquisa é baseada na análise de quanto o VTEC, proveniente dos mapas ionosféricos, pode contribuir na interpolação de medições diretas e manualmente estimadas de  $foF_2$ , considerando períodos e regiões com variabilidade da espessura equivalente da ionosfera (*slab thickness*). O método foi aplicado na região brasileira, considerando o pico do último ciclo solar (2014). Os mapas selecionados para este estudo foram: CORG, CODG, EHRG, ESRG, ESAG, IGRG, IGSG, JPLG, UPRG, UPCG, UQRG, WHRG e WHUG. Mais informações sobre os GIMs podem ser obtidas em Hernández-Pajares *et al.* (2009). Dados de quatro ionossondas do INPE foram utilizados: BVJ03 localizada em Boa Vista-RR (2,8° N, 60,7° O), SAA0K em São Luiz-MA (2,5° S, 44,3° O), FZA0M em Fortaleza-CE (3,8° S, 38,5° O) e CAJ2M em Cachoeira Paulista-SP (22,7° S, 45,0° O). Neste estudo, apenas dados de  $foF_2$  manualmente estimados foram utilizados. A resolução temporal dos dados é de 10 minutos.

Para o método de validação proposto são utilizados pares de ionossondas. A variabilidade da  $foF_2$  entre as estações utilizadas é considerada próxima da variabilidade do VTEC. No método proposto para avaliação de GIMs, os dados de uma ionossonda (lono1) são estimados baseado nos dados de outra ionossonda do par considerado (lono2). A variação do VTEC entre as posições das duas ionossondas é utilizada para transportar a  $foF_2$  da ionossonda 2 para a posição da ionossonda 1. Deste modo, a  $foF_2$  estimada pode ser comparada com o valor real medido na primeira ionossonda (lono1), e assim, implicitamente, a qualidade do GIM pode ser avaliada em relação as medidas de  $foF_2$  manualmente estimadas. A avaliação do GIM foi baseada no erro médio quadrático (*Root Mean Square* - RMS) das diferenças entre os valores de  $foF_2$

medidos na primeira estação ( $f_oF_{2_{Iono1,i}}$ ) e os valores estimados com auxílio dos GIMs ( $f_oF_{2'_{Iono1,i}}$ ). Considerando a relação de primeira ordem entre  $NmF_2$  e  $f_oF_2$  (Kelley, 2009) e o desempenho nos testes realizados, a equação utilizada para interpolação dos valores de  $f_oF^2$  foi:

$$f_oF_{2'_{Iono1,i}} = f_oF_{2_{Iono1,i}} \sqrt{\frac{VTEC_{Iono1}}{VTEC_{Iono2}}} \tag{1}$$

Considerando os valores médios de RMS analisados para um ano de dados (2015), em geral, o melhor desempenho foi obtido pelos produtos do CODE e da UPC. Resultado semelhante pode ser observado na Tabela 1, que apresenta as taxas de melhoria do RMS médio para os produtos finais. As análises foram realizadas considerando, ainda, variações diárias, sazonais, impacto da espessura da ionosfera e uma série temporal de quatro anos (2014-2017).

Este estudo surgiu a partir de alguns testes iniciais realizados em Jerez *et al.* (2020a), onde foi verificada a necessidade da elaboração de um estudo sistemático da qualidade dos GIMs para esse tipo de aplicação. Mais detalhes e o estudo completo podem ser consultados em Jerez *et al.* (2020b), o método foi divulgado e discutido também em Jerez *et al.* (2021a). Posteriormente, o método proposto foi empregado para a avaliação de dois produtos ionosféricos da missão COSMIC (ionPrf e igaPrf) em Jerez *et al.* (2021b; 2022d). Além disso, recentemente a metodologia foi aplicada para a validação de um novo produto ionosférico, obtido com apenas observáveis L1 do GPS, em Christovam *et al.* (2023).

**Tabela 1.** Taxas de melhoria do RMS médio das diferenças entre valores de  $f_oF_2$  medidos e estimados com GIMs em relação à simples diferença entre os valores medidos pelos pares de ionossondas considerando um ano de dados (2015)

<i>Pares de ionossondas</i>	<i>CODG</i>	<i>ESAG</i>	<i>IGSG</i>	<i>JPLG</i>	<i>UPCG</i>	<i>UQRG</i>	<i>WHUG</i>
FZA0M_SAA0K	8%	3%	7%	5%	3%	8%	8%
SAA0K_BVJ03	18%	2%	18%	17%	6%	22%	17%
CAJ2M_FZA0M	39%	26%	36%	32%	30%	36%	38%
CAJ2M_SAA0K	35%	26%	33%	32%	27%	35%	33%
FZA0M_BVJ03	15%	0%	16%	15%	5%	18%	16%
CAJ2M_BVJ03	42%	16%	39%	37%	27%	38%	41%

## 2.2 Impacto das incertezas na interpolação de VTEC de mapas ionosféricos

O cálculo da correção ionosférica para aplicação dos GIMs necessita de uma interpolação dos valores fornecidos no grid para o IPP (*Ionospheric Pierce Point*) específico da observável a ser corrigida. A acurácia da interpolação está diretamente relacionada à resolução dos mapas. Além dos valores de VTEC,

os desvios padrão correspondentes, apresentados como RMS no formato IONEX, também são disponibilizados pela maior parte dos GIMs. Entretanto, na equação original de interpolação do VTEC apresentada por Schaer *et al.* (1998), o desvio padrão do VTEC não é considerado. A utilização das incertezas dos valores de VTEC pode ser uma alternativa para os métodos de interpolação, com isso, os valores obtidos não dependem apenas do inverso da distância do ponto de interesse ao grid, mas também da qualidade dessas informações.

Diversos estudos se utilizaram do posicionamento GNSS para verificar a qualidade de diferentes metodologias de estimativa dos mapas de VTEC, em nível global (Orús-Perez, 2017) ou regional (Prol *et al.*, 2018). Para essas aplicações, em geral, o posicionamento por ponto preciso (PPP) é utilizado com algumas diferenças nas estratégias de processamento empregadas, como: observáveis utilizadas, estimativa do DCB e modelos de estimativa do atraso da atmosfera neutra.

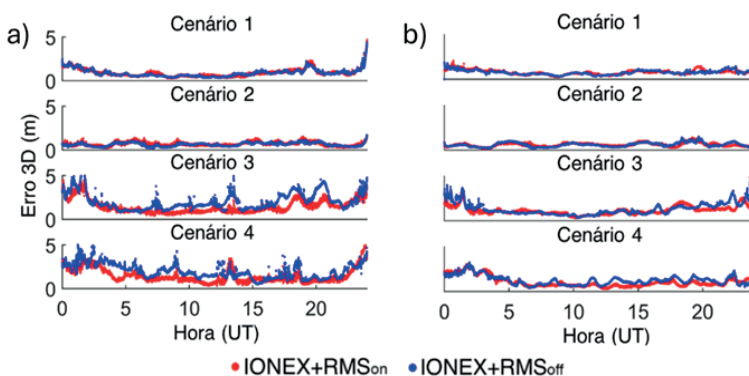
Neste contexto, no presente estudo, foi realizada uma dupla avaliação do impacto das incertezas do VTEC fornecidas pelos GIMs no cálculo da correção ionosférica. Primeiramente foi avaliado um método de interpolação do VTEC baseado no inverso da distância com ponderação considerando os valores de RMS fornecidos nos GIMs. Na sequência, foi analisado o impacto das incertezas do VTEC diretamente no posicionamento GNSS. Para esta etapa, apenas a região brasileira foi selecionada para os testes, considerando regiões com diferentes características ionosféricas.

A possibilidade que foi investigada neste estudo foi a de se obter melhoria na interpolação dos valores de VTEC ao se introduzir fatores adicionais como peso para os valores de VTEC considerando os valores de RMS. Esta abordagem foi avaliada considerando diretamente os valores do grid, onde cada valor foi estimado considerando os valores vizinhos e posteriormente comparados com o valor original do produto. Diversas análises foram realizadas considerando abordagens globais e regionais (incluindo regiões específicas e faixas de latitudes). Em nenhuma das abordagens adotadas foi possível observar variações significativas com a inclusão das incertezas a nível de VTEC.

A avaliação do impacto das incertezas do VTEC no domínio do posicionamento foi realizada considerando a região Brasileira. Para isso, foram utilizados dados de estações GNSS para realizar posicionamento com simples frequência com o método PPP em modo cinemático. Como posições de referência, foram utilizados os valores médios dos resultados obtidos com posicionamento para uma semana de dados utilizando PPP em modo estático com combinação ion-free e demais iguais às configurações utilizadas nos processamentos em modo cinemático. Para as análises foram utilizados os valores de RMS do erro obtido no posicionamento, comparando-se as coordenadas obtidas no posicionamento cinemático com as médias obtidas com posicionamento estático. Dois GIMs do IGS foram avaliados neste estudo, CODG (CODE) e UQRG (UPC). Um terceiro produto foi utilizado, denominado UQ-6. Este produto consiste em uma versão do UQRG com a diferença de ter o valor de 6 TECU subtraído dos valores de RMS, recuperando assim os valores originais de

RMS estimados, antes da inclusão de valores para nível de proteção. Quatro semanas de dados foram utilizadas, considerando cenários com tempestade geomagnética (346-352/2006), baixo fluxo solar (234-240/2008) e dois de elevado fluxo solar: equinócio (261-267/2011) e solstício (352-358/2011). Esses cenários se mostraram representativos para estudos ionosféricos, como demonstrado anteriormente por Hernandez-Pajares *et al.* (2017). Foram utilizados dados de quatro estações GNSS da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística): MAPA em Macapá-AP (0,05° N, 50,90° O), SAVO em Salvador-BA (11,06° S, 37,57° O), PPTE em Presidente Prudente-SP (21,88° S, 50,59° O) e SMAR em Santa Maria-RS (28,28° S, 52,28° O). Para os processamentos foi utilizado o *software* RTKLib (versão 2.4.2) para PPP utilizando simples frequência no modo cinemático, com dados com taxa de amostragem de 15 segundos.

Os resultados do posicionamento utilizando o produto CODG com (vermelho) e sem (azul) o peso baseado nas incertezas são apresentados na Figura 1, a partir do erro 3D médio por época em relação à hora para cada um dos cenários, considerando as estações: (a) PPTE; e (b) SMAR. Pode ser verificado que, em geral, os menores erros são observados no cenário 2 (baixo fluxo solar), enquanto os maiores erros correspondem aos cenários 3 e 4 (intenso fluxo solar). Em relação às estações utilizadas, SMAR (localizada em região com menor impacto da atividade ionosférica) apresentou os menores e mais regulares erros. A influência positiva no uso das incertezas do VTEC para o posicionamento GNSS é evidente para a maior parte dos casos, principalmente para os cenários 3 e 4. Nesses cenários, é possível verificar um aumento nos erros depois das 20h UT até 04h UT, especialmente para a estação PPTE, comportamento semelhante foi observado em SAVO.



**Figura 1.** Erro médio 3D do posicionamento utilizando CODG para as estações: (a) PPTE e (b) SMAR.

As análises considerando os valores de RMS do erro 3D no posicionamento para cada dia dos cenários, utilizando CODG com e sem as incertezas do

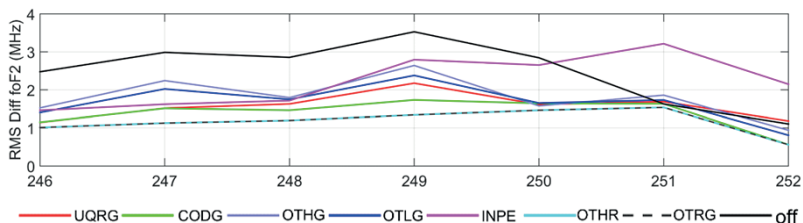
VTEC, para as quatro estações confirmam o comportamento observado anteriormente com os valores médios por época (Figura 1), com melhoria no erro obtido no posicionamento com o uso dos valores de incerteza do VTEC, principalmente nos cenários 3 e 4, em específico para as estações SAVO e PPTE. Considerando as taxas de melhorias por estação e produto, CODG apresentou as maiores taxas de melhoria para as quatro estações consideradas. Os valores médios das taxas de melhoria para CODG, UQRG e UQ-6 foram 23%, 14% e 15%, respectivamente. Os testes iniciais deste estudo foram apresentados em Jerez *et al.* (2021c), quando foi verificada a necessidade de estudos mais aprofundados. O trabalho completo pode ser consultado em Jerez *et al.* (2022a), já os principais resultados obtidos foram discutidos em Jerez *et al.* (2022b).

### 2.3 Validação de mapas ionosféricos: produtos globais vs regionais

Os GIMs disponíveis atualmente apresentam diferenças nas estratégias de processamento, porém, em geral, são fornecidos com mesma resolução espacial. Em relação aos mapas regionais, tanto a resolução temporal quanto a espacial são bastante variáveis. Além disso, existem diferenças na área de abrangência e, conseqüentemente nas estações cujos dados são utilizados para a estimativa dos valores de VTEC. No presente estudo, objetivou-se confrontar o desempenho dos GIMs em comparação com os RIMs para o território brasileiro. Para isso, as estratégias desenvolvidas nas seções 2.1 e 2.2 foram aplicadas para a realização de uma avaliação com base em dados de ionossondas e no posicionamento GNSS. Para o estudo, foram utilizadas as mesmas estações das seções 2.1 e 2.2, com exceção da estação MAPA que foi desativada, sendo substituída pela estação APMA, no mesmo município. Para o presente estudo, foi utilizado um cenário mais recente de tempestade geomagnética, semana correspondente aos dias 246 a 252 de 2017. A utilização dos dados desta semana foi baseada na disponibilidade dos mapas ionosféricos regionais do DGFI. Os produtos avaliados foram: globais (UQRG, CODG, OTHG e OTLG), regionais (INPE, OTHR) e híbrido (OTRG).

A Figura 2 apresenta os valores de RMS das diferenças entre os valores medidos de  $f_oF_2$  pelas ionossondas e os valores estimados com auxílio dos mapas ionosféricos (globais, regionais e híbrido), bem como a simples diferença entre os valores medidos pelo par de ionossondas CAJ2M-SAA0K. De maneira geral, é possível verificar que os mapas apresentaram desempenho melhor que a opção sem interpolação (*off*). Os mapas regionais do DGFI-TUM (OTHR e OVHR) apresentaram os menores erros e comportamento mais regular entre os produtos analisados. Os mapas globais apresentaram comportamento semelhante, com melhor desempenho geral do CODG, seguido por UQRG. O produto que apresentou pior desempenho foi o mapa regional do INPE.

A Tabela 2 apresenta as taxas de melhoria dos valores obtidos com os mapas em relação à comparação direta dos valores medidos com as ionossondas. Os produtos com as melhores taxas de melhoria foram os mesmos que tiveram os menores erros, alcançando valores de até 67%. De modo geral, INPE apresentou as menores taxas de melhoria.

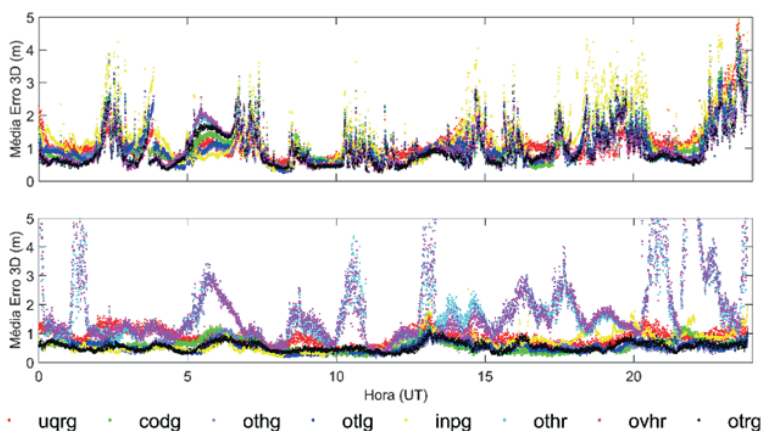


**Figura 2.** RMS das diferenças de valores de foF2 medidos por ionossondas e estimados com auxílio de mapas ionosféricos e a simples diferença entre os valores das duas ionossondas (off) para dados de 2017 do par CAJ2M-SAA0K.

**Tabela 2.** Taxas de melhoria dos RMS das diferenças de valores de foF2 medidos por ionossondas e estimados com auxílio de mapas ionosféricos em relação à simples diferença entre os valores das duas ionossondas

Pares de ionossondas	UQRGJ (%)	CODG (%)	OTHG (%)	OTLG (%)	INPE (%)	OTHR (%)	OVHR (%)	OTRG (%)
FZA0M_SAA0K	4,45	4,46	-0,79	-4,11	-4,93	12,61	10,48	12,61
CAJ2M_FZA0M	37,13	44,31	27,77	32,54	10,41	52,67	50,19	52,67
CAJ2M_SAA0K	38,00	46,31	33,57	35,01	16,43	57,58	56,49	57,58

A Figura 3 apresenta os valores de erro médio 3D obtidos no PPP com os oito tipos de mapas ionosféricos selecionados para as estações PPT e SMAR. É possível verificar que os resultados provenientes da estação PPT apresentaram



**Figura 3.** Erro médio 3D do posicionamento utilizando mapas ionosféricos utilizando dados de 2017 para as estações PPT (topo) e SMAR (baixo).

os dados mais ruidosos ao longo do dia. Em todas as estações verifica-se o valor elevado dos erros obtidos com o produto INPE. Vale ressaltar o elevado erro obtido com os produtos regionais do DGFI (OTHR e OVHR). O produto corresponde apenas à região brasileira, portanto, com exceção da estação PPTe, as demais estações são localizadas em regiões mais próximas às bordas dos mapas regionais. Esse comportamento indicou a necessidade da utilização de valores globais para completar o grid utilizado, assim foi gerado o produto híbrido chamado OTRG, que na maior parte dos casos apresentou o melhor desempenho.

Considerando os valores médios do erro 3D obtido no posicionamento por estação e produto utilizado, diferente do bom desempenho observado com os dados de ionossonda pelos produtos OTHR e OVHR, é possível verificar que no posicionamento o mesmo não ocorre, sendo que para a estação SMAR, mais ao sul do país, o produto OVHR apresentou o pior desempenho. Ainda assim, o produto INPE apresenta o pior desempenho nas outras três estações consideradas. Já o produto OTRG obteve o melhor desempenho em três das estações utilizadas, apenas com a estação APMA, o mapa OTLG obteve menor erro médio. Todas as análises deste estudo foram reportadas em Jerez *et al.* (2023a) e discutidas em Jerez *et al.* (2023b). Um compilado dos três estudos apresentados na seção 2 foi apresentada e discutida em Jerez *et al.* (2023c).

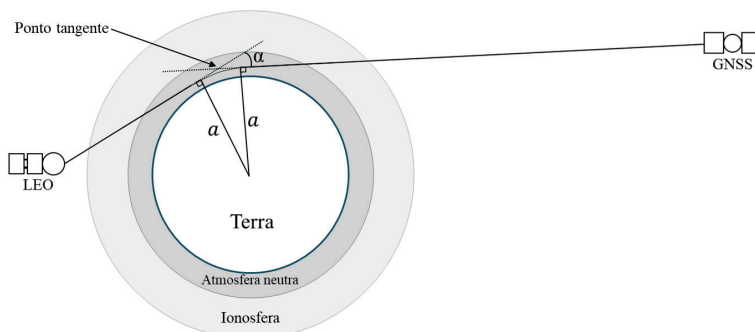
### **3. Recuperação de perfis de densidade de elétrons a partir de RO-GNSS**

No final da década de 1950 a obtenção de medidas por meio da observação de corpos ocultos já era utilizada para o estudo de outros planetas. Inicialmente com a utilização de ocultações estelares, a técnica já permitia o cálculo de parâmetros atmosféricos. A técnica evoluiu com o avanço tecnológico e da exploração espacial, e os primeiros trabalhos e missões tiveram como objeto de estudo a atmosfera de outros planetas. Os primeiros trabalhos a abordarem a possibilidade de utilizar a RO para a investigação da atmosfera terrestre surgiram no final da década de 1960 (Fjeldbo e Eshleman, 1968). Paralelamente a isso, na década de 1970 começaram a ser desenvolvidos o GPS e o GLONASS, sistemas GNSS pioneiros, que alcançaram constelação completa em 1995. Com os sistemas GNSS e as missões com satélites LEO, a utilização da técnica de RO para investigações da atmosfera terrestre se tornou uma realidade. Com isso, diversas missões foram desenvolvidas, nem todas especificamente para obtenção de dados de RO, mas com satélites equipados com receptores que permitiam a exploração da técnica.

#### **3.1 Geometria da RO-GNSS e recuperação de perfis**

A recuperação de perfis atmosféricos a partir de dados de RO está diretamente relacionada ao conceito de refração. Isso porque a RO é baseada no efeito da atmosfera, que refrata o sinal transmitido, alterando sua velocidade de propagação e, conseqüentemente, sua trajetória. Devido a essa ação, durante

um curto intervalo, o sinal GNSS chega ao receptor instalado no satélite LEO, ainda que o mesmo esteja obstruído pela Terra (Kursinski *et al.*, 2000). Durante uma ocultação, que em geral dura de um a três minutos, com a variação da posição entre os satélites GNSS e LEO, é possível obter um perfil de refração do sinal eletromagnético. A Figura 4 apresenta a geometria de uma ocultação, onde é possível verificar os principais elementos envolvidos: o ângulo de refração ( $\alpha$ ), o parâmetro de impacto ( $a$ ) e o raio de tangência ( $r_t$ ), que corresponde à distância entre o centro da Terra e o ponto tangente.



**Figura 4.** Geometria de uma ocultação GNSS. Fonte: Adaptado de Kursinski (2000).

O índice de refração ( $n$ ) em um meio é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e a velocidade da luz no meio ( $v$ ). Considerando frequências de micro-ondas, o índice de refração total é próximo à unidade, de modo que normalmente é discutido em termos de refratividade ( $N = (n - 1) 10^6$ ) (Syndergaard, 1999). A partir do índice de refração diversos perfis atmosféricos podem ser obtidos, como a temperatura, pressão e umidade da atmosfera neutra, e a densidade de elétrons da ionosfera. A refratividade pode ser expressa em função da pressão atmosférica hidrostática ( $P_{hid}$ ) dada em hectopascal, da pressão parcial de vapor d'água ( $P_w$ ) dado em hectopascal, da temperatura atmosférica ( $T$ ) dada em kelvin, da densidade de elétrons ( $n_e$ ) por metro cúbico, da frequência ( $f$ ) dada em hertz e do conteúdo líquido de água ( $W$ ) dado em gramas por metro cúbico (Syndergaard, 1999). A relação entre o ângulo de refração e o índice de refração é dado pela equação (Syndergaard, 1999):

$$\alpha(a) = -2a \int_{r_{pt}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n^2 r^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr, \tag{2}$$

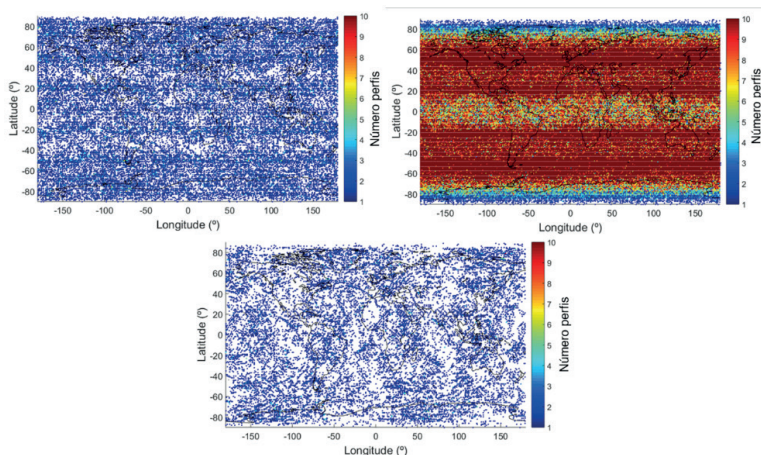
Com a aplicação da inversa de Abel (Kursinski *et al.*, 2000), é possível expressar o índice de refração ( $n$ ) em função do ângulo de refração ( $\alpha$ ), do parâmetro de impacto ( $a$ ) e do raio do ponto considerado ( $r$ ).

$$n(r) = \exp \left( \frac{1}{\pi} \int_a^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - n^2 r^2}} da \right). \tag{3}$$

Mais detalhes sobre a teoria e produtos de RO-GNSS podem ser consultados em Jerez *et al.* (2022c).

### 3.2 Análise da cobertura de dados de RO-GNSS na região brasileira

Antes da avaliação das metodologias utilizadas para a recuperação de perfis ionosféricos provenientes de RO, foi desenvolvida uma análise das missões de RO com perfis ionosféricos em relação ao número de perfis e à área de cobertura. As análises consideraram um dia, um mês e um ano de dados, além do período completo de cada missão. A Figura 5 apresenta a plotagem do número de ocorrências de ocultações com perfis ionosféricos para um mês de dados. A plotagem à esquerda corresponde a dados da missão CHAMP, a do centro à missão COSMIC e a da direita à missão GRACE. Para a obtenção das imagens foi considerado um grid de  $1^\circ \times 1^\circ$  (latitude x longitude). Com esses resultados fica evidente a maior concentração de perfis disponibilizados a partir da missão COSMIC. Além disso, verifica-se que para esta missão a maior quantidade de ocultações tem ocorrência em regiões de médias latitudes, diferente do observado para as missões CHAMP e GRACE.



**Figura 5.** Número de perfis ionosféricos das missões CHAMP (superior esquerda), COSMIC (superior direita) e GRACE (inferior) considerando um mês de dados.

Uma análise histórica também foi desenvolvida considerando as três missões. Apesar de apresentarem comportamento semelhante para nível regional (Brasil) e global, as ocorrências de ocultações com perfis ionosféricos na região do Brasil ficam em torno de apenas 2,7% do total. É possível verificar ainda que a quantidade de ocultações observada nas missões CHAMP e GRACE é mais constante ao longo do tempo. A missão COSMIC apresenta maior quantidade de dados nos anos iniciais da missão e decréscimo principalmente

a partir de 2013. Mais análises foram apresentadas em Jerez *et al.* (2019). Com a missão COSMIC-2 a geometria adotada para o conjunto de satélites visa uma cobertura mais abrangente da região equatorial. Alguns estudos iniciais mostram o aumento significativo do número de ocultações com ocorrência na região do Brasil. Porém, como os arquivos de excesso de fase ainda não estão disponíveis para produtos ionosféricos, não foi possível a utilização dos dados desta missão no presente trabalho.

### 3.3 Metodologia de recuperação de perfis ionosféricos com auxílio de informações ionosféricas

A etapa na qual a pesquisa buscou contribuir se refere à recuperação do perfil de densidade de elétrons a partir do TEC, correspondente a:

$$n_e(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{r_R} \frac{dTEC/dr_{pt}}{\sqrt{r_{pt}^2 - r^2}} dr_{pt}. \quad (4)$$

No entanto, computacionalmente essa equação pode levar a problemas de singularidade, especificamente para as regiões próximas aos limites superior e inferior dos perfis. Como solução para esse problema, Lei *et al.* (2007) apresentam uma formulação equivalente à Equação 4:

$$Ne(p_i) = c_{i,0}^{-1} \left( \frac{TEC(p_i)}{p_i} - \sum_{k=1}^m c_{i,k} Ne_{(p_{i+k})} \right). \quad (4)$$

sendo  $Ne(p_i)$  a densidade de elétrons considerando um dado  $p_i$  (raio tangente),  $c_{i,0}^{-1}$  e  $c_{i,k}$  coeficientes adimensionais baseados nos valores de  $p_i$ ,  $TEC(p_i)$  o TEC calibrado dado  $p_i$  e  $p_i$  o número de camadas acima de  $p_i$ . Deste modo, a densidade de elétrons é estimada desde o topo até a camada mais baixa do perfil. Para considerar a variabilidade horizontal da ionosfera, Pedatella, Yue e Schreiner (2015) apresentam o uso de um fator de assimetria, baseado em valores provenientes de mapas de  $NmF_2$  da própria missão COSMIC. A metodologia de processamento proposta por Pedatella, Yue e Schreiner (2015) resultou nos produtos COSMIC denominados igaPrf, disponíveis na página do CDAAC para ocultações a partir de 2015.

Para os estudos aqui realizados foram considerados três tipos de fator de assimetria da ionosfera ( $F_{AI}$ ): o primeiro considerando a estimativa baseada em valores de VTEC provenientes dos GIMs ( $F_{AI}^{GIM}$ ); o segundo aplicando a proposta de Pedatella, Yue e Schreiner (2015) ( $F_{AI}^{ionGrid}$ ); e o terceiro calculado a partir da média dos valores dos dois tipos de fatores de assimetria apresentados anteriormente ( $F_{AI}^{ionGIM}$ ). Além das diferenças em relação às fontes de dados utilizadas para o cálculo dos fatores de assimetria, foram avaliadas três formas de inclusão dessas informações na Equação 6. A primeira, de maneira análoga à utilizada por Pedatella, Yue e Schreiner (2015), na qual os valores do fator de assimetria são incluídos no valor de densidade de elétrons de cada camada, utilizado no somatório da Equação 5:

$$Ne(p_i) = c_{i,0}^{-1} \left( \frac{TEC(p_i)}{p_i} - \sum_{k=1}^m c_{i,k} Ne_{(p_{i+k})} F_{AI} \right), \quad (6)$$

sendo  $F_{AI}$  a matriz de fatores de assimetria estimados para as projeções das posições do GPS, LEO e ponto tangente para cada camada considerada. Os produtos resultantes dessa estratégia foram denominados: gmGIM, com fator de assimetria derivado de GIMs; gmlonGrid, com fator de assimetria derivado dos produtos ionGrid (equivalentes aos produtos igaPrf); e gmlonGIM, com o fator de assimetria obtido com a média dos dois produtos (GIMs e ionGrid). A segunda possibilidade foi realizada com a aplicação de apenas um fator de assimetria em relação ao TEC e a última abordagem testada foi também a aplicação de apenas um fator de assimetria, porém, utilizado diretamente no valor de densidade de elétrons final. Os resultados obtidos com essas metodologias foram muito mais discrepantes que os provenientes dos produtos *ionPrf*, assim, são apresentados apenas os resultados com a abordagem correspondente à Equação 6.

### 3.3.1 Avaliação de perfis com medições *in situ*

A avaliação com medições *in situ* considerou dados da missão GRACE. A partir de cada um dos valores do perfil de RO, assumidos como posição de referência para a definição de uma janela de busca, são verificados os valores de densidade de elétrons medidos pelo satélite GRACE cujos dados se encontrem dentro da janela definida. A partir disso, a diferença do valor obtido com a missão COSMIC é calculada em relação a todas as medidas GRACE incluídas na janela adotada. Três medidas são analisadas: a discrepância obtida a partir da menor diferença de tempo entre os dados COSMIC e GRACE; a diferença obtida com a menor distância 3D entre a posição de ocorrência com COSMIC e a medição GRACE; e o valor médio das diferenças calculadas para cada valor obtido com COSMIC e as medições GRACE pertencentes à janela de busca. Os tempos de referência em todos os casos analisados são considerados em hora local (LT – *Local Time*).

Para as análises foram adotadas três janelas de busca em latitude e longitude: 20°, 10° e 5°. As janelas de altitudes consideradas foram de 100 km e 50 km. Já janelas de tempo utilizadas foram de uma e duas horas. Foram utilizados três cenários de uma semana cada, sendo um de baixo fluxo solar (234-240/2008) e dois de intenso fluxo solar, um de equinócio (261-267/2008) e um de solstício (352-358/2011). Os resultados apresentados com o *ionPrf* correspondem ao produto ionosférico oficial da COSMIC. Os resultados gmGIM correspondem aos produtos cujos processamentos foram realizados no GMRION utilizando GIMs. Os resultados gmlonGrid foram obtidos com a metodologia que utiliza os mapas de NmF2 da missão COSMIC (ionGrid) (correspondentes ao igaPrf). E os resultados gmlonGIM, são derivados dos processamentos com fator de assimetria baseado na média entre os fatores obtidos com GIM e ionGrid.

Com as diferenças absolutas médias obtidas com janelas de 20°, 10° e 5° (em latitude e longitude), de 100 km (em altitude) e de 4 horas, considerando os mapas globais UQRG, de modo geral, é possível verificar que os quatro tipos de produtos ionosféricos analisados apresentaram discrepâncias com ordem de

grandeza semelhante. Para o cenário 1 (baixo fluxo solar), os produtos obtidos com GIMs apresentaram o melhor desempenho para as três janelas de latitude e longitude. Nos cenários 2 e 3 (intenso fluxo solar), o ionPrf apresentou o melhor desempenho em todas as configurações, enquanto os produtos obtidos com GIMs apresentaram o pior desempenho em todas as opções de janelas consideradas.

Com a diminuição da janela de tempo para 2 horas e mantendo as demais janelas, Tabela 3, os resultados obtidos foram mais variáveis. Com a janela de tempo mais restrita, o desempenho dos produtos gmlonGrid foi o melhor para a maior parte dos casos considerando os cenários 1 e 2. O pior desempenho foi obtido com o ionPrf, para o cenário 1, e com o gmGIM, para o cenário 2. O cenário 3 apresentou o comportamento mais atípico, com as diferenças mais significativas entre os erros obtidos com cada um dos quatro produtos. Neste caso, o gmGIM apresentou os melhores desempenhos para todas as janelas, enquanto o ionPrf apresentou o pior desempenho na maior parte dos casos.

**Tabela 3.** Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 100 km em altitude e 2 horas para o cenário 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios

<i>Janela: 20° x 100 km x 2h</i>				
<i>Referência</i>	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmlonGIM</i>	<i>gmlonGrid</i>
Min dist (10 <sup>4</sup> el/cm <sup>3</sup> )	13,7778	11,1752	12,1542	13,4183
Min tempo (10 <sup>4</sup> el/cm <sup>3</sup> )	23,5490	21,7451	22,4804	23,5022
Erro médio (10 <sup>4</sup> el/cm <sup>3</sup> )	19,0958	18,9663	19,1806	19,5427
<i>Janela: 10° x 100 km x 2h</i>				
<i>Referência</i>	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmlonGIM</i>	<i>gmlonGrid</i>
Min dist (10 <sup>4</sup> el/cm <sup>3</sup> )	10,4331	3,2002	5,3411	8,0930
Min tempo (10 <sup>4</sup> el/cm <sup>3</sup> )	23,8956	16,3620	18,8036	21,5555
Erro médio (10 <sup>4</sup> el/cm <sup>3</sup> )	13,5168	11,0561	11,6266	12,5234
<i>Janela: 05° x 100 km x 2h</i>				
<i>Referência</i>	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmlonGIM</i>	<i>gmlonGrid</i>
Min dist (10 <sup>4</sup> el/cm <sup>3</sup> )	10,5591	3,5431	5,5091	8,2320
Min tempo (10 <sup>4</sup> el/cm <sup>3</sup> )	18,3808	10,7636	13,3309	16,0537
Erro médio (10 <sup>4</sup> el/cm <sup>3</sup> )	12,9747	7,2263	8,8785	10,9659

Com os resultados obtidos com o aumento da restrição da janela em altitude, agora considerando 50 km e janela de tempo de quatro horas, no cenário 1, novamente o gmGIM apresentou o melhor desempenho na maior parte dos casos, enquanto o pior desempenho neste cenário foi com gmlonGrid. Com os cenários 2 e 3, os melhores resultados foram obtidos com ionPrf, enquanto o pior desempenho foi obtido com gmGIM. Na configuração mais restrita, com janela em altitude de 50 km e em tempo de 2 horas, para o cenário 1, o melhor desempenho não teve concentração significativa em um só produto, mas as maiores ocorrências foram com o gmGIM e os piores desempenhos foram obtidos com ionPrf. Considerando o cenário 2, o gmlonGrid apresentou o melhor desempenho, já o pior desempenho em todos os casos deste cenário

foi obtido com o gmGIM. Para o cenário 3, esta configuração apresentou correspondência entre os dados de RO e os provenientes da missão GRACE apenas com a janela de 20°. Neste caso, o melhor desempenho foi obtido com ionPrf e o pior com gmGIM. De forma geral, os resultados obtidos com a comparação dos resultados das metodologias de recuperação de perfis de densidade de elétrons com medições *in situ* da missão GRACE mostraram a compatibilidade dos diferentes produtos ao se considerar a ordem de grandeza das diferenças absolutas obtidas, porém, o melhor e pior desempenho entre os produtos foi variável de acordo com o cenário considerado. Para analisar o desempenho dos produtos em períodos mais longos, foram utilizados dados de ionossondas considerando dois anos de dados.

### 3.3.2 Avaliação de perfis com medições de ionossondas

Para a avaliação dos perfis obtidos com as metodologias apresentadas a partir de dados de ionossondas foi utilizada a comparação direta com as medições, sem interpolação baseada nos valores de VTEC provenientes de GIMs (seção 3.2.1). A motivação para o uso de medições diretas foi devido à utilização de GIMs em duas das metodologias de recuperação de perfis de RO. Com isso, a utilização de mapas globais também na validação poderia comprometer a avaliação das metodologias. Além disso, estudos desenvolvidos para a região brasileira mostraram que apesar de ser verificada a diminuição do erro obtido ao se utilizar a interpolação dos valores de referência, o comportamento dos resultados em relação a qual produto obteve melhor ou pior desempenho não apresentou variação (Jerez *et al.*, 2020a; 2021b).

Nesta avaliação, as quatro estações do INPE apresentadas anteriormente foram utilizadas. Diferente da seção 3.3.1, neste caso apenas um ponto por perfil é avaliado, uma vez que são adotados como referência os valores de pico da camada F2 medidos com as ionossondas. Para o estudo foram consideradas três medidas: foF2, NmF2 e hmF2. Os horários associados aos dados de RO e de referência foram transformados para hora local (LT). As janelas utilizadas foram de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude. Os produtos ionosféricos utilizados para a recuperação de perfis de RO foram o UQRG e o CODG, e os períodos analisados foram os anos de 2014 e 2015. Nas análises foram considerados também os valores médios de distância entre as posições de ocorrência das ocultações e as posições das ionossondas consideradas, bem como o número de ocultações ocorridas para cada cenário. Para as análises foram utilizadas as diferenças médias absolutas obtidas entre os valores dos perfis de RO e os medidos com as ionossondas.

Para o ano de 2014 com UQRG e janela de 20° em latitude e longitude, os melhores resultados foram obtidos com ionPrf e os piores resultados foram obtidos com gmlonGrid. Com a diminuição da janela para 10° e posteriormente para 5°, o melhor desempenho passa a ser observado com o gmGIM. Para o ano de 2015, com a janela de 20°, a maior parte das ocorrências de melhor desempenho é observada com o ionPrf, já o pior desempenho foi observado nos resultados do gmlonGrid. Com as janelas de 10° e 5°, o melhor desempenho

se concentra com gmGIM. Em ambos os anos os piores resultados são obtidos com gmlonGrid.

Para as análises utilizando dados de ionossonda como referência também foram consideradas as metodologias com a aplicação do produto CODG. Considerando os dados de 2014 com a janela de 20°, o melhor desempenho foi obtido com ionPrf, enquanto o pior desempenho foi obtido com gmlonGrid para a maior parte dos casos. Com janelas de 10° e 5°, o melhor desempenho foi obtido com gmGIM, e o pior desempenho foi observado com gmlonGrid. Os resultados obtidos com CODG para 2015 com a janela de 20°, apresentaram melhor desempenho com gmGIM (seis ocorrências) e ionPrf (cinco ocorrências) enquanto o pior desempenho foi obtido com gmlonGrid. Com as janelas de 10° e 5°, todas as ocorrências de melhor desempenho foram obtidas com gmGIM e o pior desempenho foi observado com gmlonGrid. A Tabela 4 apresenta os resultados da janela de 5°.

De modo geral, assim como observado com os dados *in situ*, os resultados obtidos com dados de ionossonda mostraram compatibilidade entre os erros obtidos com os produtos analisados. Foi possível verificar que os resultados apresentaram um comportamento semelhante, sendo observada melhoria do desempenho com a abordagem proposta (gmGIM) com a utilização de ocultações com ocorrência mais próxima aos dados de referência (janelas mais restritas). Ressalta-se que para o presente estudo foram utilizados todos os perfis de RO-GNSS disponíveis. O estudo completo das metodologias de recuperação de perfis está em desenvolvimento, após a realização de estudos sobre metodologias de filtragens de produtos ionosféricos provenientes de RO-GNSS (estudos iniciais sobre o tema podem ser consultados em Jerez *et al.*, 2023d), visando complementar as análises e fornecer uma avaliação mais robusta.

**Tabela 4.** Erros absolutos médios por metodologia utilizando CODG com dados de 2015 e janela de 5°

<i>Estação</i>	<i>Medidas</i>	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmlonGIM</i>	<i>gmlonGrid</i>
BVJ03	foF <sub>2</sub> (MHz)	1,42	1,39	1,37	1,39
	NmF <sub>2</sub> (10 <sup>5</sup> el/cm <sup>3</sup> )	3,59	3,47	3,45	3,51
	hmF <sub>2</sub> (km)	36,82	36,44	37,30	38,35
SAA0K	foF <sub>2</sub> (MHz)	0,85	0,80	0,82	0,85
	NmF <sub>2</sub> (10 <sup>5</sup> el/cm <sup>3</sup> )	1,95	1,90	1,93	1,96
	hmF <sub>2</sub> (km)	46,12	41,46	40,14	38,88
FZA0M	foF <sub>2</sub> (MHz)	0,70	0,63	0,69	0,78
	NmF <sub>2</sub> (10 <sup>5</sup> el/cm <sup>3</sup> )	1,48	1,31	1,45	1,65
	hmF <sub>2</sub> (km)	30,32	30,42	29,51	29,25
CAJ2M	foF <sub>2</sub> (MHz)	0,69	0,61	0,65	0,71
	NmF <sub>2</sub> (10 <sup>5</sup> el/cm <sup>3</sup> )	1,20	1,08	1,15	1,26
	hmF <sub>2</sub> (km)	29,17	27,58	29,61	29,61

## 4. Conclusões

A RO parte do princípio de que o sinal transmitido pelo satélite GNSS sofre os efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera no trajeto até o receptor localizado no satélite LEO. Visando contribuir na qualidade dos perfis ionosféricos obtidos com dados de RO-GNSS, na presente pesquisa, primeiramente foi desenvolvido um extenso estudo em relação ao desempenho de mapas ionosféricos para a região brasileira. Inicialmente foi proposto um método de avaliação de mapas globais por meio de dados de ionossonda, no qual dois produtos globais apresentaram melhor desempenho para a região brasileira (UQRG e CODG). Além disso, a metodologia desenvolvida representou uma alternativa para a utilização dos dados de ionossondas, auxiliados por mapas globais, considerando a limitação no número de estações disponíveis em regiões como a do Brasil. Na sequência foi avaliado o impacto do uso das incertezas dos valores de VTEC, disponibilizadas nos GIMs, nos métodos de interpolação e no posicionamento GNSS. No posicionamento GNSS, ficou evidente a influência do uso das incertezas. A última contribuição desta pesquisa em relação aos mapas ionosféricos foi com uma avaliação comparativa do desempenho de mapas regionais e globais para a região brasileira. Os produtos regionais do DGFI apresentaram os melhores resultados para as análises utilizando dados de ionossondas e no posicionamento GNSS.

Em relação aos estudos sobre RO, foi conduzida uma análise da disponibilidade de perfis ionosféricos provenientes de RO, bem como as ocorrências na região brasileira. Para isso, foram considerados dados de três missões, CHAMP, COSMIC e GRACE, sendo verificado que menos de 3% das ocultações tiveram ocorrência na região do Brasil. Além disso, foi desenvolvida uma metodologia para a recuperação de perfis de densidade de elétrons utilizando dados de RO auxiliados por informações ionosféricas. A metodologia foi implementada no módulo GMRION do *software* CDAAC, utilizado para o processamento de dados da missão COSMIC. Com a avaliação *in situ*, de modo geral, o produto proposto apresentou melhor desempenho para o cenário de baixo fluxo ionosférico, enquanto o ionPrf obteve os piores resultados. Nos cenários de intenso fluxo ionosférico o produto ionPrf apresentou os melhores resultados, enquanto o produto proposto apresentou o pior desempenho. Com a avaliação com dados de ionossondas, de modo geral, para a janela de 20°, o produto ionPrf apresentou os melhores resultados, porém, com as janelas mais restritas (10° e 5°), em geral o produto proposto (gmGIM) apresentou melhor performance. Os estudos aqui desenvolvidos consideraram apenas dados da missão COSMIC, dados de outras missões devem ser considerados futuramente, incluindo os da recente missão COSMIC-2. Além dos resultados já publicados, diversos trabalhos e projetos em continuidade ao estudo aqui apresentado seguem em desenvolvimento, incluindo novas metodologias de filtragem (Jerez *et al.*, 2023d) e validação de dados de RO, estratégias de processamento e utilização de diferentes produtos e missões.

## **Acrônimos e expressões**

CDAAC: COSMIC Data Analysis and Archive Center.

CHAMP: Challenging Minisatellite Payload.

CODE: Center for Orbit Determination in Europe.

CODG: GIM Solução final (CODE).

COSMIC: Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate.

DCB: Differential Code Bias.

DGFI-TUM: Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut- Technische Universität München.

GIM: Global Ionospheric Map.

GMRION: Ionospheric module of CDAAC software.

GPS: Global Positioning System.

GNSS: Global Navigation Satellite System.

GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment.

IAAC: IGS Ionosphere Associate Analysis Centers.

IGS: International GNSS Service.

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

IPP: Ionospheric Pierce Point.

IRI: International Reference Ionosphere.

LEO: Low Earth Orbiting.

LT: Local Time.

OTHG: GIM Solução final (DGFI-TUM).

OTHR: RIM Solução final (DGFI-TUM).

OTRG: Solução híbrida final (DGFI-TUM).

PPP: Posicionamento por Ponto Preciso.

RBMC: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo.

RIM: Regional Ionospheric Map.

RMS: Root Mean Square.

RO: Rádio Ocultação.

STEC: Slant Total Electron Content.

SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.

TEC: Total Electron Content.

VTEC: Vertical Total Electron Content.

UT: Universal Time.

UPC: Universitat Politècnica de Catalunya.

UQRG: GIM Solução rápida (UPC).

## Bibliografia

- Altinay, O., Tulunay, E. & Tulunay, Y. (1997). Forecasting of ionospheric critical frequency using neural networks. *Geophysical Research Letters*, 24 (12), 1467-1470. <https://doi.org/10.1029/97GL01381>
- Araujo-Pradere, E., Weatherhead, E. C., Dandenault, P. B., Bilitza, D., Wilkinson, P., Coker, C. & Paznukhov, V. (2019). Critical issues in ionospheric data quality and implications for scientific studies. *Radio Science*, 54 (5), 440-454. <https://doi.org/10.1029/2018RS006686>
- Christovam, A. L., Prol, F. S., Jerez, G. O., Hernández-Pajares, M. & Camargo, P. O. (2023). PPP at low latitudes with ionospheric model exclusively based on single frequency GNSS measurements. *Space Weather*, 21 (8), e2023SW003513. <https://doi.org/10.1029/2023SW003513>
- Fjeldbo, G. & Eshleman, V. R. (1968). The atmosphere of Mars analyzed by integral inversion of the Mariner IV occultation data. *Planetary and Space Science*, 16 (8), 1035-1059. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(68\)90020-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(68)90020-2)
- García-Fernández, M., Hernández-Pajares, M., Juan, J. M. & Sanz, J. (2005). Performance of the improved Abel transform to estimate electron density profiles from GPS occultation data. *GPS Solutions*, 9, 105-110. <https://doi.org/10.1007/s10291-005-0139-5>
- Goss, A., Schmidt, M., Erdogan, E., Görres, B. & Seitz, F. (2019). High-resolution vertical total electron content maps based on multi-scale B-spline representations. *Annales Geophysicae*, 37 (4), 699-717. <https://doi.org/10.5194/angeo-37-699-2019>
- Hernández-Pajares, M., Juan, J. M. & Sanz, J. (2000). Improving the Abel inversion by adding ground GPS data to LEO radio occultations in ionospheric sounding. *Geophysical Research Letters*, 27 (16), 2473-2476. <https://doi.org/10.1029/2000GL000032>
- Hernández-Pajares, M., Juan, J. M., Sanz, J., Orus, R., García-Rigo, A., Feltens, J. & Krankowski, A. (2009). The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *Journal of Geodesy*, 83, 263-275. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1>
- Hernández-Pajares, M., Roma-Dollase, D., Krankowski, A., García-Rigo, A. & Orús-Pérez, R. (2017). Methodology and consistency of slant and vertical assessments for ionospheric electron content models. *Journal of Geodesy*, 91 (12), 1405-1414. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1032-z>
- Jerez, G. O., Hernández-Pajares, M., Alves, D. & Monico, J. F. (2023d). Validation Methods to Study the Consistency and Quality of Radio Occultation Electron Density Profiles: Application to COSMIC. *Proceedings of the 36<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2023)* (pp. 3307-3315). <https://doi.org/10.33012/2023.19184>
- Jerez, G. O., Hernández-Pajares, M., Goss, A., Prol, F. S., Alves, D. B., Monico, J. F. & Schmidt, M. (2023a). Two-way assessment of ionospheric maps performance over the Brazilian region: Global versus regional products. *Space Weather*, 21 (2), e2022SW003252. <https://doi.org/10.1029/2022SW003252>
- Jerez, G. O., Alves, D. B. M., Nespolo, R. S., Monico, J. F. G. & Hernández-Pajares, M. (2022c). Rádio Ocultação GNSS: Revisão Teórica, Missões e Produtos. *Revista Brasileira de Cartografia*, 74 (4). <https://doi.org/10.14393/rbcv74n4-63973>
- Jerez, G. O., Hernández-Pajares, M., Goss, A., da Silva, C. M., Alves, D. B. & Monico, J. F. (2022a). Impact and synergies of GIM error estimates on the VTEC interpolation

- and single-frequency PPP at low latitude region. *GPS Solutions*, 26 (2), 40. <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01228-0>
- Jerez, G. O., Hernandez-Pajares, M., Goss, A., Prol, F. S., Alves, D. B. M., Monico, J. F. G., Silva, C. M. & Schmidt, M. (2023c). Ongoing strategies for assessing VTEC maps performance over a low latitude region. XXXV URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS 2023). URSI-GASS Program Book.
- Jerez, G. O., Hernandez-Pajares, M., Prol, F. S., Alves, D. B. M. & Monico, J. F. G. (2021b). *Performance of COSMIC electron density profiles over the Brazilian region by means of ionosonde data: ionPrf versus igaPrf*. 8<sup>th</sup> International Radio Occultation Working Group Meeting. Poster Gallery.
- Jerez, G. O., Hernández-Pajares, M., Prol, F. S., Alves, D. B. & Monico, J. F. (2020b). Assessment of global ionospheric maps performance by means of ionosonde data. *Remote Sensing*, 12 (20), 3452. <https://doi.org/10.3390/rs12203452>
- Jerez, G. O., Souza, A. L. C., Hernandez-Pajares, M., Alves, D. B. M. & Monico, J. F. G. (2021c). *Assessment of global ionospheric maps considering TEC uncertainties*. VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia e VIII Simpósio de Física e Astronomia do Vale do Paraíba. Abstract Book of VIII SBGEA & VIII SIMFAST.
- Jerez, G., Hernández-Pajares, M., Goss, A., Prol, F., Alves, D., Monico, J. & Schmidt, M. (2023b). *Performance of global and regional ionospheric maps over a low latitude region*. EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU-8243). <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8243>
- Jerez, G., Hernández-Pajares, M., Goss, A., Silva, C., Alves, D. & Monico, J. (2022b). *Impact of GIM uncertainties on the single-frequency PPP over the Brazilian region*. EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU22-8459). <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-8459>
- Jerez, G., Hernández-Pajares, M., Alves, D. & Monico, J. (2022d). *Validation of radio occultation electron density profiles over a low latitude region: an ongoing strategy*. 21<sup>st</sup> International Beacon Satellite Symposium. BBS 2022 Conference Book.
- Jerez, G., Hernández-Pajares, M., Prol, F., Alves, D. & Monico, J. (2021a). *Assessment of global ionospheric maps performance in the Brazilian region using ionosonde data*. In EGU General Assembly Conference Abstracts. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-5440>
- Jerez, G., Prol, F., Alves, D., & Monico, J. (2019). *Analysis of the coverage of radio occultation electron density profiles over the Brazilian region*. BBS 2019 Conference Book.
- Jerez, G., Prol, F., Alves, D., Monico, J. & Hernández-Pajares, M. (2020a). *Assessment of electron density profiles over the Brazilian region using radio occultation data aided by global ionospheric maps*. EGU General Assembly Conference Abstracts. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-325>
- Kelley, M. C. (2009). *The Earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics*. Academic Press.
- Kilifarska, N. A. & Ouzounov, D. P. (2001). Theoretical modeling of foF2 and hmF2 ionospheric parameters during a strong magnetic disturbance. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106 (A12), 30415–30428. <https://doi.org/10.1029/2001JA001106>
- Kursinski, E. R., Hajj, G. A., Leroy, S. S. & Herman, B. (2000). The GPS radio occultation technique. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 11 (1), 53-114. [https://doi.org/10.1007/3-540-34121-8\\_12](https://doi.org/10.1007/3-540-34121-8_12)

- Lei, J., Syndergaard, S., Burns, A. G., Solomon, S. C., Wang, W., Zeng, Z. & Lin, C. H. (2007). Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: Preliminary results. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112 (A7). <https://doi.org/10.1029/2006JA012240>
- Liu, A., Wang, N., Li, Z., Wang, Z., & Yuan, H. (2019). Assessment of NeQuick and IRI-2016 models during different geomagnetic activities in global scale: Comparison with GPS-TEC, dSTEC, Jason-TEC and GIM. *Advances in Space Research*, 63 (12), 3978-3992. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.02.032>
- Orús-Perez, R. (2017). Ionospheric error contribution to GNSS single-frequency navigation at the 2014 solar maximum. *Journal of Geodesy*, 91 (4), 397-407. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0971-0>
- Pedatella, N. M., Yue, X. & Schreiner, W. S. (2015). An improved inversion for FORMOSAT-3/ COSMIC ionosphere electron density profiles. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120 (10), 8942-8953. <https://doi.org/10.1002/2015JA021704>
- Prol, F. S., de Oliveira Camargo, P., Hernandez-Pajares, M. & Muella, M. T. D. A. H. (2018). A new method for ionospheric tomography and its assessment by ionosonde electron density, GPS TEC, and single-frequency PPP. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(5), 2571-2582. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2874974>
- Schaer, S., Gurtner, W. & Feltens, J. (1998, February). *IONEX: The ionosphere map exchange format version 1*. Proceedings of the IGS AC workshop, Darmstadt, Germany (Vol. 9, No. 11).
- Syndergaard, S. (1999). *Retrieval analysis and methodologies in atmospheric limb sounding using the GNSS radio occultation technique* (Vol. 99). Danish Meteorological Institute.
- Takahashi, H., Wrasse, C. M., Denardini, C. M., Pádua, M. B., De Paula, E. R., Costa, S. M. A. & Sant'Anna, N. (2016). Ionospheric TEC weather map over South America. *Space Weather*, 14 (11), 937-949. <https://doi.org/10.1002/2016SW001474>