

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

BERNARDO ALFREDO SCHEFFLER

**INTERFERÊNCIAS DO LANÇAMENTO DE FOGUETES NA QUALIDADE DE
DADOS GNSS PROCESSADOS POR PPP**

Itaqui

2018

BERNARDO ALFREDO SCHEFFLER

**INTERFERÊNCIAS DO LANÇAMENTO DE FOGUETES NA QUALIDADE DE
DADOS GNSS PROCESSADOS POR PPP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Cartógrafo e Agrimensor.

Orientador: Me. Marcelo Jorge de Oliveira

Itaqui

2018

BERNARDO ALFREDO SCHEFFLER

INTERFERÊNCIAS DO LANCAMENTO DE FOGUETES NA QUALIDADE DE
DADOS GNSS PROCESSADOS POR PPP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Cartográfica e de
Agrimensura da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para obtenção do
Título de Engenheiro Cartógrafo e Agrimensor.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 30, novembro de 2018.

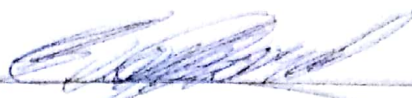
Banca examinadora:



Prof. Me. Marcelo Jorge de Oliveira.

Orientador

UNIPAMPA



Prof. Me. Leonard Niero da Silveira.

UNIPAMPA



Prof. Me. Robert Martins da Silva.

UNIPAMPA

A317i Alfredo Scheffler, Bernardo
INTERFERÊNCIAS DO LANÇAMENTO DE FOGUETES NA QUALIDADE DE
DADOS GNSS PROCESSADOS POR PPP / Bernardo Alfredo Scheffler.
30 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA,
2018.

"Orientação: Marcelo Jorge de Oliveira".

1. Interferências GNSS. 2. ionosfera. 3. Lançamento de
Foguetes. I. Título.

Dedico este trabalho aos meu pais, Alfredo e Ivete, pelo incentivo para alcançar meus objetivos.

“Excelsior! ”.

Stanley Martin Lieber

RESUMO

O uso de receptores GNSS tem se tornado cada vez mais cotidiano para os seres humanos, essa ferramenta só é possível devido a uma estrutura tecnológica global. A obtenção dessas informações de posicionamento pode sofrer interferências em todo o caminho desde sua transmissão no espaço até a recepção na superfície da Terra. Interferências na propagação das ondas GNSS acontecem na atmosfera, e durante os lançamentos de foguetes essas interferências são mais significativas. O lançamento de foguetes também tem se tornado um fenômeno cada vez mais comum, desde a criação de foguetes reutilizáveis, tornando-os um fenômeno cotidiano em alguns locais do planeta. Este trabalho teve por finalidade averiguar as interferências na qualidade de dados GNSS processados por PPP, causadas pelo foguete Falcon Heavy no seu lançamento no dia 06/02/2018, verificando-se interferências que levaram a uma diferença na precisão posicional absoluta de até $\sim 0,46\text{m}$.

Palavras chave: Falcon, Distúrbios ionosféricos, Posicionamento.

ABSTRACT

The use of GNSS have become a part of the daily life for the humans, this tool is only possible due to a global technological structure. The gathering of these positioning data can suffer interference along the way from its transmitter on space to the receiver on land. Interferences on the GNSS wave propagation happens on the atmosphere, and during the rocket launches these interferences are more significant. The rocket launches is becoming a normal phenomenon in some parts of the Earth. This thesis has the go to determine the interferences on the quality of GNSS data processed by PPP, caused by the Falcon Heavy launch on 06/02/2018, verifying interferences that caused differences on the position absolute precision as big as $\sim 0,46\text{m}$.

Keywords: Falcon, Ionospheric disturbances, Positioning.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COCONet - Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network

CORS - Continuously Operating Reference Stations

DCB - Differential Code Biases

ESA – European Space Agency

GALILEO - European Satellite Navigation System

GLONASS - Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya Sistema

GMT - Greenwich Mean Time

GNSS - Global Navigation Satellite System

GPS - Global Positioning System

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPP - Ionosphere Piercing Point

IRNSS - India, India's Regional Navigation Satellite System

NASA – National Aeronautics and Space Administration

ONU – United Nations

PPP - Posicionamento por Ponto Preciso

QZSS - Quasi-Zenith Satellite System

RINEX - Receiver Independent Exchange Format

SAW - Shock Acoustic Waves

STEC – Slant Total Electron Content

TEC – Total Electron Content

VTEC – Vertical Total Electron Content

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 JUSTIFICATIVA	13
3 OBJETIVOS	13
3.1 Objetivo geral	13
3.2 Objetivos Específicos	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1 Análise do Conteúdo total de Elétrons com GNSS	15
4.2 Posicionamento por Ponto Preciso	16
4.3 Lançamento do Foguete Falcon Heavy	17
5. DESENVOLVIMENTO	19
5.1 Materiais	19
5.2 Métodos	19
6. RESULTADOS	21
6. CONCLUSÕES	27

1 INTRODUÇÃO

Geodésia é a ciência que tem por objetivo determinar a forma e as dimensões da Terra, bem como os parâmetros definidores de seu campo da gravidade e suas variações temporais (GEMAEL, 1999, p. 19). O termo Geodésia também é utilizado para designar a medição e o cálculo acima de uma superfície curva, análoga à superfície curva da Terra.

Com a tecnologia *Global Navigation Satellite System* (GNSS) entrando em operação em meados do século XX, houve uma revolução no que diz respeito a coleta de dados para posicionamento global, visto que até então a determinação de coordenadas se dava a partir de observações astronômicas.

Com o surgimento dos métodos de posicionamento por satélite, se tornou possível a obtenção direta de coordenadas tridimensionais (x, y, z), sendo este sistema de coordenadas tridimensionais pode ser matematicamente transformado em latitude, longitude e altura elipsoidal (TORGE, 1991, p. 213).

Atualmente os receptores GNSS são a principal ferramenta de posicionamento para obras de engenharia, devido a sua facilidade e pela certeza dos resultados obtidos.

O sistema GNSS, inclui constelações de satélites que orbitam a Terra e transmitem sua localização no espaço ao decorrer do tempo, para estações de controle em solo, e para receptores que calculam sua posição na superfície da Terra por trilateração. O sistema GNSS tem um papel significativo em todas as formas de transporte, telecomunicação, mapeamento, agricultura, e pesquisa científica, dentre muitas outras atividades vitais para a sociedade.

Atualmente o sistema GNSS inclui dois sistemas globais completamente funcionais, o *Global Positioning System* (GPS), pertencente aos Estados Unidos da América, e o *Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema* (GLONASS) pertencente a Federação Russa. Também, encontram-se em desenvolvimento os sistemas globais da Europa, *European Satellite Navigation System* (GALILEO), e o Chinês COMPASS/Bei-Dou, e os sistemas regionais geoestacionários da Índia, *India's Regional Navigation Satellite System* (IRNSS), e do Japão *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS). Assim que todos esses sistemas estiverem operacionais, os usuários terão acesso aos sinais de mais de 100 satélites global e regionalmente, Organização das Nações Unidas (ONU), (2012).

A possibilidade de receber ondas de rádio fora do horizonte observável é conhecida desde os primeiros estudos em radiocomunicação. Recepção de distâncias muito longas ao

redor do mundo, incluindo ecos, são observadas a muito tempo, desde que sua força de emissão seja alta o suficiente.

Com o advento de satélites artificiais, evidenciou-se a propagação de sinais de rádio em grandes distâncias ao redor do mundo, mesmo com poder de emissão relativamente baixo, Carrara et al. (1970).

A comunicação entre satélites é feita por ondas de rádio, tornando os satélites, estações de repetição de ondas de rádio no espaço. Os satélites recebem as ondas de rádio transmitidas pelas estações de controle no solo, e amplificam esses sinais para retransmitir para o solo. Isso é vantajoso, devido as grandes altitudes que se encontram os satélites, que permitem que cada um cubram grandes distâncias no terreno, (ONU, 2003).

De acordo com Camargo (1999), a atmosfera terrestre é basicamente uma camada concêntrica de gases, com origem ao redor da Terra, esses gases funcionam como o meio de propagação de ondas eletromagnéticas.

As camadas inferiores (Troposfera) até 50 Km, funcionam como uma zona neutra e a propagação dos sinais depende da pressão, temperatura e quantidade de vapor de água na atmosfera.

As camadas superiores (Ionosfera) de 50 Km até 1000 Km, são formadas por partículas carregadas (ionizadas), dependendo da frequência do sinal para sua propagação. A maior fonte de erro no posicionamento com GNSS se dá devido à refração ionosférica.

Variações na densidade de elétrons da ionosfera (TEC) podem ser provocadas por *Shock Acoustic Waves* (SAW), que resultam de eventos com grande liberação de energia, como terremotos e lançamentos de foguetes, (Afraimovich et al., 2000).

O Presente trabalho teve o objetivo de avaliar possíveis interferências causadas pelo lançamento de foguetes na qualidade de pontos processados pelo serviço de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).

2 JUSTIFICATIVA

Vislumbrando a possibilidade de que em um futuro próximo viagens espaciais se tornem um fenômeno normal no cotidiano dos seres humanos. Se torna necessário analisar os possíveis distúrbios causados pelo lançamento de foguetes em altas altitudes, e como esses distúrbios antropogênicos na atmosfera podem afetar a recepção de dados GNSS para fins de Posicionamento por Ponto Preciso.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Verificar a Ocorrência de erros resultantes do lançamento de foguetes no Posicionamento por Ponto Preciso de dados GNSS.

3.2 Objetivos Específicos

Verificar a amplitude dos erros causados na recepção de dados GNSS pelas interferências atmosféricas do lançamento do foguete Falcon no dia 06/02/2018.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

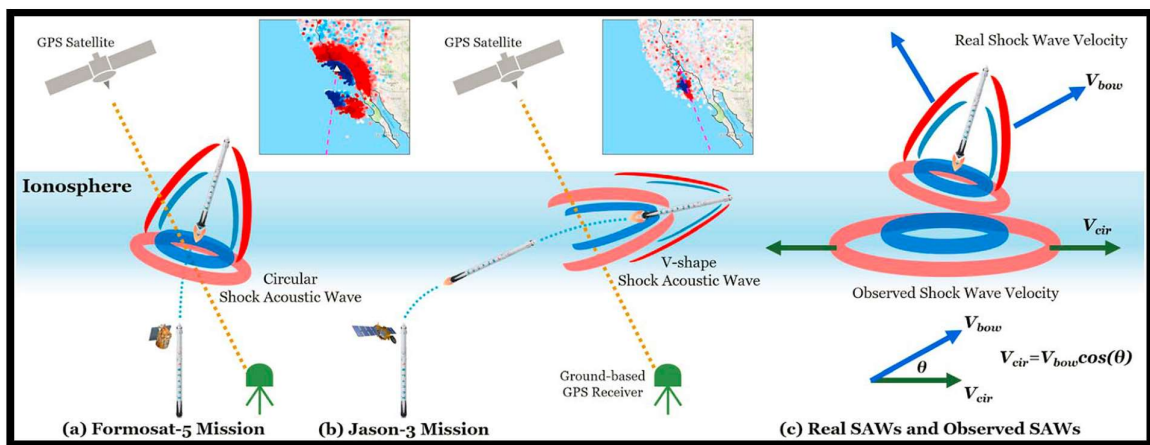
De acordo com Afraimovich et al. (2000), SAW causadas por explosões, abalos sísmicos e lançamento de foguetes podem afetar a densidade de elétrons na ionosfera, e estas variações podem ser identificadas localmente por interferências na recepção de dados GNSS.

A exaustão do Ônibus Espacial Columbia durante sua ascensão foi uma grande fonte de energia e causou perturbações acústicas na atmosfera. Devido ao acoplamento entre partículas neutras e elétrons na ionosfera, mesmo perturbações de baixa frequência induzem a variações na densidade de elétrons da atmosfera, Calais e Minster (1996).

Kakinami et al. (2013), identificou distúrbios ionosféricos produzidos por um foguete lançado da Coreia do Norte, através de dados de redes de monitoramento contínuo GNSS, com as bandas L1 ($f = 1575,42$ MHz) e L2 ($f = 1227,60$ MHz), com dados a cada 30 segundos.

Usualmente, o lançamento de foguetes produzia na ionosfera ondas com formato de “V” devido ao seu ângulo de entrada na atmosfera, causando SAW facilmente absorvidas. Com os avanços tecnológicos que possibilitaram os Foguetes Reutilizáveis Falcon 9 com alta capacidade e flexibilidade de lançamento Bjelde (2018), também se iniciou um novo método de saída da atmosfera, perpendicular às suas camadas, gerando ondas circulares, mais difíceis de se dispersarem, Figura 1.

Figura 1. Comparação de um distúrbio ionosférico em formato de V, e a SAW circular gerada pelos lançamentos do Falcon 9.



Fonte: (Chou et al. 2018).

A SAW circular gerada pelo foguete Falcon em 24/08/2017, teve início aproximadamente 5 minutos após o lançamento, e se estendeu por um diâmetro de aproximadamente 1500 km, e gerando posteriormente um buraco no plasma ionosférico com diâmetro de aproximadamente 900 km, com 10% a 70% de redução no *Total Electron Content* (TEC).

A SAW circular pode não ter causado erros de navegação e posicionamento da rede GNSS, mas o posterior buraco no plasma ionosférico pode ter levado a erros de até ~1m, Chou et al. (2018).

4.1 Análise do Conteúdo total de Elétrons com GNSS

O Conteúdo Total de Elétrons, ou TEC, é um indicativo crítico das propriedades físicas da ionosfera. Nas últimas décadas, medições GNSS se tornaram a principal fonte de dados para os cálculos de TEC sobre grandes porções da Terra, devido a abundância de dados e a possibilidade de produzir-se mapas quase em tempo real, e com alta resolução espacial, Chen et al. (2015).

De acordo com o Observatório Real da Bélgica, as ondas eletromagnéticas são perturbadas quando viajam pela ionosfera, que às dispersa. A refração ionosférica depende da frequência do sinal que a atravessa. O índice de refração da fase ionosférica, é dado por:

$$n_{Iono} = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (1)$$

$$c_2 = -40,3 Ne \quad (2)$$

Onde Ne é o número de elétrons livres na ionosfera, e f , são as frequências GNSS.

O TEC inclinado, ou STEC, é definido como a soma de Ne ao longo do caminho do sinal, s_0 é a distância entre o receptor GNSS e o satélite:

$$STEC = \int Ne \, d_{s_0} \quad (3)$$

Para estimar o STEC, se faz uso da geometria entre P_4 e Φ_4 :

$$P_4 = P_1 - P_2 = -0,647 + c(\Delta b^{sat} - \Delta b_{rec}) \quad (4)$$

$$\Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_2 = +0,0647 I + B_4 \quad (5)$$

Onde P_4 é o código e Φ_4 a fase observável. c é a velocidade da luz no vácuo. Δb^{sat} e Δb_{rec} são o atraso diferencial da frequência entre o satélite e o receptor, chamado de *Differential Code Biases* (DCB). B_4 é o parâmetro de ambiguidade da fase. I é a refração ionosférica, que pode ser relacionada com o STEC.

$$I_K = 1,2 = -\frac{40,3}{f_{1,2}^2} STEC \quad (6)$$

Pode-se estimar o valor para o TEC vertical (VTEC) com base nos valores de STEC. O valor VTEC é calculado para cada *Ionosphere Piercing Point* (IPP), com a função MF_1 :

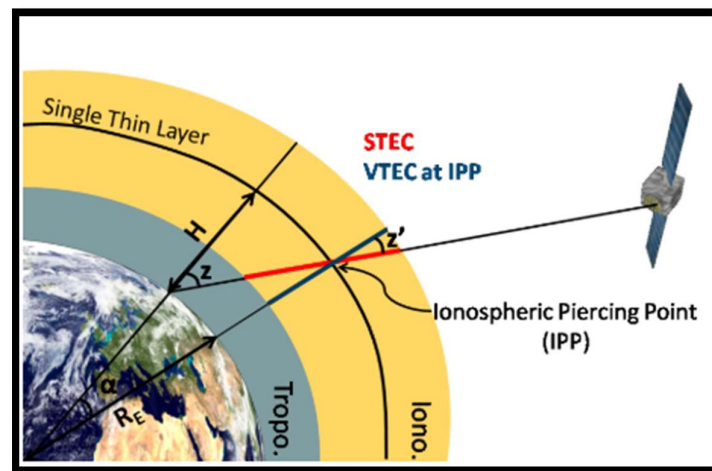
$$MF_1(z) = \frac{STEC}{VTEC} = \frac{1}{\cos z'} \quad (7)$$

$$\sin z' = \frac{RE}{RE+H} \sin(z) \quad (8)$$

Sendo RE o raio do centro da Terra até a parte exterior da ionosfera. H a altitude até a superfície de representação da ionosfera. z' o ângulo de entrada do sinal do satélite na atmosfera. E z o ângulo de chegada do sinal do satélite no solo.

Conforme pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2. Comparação entre STEC e VTEC no IPP



Fonte: Observatório Real da Bélgica, Grupo de pesquisas em GNSS, 2014.

4.2 Posicionamento por Ponto Preciso

O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), é um método de posicionamento, que usa dados da rede GNSS. O PPP requer a disponibilidade de dados precisos das orbitas e do relógio dos satélites. A combinação dos dados dos satélites e receptores de duas frequências (L1 e L2), consegue resultar em soluções com nível centimétrico, e máxima acurácia após 24 horas em modo estático, IBGE (2017).

De acordo com ESA, apud Samper (2011), o PPP é valido para todos os locais do Planeta, e as soluções raramente são afetadas por falhas individuais de referência, devido ao grande número de estações de referência, resultando em uma grande redundância de dados.

O PPP tem a vantagem de utilizar apenas um receptor GNSS, mas também, há a necessidade de um longo tempo de coleta de dados GNSS para se ter bons resultados.

O PPP funciona da seguinte maneira:

$$l_p = \rho + c(b_{Rx} - b_{Sat}) + Tr + \varepsilon_p \quad (9)$$

$$l_\phi = \rho + c(b_{Rx} - b_{Sat}) + Tr + N\lambda + \varepsilon_\phi \quad (10)$$

Sendo l_p a combinação das pseudodistâncias de L1 e L2, l_ϕ a combinação das fases das portadoras, mesmos dados utilizados na equação (4). b_{Rx} é a diferença do relógio do receptor para a referência GPS e b_{Sat} a diferença do relógio do satélite com a referência GPS. c é a velocidade da luz no vácuo. Tr é o atraso do sinal devido a Troposfera. λ é a combinação do comprimento de onda da portadora, e N é a ambiguidade portadora-fase. ε_p e ε_ϕ são os ruídos, multicaminhamentos e outras interferências.

ρ é a distância geométrica entre o satélite e o receptor, calculado através de suas coordenadas x, y, z, conforme a equação 11.

$$\rho = \sqrt{(x_{Sat} - x_{Rx})^2 + (y_{Sat} - y_{Rx})^2 + (z_{Sat} - z_{Rx})^2} \quad (11)$$

Existem variados serviços online de PPP, onde se submete os arquivos de observação RINEX, os dados são processados e retornados ao usuário, como o IBGE-PPP.

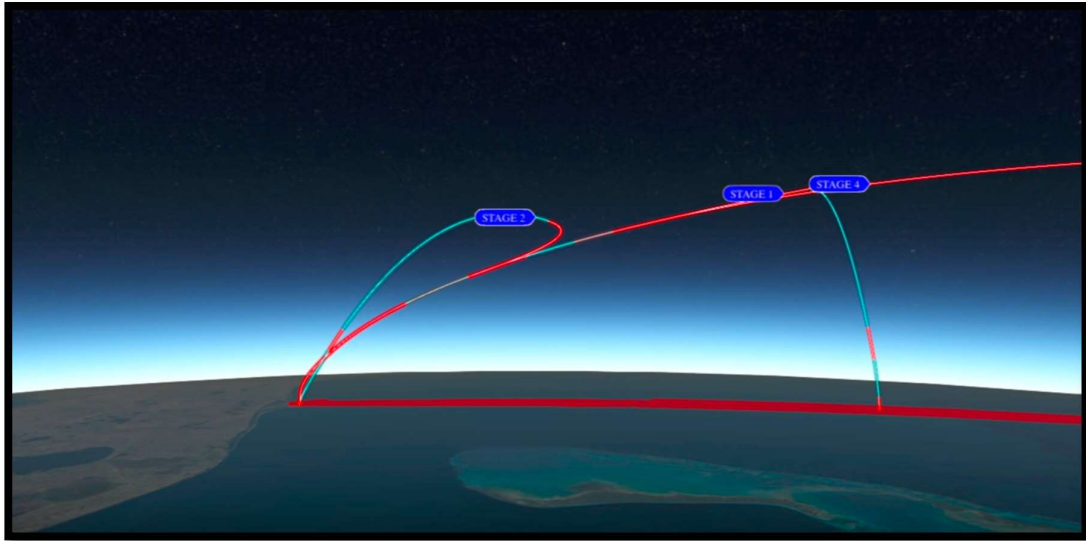
4.3 Lançamento do Foguete Falcon Heavy

O Foguete foi lançado do *Kenedy Space Center* da NASA as 20:45 GMT em direção a Leste, gerando 22,25 milhões de Newtons de força. Com os propulsores laterais retornando a Base de Cabo Canaveral, e a carga indo em direção a Marte.

O lançamento teve duração total de 28 minutos e 52 segundos. Após o início do momento de maior estresse mecânico se deu a +1 min e 52s, os propulsores laterais de

desacoplaram em + 2min e 29s, iniciando o retornando ao solo em +2 min 50s. +3min 4s se desliga o Estagio 3, com início do retorno em +3min 24s. Em aproximadamente +6min 40s reinicia a reentrada dos estágios 2 e 3, com pousos respectivos em +7min 58s e +8min 19s. SpaceX (2018), conforme Figura 3 e 4.

Figura 3. Descrição do movimento do Foguete.



Fonte: Murphy, 2018.

Figura 4. Descrição do movimento do Foguete.



Fonte: Murphy, 2018.

5. DESENVOLVIMENTO

5.1 Materiais

- PPP IBGE;
- Receptores GNSS (COORS, COCONet);
- *Software* Teqc;
- *Software* QGIS.

5.2 Métodos

Foram utilizados os dados disponíveis das estações das Redes de Monitoramento GNSS *Continuously Operating Reference Stations* (CORS) e *Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network* (COCONet) do dia 06/02/2018, totalizando 15 pontos distribuídos pela costa leste da Florida e pelas ilhas ao norte do Caribe, na data do lançamento do foguete Falcon Heavy em Cabo Canaveral.

Os dados adquiridos em formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX), foram importados ao *software* Teqc (uma ferramenta livre para o processamento de dados RINEX), e dividido em parcelas de 15 minutos, iniciando-se em 20:30 *Greenwich Mean Time* (GMT), até 21:45 GMT.

Para a divisão do arquivo RINEX utilizou-se das seguintes linhas de comando no diretório Teqc

```
teqc +st 180206hhmmss.0000 +dh 0.25 "nome_do_arquivo_original.18o"  
>Nome_do_arquivo_de_saida.o
```

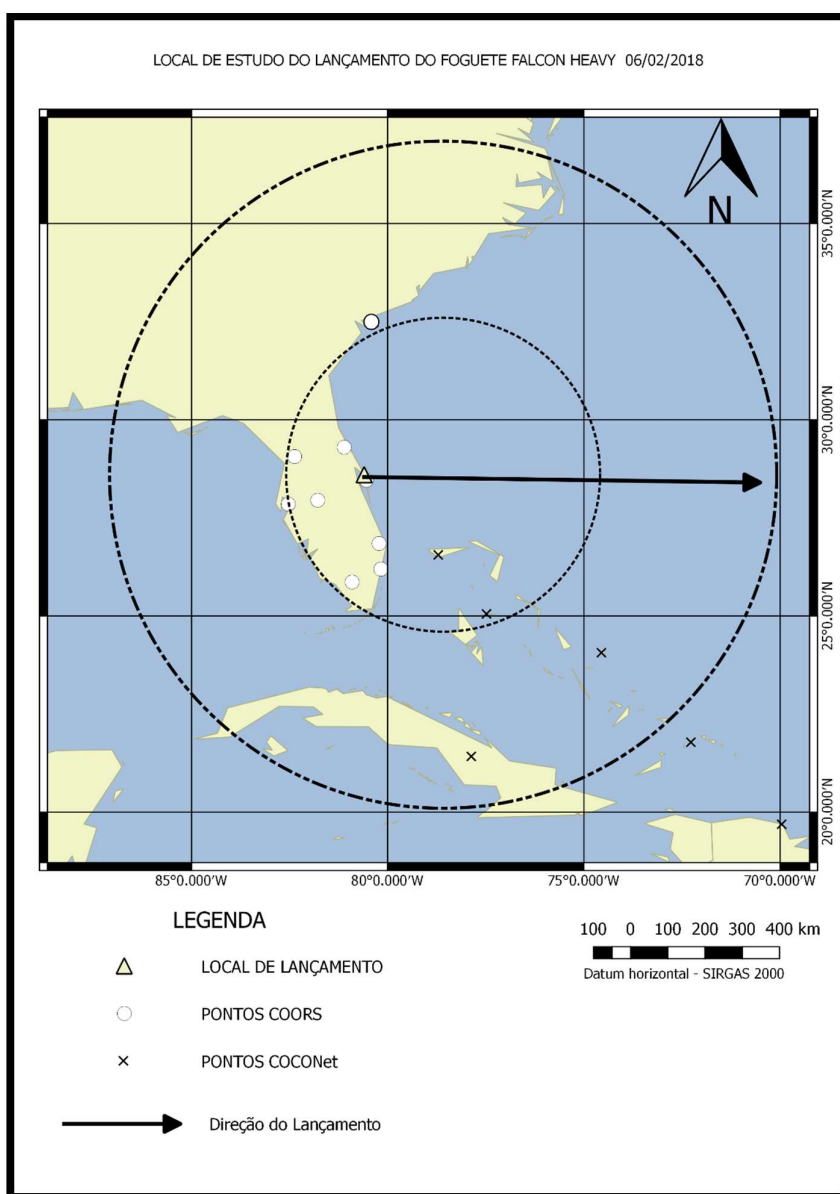
Sendo *teqc* a inicialização do programa, *+st* o comando de iniciar a janela de tempo com *ano-mês-dia-hora-minuto-segundo.decimosdesegundo*, *+dh* o comando para quanto tempo se estenderá a janela de tempo, o “*nome no arquivo*” seguido de *>* e o arquivo de saída. Sendo os arquivos de entrada e saída em formato RINEX.

Posteriormente os arquivos RINEX foram processados pelo método IBGE-PPP, um serviço online e gratuito do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, com dados de orbitas finais.

Os dados processados por PPP foram interpolados com o método do inverso do quadrado da distância, e foram criados os mapas temáticos no *software* QGIS.

Foram coletados os dados de acordo com a disponibilidade do dia e em função da área de abrangência da SAW e do posterior buraco na ionosfera, conforme Figura 5.

Figura 5. Área de estudo



Fonte: Scheffler, 2018.

6. RESULTADOS

O serviço IBGE-PPP processou os arquivos das observações GNSS em formato RINEX, com a combinação de L1 e L2 (L3) e utilizando dados de órbitas finais dos satélites. Retornando os valores de latitude e longitude, bem como os seus desvios padrões em metros.

Com o desvio padrão da latitude e longitude, pode-se estimar a precisão posicional absoluta com a raiz da soma dos quadrados do desvio padrão da latitude e longitude.

Os dados obtidos podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1. Variação temporal da Precisão Posicional Absoluta (m), do Posicionamento por Ponto Preciso, de 20:30 a 21:45 GMT, do dia 06/02/2018.

Dados dos Pontos (g° m" s') SIRGAS			Precisão Posicional Absoluta (m)				
Nome do ponto	Latitude	Longitude	Prévio ao Lançamento	Durante o Lançamento		Após o Lançamento	
			20:30 - 20:45 GMT	20:45 - 21:00 GMT	21:00 - 21:15 GMT	21:15 - 21:30 GMT	21:30 - 21:45 GMT
ccv6	28 27 35.82737	-80 32 43.70257	0.65	0.69	0.95	1.09	0.94
mtnt	25 51 56.76076	-80 54 25.18639	0.63	0.66	0.82	1.04	0.90
ornd	29 17 53.46945	-81 06 32.01312	0.65	0.73	1.06	1.11	1.00
laud	26 11 46.34157	-80 10 23.01430	0.63	0.68	0.81	1.08	0.92
pbch	26 50 46.63807	-80 13 09.29990	0.63	0.67	0.83	1.04	0.90
brtw	27 56 58.64215	-81 46 58.20069	0.65	0.70	0.93	1.10	1.00
mde6	27 50 59.33773	-82 31 57.32001	0.66	0.74	1.02	1.11	1.03
dunn	29 03 43.74382	-82 22 15.33110	0.87	1.04	1.10	1.48	1.11
cn13	24 03 54.68400	-74 32 1.61520	0.41	0.42	0.48	0.59	0.54
cn15	26 33 23.97960	-78 41 35.09520	0.45	0.48	0.62	0.76	0.64
cn16	21 25 20.28000	-77 50 59.15400	0.54	0.47	0.49	0.60	0.61
cn27	19 40 1.68960	-69 56 23.30880	0.36	0.37	0.37	0.39	0.41
cn53	21 46 57.56880	-72 15 13.92480	0.38	0.39	0.41	0.47	0.47
nas0	25 03 9.21240	-77 27 44.12160	0.45	0.47	0.58	0.71	0.77
sceb	32 28 58.75588	-80 19 55.90438	0.66	0.75	1.06	1.13	1.11

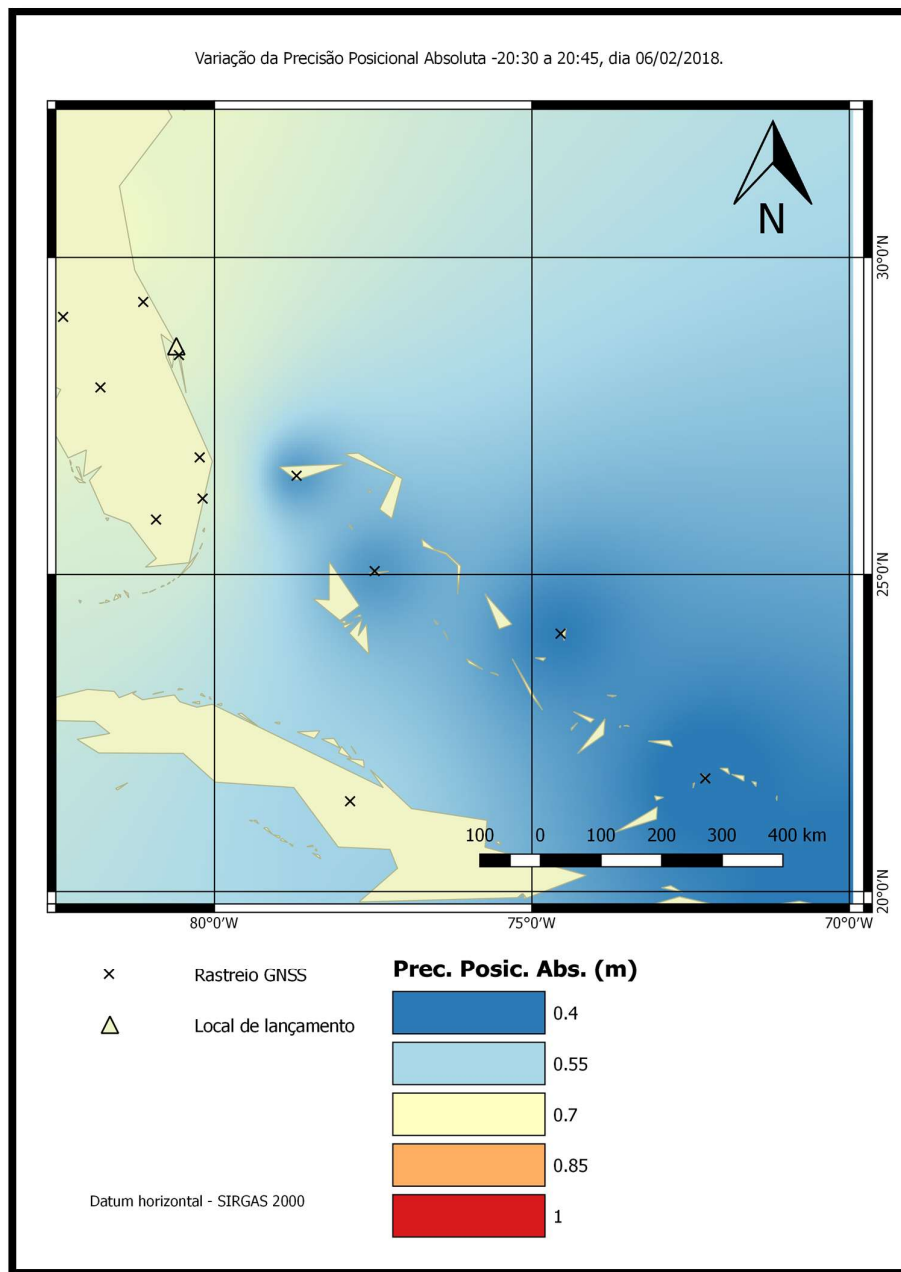
Fonte: Scheffler, 2018.

Após o processamento dos dados por PPP, os resultados de erros obtidos podem ser visualizados nas figuras a seguir.

A Figura 6 apresenta os resultados da Precisão Posicional Absoluta em metros, de cada estação de rastreamento GNSS. A diferença de resultados se dá devido a diferença da resolução temporal dos arquivos, que na rede COCONet nas ilhas do caribe é de 15s e na rede COORS do continente americano é de 30s.

Verifica-se uma variação de ~0,28 m entre as coordenadas da rede caribenha e a rede norte americana, para o processamento PPP com duração de rastreamento de 15 minutos.

Figura 6. Variação da Precisão Posicional Absoluta -20:30 a 20:45, dia 06/02/2018.



Fonte: Scheffler, 2018.

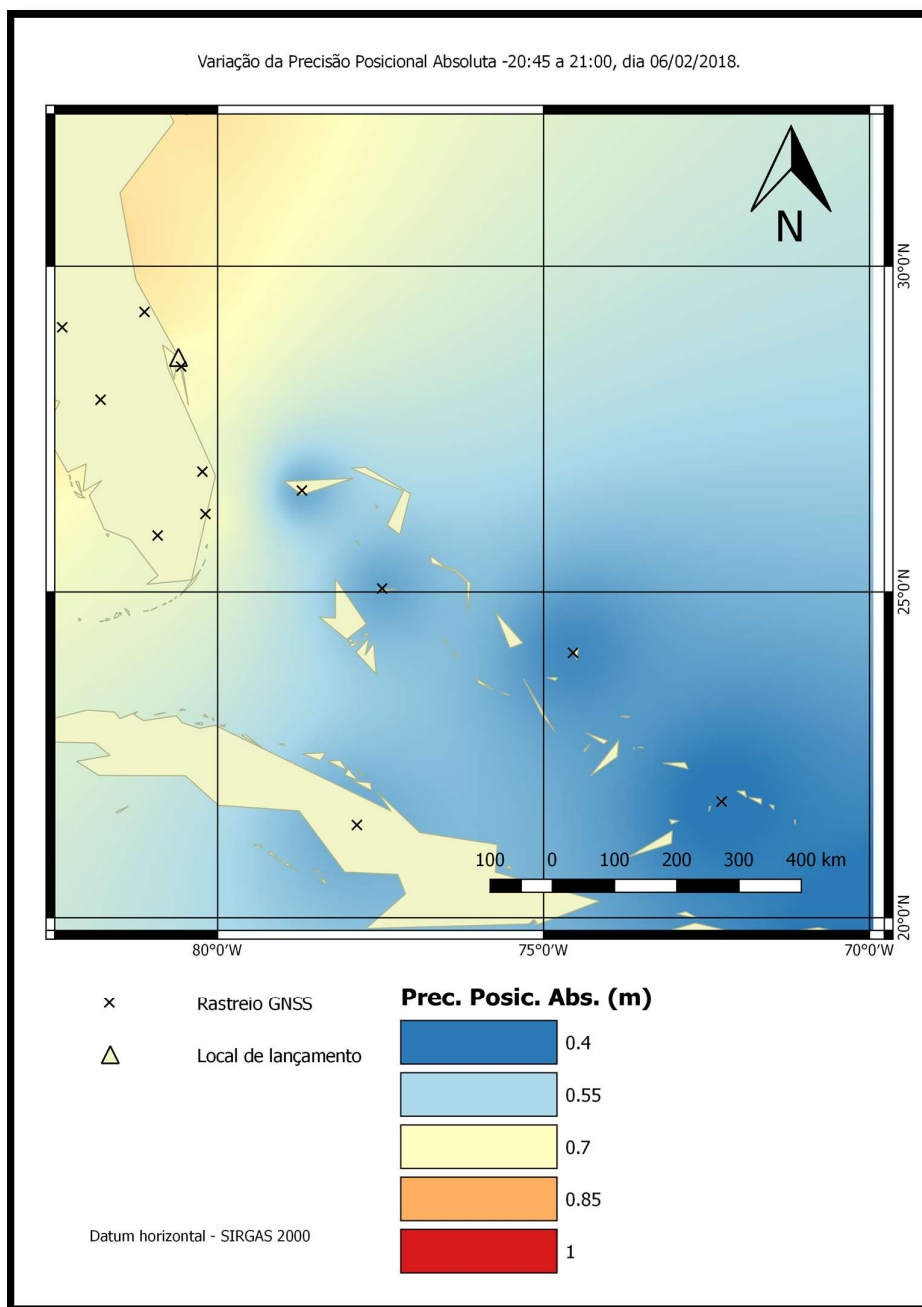
A Figura 7 apresenta os resultados da Precisão Posicional Absoluta em metros, dos primeiros 15 minutos do lançamento, que teve ascensão até ~20:51:40 GMT.

Os pontos da rede COCOnet mais distantes da área de influência da SAW ao Sudoeste tiveram uma variação de ~0,03 m, e os pontos próximos a área de lançamento tiveram uma variação de ~0,09 m.

Os pontos da rede COORS, tiveram uma variação em comparação com o período anterior do lançamento entre 0,06m e 0,08m.

De acordo com Chou et al. (2018), espera-se que a SAW tenha induzido interferências a partir de 5 minutos do lançamento.

Figura 7. Variação da Precisão Posicional Absoluta -20:45 a 21:00, dia 06/02/2018.



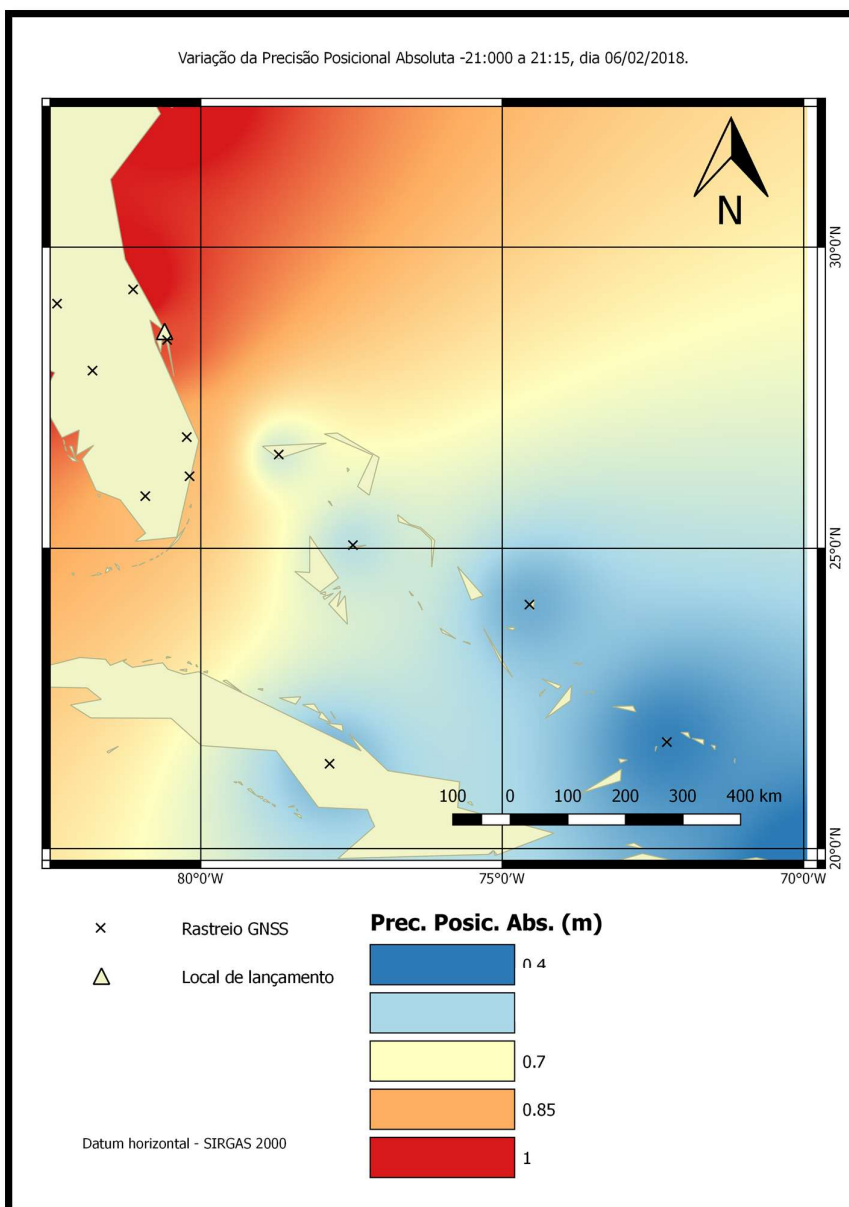
Fonte: Scheffler, 2018.

A Figura 8 apresenta os resultados da Precisão Posicional Absoluta em metros, dos 15 minutos finais do lançamento, que teve duração até ~21:14 GMT.

Os pontos da rede COCONet mais distantes da área de lançamento apresentaram uma variação de ~0,04 m, e os pontos próximos ao local de lançamento tiveram uma variação de ~0,18 m.

Os pontos da rede COORS, tiveram uma variação entre 0,2 m e 0,35 m.

Figura 8. Variação da Precisão Posicional Absoluta -21:000 a 21:15, dia 06/02/2018.



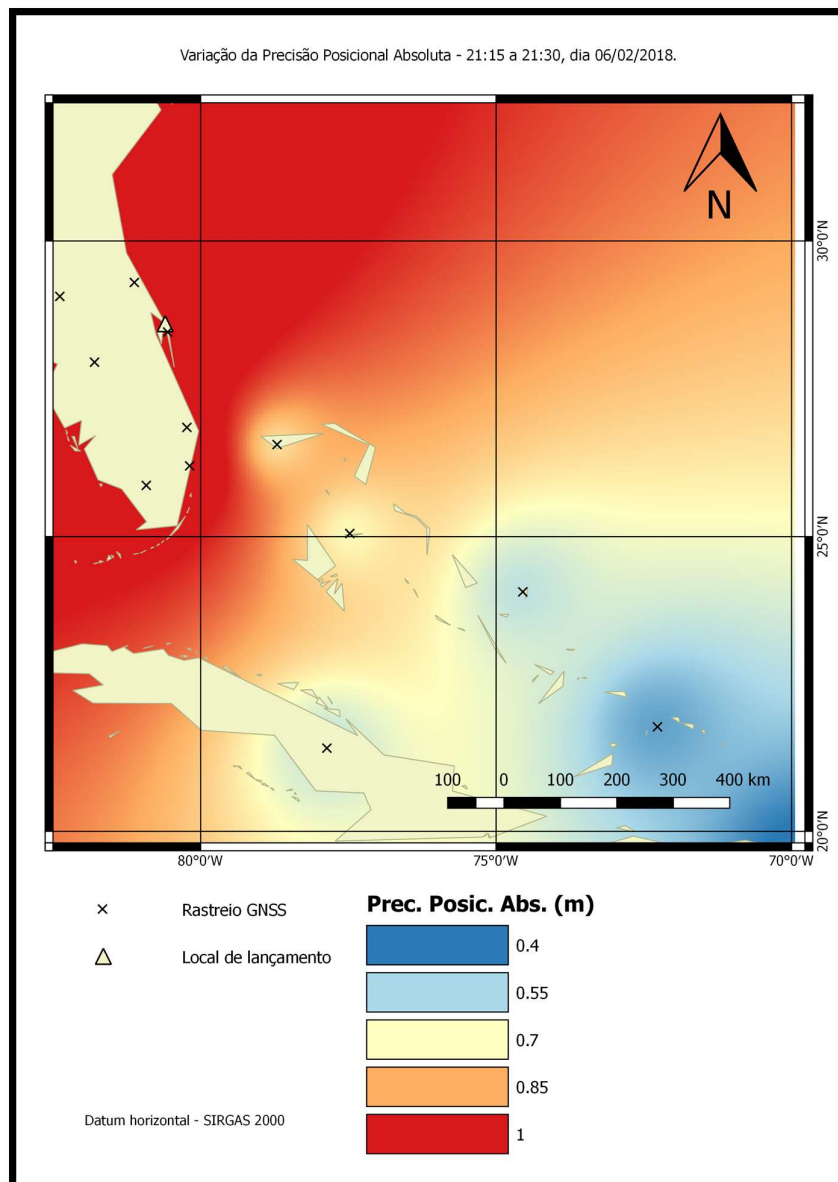
Fonte: Scheffler, 2018.

A Figura 9 apresenta os resultados da Precisão Posicional Absoluta em metros, dos primeiros 15 minutos posteriores ao lançamento, de 21:15 até 21:30 GMT.

Os pontos da rede COCONet mais distantes da zona de lançamento tiveram uma variação em comparação com o período anterior ao lançamento de $\sim 0,09$ m, e os pontos próximos ao local de lançamento tiveram uma variação de $\sim 0,25$ m.

Os pontos da rede COORS tiveram uma variação entre $\sim 0,37$ m e $\sim 0,46$ m

Figura 9. Variação da Precisão Posicional Absoluta - 21:15 a 21:30, dia 06/02/2018.



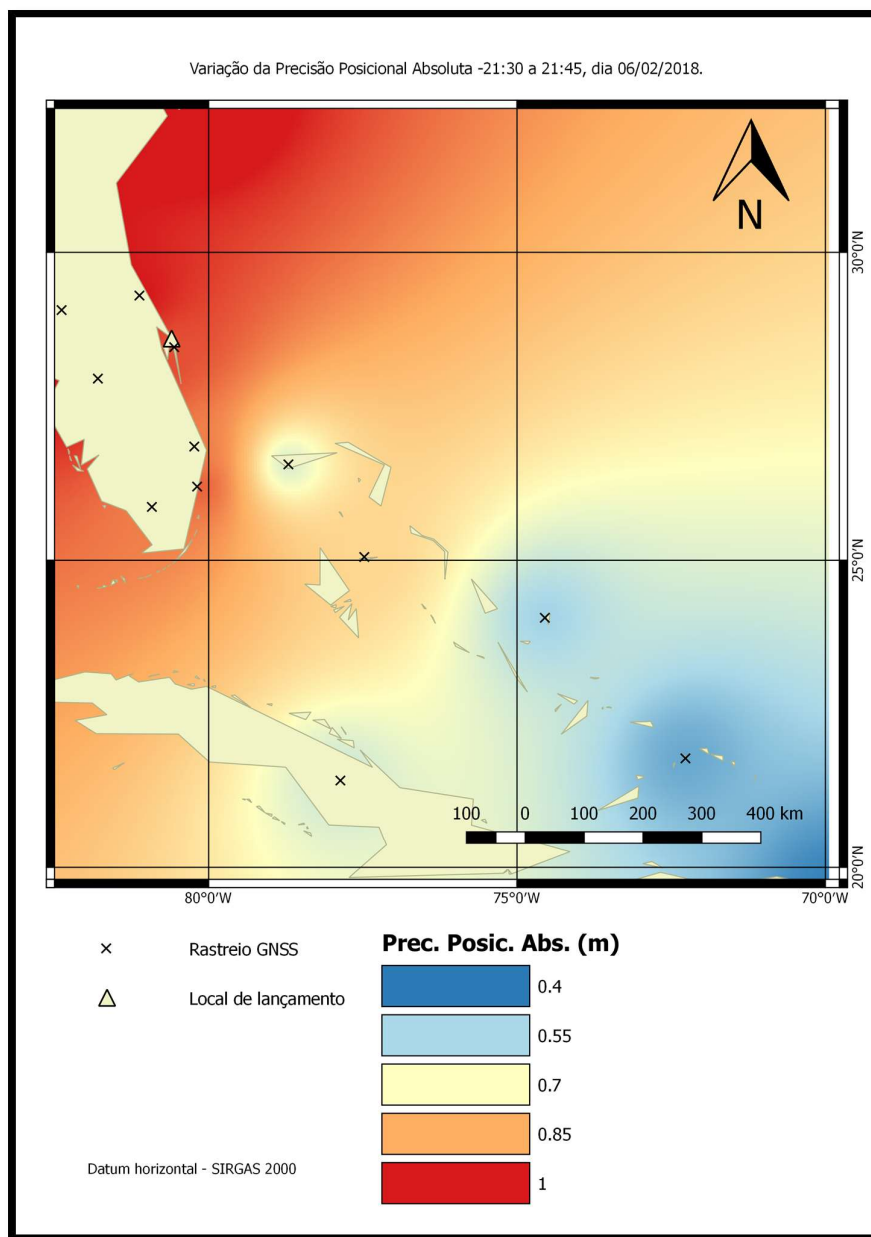
Fonte: Scheffler, 2018.

A Figura 10 apresenta os resultados da Precisão Posicional Absoluta em metros, dos 15 minutos posteriores ao lançamento até 30 minutos após o lançamento, de 21:30 até 21:45 GMT.

Os pontos da rede COCONet apresentaram uma variação em comparação com o período anterior ao lançamento de $\sim 0,09$ m nas áreas distantes ao local e de $\sim 0,13$ m nos locais próximos ao lançamento.

Os pontos da rede COORS variaram entre $\sim 0,291$ m e $\sim 0,355$ m.

Figura 10. Variação da Precisão Posicional Absoluta -21:30 a 21:45, dia 06/02/2018.



Fonte: Scheffler, 2018.

6. CONCLUSÕES

O serviço de PPP, apesar de utilizar a combinação linear das bandas L1 e L2, sofreu interferências na precisão das coordenadas nos momentos posteriores ao lançamento, que foram ocasionadas pelo buraco gerado no plasma ionosférico. Isso se verifica pela manutenção da Precisão Posicional Absoluta nos locais fora da influência do lançamento do foguete (onde variou até ~0,09 m), e os locais que ficaram sob e ao redor do lançamento que tiveram uma variação da Precisão Posicional Absoluta (onde variou até ~0,46 m) em comparação do momento antes do lançamento com a pior situação entre 21:15 e 21:30 GMT, o provável momento de maior influência do buraco deixado no plasma ionosférico.

Os momentos iniciais do lançamento, o período no qual a SAW foi gerada não houve grande variação nos desvios padrões das coordenadas, mas a partir de 21:00 até ~21:30 GMT, verificou-se um crescimento da Precisão Posicional Absoluta e um decréscimo a partir de 21:30 GMT

O lançamento do foguete pode não ter sido a única fonte de imprecisão das coordenadas, isso também pode ter sido ocasionado por uma série de fatores que não foram levados em consideração, como a variação temporal da cobertura de satélites.

Este foi o foguete com maior potência já lançado, gerando 22,25 milhões de Newtons de força, não se pode descartar a possibilidade de que uma liberação de energia tão grande na atmosfera não teria causado interferências na recepção GNSS, como já provado por Calais e Minster (1996). Chou et al. (2018), e Afraimovich et al. (2000).

Para o profissional Engenheiro Agrimensor e Cartógrafo, essas interferências são localizadas e sua duração temporal é limitada, podendo ser facilmente contornadas com um maior tempo de rastreamento GNSS.

Não se pode ignorar tais interferências, pois a sua influência é significativa, e espera-se um aumento significativo em um futuro próximo do lançamento de foguetes.

Uma análise completa da situação somente seria possível com uma densa rede de rastreamento GNSS, o que não é o que acontece neste caso devido ao deslocamento do foguete ter sido sobre o oceano.

REFERÊNCIAS

AFRAIMOVICH E. L., KOSOGOROV E. A., PLOTNIKOV A. V. **Shock-acoustic waves generated during rocket launches and earthquakes**. Institute of Solar and Terrestrial Physics, Siberian Division, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia, 2000.

BJELDE, Brian. CAPOZZOLI, Peter. SHOTWELL, Gwynne. **The SpaceX Falcon 1 Launch Vehicle Flight 3 Results, Future Developments, and Falcon 9 Evolution**. USA, 2018.

CALAIS, M.; MINSTER, J. B. **GPS detection of ionospheric perturbations following a Space Shuttle ascent**. Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA, 1996.

CAMARGO, Paulo de Oliveira. **Modelo Regional Da Ionosfera Para Uso Em Posicionamento Com Receptores GPS De Uma Frequência**. UFPR, 1999.

CARRARA, N.; GIORGIO, M.T. de; PELLEGRINI P.F. **Guided Propagation of HF radio waves in the ionosphere**. Institut di Ricerca sulle Onde Elettromagnetiche del C.N.R., Firenze, Italy, 1970.

CHEN, Z., S.-R. ZHANG, A. J. COSTER, AND G. FANG. **EOF analysis and modeling of GPS TEC climatology over North America**, J. Geophys. Res. Space Physics, 2015.

CHOU, Min-Yang. SHEN, Ming-Hsueh. LIN, Charles C. H. YUE, Jia. CHEN, Chia-Hung. LIU, Jann-Yenq. LIN, Jia-Ting. **Gigantic Circular Shock Acoustic Waves In The Ionosphere Triggered By The Launch Of Formosat-5 Satellite**. Space Weather, 16, 172 - 184. 2018.

GEMAEL, C. **Introdução a Geodesia Física**. Curitiba: Editora UFPR, 1999, p. 19.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP**, Rio de Janeiro, 2017. Acesso em: 10/11/2018. Disponível em: < https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf >.

LAÍNEZ SAMPER, M.D. ET AL. **Multisystem real time precise-point-positioning, Coordinates, Volume VII, Issue 2.** 2011. Acesso em: 15/11/2018. Disponível em: < https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Precise_Point_Positioning >.

MURPHY, D. **Flight Club: SpaceX Falcon Heavy Launch. 2018.** Acesso em 6/11/2018. Disponível em: < <https://www.flightclub.io/>> e https://www.youtube.com/watch?v=R0w-BzDrWww&ab_channel=TheVehicleDestroyer.

OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS UNITED NATIONS OFFICE AT VIENNA. **Global Navigation Satellite Systems Education Curriculum.** New York, 2012.

OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS UNITED NATIONS OFFICE AT VIENNA. **Satellite communications.** New York, 2003.

RODRIGUES, R. S. **Comparação entre coordenadas no Plano Topográfico Local obtidas a partir de topografia e geodesia.** Santa Maria: [s.n.], 2015, p. 17.

ROYAL OBSERVATORY OF BELGIUM GNSS RESEARCH GROUP, **IONOSPHERE: TUTORIAL.** Belgium, 2014. Acessado em: 15/11/2018. Disponível em: < http://gnss.be/ionosphere_tutorial.php#x2-100000 >.

SALOMONI, Christiane S. **GPS E Ionosfera: Estudo Do Comportamento Do Tec E De Sua Influência No Posicionamento Com GPS Na Região Brasileira Em Períodos De Alta E Baixa Atividade Solar.** UFRGS, 2008.

SPACE X. **Falcon Heavy Demonstration Mission PressKit,** 2018. Acesso em: 17/05/2018. Disponível em: < https://www.spacex.com/sites/spacex/files/falconheavypresskit_v1.pdf>.

TORGE, W. **Geodesy.** 2^a ed. Hannover: Walter de Gruyter, 1991, p. 213.

KAKINAMI, Y., M. YAMAMOTO, C.-H. CHEN, S. WATANABE, C. LIN, J.-Y. LIU, and H. HABU, **Ionospheric disturbances induced by a missile launched from North Korea on 12 December 2012,** J. Geophys. Res. Space Physics, 118, 5184 – 5189. 2013.

ANEXOS

ANEXO –A Tabela de resultados dos processamentos por PPP do serviço IBGE-PPP.

DADOS OFICIAIS DOS PONTOS (SIRGAS 2000)				RESULTADO PROCESSAMENTO POR PPP															
ID	LAT	LON	h	3:45:00 PM EST - 20:45 GMT			4:00:00 PM EST - 21:00 GMT			4:15:00 PM EST - 21:15 GMT			4:30:00 PM EST - 21:30 GMT			4:45:00 PM EST - 21:45 GMT			
				σ lat (m)	σ lon (m)	Presc. Posic. Abs.	σ lat (m)	σ lon (m)	Presc. Posic. Abs.	σ lat (m)	σ lon (m)	Presc. Posic. Abs.	σ lat (m)	σ lon (m)	Presc. Posic. Abs.	σ lat (m)	σ lon (m)	Presc. Posic. Abs.	
ccv6	28 27 35.82737	-80 32 43.70257	-23.686	0.172	0.622	0.645	0.154	0.671	0.688	0.146	0.934	0.945	0.137	1.080	1.089	0.128	0.935	0.944	
mntnt	25 51 56.76076	-80 54 25.18639	-18.928	0.154	0.616	0.635	0.152	0.646	0.664	0.142	0.805	0.817	0.136	1.033	1.042	0.128	0.886	0.895	
ormd	29 17 53.46945	-81 06 32.01312	-18.349	0.155	0.631	0.650	0.155	0.711	0.728	0.150	1.051	1.062	0.136	1.104	1.112	0.128	0.992	1.000	
laud	26 11 46.34157	-80 10 23.01430	-18.135	0.157	0.609	0.629	0.154	0.667	0.685	0.143	0.799	0.812	0.133	1.070	1.078	0.128	0.916	0.925	
pbch	26 50 46.63807	-80 13 09.29990	-15.303	0.154	0.609	0.628	0.154	0.648	0.666	0.143	0.820	0.832	0.133	1.031	1.040	0.128	0.886	0.895	
brtw	27 56 58.64215	-81 46 58.20069	13.575	0.153	0.633	0.651	0.151	0.685	0.701	0.143	0.920	0.931	0.136	1.091	1.099	0.128	0.992	1.000	
mdc6	27 50 59.33773	-82 31 57.32001	-14.200	0.149	0.640	0.657	0.152	0.721	0.737	0.145	1.012	1.022	0.136	1.100	1.108	0.129	1.020	1.028	
dunn	29 03 43.74382	-82 22 15.33110	-6.345	0.164	0.850	0.866	0.168	1.031	1.045	0.152	1.094	1.105	0.146	1.475	1.482	0.130	1.102	1.110	
cn13	24 03 54.68400	74 32 1.61520	-34.500	0.121	0.388	0.406	0.126	0.404	0.423	0.114	0.467	0.481	0.102	0.578	0.587	0.096	0.533	0.542	
cn15	26 33 23.97960	78 41 35.09520	-27.600	0.120	0.431	0.447	0.117	0.461	0.476	0.108	0.613	0.622	0.098	0.756	0.762	0.094	0.635	0.642	
cn16	21 25 20.28000	77 50 59.15400	106.700	0.135	0.526	0.543	0.123	0.458	0.474	0.110	0.474	0.487	0.105	0.587	0.596	0.099	0.605	0.613	
cn27	19 40 1.68960	69 56 23.30880	-17.700	0.127	0.339	0.362	0.130	0.344	0.368	0.127	0.347	0.370	0.106	0.374	0.389	0.099	0.400	0.412	
cn53	21 46 57.56880	72 15 13.92480	-15.200	0.123	0.363	0.383	0.125	0.368	0.389	0.116	0.395	0.412	0.103	0.454	0.466	0.096	0.464	0.474	
nas0	25 03 9.21240	77 27 44.12160	-16.476	0.127	0.427	0.445	0.135	0.450	0.470	0.129	0.562	0.577	0.100	0.702	0.709	0.099	0.767	0.773	
sceb	32 28 58.75588	-80 19 55.90438	-23.958	0.157	0.641	0.660	0.159	0.730	0.747	0.173	1.062	1.076	0.145	1.119	1.128	0.136	1.098	1.106	