

TAYNÁ APARECIDA FERREIRA GOUVEIA

**MODELAGEM DA IONOSFERA A PARTIR DAS
OBSERVÁVEIS IONOSFÉRICAS ADVINDA DO PPP**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)
Campus de Presidente Prudente/SP.

Supervisor: Prof. Dr. João Francisco
Galera Monico.

CNPQ - Processo 116545/2023-2

Presidente Prudente
2024

RESUMO

Na propagação dos sinais GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) ao ultrapassar a atmosfera, podem ser citados dois efeitos: devido a camada ionizada, a ionosfera e atmosfera neutra (ou neutrosfera). Sendo que a Ionosfera apresenta os maiores efeitos nos sinais de rádio, como o GNSS. O Brasil com sua extensão territorial superior a 8,5 milhões de km², contempla diferentes, particulares e distintos efeitos ionosféricos de acordo com a localização geográfica, horário do dia e da época do ano. Isso resulta em um grande desafio o de modelar de modo adequado e de qualidade os efeitos que a Ionosfera causa nos sinais e por conseguinte na qualidade do posicionamento GNSS. Sendo assim, ao longo dos anos diferentes metodologias foram desenvolvidas com o intuito de obter a melhor estratégia de modelagem ionosférica. Tais metodologias podem ser aplicadas para obter informações quanto as variações e efeitos ionosféricos, como também em aplicações desses nas modelagens dos seus erros. Pois, quanto melhor determinada a magnitude dos efeitos ionosféricos, mais acurados e rapidamente solucionada será a técnica de posicionamento a qual foi aplicada. No caso específico deste projeto, almejou-se realizar investigações com as chamadas observáveis ionosféricas advindas do processamento de dados de uma rede GNSS usando o PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), via sua modelagem adequada. As metodologias desenvolvidas nesse projeto podem ser diretamente avaliadas via o posicionamento GNSS, podendo ser no contexto do próprio PPP, bem como no GBAS (*Ground – Based Augmentation System*), objetivando aplicações na navegação aérea. Para realizar a modelagem dos efeitos ionosféricos, mais acurados e rapidamente solucionada (solução das ambiguidades) a técnica de posicionamento PPP será aplicada. Portanto, este projeto propôs uma investigação e refinamentos na modelagem e estimação dos efeitos ionosféricos, principalmente no que tange o conteúdo total de elétrons inclinado (*Slant Total Electron Content - STEC*) considerando a variação regional, temporal (hora do dia) e época do ano (maiores e menores efeitos ionosféricos), sobre o território brasileiro. Os resultados são apresentados nos trabalhos desenvolvidos e em desenvolvimento, assim como a divulgação científica realizada, na formação de recursos humanos e demais atividades extras desenvolvidas durante o período do projeto de PDJ Júnior.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	4
1.1 Objetivos	6
2. DETERMINAÇÃO DO STEC NO CONTEXTO DO PPP.....	7
2.1 Caracterização Ionosférica	7
2.2 Modelagem Ionosférica.....	9
2.3 PPP e a estimativa ionosférica.....	10
2.3.1 Estimativa do STEC.....	12
2.3.2 Estimativa do STEC utilizando dupla frequência	13
3. RESULTADOS	16
3.1 Publicação e apresentação em evento científico	16
3.2 Resultados e Análises STEC advindos de estimativa das observáveis GNSS no PPP	16
4. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS.....	20
4.1 Atividades adicionais desenvolvidas relacionadas ao projeto de PDJ	20
4.2 Atividades adicionais desenvolvidas.....	21
4.3 Divulgação Científica.....	23
4.4 Formação de Recursos Humanos	24
4.4.1 Coorientações e orientações vinculadas ao PDJ e INCT GNSS NavAer	24
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
REFERÊNCIAS	28
ANEXO A – PUBLICAÇÕES RELACIONADAS A PESQUISA DE PDJ E INCT GNSS	
NAVAER	30
Trabalhos Completos Publicados em Anais de Eventos	30
ANEXO B – DEMAIS PUBLICAÇÕES.....	32
Trabalhos Publicados em Anais de Eventos.....	32

1. INTRODUÇÃO

A determinação da posição de um local, ou daquela que se deseja chegar (navegação), considera o tempo que o sinal GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) se propaga do satélite até um receptor, multiplicado pela velocidade da luz e as coordenadas do satélite, que em geral são disponibilizadas aos usuários. Determinar a posição seria simples, não fosse a interferência do sinal por diferentes meios e fontes (satélite, receptor, estação e propagação de sinal), causando erros na posição do usuário. Para minimizar esses erros, diferentes técnicas e modelos, que consideram a realidade física do espaço percorrido pelo sinal, foram desenvolvidos. A escolha das técnicas e modelos a serem utilizados dependerá da aplicação e da acurácia pretendida (MONICO, et al, 2009).

Na propagação do sinal GNSS pela atmosfera, dois efeitos principais podem ser observados: um devido à camada ionizada, a Ionosfera, e outro à atmosfera neutra (ou Neutrosfera). A Ionosfera é a fonte de erro com a maior magnitude no posicionamento GNSS. Essa camada atmosférica, situada entre 50 a 1000 km de altitude, é composta por gases rarefeitos que, combinados com as altas temperaturas, caracterizam o estado da matéria denominado plasma, onde há grande concentração de energia. Devido à ação da radiação solar nesta camada, há considerável quantidade de átomos e moléculas ionizadas, assim como os elétrons livres (VIANELLO; ALVES, 2000).

O sinal GNSS, ao propagar-se pela atmosfera, sofre erros e distorções devido à Ionosfera, principalmente pela refração, retardos e cintilação. As ondas de radiofrequência são afetadas de forma dependente da frequência eletromagnética, uma vez que o índice de refração é uma função da frequência. Essa interação resulta em diferentes impactos nos sinais GNSS, podendo até causar a perda do sinal. Tais distorções geram erros nas medidas GNSS e, conseqüentemente, na posição resultante do processamento dos dados advindos desses sistemas.

A magnitude do erro causado pela composição da Ionosfera e suas variações é proporcional à densidade de elétrons livres presentes, denominado de TEC (*Total Electron Content*) e na direção inclinada o STEC (*Slant TEC*) (MORTON et al., 2021; ARIKAN et al., 2008), que apresentam variação temporal e espacial. Para minimizar ou eliminar esses erros, diferentes estratégias e modelagens podem ser aplicadas, como a partir da combinação

livre de ionosfera (*ion-free*), onde os efeitos ionosféricos de maior magnitude são eliminados pelo processamento de dupla frequência das observáveis, (CAMARGO, 1999; MONICO, 2008; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017). Para aplicações que requeiram resultados acurados, os efeitos secundários, embora representem menor magnitude, também precisam ser minimizados (MARQUES et al., 2011; MARQUES et al., 2014).

Um efeito de grande importância é a Anomalia de Ionização Equatorial (AIE) (*Equatorial Ionization Anomaly - EIA*), que se caracteriza por um aumento da densidade eletrônica nas regiões de baixas latitudes. A região equatorial recebe cerca de 50% da radiação solar incidente (ABDU, 2005). O Brasil está em uma região com concentração de fenômenos e anomalias ionosféricas, que impactam muito mais o desempenho dos sistemas de posicionamento por satélite dos sistemas GNSS, comparado a regiões de latitudes médias, como Estados Unidos da América e Europa, por exemplo.

As características peculiares da Ionosfera sobre o território nacional resultam em um grande desafio na modelagem adequada e de qualidade dos efeitos sofrido pelos sinais e, por conseguinte, na qualidade do posicionamento GNSS. Sendo assim, ao longo dos anos, diferentes metodologias foram desenvolvidas com o intuito de obter a melhor estratégia da modelagem ionosférica. Tais metodologias podem ser aplicadas para obter informações quanto as variações e efeitos ionosféricos, bem como em aplicações desses nas modelagens dos seus erros. Pois, quanto melhor determinada a magnitude dos efeitos ionosféricos, mais acurados será a técnica de posicionamento a qual for aplicada.

Para aplicações em tempo real, a disponibilidade de uma modelagem ionosférica de melhor qualidade para a região de estudo contribuiria significativamente para a qualidade da navegação. Isso se torna ainda mais crucial devida à impossibilidade de estimar tais erros em tempo real. A partir da técnica de PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) serão analisadas as observáveis ionosféricas com modelagem adequada para aplicações de alta precisão. Portanto, metodologias que resultem em modelagem ionosféricas precisas são ferramentas necessárias para um funcionamento mais efetivo dos sistemas GNSS na região brasileira.

O presente projeto foi proposto junto ao O INCT Tecnologia GNSS no suporte à navegação aérea (INCT GNSS-NavAer) (GNSS-NavAer), que objetiva investigações em relação as variações ionosféricas e seu impacto sobre o sinal GNSS para fins de avaliação a sua aplicação no posicionamento GNSS e navegação área (INCT, 2023).

Esse relatório técnico, processo 116545/2023-2, contempla a pesquisa e as atividades desenvolvidas entre julho de 2023 e dezembro de 2023. Inicialmente é apresentada uma revisão sobre a temática de pesquisa proposta (seção 2), as principais atividades realizadas e os resultados obtidos no âmbito do PDJ Junior (seção 3), além das atividades adicionais realizadas (seção 4) e as considerações finais (seção 5).

A seguir, são apresentados os objetivos gerais e específicos formulados no projeto.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste projeto foi o de investigar e realizar determinações do STEC, a partir do PPP, sobre o território brasileiro. Com o intuito de atingir o objetivo principal os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- I. Investigar programas de posicionamento multi-GNSS que possibilitem processar e avaliar diferentes estratégias na modelagem e estimação dos efeitos ionosféricos sobre o posicionamento;
- II. Investigar novas metodologias na determinação do STEC com acurácia de nível centimétrico via PPP com injunções das coordenadas;
- III. Avaliar a variação do STEC estimado de acordo com a região e época do ano sobre território nacional, com foco nos aeroportos;
- IV. Divulgar a pesquisa desenvolvida e resultados obtidos em periódicos e eventos científicos, visando contribuir para o desenvolvimento científico nacional;
- V. Divulgação Científica, elaboração e desenvolvimento de estratégias de divulgação dos resultados trabalhos desenvolvidos por pesquisadores e eventos do INCT no âmbito social;
- VI. Contribuir com a disseminação da ciência, visando facilitar o entendimento da sociedade com as pesquisas desenvolvidas no projeto.

2. DETERMINAÇÃO DO STEC NO CONTEXTO DO PPP

2.1 Caracterização Ionosférica

O sinal GNSS percorre mais de 20.000 km, desde a transmissão no satélite até a recepção, cerca de 19.000km no vácuo. Ao atravessar a camada ionosférica (50km a 1000km) sofre refração. A refração ionosférica ocorre devido ao número de elétrons livres, isto é, a densidade de elétrons presentes ao longo do caminho percorrido pelo GNSS.

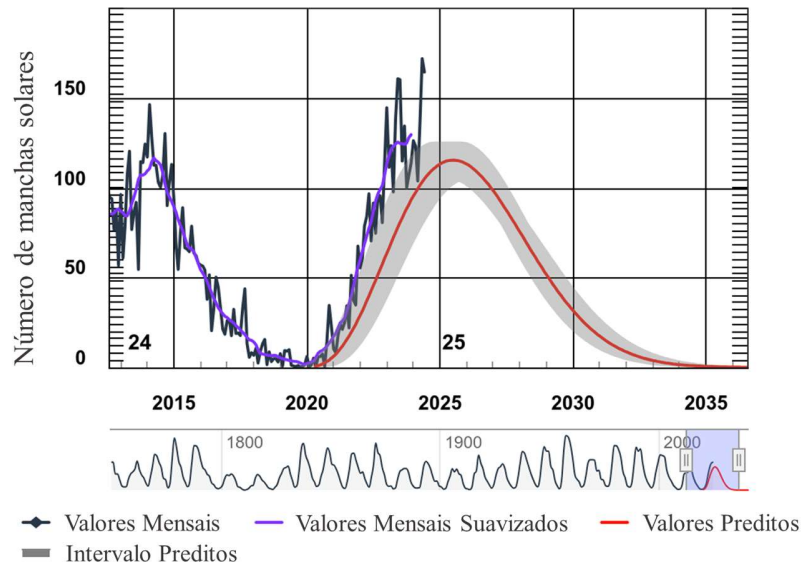
A refração ionosférica pode ser quantificada por meio do Conteúdo Total de Elétrons (*Total Electron Content* - TEC), o qual representa o número de elétrons contidos no caminho percorrido pelo sinal, do satélite ao receptor. O TEC varia de acordo com a localização geográfica (latitude), estação do ano e hora do dia. Tais variações ocorrem devido a radiação solar, localização e atividade geomagnético, dentre outras irregularidades. Essas irregularidades podem até fazer com que o receptor perca a sintonia com o satélite (LEICK, 2004; HOBIGER, T., JAKOWSKI, 2017; MORTON et al., 2020).

O TEC apresenta variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos, tais variações influenciam diretamente a densidade de elétrons na Ionosfera:

- as variações diurnas ocorrem devido à radiação solar em certas regiões da ionosfera, a partir da recombinação e junção dos elétrons e íons, e desaparecem a noite, na região brasileira, os valores máximos ocorrem entre as 12:00 e 16:00 LT (Local Time – Tempo Local);
- as variações sazonais são ocasionadas a partir da declinação do Sol e da intensidade do fluxo de ionização que mudam nas estações do ano. Nos equinócios (aproximadamente nos meses de março, abril, setembro e outubro – no hemisfério sul), são observados os valores máximos de densidade de elétrons e, portando, é quando os efeitos da Ionosfera são maiores. Nos solstícios (aproximadamente nos meses de junho e julho, dezembro e janeiro) os efeitos são menores;
- as variações de longos períodos, apresentação periodicidade de aproximadamente 11 anos (Figura 1). São consideradas de acordo com as manchas solares, sendo que o aumento de ionização é proporcional ao número de manchas. Essas manchas são regiões mais frias e escuras na superfície do Sol, rodeadas por regiões brilhantes que emitem um alto nível de radiação ultravioleta, resultando na mudança da densidade

de elétrons na ionosfera. Em dezembro de 2019 teve início o ciclo 25, que tem apresentado valores superiores as previsões para o período, como pode ser observado na Figura 1.

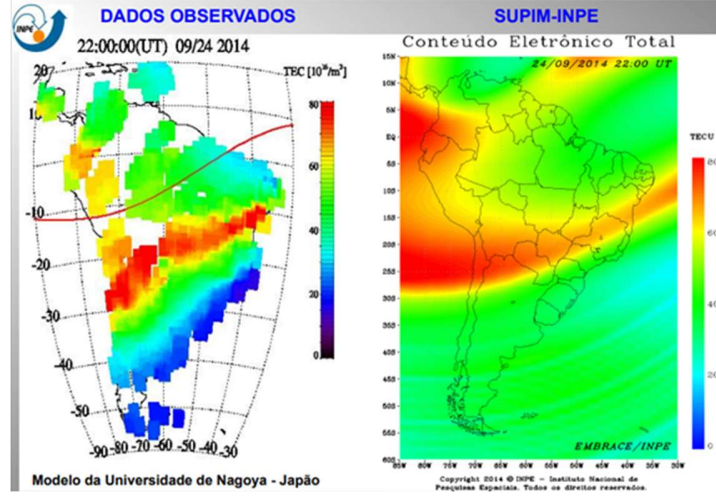
Figura 1: Série histórica do número de manchas e ciclos solares



Fonte: Adaptado de SWPC/NOAA (2023).

Um dos eventos de grande impacto nos sinais GNSS, que ocorrem na ionosfera equatorial e de baixa latitude, é devido EIA. Esses eventos podem ser acentuados ou inibidos durante a ocorrência de fortes tempestades geomagnéticas, como as explosões solares. Logo, nessas regiões há um alto nível de ionização, aumentando a densidade de elétrons, principalmente no início da tarde, originando o fenômeno da anomalia equatorial. Nas latitudes de $\sim 15^\circ\text{N}$ e $\sim 15^\circ\text{S}$, normalmente, são observados os valores máximos de TEC, regiões essas que correspondem aos picos (cristas) da anomalia equatorial, como mostra a Figura 2 (HOBIGER, T., JAKOWSKI, 2017; MORTON et al., 2020).

Figura 2: Anomalia Equatorial da América do Sul.



2.2 Modelagem Ionosférica

O *Slant* TEC (STEC) é o principal parâmetro capaz de descrever a camada ionosférica. O STEC representa a quantidade de elétrons livres em uma coluna com seção transversal de 1 m^2 ao longo do caminho percorrido pelo sinal, do satélite (s) até o receptor (r) que pode ser obtido pela expressão (LEICK, 1995; MONICO, 2008; HOBIGER, T., JAKOWSKI, 2017; MORTON et al., 2020):

$$\text{STEC} = \int_r^s n_e ds \quad (1)$$

O STEC é dado em elétrons/ m^2 , entretanto, devido os valores apresentarem uma ordem de grandeza elevada, adota-se como unidade o TECU (*Total Electron Content Units* - *TEC Unit*), sendo 1 TECU equivalente a 1×10^{16} elétrons/ m^2 .

É possível determinar o erro devido à refração ionosférica para a fase da portadora ($\Delta\phi_r^s$) e para os sinais modulados pela pseudodistância (código) ($\Delta\rho_r^s$) em função do TEC e da frequência, ambos apresentam a mesma magnitude do erro na distância, apenas com sinais opostos:

$$\Delta\phi_r^s = I_{f_r}^s = - \frac{40,3}{f^2} \text{ STEC} \quad (2)$$

$$\Delta\rho_r^s = I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{ STEC} \quad (3)$$

O erro devido à refração ionosférica, é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao STEC, como pode ser observado nas equações (2) e (3). Desse modo, as frequências mais altas são menos afetadas pela Ionosfera.

O TEC também pode ser projetado para a direção vertical (VTEC). Assim, o mesmo precisa ser mapeado para vertical, utilizando uma função de mapeamento:

$$VTEC = \cos z' \times STEC \quad (4)$$

$$z' = \frac{R_m}{R_m + H_m} \sin z \quad (5)$$

onde (z') é o ângulo zenital do caminho do sinal em relação a altitude média da Ionosfera (H_m) (entre 300 km e 400 km) denominado ponto ionosférico (IP), o raio médio da Terra (R_m) e o ângulo zenital (z) do satélite na estação de observação é obtido da seguinte expressão (CAMARGO, 1999; HOFMANN-WELLENHOF et al., 1997).

Vários modelos têm sido desenvolvidos para estimar o STEC. No entanto, é difícil encontrar modelos que estimem precisão adequada requerida pelos posicionamentos GNSS. Uma estratégia é a determinação do TEC a partir de observações simultâneas dos sinais transmitidos pelos satélites GNSS de simples e dupla frequência.

2.3 PPP e a estimativa ionosférica

Aqui serão apresentados os modelos em relação ao sistema americano de posicionamento global (GPS), mas que podem ser expandidos aos demais sistemas. A partir das observáveis de fase e pseudodistância é possível estimar e derivar valores de STEC. As observáveis brutas de fase e pseudodistância, em metros, podem ser expressas por meio das seguintes equações:

$$PD_r^t = \rho_r^{st} + c(dt_r - dt^t) + I_r^t + T_r^t + dm_r^t + \varepsilon_{PD_r^t}, \quad (6)$$

$$\varphi_r^t = f \left(\frac{\rho_r^{st} - I + T}{c} \right) + f(dt_r - dt^t) + (\varphi^t - \varphi_r) + N_r^t + \varepsilon_{\varphi_r^t}, \quad (7)$$

sendo:

ρ_r^t : distância geométrica obtida do intervalo de tempo de propagação do sinal do satélite até o receptor, no tempo de transmissão (t) e de recepção (r) multiplicado pela velocidade da luz

no vácuo (c);

dt_r : erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS;

dt^t : erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS;

I_r^t : erro causado pela ionosfera;

T_r^t : erro causado pela atmosfera neutra (troposfera);

dm_r^t : erro causado pelo multicaminho;

$\varepsilon_{PD_r^t}$: erros da medida de pseudodistância (ruído).;

f : frequência do sinal da fase;

φ^t : fase gerada no satélite;

φ_r : fase recebida no receptor;

N_r^t : ambiguidade da fase;

$\varepsilon_{\varphi_r^t}$: erros da fase da onda portadora.

A observável mais utilizada, para posicionamentos onde se busca alta acurácia, é a medida de fase da onda portadora (fase de batimento da onda portadora). Isso ocorre porque é uma observável mais precisa que a pseudodistância, porém ambígua devido ao número inteiro de ciclos entre o receptor e o satélite, no instante da primeira observação. A fase da onda portadora pode ser obtida pela diferença entre a fase gerada no satélite e a réplica gerada no receptor, ambas no instante de recepção. Apenas uma parte fracionária é medida, e o número inteiro de ciclos que é desconhecido é chamado de ambiguidade (N_r^t) (MONICO, 2008; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017).

O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) é uma técnica de posicionamento que pode fornecer as coordenadas de um ponto com alta acurácia: acurácia decimétrica no modo estático e centimétrica no cinemático. Sendo que no modo estático pode atingir a ordem de poucos centímetros, de acordo com tempo e condições de rastreamento (MARQUES, 2012; MONICO, 2008; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017).

Para obter tal acurácia são necessários receptores de dupla frequência e a modelagem ou minimização dos efeitos/erros que interferem no sinal GNSS. No PPP são utilizados dados de órbitas e relógios disponibilizados pela rede global de serviços GNSS (IGS – *International GNSS Service*), além da modelagem para os erros advindos da ionosfera e da atmosfera neutra e as demais fontes existentes (SEEBER, 2003).

Com a modelagem dos erros no PPP busca-se melhorar a acurácia no posicionamento com a menor quantidade possível de dados, ou seja, otimizar o tempo de convergência. A convergência do PPP é o tempo de estabilização da precisão dos parâmetros envolvidos, e sua qualidade pode ser analisada a partir da série temporal das precisões das coordenadas estimadas no PPP. O tempo de convergência, ou intervalo de tempo de inicialização do PPP, para que o posicionamento atinja precisão decimétrica é, em geral, em torno de 30 minutos, podendo ser mais longo para precisão centimétrica. Marques et al. (2014) mostram que, em aplicações em tempo real, o tempo de convergência pode atingir 1 hora com acurácia de 10 a 5 cm.

2.3.1 Estimativa do STEC

Existem diversos estudos relacionados à estimativa do TEC capazes de descrever o comportamento da camada ionosférica em escala global, regional e local (CAMARGO, 1999; MATSUOKA; CAMARGO 2004; HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2009). De maneira geral, as abordagens da estimativa do TEC diferem em relação ao método empregado. Utilizando informações GNSS, pode-se destacar a combinação entre frequências. A combinação linear livre da geometria é empregada, com base na diferença entre as observáveis de cada portadora, sendo uma técnica amplamente difundida (GEORGIADIOU, 1994; BRUNINI, 1998; CAMARGO, 1999; SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; CIRAULO et al., 2007; YASYUKEVICH et al., 2015; ALIZADEH et al., 2015). O termo geométrico é eliminado, devido a combinação linear entre as observáveis; pois os efeitos que independem da frequência são eliminados ao fazer a diferença entre as observáveis nas portadoras. Como resultado, o atraso ionosférico é mantido, bem como os atrasos de *hardware* e as ambiguidades, quando se trata da fase da onda portadora. Entretanto, esse atraso de *hardware* entre a banda L se torna um fator limitante de obter valores acurados de TEC.

A combinação linear livre da geometria também é utilizada a partir da pseudodistância filtrada pela fase da portadora. A ideia principal do método é aproveitar o baixo ruído da fase (poucos milímetros) para reduzir os ruídos das medidas do código (alguns metros), assim obtendo resultados mais precisos sem a necessidade de resolver as

ambiguidades. Entretanto, o método limita-se devido a sua sensibilidade a perda de ciclo (MATSUOKA; CAMARGO 2004; MONICO, 2008).

A metodologia para determinar o TEC a partir de estimativas acuradas, ainda se apresenta como um desafio. Podendo destacar dois fatores: Em métodos de dupla frequência, a estimativa do DCB (*Differential Code Biases*) pode ser um fator limitante na acurácia dos valores de TEC; Métodos empregando simples frequência a solução das ambiguidades e o ruído do código podem ser um fator limitante (YASYUKEVICH et al., 2015; MYLNIKOVA et al., 2017). O DCB representa a diferença de tempo de propagação das diferentes portadoras no hardware dos equipamentos, somado com uma imperfeita modulação e demodulação do código entre as portadoras (CHRISTOVAM et al., 2023).

Os elétrons livres presentes na Ionosfera apresentam-se como um erro a ser minimizado no posicionamento GNSS, para outras Ciências, como para o Clima Espacial, quantificá-los pode gerar uma informação importante. Medidas diretas são de difícil aquisição devido a variabilidade dos elétrons livres, nesse sentido, a modelagem ionosférica precisa torna possível essa tarefa.

2.3.2 Estimativa do STEC utilizando dupla frequência

Segundo Christovam et al. (2023), a estimativa do TEC a partir da técnica de dupla frequência considerando a combinação linear livre de geometria é amplamente empregada. Tal método baseia-se na diferença entre as observáveis GNSS (fase e pseudodistância) de cada portadora, onde os efeitos que independem da frequência são eliminados. A partir da diferença entre as observáveis nas portadoras L1 e L2, considerando comprimento de onda da portadora L1 (λ_1) e L2 (λ_2) tem-se (MANNUCCI et al., 1998; CIRAIOLO et al., 2007; CHRISTOVAM et al., 2023):

$$P_2 - P_1 = (I_2 - I_1) + c(\Delta b_s^P + \Delta b_r^P) + \Delta \varepsilon_P \quad (8)$$

$$\phi_1 \lambda_1 - \phi_2 \lambda_2 = (I_2 - I_1) + (N_1 \lambda_1 - N_2 \lambda_2) + c(\Delta b_s^\phi + \Delta b_r^\phi) + \Delta \varepsilon_\phi \quad (9)$$

os termos Δb_s e Δb_r são referentes a tendência inter-frequência para satélite (s) e o receptor (r), respectivamente, para fase da onda portadora ($\Delta b_{s,r}^\phi$) e para o código ($\Delta b_{s,r}^P$), que é o DCB.

O TEC pode ser convertido em erro na distância medida pela fase ou código, nas frequências das portadoras L1, L2 e L5, utilizando as equações (2) e (3), e demais modelagens matemáticas apresentadas em Christovam et al., (2023). Logo, o TEC pode ser obtido utilizando as pseudodistâncias (PD_{1r}^t, PD_{2r}^t) advindas dos códigos em L1 (f_1^2) e L2 (f_2^2) e a frequência da onda portadora L1 e L2, respectivamente, e $e_{PD_{12}}$ os erros sistemáticos não eliminados na combinação linear e erros aleatórios, a partir da seguinte combinação linear, tem-se (MATSUOKA; CAMARGO, 2004):

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} [(PD_1^2 - PD_2^2) - e_{PD_{12}}] \quad (10)$$

A estimativa do TEC a partir da combinação linear entre as medidas de fase (PD_{1r}^t, PD_{2r}^t) advindas dos códigos em L1 (f_1^2) e L2 (f_2^2) e a frequência da onda portadora L1 e L2, respectivamente, e $e_{PD_{12}}$ os erros sistemáticos não eliminados na combinação linear e erros aleatórios, a partir da seguinte combinação linear, tem-se (MATSUOKA; CAMARGO, 2004):

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} [(\lambda_2 \phi_{2r}^S - \lambda_1 \phi_{1r}^S) - (\lambda_1 N_{1r}^S - \lambda_2 N_{2r}^S) - e_{\phi_{12}}] \quad (11)$$

Os valores de TEC podem ser 10 vezes mais ruidosos quando calculados a partir da pseudodistância que em relação a fase da onda portadora. Isso se deve a magnitude da precisão da pseudodistância ser da ordem métrica, ao contrário da fase que é da ordem centimétrica a milimétrica (CAMARGO, 2004; MONICO, 2008).

Na estimativa do STEC usando o PPP pode-se obter estimativas mais precisas. Algumas estratégias são cruciais para tal qualidade, como por exemplo, obter as coordenadas das estações GNSS podem ser consideradas como valores conhecidos ou fixadas (PPP-Fixado). No processamento GNSS alguns parâmetros podem ser negligenciados ou estimados. Podendo estimar, por exemplo, o atraso neutrosférico, e o STEC. Ou ainda, utilizar fontes externas para obter, os parâmetros efemérides e relógios precisos, como a partir do IGS (OLIVEIRA Jr et al. 2020; CHRISTOVAM et al., 2023; MONICO et al., 2023).

Os valores de STEC estimados por meio do PPP tem a precisão dependente das observáveis, do processamento e efeitos que afetam o receptor e o satélite. Os valores corrigidos de STEC, são essenciais para várias aplicações em monitoramento do Clima Espacial.

3. RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos e trabalhos desenvolvidos, além dos desafios encontrados. A revisão teórica foi realizada (seção 2), com embasamento em referências consolidadas como livros e artigos científicos, o que balizou a metodologia e discussão dos resultados obtidos. O software inicialmente investigado foi o GROOPS (*Gravity Recovery Object Oriented Programming System*) (MAYER-GÜRR et al., 2021), porém, o processamento com o software GROOPS apresentou diversas dificuldades não permitindo solução em tempo hábil para obter os resultados. Por essa razão, posteriormente foi utilizado o software RTKLib (RTBLib, 2023).

Os resultados obtidos são apresentados a partir do trabalho com resultados iniciais apresentados em evento científico (3.1), assim como de resultados e discussões ainda não publicados (3.2).

3.1 Publicação e apresentação em evento científico

GOUVEIA, T. A. FERREIRA; DE OLIVEIRA JÚNIOR, P. S.; MONICO, J. F. G.; GOMES, A. Avaliação de múltiplas técnicas na estimação do STEC na região equatorial a partir de receptores GNSS de Smartphones. In: V Workshop do INCT GNSS NavAer, 2023, São José dos Campos. Anais do V Workshop do INCT GNSS NavAer., 2023.

GOUVEIA, T. A. F.; SILVA, C. M.; OLIVEIRA JR., P. S.; PEREIRA, V. A. S.; MONICO, J. F. G.; AGUIAR, C. R.; ALVES, D. B. M. Investigação para aprimoramento de metodologias na determinação do atraso ionosférico no cenário brasileiro In: XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas e V Simpósio Brasileiro de Geomática, 2022, Curitiba - PR. Anais do XII CBCG e V SBG., 2022.

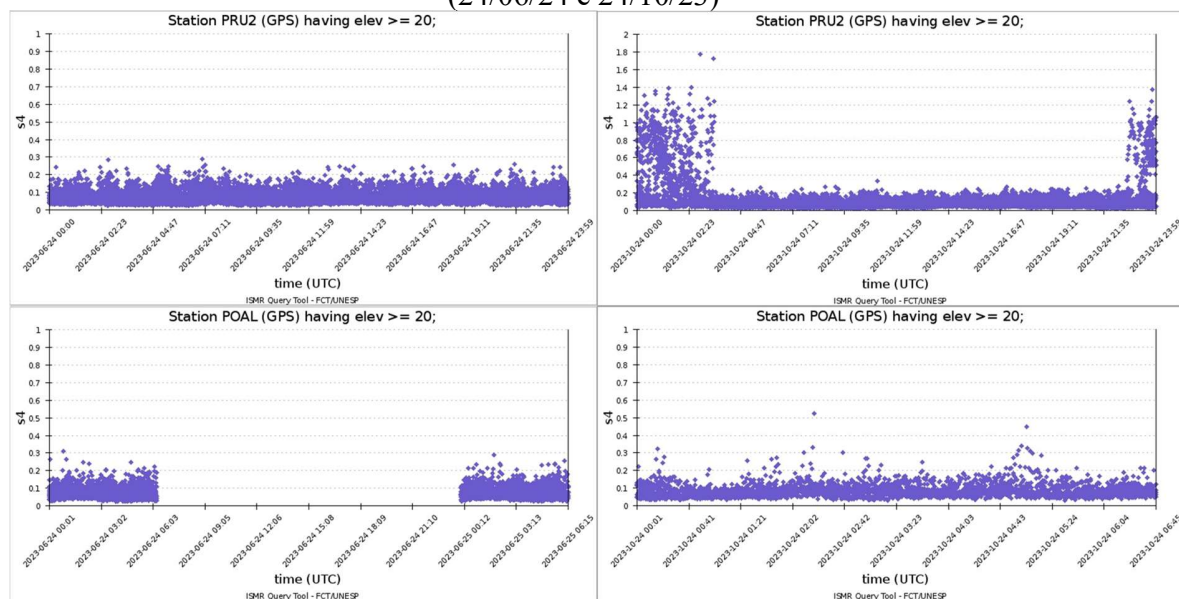
3.2 Resultados e Análises STEC advindos de estimativa das observáveis GNSS no PPP

Neste experimento, com base na literatura investigada, foram selecionados estações e períodos que representam diferentes variações ionosféricas. A Figura 3 ilustra a variação

do índice S4 durante períodos de alta e baixa atividade solar. O comportamento da ionosfera, conforme a localização geográfica, é exemplificado por essas duas estações da rede do INCT GNSS NAVAER (<https://inct-gnss-नावर.فct.unesp.br/static/document/anais-v-workshop-inct-gnss-नावर.pdf>), considerando a região geográfica, a época do ano e a hora do dia.

Observa-se que a estação PPTE (Presidente Prudente-SP) registra uma alta atividade ionosférica, atribuída à sua localização sob a influência diretamente da anomalia equatorial. Em contraste, a estação POAL (Porto Alegre-RS) demonstra uma atividade ionosférica reduzida, característica de regiões de latitudes médias. As datas foram selecionadas de acordo com período de solstícios (julho de 2023-doy 175) e de equinócio (outubro de 2023-doy 297), considerando a disponibilidade dos dados.

Figura 3: Variação do S4 em duas regiões distintas (PPTE e POAL) e em períodos (24/06/24 e 24/10/23)



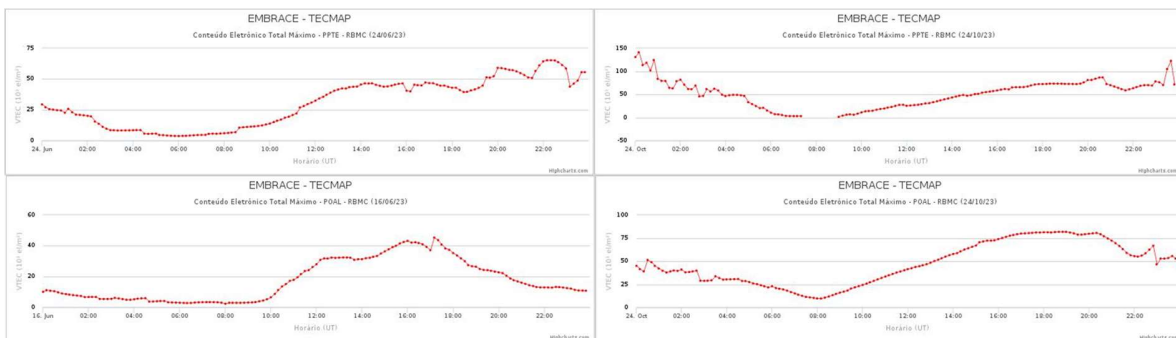
Fonte: ISMRQueryTool (<https://ismrquerytool.fct.unesp.br/is/>).

É possível observar fortes índices de cintilação ionosférica para PPTE (valores superiores a 1,4 em outubro), enquanto o mesmo não é observado para POAL (máximo de 0,4, em outubro).

Na Figura 4 são apresentados valores de VTEC disponibilizado pelo Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (EMBRACE, 2023). Como apresentado na literatura as estações mais próximas do Equador Magnético apresentam maiores valores de

VTEC (NAUS e PPTE – superior a 65) que a estação mais distante (POAL – inferior a 55). No período de solstício os valores de VTEC são menores, quando comparado com período de equinócio, que são de duas até seis vezes maiores (por exemplo, PPTE – VTEC de 25×10^1 el/m² 00h em 24/6/23 e cerca de 150×10^1 el/m² em 24/10/23), independente da região. A variação de acordo com a hora local pode ser observada nas três estações e nos dias avaliados, uma diminuição entre 9h00 e 10h00, com valores crescentes após as 12h00.

Figura 4: Variação do TEC em duas regiões (PPTE e POAL) e em períodos distintos (24/06/24 e 24/10/23)



Fonte: Adaptado de EMBRACE (2023).

Na Figura 5 são apresentados os valores de STEC resultantes do pós-processamento de observáveis GPS no RTKLib. As estratégias selecionadas tiveram como objetivo alcançar a melhor precisão possível. Dentre as estratégias de processamento considerou-se: as ambiguidades estimadas no processo *forward* como entrada para o processo *backward*; o modo de processamento foi PPP-*fixed*, considerando as coordenadas da estação conhecidas e fixadas em seus valores conhecidos, tal estratégia reduz o número de parâmetros a serem estimados e o tempo de processamento (celeridade nas soluções) (TAKASU, 2023; MONICO et al., 2023).

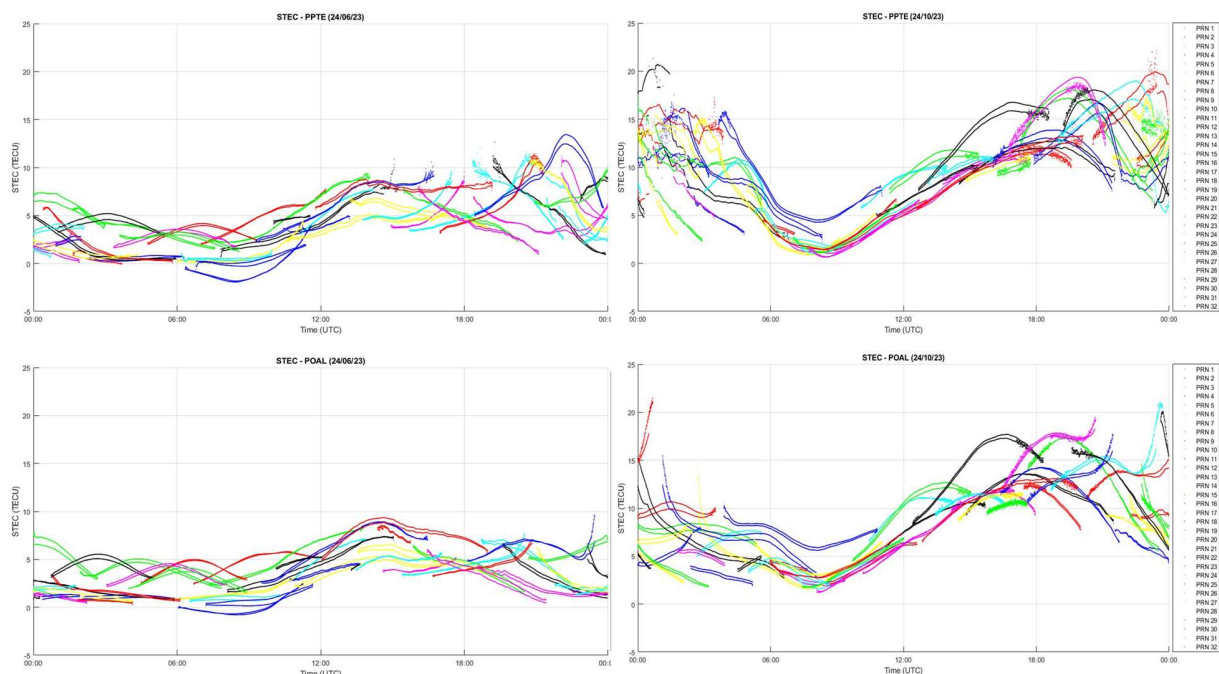
Os gráficos da Figura 5 apresentam a variação do STEC para diferentes PRNs, apresentado pelas diferentes cores, em dois dias distintos (24/06/23 e 24/10/23) estimados para as estações PPTE e POAL. Em ambas as estações e dias avaliados, pode-se observar um aumento gradual do STEC ao longo do dia, um pico acentuado de STEC nas primeiras horas da manhã (06h UTC), seguido por uma queda significativa e um aumento novamente na tarde (12 h UTC), e uma diminuição à noite. Em POAL e PPTE os valores elevados se mantêm até

o início do dia. Tal comportamento está relacionado à influência da radiação solar, que ioniza a ionosfera com maior intensidade.

As variações do STEC em relação entre diferentes PRNs indica que a Ionosfera afeta cada sinal GPS de maneira distinta, dependendo da trajetória do sinal, isto é, a porção da Ionosfera que cada sinal percorreu. Em outubro, a variabilidade do STEC entre os PRNs é mais alta, apresentando a importância da modelagem adequada para diferentes os PRNs.

A variação sazonal pode ser observada em ambas as estações, com os maiores valores de STEC em outubro (equinócio) comparados a junho (solstício). A variação horária do STEC mostra um aumento durante o dia; em junho, o STEC aumenta gradualmente à tarde, enquanto em outubro, os maiores valores são observados pela manhã. PPTE apresenta os maiores valores em comparação a POAL, independentemente do período avaliado. Os ruídos observados podem estar associados a outros eventos, como eventos geomagnéticos, como tempestades solares, e anomalias impactando os valores de STEC.

Figura 5: Variação do STEC em duas regiões (PPTE e POAL) e em períodos distintos (24/06/23 e 24/10/23)



Na estação PPTE, em junho, os valores de STEC apresentam um aumento gradual, atingindo até 15 TECU por volta das 14h UTC, refletindo a intensidade solar durante o dia,

com variações entre os PRNs de até 5 TECU. Valores até quatro vezes maiores (20 TECU) podem ser observados em outubro, por volta das 06h UTC. Na estação POAL, os valores de STEC não excedem 10 TECU às 14h UTC em junho. Em outubro, apesar do aumento do STEC, apenas alguns PRNs excedem 15 TECU. A precisão da estimativa do STEC apresentou valores centimétricos, inferior a 40 cm (valores mínimos de 4 cm).

Os valores negativos de STEC observados na Figura 5 no dia 24/06/24 (antes das 12 UTC), em ambas as estações, não representam a realidade física, uma vez que não há quantidade total de elétrons negativa ao longo de um caminho entre o satélite e o receptor. Tais valores negativos podem ocorrer devido a erros na modelagem, considerando que esse período (solstício) não apresenta condições ionosféricas extremas (como mostrado na Figura 3), tais como tempestades geomagnéticas ou variações bruscas, que são de difícil modelagem.

Tais resultados indicam a importância de investigações nesse sentido no território brasileiro, especialmente considerando o Ciclo Solar 25, que poderá proporcionar um grande campo de estudo sobre o impacto no posicionamento GNSS. Isso permitirá quantificar e modelar a variação ionosférica por meio das estimativas GNSS.

4. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

Nessa seção são apresentadas as atividades adicionais desenvolvidas, relacionadas ao projeto e ao INCT GNSS-NavAer (4.1), e atividades adicionais e habilidades desenvolvidas pela bolsista PDJ (4.2). Contemplam também a formação de recursos humanos (4.3) e as atividades de divulgação científica (4.4), em eventos científicos e para a sociedade.

4.1 Atividades adicionais desenvolvidas relacionadas ao projeto de PDJ

As principais atividades desenvolvidas no período do projeto são apresentadas de forma resumida no quadro 1. Além de atividades planejadas, também foram realizadas atividades adicionais e correlacionadas com as habilidades a serem desenvolvidas por um pesquisador PDJ. As publicações são apresentadas no ANEXO A.

Quadro 1. Cronograma de atividades desenvolvidas, número da atividade, nomenclatura geral, quantidade-descrição das atividades.

ATIVIDADES		
1	Publicações (ANEXO)	2 - Trabalhos de evento CBCG 2022
		2 - Trabalho de evento V Workshop do INCT GNSS-NavAer 2023
		4 - Trabalhos de orientação e co-orientação no Congresso de Iniciação Científica (CIC) da UNESP
2	Participação em Eventos	ICCC - <i>Workshop “Geodesy for Climate Research”</i>
		CBCG - Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas 2022
		V Workshop do INCT GNSS-NavAer 2023
3	Orientação e Coorientação (Seção 4.1)	3 Coorientação e Orientação de IC-JR e 3 Coorientação de IC
4	Organização de eventos	1 – Organização de seção especial do GEGE/INCT no CBCG de 2022
		1 – Organização do V Workshop do INCT GNSS-NavAer 2023
5	Divulgação Científica	Elaboração, desenvolvimento e supervisão de material de divulgação científica do INCT GNSS NavAer

4.2 Atividades adicionais desenvolvidas

Nessa seção são apresentadas as atividades adicionais desenvolvidas pela PDJ A divulgação científica e participação em evento científico quanto no desenvolvimento de novas estratégias de divulgação científica foram realizadas continuamente, e continuam mesmo após o término do PDJ. Além das atividades planejadas, também foram realizadas atividades adicionais e correlacionadas com as habilidades a serem desenvolvidas por um pesquisador PDJ, tais atividades são sumarizadas no quadro 2. As publicações são apresentadas no ANEXO B.

A PDJ participou da organização do Workshop INCT que ocorreu em novembro de 2023. A atuação da PDJ iniciou antes da realização do evento, desde o planejamento, atuação junto ao comitê científico, realização de reuniões de planejamento da estrutura do evento e divulgação do mesmo. Nos dias que antecederam o evento a PDJ atuou na estruturação do ambiente onde o evento foi realizado, produção e organização do material a ser utilizado no evento e sistemas de divulgação e sistema de transmissão on-line. Durante o evento atuou como cerimonialista do Workshop, finalizado o evento atuou na organização da produção de certificados e *Proceedings* do evento.

Quadro 2. Cronograma de atividades desenvolvidas no período de 01/06/22 até 31/04/23, número da atividade, nomenclatura geral, quantidade-descrição das atividades.

ATIVIDADES		
1	Publicações (ANEXO)	1 – Publicação coautoria artigo internacional
		3 - Trabalhos de evento CBCG 2022
		1 - Trabalho de evento SIRGAS
		2 - Trabalho de evento V Workshop do INCT GNSS-NavAer 2023
		4 - Trabalhos de orientação e co-orientação no Congresso de Iniciação Científica (CIC) da UNESP
2	Eventos	Membro de Mesa redonda: “Trajetória acadêmica: da graduação em Matemática a pós doutoranda em Geodésia” no SAEC – Semana Acadêmica da Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da FCT UNESP
3	Bancas Mestrado e Doutorado	2 - Bancas de qualificação de Mestrado, intituladas: I - “Análise do efeito de gradientes troposféricos no PPP com funções de mapeamento baseadas em dados de PNT no território brasileiro”; II - “Definição de superfície topográfica marítima da baía de guanabara-RJ por técnicas de posicionamento GNSS”.
		1 - Banca de defesa de Mestrado: “Definição de superfície topográfica marítima da baía de guanabara-RJ por técnicas de posicionamento GNSS”
		1 - Banca de qualificação de Doutorado, intitulado: “Efeito combinado da refração atmosférica e da curvatura da Terra no sensoriamento remoto do nível do mar com refletometria GNSS”
4	Orientação e Coorientação (Seção 4.1)	1 - Coorientação de Doutorado, 1 Coorientação de Mestrado, 2 Coorientação de IC
5	Parecerista de Artigos	5 - Revisão de artigos científicos nacionais e internacionais (JOGE, BCG, PG, JGS) e parecerista de projetos e trabalhos de eventos (INCT, PPGCC, CBCG, CIC, Workshop INCT, CNMAC)
6	Docência	4 - Disciplinas de graduação como professor responsável: Geodésia I; Desenho Geométrico e Geometria Descritiva para o curso de Matemática; Desenho Técnico para o curso de Engenharia Cartográfica e Desenho Básico para a Engenharia Ambiental
		1 - Disciplina no PPGCC “Tópicos Especiais: Advanced topics on GNSS for positioning and remote sensing”: Aulas “Neutral Atmosphere (Troposphere) fundamentals and monitoring using GNSS” como colaboradora
7	Organização de eventos	2 - Organização do <i>Pint of Science</i> Presidente Prudente em 2023 e 2024
		1 – Organização da Feira de Ciência do Oeste Paulista, na 20ª Semana Nacional de Ciência e Tecnologia do MCTI;
		1 – Organização de seção especial do GEGE/INCT no CBCG de 2022
		1 – Organização do V Workshop do INCT GNSS-NavAer 2023
8	Divulgação Científica	2 – Matéria em jornal impresso e televisivo (Imparcial e TV Fronteira);
		2 – Entrevistas em jornal e rádio (CBN Local)
		1 – Apresentação em evento de Divulgação Científica – Pint of Science Presidente Prudente 2024

		Elaboração, desenvolvimento e supervisão de material de divulgação científica do INCT GNSS NavAer
15	Autoria	Autora de 2 capítulos de livro

4.3 Divulgação Científica

A Divulgação Científica foi realizada a partir da publicação de trabalhos e apresentação de trabalhos em eventos como autoria e coautoria, como apresentado nos quadros 1 e 2 e descritos nos ANEXOS A e B.

Além da divulgação realizada nos ambientes acadêmicos, foram realizadas diferentes atividades visando a divulgação científica para a sociedade. A partir da elaboração, desenvolvimento e supervisão de material de divulgação científica do INCT GNSS NavAer. Podendo citar: reuniões da equipe de Divulgação Científica para planejamento, elaboração e discussões dos conteúdos a serem divulgados nas redes sociais (<https://www.linkedin.com/in/grupo-de-estudo-em-geod%C3%A9sia-espacial-178730243/>; Instagram e Facebook @gege.unesp).

A divulgação científica e participação em evento científico quanto no desenvolvimento de novas estratégias de divulgação científica foram realizadas continuamente, e continuam mesmo após o término do PDJ. Podendo citar: reuniões da equipe de Divulgação Científica para planejamento, elaboração e discussões dos conteúdos a serem divulgados nas redes sociais (<https://www.linkedin.com/in/grupo-de-estudo-em-geod%C3%A9sia-espacial-178730243/>; Instagram e Facebook @gege.unesp). Além de atividades planejadas, também foram realizadas atividades adicionais e correlacionadas com as habilidades a serem desenvolvidas por um pesquisador PDJ, tais atividades são sumarizadas no quadro 1.

A bolsista de PDJ também participou de atividades de divulgação científica não relacionadas ao PDJ, tais como:

- 1) integrante da equipe de organização e como cerimonialista da primeira (2023) e da segunda (2024) edição do *Pint of Science*, o maior evento de divulgação científica do mundo, em Presidente Prudente (<https://pintofscience.com.br/equipe/Presidente%20Prudente>) (<https://www.fct.unesp.br/#!/no>, 2023;

<https://www.fct.unesp.br/#!/noticia/1681/pint-of-science-prudente-festival-reuniu-cerca-de-500-pessoas/>;) na edição de 2024 a PDJ atuou também como palestrante (<https://pintofscience.com.br/event/inteligencia-artificial-decifra-me-ou-te-devoro-1>; <https://www.fct.unesp.br/#!/noticia/1672/comunicacao-e-ia-e-tema-do-2-dia-do-pint-of-science/>). Adicionalmente, no período que antecedeu esse evento a bolsista de PDJ também participou da divulgação por entrevistas em jornais de notícias, rádio, por meio televisivo e publicação digital (<https://www.imparcial.com.br/>; <https://www.youtube.com/watch?v=OSeShRKv330>; <https://www.imparcial.com.br/noticias/pint-of-science-prudente-aborda-inteligencia-artificial,65587>; <https://x.com/OIMPARCIALSP/status/1790008843864347063>);

- 2) integrante da equipe de organização da II Feira de Ciência do Oeste Paulista (<https://fctoestepaulista.com.br/>; <https://www.fct.unesp.br/#!/noticia/1472/ii-feira-de-ciencias-e-tecnologia-do-oeste-paulista/>), na 20ª Semana Nacional de Ciência e Tecnologia do MCTI .

4.4 Formação de Recursos Humanos

Em seguida são apresentados os recursos humanos formados no decorrer desses um ano e renovação de meses de projeto, composta por: alunos de ensino médio, de graduação, alunos de Mestrado e Doutorado. São apresentados projetos finalizados e em andamento.

4.4.1 Coorientações e orientações vinculadas ao PDJ e INCT GNSS NavAer

Iniciação científica ensino médio – Finalizadas

1. ELISA MARIOTTO MAGRO. Do Espaço aos Campos: Compreendendo a Ciência por Trás do GNSS em Veículos Autônomos. 2023. Iniciação científica (Ensino Médio) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Inst. financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
2. Matheus Medeiros Zago. Entendendo os conceitos Matemáticos e Físicos no posicionamento GNSS. 2023. Iniciação científica (Ensino Médio) - Universidade Estadual

Paulista Júlio de Mesquita Filho. Inst. financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

3. Vinicius Aragão Gomes. O potencial do GNSS em smartphones para navegação em ambientes urbanos. 2023. Iniciação científica (Ensino Médio) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Inst. financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Iniciação científica finalizadas

1. Matheus Brito da Silva. CLIMA ESPACIAL E SUA INFLUÊNCIA NAS APLICAÇÕES GNSS - UMA ABORDAGEM TÉCNICA E DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA. 2023. Iniciação científica (Física) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Inst. financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

2. Gabriel Willian Reis Suniga. Investigações sobre os efeitos da relatividade nas medidas de tempo dos relógios GNSS. 2023. Iniciação científica (Física) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Inst. financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Iniciação científica – Em andamento

1. Maria Caroline Alves Garcia. Divulgação Científica na Geodésia, uma conexão entre a universidade e a sociedade. Divulgando o INCT GNSS NavAer e suas pesquisas. 2023. Iniciação científica (Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Inst. financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

4.4.2 Demais coorientações e orientações - não vinculadas com o PDJ

Iniciação científica finalizadas – não vinculadas com o PDJ

1. Afonso Marques Albuquerque. Bolsa IC PIBIC (2022-2023) - Desenvolvimento e avaliação de séries temporais do atraso Zenital e PWV da atmosfera neutra na região brasileira. 2023. Iniciação científica (Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) -

FCT/UNESP
Inst. financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

2. Afonso Marques Albuquerque. Bolsa IC PIBIC (8/2023-12/2023) - Desenvolvimento e análise da climatologia do atraso zenital da atmosfera neutra e do PWV na região brasileira. 2023. Iniciação científica (Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) - FCT/UNESP
Inst. financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

5. Afonso Marques Albuquerque. Bolsa IC PIBIC (2021-2022) - Aprimoramento e Análise da Modelagem do Atraso Zenital Advindo da Atmosfera Neutra Sobre o Território Brasileiro. 2022. Iniciação científica (Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) - FCT/UNESP
Inst. financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Iniciação científica – Em andamento – não vinculadas com o PDJ

1. Maria Júlia de Souza Pompei. Atmosfera Neutra e do PWV na Região Brasileira. 2024. Iniciação científica (Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) - FCT/UNESP
Inst. financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Dissertação de mestrado em andamento – coorientadora – não vinculadas com o PDJ

1. Afonso Marques Albuquerque. Aprimoramento da Estimativa do GNSS-PWV na Ocorrência de Eventos de Precipitação. 2024. Dissertação (Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Inst. financiadora: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Tese de doutorado em andamento: coorientadora – não vinculadas com o PDJ

1. Viviane Aparecida dos Santos. Aplicação do GNSS na Estimativa do ZWD para Previsão e Monitoramento de Eventos Climáticos Extremos. 2020. Tese (Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Inst. financiadora: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o desenvolvimento deste projeto, muitas atividades de grande importância foram realizadas pela PDJ junto ao INCT GNSS NavAer, incluindo a investigação do STEC, a participação e organização de eventos, a formação de recursos humanos, práticas docentes, participação em bancas, entre outras.

A investigação das variações ionosféricas foi desenvolvida desde a revisão bibliográfica até a realização de experimentos e análises, permitindo verificar a variação diária, sazonal e regional. Compreender essas variações é essencial para melhorar a precisão dos sistemas de navegação por satélite e avançar no estudo da dinâmica ionosférica.

Na formação de recursos humanos a PDJ realizou a orientação de alunos de ensino fundamental à doutorado. Na atuação de parecerista realizou revisão de projetos, relatórios científicos, trabalhos de eventos e periódicos.

Os resultados desenvolvidos ao longo do projeto proporcionaram a divulgação em evento científico. Além da divulgação da pesquisa de modo convencional, participou da organização e realização de divulgação científica para a sociedade, o qual teve uma grande participação da sociedade e visibilidade. Quanto a divulgação científica realizou diferentes atividades junto ao INCT GNSS-NavAer e atividades correlacionadas.

REFERÊNCIAS

ABDU, M.A. Equatorial ionosphere-thermosphere system: Electrodynamics and irregularities. *Advances in Space Research*, v. 35, n.5, p.771-787, 2005.

ARIKAN, F., H. NAYIR, U. SEZEN, and O. ARIKAN. Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC, *Radio Sci.*, 43, RS4004, doi:10.1029/2007RS003785.

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, e2023SW003513. <https://doi.org/10.1029/2023SW003513>

EMBRACE. <https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/tec-map-grafico/>. Acesso em: nov. 2023.

HOBIGER, T., JAKOWSKI, N. Atmospheric Signal Propagation. Em: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Eds.). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer Handbooks. Cham: Springer International Publishing, 2017a. p. 165–193.
LEICK, A. *GPS Satellite Surveying*. [s.l.] John Wiley & Sons, 2004.

INCT GNSS NavAer. INCT Tecnologia GNSS no suporte à navegação aérea. <https://inct-gnss-नाव्अर.फ्त्.ुनेस्.ब्र/pt/>. Acesso em: nov. 2023.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 1, n. 56, 2004.

MAYER-GÜRR, T., BEHZADPOUR, S., EICKER, A., ELLMER, M., KOCH, B., KRAUSS, S., POCK, C., RIESER, D., STRASSER, S., SUESSER-RECHBERGER, B., ZEHENTNER, N., KVAS, A. (2021). GROOPS: A software toolkit for gravity field recovery and GNSS processing. *Computers & Geosciences*, 104864. doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104864

MONICO, J. F. G., 2008. *Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação*, Editora UNESP, São Paulo, 476 p.

MONICO, J. F. G.; de OLIVEIRA Jr., P. S.; PEREIRA, V. A. S.; MACHADO, S. B. L. ASSESSMENT OF STEC ESTIMATION QUALITY USING GNSS PPP FIXED, *Int. Arch.*

Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVIII-1/W2-2023, 1135–1140, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-1135-2023>, 2023.

MORTON, Y. J., YANG, Z., BREITSCH, B., BOURNE, H., RINO, C. Ionospheric effects monitoring and mitigation techniques. Em Position Navigation and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation Sensor Systems and Civil Applications, Hoboken, NJ, USA:Wiley, 2020. P. 879-937

MYLNIKOVA, A. A.; YASYUKEVICH, Y. V.; IVANOV, V. B.; YASYUKEVICH, A. S. Estimating the absolute total electron content from the single-frequency GPS/GLONASS data. In Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS), 2017. doi:10.1109/PIERS.2017.8262276.d

OLIVEIRA, P. S. DE, MONICO, J. F. G. AND MOREL, L. Mitigation of receiver biases in ionospheric observables from PPP with ambiguity resolution, Advances in Space Research, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.037>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS - RBMC. 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: set. 2023.

MONICO, J. F. G et al. The GNSS NavAer INCT Project Overview and Main Results. Journal of Aerospace Technology and Management, 14, 1–23, 2022. <https://doi.org/10.1590/jatm.v14.1249>

RTKLIB: Demo5. Site. Disponível em: <<https://www.rtklib.com>>. Acesso em: Setembro de 2023.

SEEBER, G. Satellite geodesy. 2nd completely rev. and extended ed ed. Berlin ; New York: Walter de Gruyter, 2003.

SWPC/NOAA. SPACE WEATHER PREDICTION CENTER. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>. Acesso em: nov. 2023.

TAKASU, T. RTKLIB Manual: Demo5 version. Disponível em: https://rtkexplorer.com/pdfs/manual_demo5.pdf. Acesso em: set de 2023.

YASYUKEVICH.; MYLNIKOVA, A. A.; KUNITSYN, V. E.; PADOKHIN, A. M. Influence of GPS/GLONASS differential code biases on the determination accuracy of the absolute total electron content in the ionosphere. Geomagnetism and Aeronomy, v. 55, n. 6, p. 763-769, 2015. doi:10.1134/S001679321506016X.

ANEXO A – PUBLICAÇÕES RELACIONADAS A PESQUISA DE PDJ E INCT GNSS NAVAER

Resumos Publicados em Anais de Eventos

1. GOUVEIA, T. A. F.; SILVA, C. M.; OLIVEIRA JR., P. S.; PEREIRA, V. A. S.; MONICO, J. F. G.; AGUIAR, C. R.; ALVES, D. B. M. Investigação para aprimoramento de metodologias na determinação do atraso ionosférico no cenário brasileiro In: XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas e V Simpósio Brasileiro de Geomática, 2022, Curitiba - PR. Anais do XII CBCG e V SBG. , 2022.

2. SILVA, C. M.; SILVA, W. C.; SOUZA, F. T. L.; MONICO, J. F. G.; BALVEDI, G.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T. A. F. GAST-X e o futuro do GBAS DFMC com o uso da fase da onda portadora para monitoramento ionosférico In: XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas e V Simpósio Brasileiro de Geomática, 2022, Curitiba - PR. Anais do XII CBCG e V SBG. , 2022.

3. MONICO, J. F. G.; STUANI, V. A.; AGUIAR, C. R.; OLIVEIRA JUNIOR, P. S.; GOUVEIA, T. A. F. GRADIENTES IONOSFÉRICOS DERIVADOS DA ESTIMATIVA DO STEC NO PPP. In: XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas e V Simpósio Brasileiro de Geomática, 2022, Curitiba - PR. Anais do XII CBCG e V SBG. , 2022.

4. GOUVEIA, T. A. FERREIRA; DE OLIVEIRA JÚNIOR, P. S.; MONICO, J. F. G.; GOMES, A. Avaliação de múltiplas técnicas na estimação do STEC na região equatorial a partir de receptores GNSS de Smartphones. In: V Workshop do INCT GNSS NavAer, 2023, São José dos Campos. Anais do V Workshop do INCT GNSS NavAer, 2023.

5. GARCIA, M. C. A.; GOUVEIA, T. A. FERREIRA; MONICO, J. F. G. Impacto da divulgação científica no INCT GNSS-NavAer. In: V Workshop do INCT GNSS NavAer, 2023, São José dos Campos. Anais do V Workshop do INCT GNSS NavAer. , 2023.

Trabalhos Completos Publicados em Anais de Eventos

1. ALBUQUERQUE, A. M.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T. A. F.; SANTOS, V. A. Avaliação do atraso zenital hidrostático integrado e simplificado a partir de dados de radiossonda no território brasileiro In: XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas e V Simpósio Brasileiro de Geomática, 2022, Curitiba - PR. Anais do XII CBCG e V SBG. , 2022.

2. SANTOS, V. A.; ALBUQUERQUE, A. M.; GOUVEIA, T. A. F.; ALVES, D. B. M.
Avaliar a qualidade das estimativas do ZTD obtido com o Bernese 5.2 utilizando estações
GNSS do Brasil In: XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas e V Simpósio Brasileiro
de Geomática, 2022, Curitiba - PR. Anais do XII CBCG e V SBG. , 2022.

ANEXO B – DEMAIS PUBLICAÇÕES

Trabalhos Publicados em Anais de Eventos

1. POMPEI, M. J. S.; SANTOS, V. A.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T. A. F. Análise da variação do erro devido a influência da atmosfera neutra em relação ao ângulo de elevação dos satélites GNSS In: XXXIV CIC Unesp, 2023, Presidente Prudente. Anais do XXXIV CIC Unesp. , 2023.
2. ALBUQUERQUE, A. M.; Alves, D.B.M.; GOUVEIA, T. A. F.; SANTOS, V. A. Desenvolvimento de series temporais de ZTD para região de Boa Vista e Brasília por meio de dados de radiossonda e GNSS In: XXXIV CIC Unesp, 2023, Presidente Prudente. Anais do XXXIV CIC Unesp. , 2023.
3. SANTOS, V. A.; ALBUQUERQUE, A. M.; GOUVEIA, T. A. F.; SAPUCCI, L. F.; ALVES, D. B. M.. Estimativa do vapor d'água atmosférico utilizando o software Bernese 5.2 por meio de dados multi-GNSS In: Simpósio SIRGAS2022, 2022, Santiago do Chile, Chile. Simpósio SIRGAS, 2022.

Artigos em jornal de notícias

1. GOUVEIA, T. A. F.. Pint Of Science Brasil promete agitar com muita ciência e som: Festival mundial terá uma de suas edições em Presidente Prudente. Notícias - FCT UNESP, <https://www.fct.unesp.br/#!/no>, 2023.
2. PAULA, R. P.; GOUVEIA, T. A. F.. Pint Of Science Brasil promete agitar Prudente com muita ciência e som. O Imparcial, <https://www.imparcial.com.br/>, 2023.
3. PAULA, R. P.; GOUVEIA, T. A. F.; SILVA, M. B.. Presidente Prudente terá edição local do Pint Of Science Brasil. O Imparcial, <https://www.imparcial.com.br/>, 2023.