



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Avaliação e Comparação de Longo Prazo da Simulação Ionosférica do INPE com Modelos Ionosféricos e Dados Observacionais

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/INPE/CNPq)

Gabriel Sandim Falcão (Universidade Federal de Santa Maria, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: gsfalcao09@gmail.com

Adriano Petry (Tecnologista do INPE, Orientador)

E-mail: adriano.petry@inpe.br

Julho de 2018



SUMÁRIO

	Pág.
1. Lista de Ilustrações	3
2. Lista de Símbolos e Abreviaturas	4
3. Resumo.....	5
4. Introdução.....	6
5. Objetivos do Trabalho.....	8
6. Fundamentação Teórica	9
7. Materiais e Métodos Utilizados.....	14
8. Análises e Resultados	15
9. Conclusões.....	20
10. Referências Bibliográficas.....	21



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Pág.
Figura 1: Visualização das aproximações para medição de TEC	9
Figura 2: Parte de um arquivo IONEX da IGS.....	10
Figura 3: Mapas de TEC gerados pelo INPE (A), estações terrestres GNSS (B) e pela IGS (B).....	12
Figura 4: Cluster de Desenvolvimento	14
Figura 5: Cluster Operacional.....	14
Figura 6: Parte de um Arquivo IONEX do INPE	16
Figura 7: Mapa de VTEC gerado pelo SUPIM-DAVS.....	17
Figura 8: Mapa de TEC global do SUPIM-DAVS	19
Figura 9: Mapa de TEC global do IGS.....	19



LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

DAVS – Data Assimilation and Visualization System

eI/m² – Elétrons por Metro Quadrado

EMBRACE – Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial

GNSS – Sistema Global de Navegação de Satélites Global Navigation Satellite System

GPS – Global Positioning System

IGS – International GNSS Service

IONEX – Ionosphere Exchange

RINEX - Receiver Independent Exchange

RMSE – Root Mean Square Error

SIP – Solar Irradiance Platform

STEC – Slant Total Electron Content

SUPIM – Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model

TEC – Total Electron Content

VTEC – Vertical Total Electron Content



RESUMO

Neste projeto, foi continuado o processo de atualização e expansão da base de dados de previsões do comportamento da ionosfera e na incidência do conteúdo eletrônico total sobre a área da América do Sul. Além disso foi iniciado também o processo de comparação entre os dados previstos pelo modelo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, que utiliza como base o Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model, dados observacionais de estações do Global Navigation Satellite System e também as previsões do modelo utilizado pelo International GNSS Service. Essas previsões são feitas de maneiras distintas para que possamos visualizar o nível de intensidade do conteúdo total de elétrons sobre uma área determinada. Nosso modelo é considerado um modelo físico, pois realiza previsões da concentração eletrônica em vários pontos que depois são combinadas para que nosso sistema de visualização e assimilação de dados faça um somatório das várias concentrações chegando no conteúdo eletrônico total. Já o modelo do International GNSS Service gera previsões baseadas em dados observacionais, fazendo com que seja uma comparação interessante entre dois modelos diferentes. Embora ainda não se tenha os resultados completos, pretendemos obtê-los através de um estudo mais aprofundado ainda da linguagem R e a partir de uma base maior de dados de simulações globais, para que sejam possíveis comparações com mais dados, observando o erro médio quadrático ocorrido entre os dados comparados, obtendo assim resultados mais confiáveis devido a maior área coberta pelo nosso modelo.



1. Introdução

A previsão e análise do comportamento ionosférico é um importante aspecto no mundo científico hoje em dia, devido ao crescente número de satélites o que aumenta cada vez mais a quantidade de sinais que passam pela ionosfera e podem ser afetados por eventuais mudanças no clima espacial, sendo elas anômalas ou eventos previstos. Logo, as simulações feitas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem foco em prever um importante fator descritivo da ionosfera, a incidência do conteúdo total de elétrons sendo seu nome em inglês o mais utilizado, total electron content (TEC). Sua unidade sendo definida como $TECU=10^{16}el/m^2$ (B. Hofmann-Wellenhof; H. Lichtenegger & J. Collins (2001)). Há duas maneiras de se analisar a concentração de elétrons num determinado caminho, que faz com que se possam estimar dois tipos de TEC: Slant TEC (STEC) e Vertical TEC (VTEC), definidos como sendo o somatório da concentração de elétrons entre satélite/Global Positioning System (GPS) ao longo de um caminho inclinado e o somatório de elétrons ao longo de um caminho vertical, respectivamente. Sendo assim, o INPE desenvolveu uma versão melhorada do Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model (SUPIM), um modelo físico que prevê o comportamento ionosférico através de equações físicas e químicas sem nenhuma influência de dados observacionais. O SUPIM faz parte de um sistema maior, nomeado SUPIM-DAVS, que consegue gerar mapas contendo previsões de TEC através da interpolações dos dados gerados, ou seja, o SUPIM prevê a concentração de elétrons em vários pontos esparsos e quando finalizado, o Data Assimilation and Visualization System (DAVS) realiza um somatório das várias concentrações previstas para que seja calculado o TEC para as previsões do SUPIM, que também afetam o comportamento ionosférico, podendo com essas informações determinar os níveis incidentes de TEC sobre as coordenadas desejadas (Petty, A., et al. (2014)). Então, assim como o SUPIM, diferentes modelos e métodos para previsões e análises do



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

comportamento ionosférico existem, e para que sempre haja melhorias e/ou atualizações nos métodos utilizados, é interessante realizar a comparação entre os mesmos.



2. Objetivos do Trabalho

Foram definidos como objetivos específicos da pesquisa como sendo um levantamento e atualização da base de dados do INPE referentes às simulações ionosféricas, busca de arquivos nos formatos Ionosphere Exchange (IONEX) e Receiver Independent Exchange (RINEX) disponibilizados pela International GNSS Service (IGS) e também um estudo da linguagem R e do ambiente RStudio para que pudesse ser desenvolvido um sistema para comparação a longo prazo entre as simulações ionosféricas produzidas pelo INPE e dados e modelos disponibilizados pela IGS. Quando finalizado o processo de comparações, será avaliada a possível publicação de artigos, abordando os resultados do projeto.

3. Fundamentação Teórica

Anterior ao início do projeto em si, uma rápida introdução ao sistema operacional Ubuntu foi feita, que é utilizado por proporcionar, de maneira mais fácil, acesso e uma melhor manipulação de dados que outros sistemas operacionais não proporcionariam.

Para o início da pesquisa, foi necessário estudar e aprender como é configurado e como funciona o sistema. É importante entender o básico para que assim sejam obtidos resultados coerentes. Para isso, foi lido o que pode ser considerado um manual do sistema SUPIM-DAVS (Puntel et al. 2015), que esclarece como devem ser definidos os parâmetros do modelo para que as simulações sejam geradas corretamente. É essencial o entendimento de quais parâmetros serão usados em determinada simulação, já que eles determinam o resultado, como por exemplo, as coordenadas de latitude e longitude iniciais e finais para determinação da área simulada ou o dia acompanhado de mês e ano que se deseja obter. Além disso é preciso ter um certo entendimento de como o código do SUPIM funciona, para que se possa identificar onde possíveis problemas possam ter ocorrido.

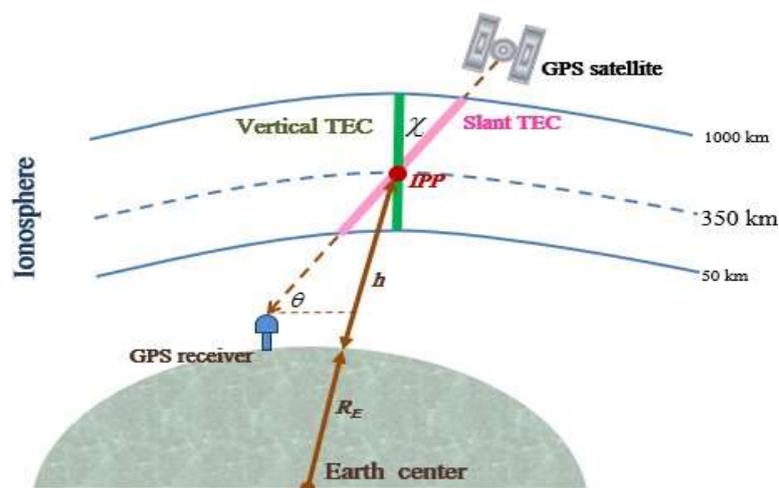


Figura 1: Visualização das aproximações para medição de TEC. Fonte: http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page_id=243

Um outro modelo que foi estudado além do SUPIM, foi o modelo IGS, que também produz mapas de TEC mas de uma maneira diferente à do modelo do INPE. O modelo IGS recolhe seus dados de estações do Global Navigation Satellite System (GNSS) espalhadas pelo globo, como ilustrado na figura 1. Esses dados passam por várias etapas até chegarem em seu estado final de mapas ionosféricos. Os dados observacionais inicialmente recolhidos das estações passam por centros de avaliação e análise para que possam ser combinados após aplicada uma média ponderada do TEC previsto entre os mapas fornecidos. Com os mapas obtidos, sua validação é feita através de comparação com o TEC obtido de sondas de dupla frequência localizadas em satélites orbitantes (Hernández-Pajares, et al. (2009)).

```

2017 7 27 0 0 0 EPOCH OF FIRST MAP
2017 7 28 0 0 0 EPOCH OF LAST MAP
3600 INTERVAL
25 # OF MAPS IN FILE
NONE MAPPING FUNCTION
10.0 ELEVATION CUTOFF
One-way carrier phase leveled to code OBSERVABLES USED
6371.0 BASE RADIUS
2 MAP DIMENSION
450.0 450.0 0.0 HGT1 / HGT2 / DHGT
87.5 -87.5 -2.5 LAT1 / LAT2 / DLAT
-180.0 180.0 5.0 LON1 / LON2 / DLON
-1 EXPONENT
TEC/RMS values in 0.1 TECU; 9999, if no value available COMMENT
1 END OF HEADER
2017 7 27 0 0 0 START OF TEC MAP
87.5-180.0 180.0 5.0 450.0 EPOCH OF CURRENT MAP
LAT/LON1/LON2/DLON/H
73 74 74 74 74 74 75 75 75 75 75 75 75 75 74
74 74 74 73 73 72 72 72 71 71 70 70 69 69 68 68
68 67 67 67 67 67 66 66 66 66 66 67 67 67 67 67
68 68 68 68 69 69 69 69 70 70 70 70 71 71 71 71
71 72 72 72 72 73 73 73 73 73 73 73 73 73 73 73
85.0-180.0 180.0 5.0 450.0 LAT/LON1/LON2/DLON/H
73 74 75 75 76 76 77 78 78 78 79 79 79 79 78
78 77 77 76 75 74 73 72 71 70 69 68 67 66 65 65
64 63 63 62 62 62 62 62 62 62 62 63 63 64 65 65
66 66 67 68 68 69 69 70 70 70 71 71 71 71 71 71
71 71 71 72 72 72 73 73 73

```

Figura 2: Parte de um arquivo IONEX da IGS. Fonte: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>

Outra importante distinção entre os mapas de TEC gerados pelo INPE e os da IGS são sua resolução. O nosso sistema gera mapas com intervalos de uma hora, começando à meia-noite, indo até as vinte e três horas e com uma resolução de 1° de variação para longitude e latitude. Já os mapas da IGS possuem um intervalo maior, duas horas e resolução de 2° e 5°

de variação para longitude e latitude respectivamente (Hernández-Pajares, et al. (2009)). É importante ressaltar que ambos os mapas estimam os valores para o VTEC para geração de mapas finais. A figura 2 mostra o início dos dados fornecidos pelo IGS na forma de arquivos IONEX.

Os arquivos no formato IONEX foram criados baseando-se em formatos mais antigos como o RINEX, estabelecendo um formato padrão atualizado, podendo gerar mapas em duas e/ou três dimensões, para comparações de mapas de TEC. Todo arquivo IONEX deve possuir um cabeçalho contendo as informações que serão expostas e parâmetros obrigatórios (Schaer et al. 2015), como data, altura, latitude e longitude, vistos como EPOCH, HGT, LAT e LON na figura 2.

Outro fator importante em relação ao modelo IGS é que seus mapas de TEC também são influenciados pela variação de fluxo solar, podendo ter inclusive alguns pontos em comum com essa variação (Hernández-Pajares, et al. (2009)).

A intenção do estudo desse modelo é justamente entendê-lo para compara-lo com o SUPIM, para que se possa ter uma noção de como um modelo físico que não utiliza diretamente dados observacionais se comporta em relação à um modelo que faz uso de dados obtidos de estações espalhadas pelo mundo. Na figura 3, podemos visualizar os diferentes resultados para as previsões de TEC para a América do Sul, primeiramente do modelo do INPE, com um mapa de maior resolução, e nos mapas de dados observacionais e do IGS com uma resolução menor. Podemos ver que o local de maior divergência entre os mapas está à nordeste e uma certa semelhança maior entre os mapas B e C pelo fato de que o IGS faz uso dos dados de estações para sua previsão.

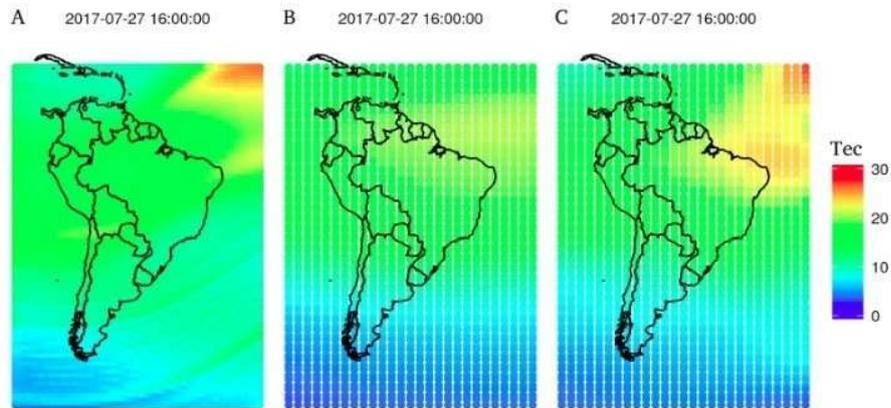


Figura 3: Mapas de TEC gerados pelo INPE (A), estações terrestres GNSS (B) e pela IGS (C)

Para a realização dessa comparação a linguagem R e o ambiente Rstudio foram escolhidos devido a sua boa capacidade para representação de dados e o fato de ser uma boa escolha para manipulação de dados estatísticos.

4. Materiais e Métodos Utilizados

Para a realização da pesquisa foram utilizados dois clusters do Centro Regional Sul de Pesquisa Espaciais do INPE, sendo um chamado de Desenvolvimento (Figura 4) e composto por 9 nós, utilizado para testar alterações, e outro chamado de Operacional (Figura 5) com 29 nós, que é utilizado para a implementação definitiva das alterações testadas e aprovadas. Um desktop também foi utilizado para acesso aos clusters através da rede interna do INPE.

As especificações de cada cluster são diferentes, no cluster de Desenvolvimento temos os processadores AMD Opteron 254, que possui um núcleo e o processador Intel Xeon E5-2609, com quatro núcleos, com uma memória total em torno de 850 gigabytes. Já no cluster Operacional além de alguns nós com os mesmos processadores do cluster de Desenvolvimento, os processadores Intel Xeon X5670, com seis núcleos e o Intel Xeon E5630, com quatro núcleos e com uma memória de aproximadamente dois terabytes. Atualmente não estamos atuando em capacidade máxima devido a alguns problemas técnicos em alguns nós que estamos tentando resolver.



Figura 4: Cluster de Desenvolvimento

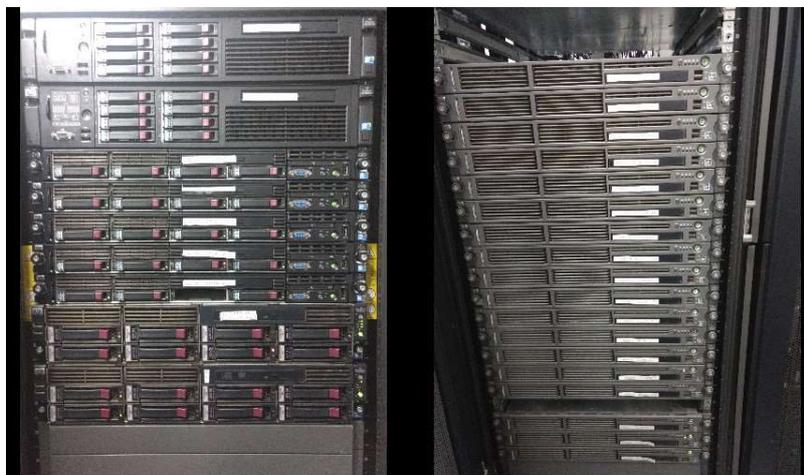


Figura 5: Cluster Operacional



5. Análises e Resultados

Inicialmente, foram resolvidos alguns problemas relacionados a alguns nós do cluster de desenvolvimento para que pudéssemos dar prosseguimento às simulações que estavam sendo feitas anteriormente. Resolvido isso, partimos para uma atualização da base de dados do INPE, já que havia muitos dias onde a simulação precisava ser feita ou refeita para que tivéssemos um período de tempo aceitável, e, até o presente dia, estamos tentando deixar a base de dados o mais completa possível, com mapas de TEC disponíveis para acesso. Até o início de 2018, estávamos gerando somente mapas com coordenadas limitadas ao território da América do Sul e então visando futuras publicações, foram feitas alterações diretas no sistema de simulação para que fossem aceitos números de ponto flutuante nos campos de coordenadas de latitude e longitude e assim conseguimos gerar mapas globais além de arquivos IONEX válidos para as nossas simulações. Na figura 6 podemos ver que o arquivo IONEX do INPE está dentro dos padrões exigidos para seja válida sua comparação com outros dados. Podemos ver claramente que o cabeçalho contém a versão e tipo e abaixo encontram-se a data (EPOCH), altura, latitude e longitude, além das dimensões do mapa.



```

1.0          IONEX          GPS          IONEX VERSION/TYPE
SUPIM-DAVS  CRS/INPE      18-jul-2018 13:25:22  PGM/RUN BY/DATE
South America ionospheric maps, day 199 of 2018  DESCRIPTION
Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model with  DESCRIPTION
Ionosonde and GPS data assimilation  DESCRIPTION
3600        INTERVAL
24          # OF MAPS IN FILE
NONE        MAPPING FUNCTION
0           ELEVATION CUTOFF
           OBSERVABLES
6771.0     BASE RADIUS
2           MAP DIMENSION
-65.0 20.0 1.0  LAT1/LAT2/DLAT
-90.0 -25.0 1.0  LON1/LON2/DLON
90.0 1000.0 10.0 HGT1/HGT2/DHGT
           END OF HEADER
1           START OF TEC MAP
2018 7 18 0 0 0  EPOCH OF CURRENT MAP
-65.0 -90.0 -25.0 01.0 400.0  LAT/LON1/LON2/DLON/H
1.7 1.7 1.7 1.7 1.7 1.7 1.8 1.7 1.8 1.8 1.8 1.8 1.9 2.0 2.0 2.1
2.1 2.1 2.1 2.2 2.2 2.2 2.2 2.1 2.0 1.9 1.8 1.7 1.7 1.7 1.7 1.7
1.7 1.7 1.7 1.9 2.1 2.0 2.0 1.9 1.9 1.7 1.7 1.6 1.6 1.6 1.6 1.5
1.4 1.4 1.4 1.4 1.3 1.2 1.0 1.0 1.0 1.0 1.1 1.2 1.2 1.3 1.3 1.3
1.3 1.3
-64.0 -90.0 -25.0 01.0 400.0  LAT/LON1/LON2/DLON/H
2.2 2.2 2.3 2.3 2.3 2.3 2.3 2.4 2.5 2.5 2.6 2.7 2.7 2.8 2.8 2.9
2.8 2.8 2.8 2.7 2.6 2.5 2.4 2.2 2.0 1.9 1.7 1.6 1.6 1.6 1.6 1.7
1.7 1.7 1.8 1.9 2.0 2.0 2.1 2.1 2.0 1.9 1.8 1.7 1.7 1.6 1.5 1.4
1.4 1.4 1.5 1.5 1.4 1.2 1.1 1.0 0.9 1.0 1.0 1.2 1.2 1.3 1.2 1.2
1.2 1.2

```

Figura 6: Arquivo IONEX do INPE Fonte: Base de dados do INPE

Outra alteração realizada no modelo SUPIM foi na verificação dos seus arquivos de saída para a continuação das simulações. Esses arquivos de texto informam se a rodada do SUPIM conseguiu convergir para uma altitude, gerando uma saída válida para a continuação da simulação. Os arquivos de saída geralmente são compostos somente pelas palavras Normal End, insinuando sua convergência, logo, a verificação era feita de acordo com o tamanho de cada arquivo, que seria de 11 bytes (número de letras de Normal End mais os espaços) caso fosse sucedido, mas como isso começou a nos causar alguns problemas com alguns arquivos contendo mais do que 11 bytes devido as várias tentativas do SUPIM, adicionamos uma verificação de string, fazendo com que um arquivo de texto de saída que possuísse um Normal End, independente do seu tamanho, seja aceito.

Na figura 7, vemos um mapa de TEC produzido pelo INPE recentemente em maior escala do que mostrado anteriormente na figura 3, esses mapas encontram-se disponíveis para visualização no site do EMBRACE e são atualizados diariamente.

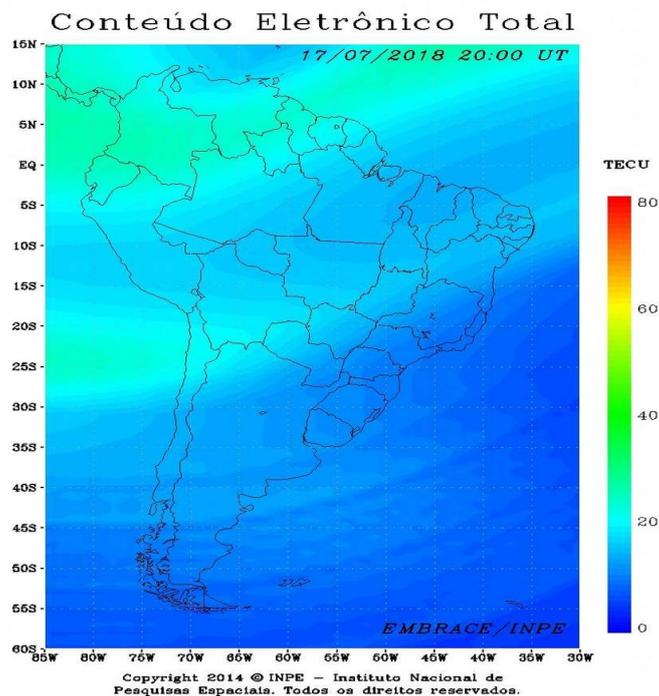


Figura 7: Mapa de TEC gerado pelo SUPIM-DAVS.

Após o estabelecimento de uma base de dados razoável, foi definida quantidade de dados utilizados nas comparações com outros modelos e dados observacionais como sendo de um ano e oito meses, começando em 1º de Janeiro de 2016 até 31 de Agosto de 2017, com a área delimitada sendo o continente da América do Sul, como visto na figura 7. As comparações entre dados de TEC oriundos de modelos diferentes ou de dados observacionais são feitas aplicando o Root Mean Squared Error (RMSE) entre as diferentes

previsões de TEC obtidas, demonstrando o quanto de erro cada previsão comete em relação ao dado observacional, como mostrado a seguir:.

$$\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (ref_i - x_i)^2}$$

Como as previsões são feitas de formas distintas, podemos achar algumas explicações para diferentes níveis de erro que tenham ocorrido. Assim, caso algum evento que cause uma alteração considerável no comportamento na ionosfera aconteça, o dado final será diferente do dado previsto pelo nosso sistema. Além disso, como o modelo da IGS é baseado em dados observacionais obtidos de estações GNSS espalhadas pelo globo, algum local que não tenha tanta cobertura, principalmente no oceano, faz com que a previsão de TEC para esses locais seja pessimista e prejudicada (Hernández-Pajares, et al. (2009)). Enfim, esses são alguns dos fatores que podem ter influência na quantidade de erro nas previsões, podendo causar picos inesperados, uma previsão muito divergente do que se é esperado.

Atualmente, estamos expandindo nossa base de dados com previsões globais de TEC, partindo do ano de 2016 até os dias atuais, utilizando os clusters o máximo de tempo possível. Logo, as simulações não ficarão limitadas somente à América do Sul. Com a cobertura global, pretendemos ter um escopo ainda maior de comparações a fazer, já que o modelo IGS, por exemplo, poderá ter mais dados de estações na Europa do que na América do Sul, podendo performar melhor em previsões no continente europeu, melhorando a qualidade de comparação com o nosso modelo. No entanto ainda estamos encaminhando os resultados finais para as comparações somente englobando a América do Sul e quando estivermos com uma base de dados globais maior, começaremos outra série de comparações, analisando o desempenho do nosso sistema com alcance global. Analisando os nossos resultados, planejamos futuramente a publicação de artigos demonstrando e

discutindo os dados, produzindo uma discussão interessante visualizando o desempenho dos modelos num mesmo gráfico. Abaixo, as figuras 8 e 9 apresentam previsões globais de TEC para dias diferentes feitas pelo INPE e pelo IGS respectivamente.

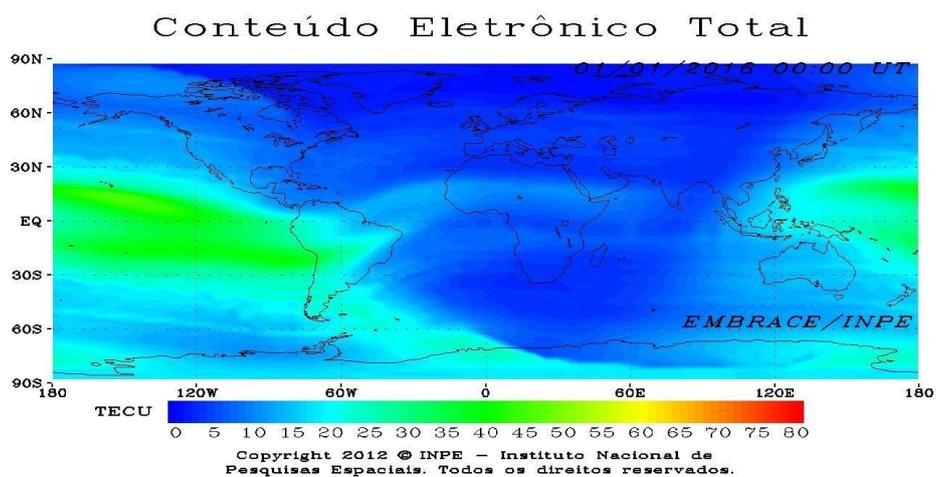


Figura 8: Mapa de TEC global do SUPIM-DAVS. Fonte: base de dados INPE

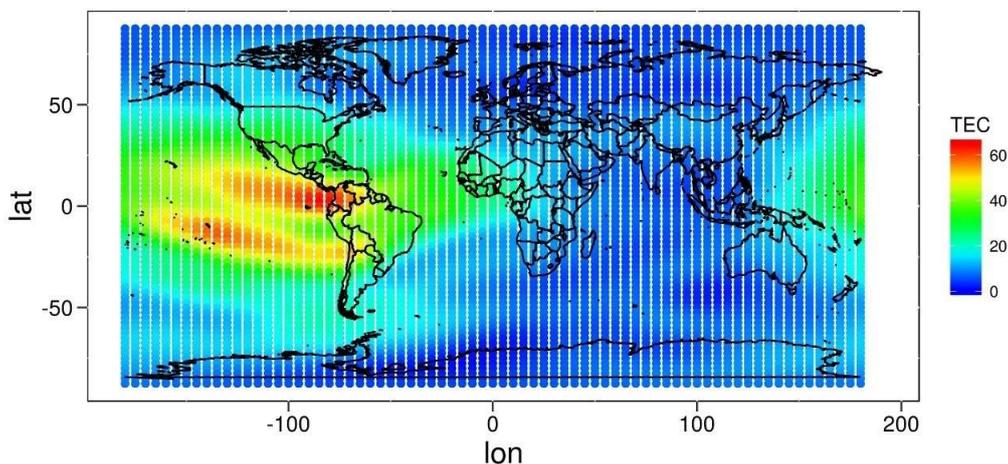


Figura 9: Mapa de TEC global do IGS



6. Conclusões

A previsão do Clima Espacial vem se tornando cada vez mais importante ao longo do tempo, devido ao crescente aumento de satélites e outros objetos, inclusive missões espaciais, lançados para o espaço. Logo, prever o comportamento da ionosfera, uma camada da atmosfera de extrema importância, acaba sendo imprescindível para o avanço dessa área podendo descobrir fontes de erro e justificando possíveis alterações nas transmissões recebidas por GPS localizados na Terra e isso sendo possível através da análise de incidência de TEC. Nosso projeto, inicialmente com previsões e comparações somente para a América do Sul e agora com previsões globais, tem sua margem para crescimento, e a comparação dos resultados do modelo usado pelo INPE com outros modelos e dados observacionais é relevante, podendo causar discussões referentes a quais métodos de previsões são os mais confiáveis, incitando a atualização dos modelos atuais e para que previsões cada vez mais precisas sejam feitas.

7. Referências Bibliográficas

PETRY, A.; SOUZA, J. R.; VELHO, H. F. C.; PEREIRA, A. G.; BAILEY, G. J. First results of operational ionospheric dynamics prediction for the Brazilian Space Weather program. *Advances in Space Research*, v. 54, n. 1, p. 22-36, 2014. DOI:<10.1016/j.asr.2014.03.017>. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.03.017>>.

Hernández-Pajares, et al. (2009). The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *J Geod* (2009) 83:263-275, DOI:<10.1007/s00190-008-0266-1>

B. Hofmann-Wellenhof; H. Lichtenegger & J. Collins (2001). *Global Positioning System: Theory and Practice*. New York: Springer-Verlag.

PUNTEL, F. E.; PETRY, A.; SOUZA, J. R.; CAMPOS VELHO, H. F. Sistema para previsão operacional da dinâmica da ionosfera baseado no Modelo SUPIM v2. São José dos Campos: INPE, 2015. 34 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3HFHJTB>. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/11.27.16.27-MAN). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3HFHJTB>>.

Schaer, S., Gurtner, W., Feltens, J., 2015. IONEX: The IONosphere map eXchange format version 1.1. In: Dow J.W., (Ed.), *Proceeding of the IGS AC Workshop*, Darmstadt, Germany, September 17, pp. 233–247.