

Análise da influência ionosférica e solar na acurácia do IBGE-PPP utilizando séries temporais

RESUMO

Krisley Xavier Soares de Freitas

krisley.freitas@ufv.br

orcid.org/0000-0001-8453-324X

Universidade Federal de Viçosa (UFV),
Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Lécio Alves Nascimento

lecio.nascimento@ifnmg.edu.br

orcid.org/0000-0003-2499-4372

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Norte de Minas Gerais
(IFNMG), Araçuaí, Minas Gerais, Brasil.

William Rodrigo Dal Poz

william.dalpoz@ufv.br

orcid.org/0000-0001-9532-3643

Universidade Federal de Viçosa (UFV),
Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

A ionosfera é uma das principais fontes de erros sistemáticos no posicionamento com GPS para usuários de receptores de uma frequência. O principal parâmetro para descrever o efeito ionosférico é o TEC (*Total Electron Content* - Conteúdo Total de Elétrons), que não é constante e não varia de forma regular. Como a densidade de elétrons na ionosfera depende da atividade solar, a análise do comportamento de índices solares como o número de manchas solares e o fluxo solar a 10,7cm também se mostra pertinente para uma visão mais abrangente do comportamento da ionosfera e de sua influência no posicionamento com GPS. Este trabalho objetiva avaliar a influência da ionosfera e da atividade solar na acurácia do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) utilizando observáveis GPS/L1 através de séries temporais. Diante dos resultados obtidos, foi possível observar uma forte correlação entre as séries do VTEC e das manchas solares, variando entre 58,2% e 75,9%, e do VTEC e do F10,7 variando entre 64,3% e 82,1%. Ademais, verificou-se uma forte influência do VTEC na acurácia planimétrica das estações BOAV e VICO - correlação de 71,7% e 63,7%, respectivamente. Entretanto, essa influência na acurácia altimétrica obteve valor máximo de 50,8% nas estações analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: VTEC. IBGE-PPP. Ionosfera. Fluxo Solar a 10,7. Manchas Solares.

INTRODUÇÃO

Dentre os efeitos sistemáticos que degradam o posicionamento GPS realizado com simples frequência (L1), pode-se destacar os efeitos associados à ionosfera, principalmente após a desativação da técnica SA (*Selective Availability*) ocorrida em 2000 (MONTENBRUCK, 2002; AZAMBUJA, 2015). A ionosfera consiste em uma camada da atmosfera terrestre que se inicia por volta de 50 km acima da superfície terrestre e estende-se até aproximadamente 1000 km de altitude, caracterizada por possuir um número suficiente de elétrons livres para afetar a propagação do sinal GPS, constituindo-se em um meio dispersivo, ou seja, um meio no qual a propagação de sinais é dependente da frequência (MATSUOKA, 2007; LOPES; MARQUES, 2020).

Os efeitos da ionosfera no sinal GPS são principalmente descritos pelo TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), normalmente apresentado em unidades de TEC (TECU – *TEC Unit*), onde 1 TECU equivale a 1×10^{16} elétrons/m². Como destaca Matsuoka (2007), o TEC não é constante e sua variação não ocorre de forma regular. De fato, as regiões equatoriais geomagnéticas caracterizam-se por um alto nível de densidade de elétrons, com o Brasil apresentando uma das maiores variações espaciais e temporais do TEC no mundo na ausência de tempestades ionosféricas (KOMJATHY et al., 2003). O alto nível de densidade de elétrons é justificável pela maior incidência da radiação solar, o que ocasiona a fotoionização (absorção da radiação solar por átomos e moléculas) além de outros fatores como a mobilidade de íons e elétrons que dependem da direção do campo magnético terrestre (INPE, 2021).

Usuários de receptores de simples frequência (L1) são significativamente afetados pelo efeito da ionosfera devido à impossibilidade de formação da combinação linear denominada de *ion-free* (livre da ionosfera), efetuada a partir da combinação linear das observações de receptores de dupla frequência (L1L2). No entanto, pesquisas associadas à modelagem e mitigação do efeito ionosférico de primeira ordem tem avançado no sentido da redução na perda de acurácia dos resultados obtidos no PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) realizado com dados de simples frequência, justificável pelas diversas estratégias de processamento utilizadas para explorar os efeitos ionosféricos, além da integração de dados GNSS multifrequência e multiconstelações no PPP (SETTI JUNIOR; ALVES; SILVA, 2019; SU; JIN; HOQUE, 2019).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos nos últimos anos pela comunidade geodésica sobre o comportamento do TEC e o impacto da ionosfera no posicionamento com GPS em diversas regiões do Brasil e do mundo, tais como: Dal Poz (2005), Marques et al. (2009), Matsuoka e Camargo (2009), Penha et al. (2011), Matsuoka et al. (2012), Marques (2012); Pereira e Camargo (2013), Matsuoka et al. (2013), Prol (2015), Lopes e Marques (2020) e Prol e Hoque (2021). Nesse sentido, utilizar séries temporais longas consiste em uma adição interessante ao tema, uma vez que as séries são compostas por um ou mais tipos de dados específicos, possibilitando diversas análises e a obtenção de informações sobre seu comportamento (tendencioso, cíclico ou sazonal), assim como as influências temporais de alguns fatores associados os dados (NASCIMENTO, 2016).

Nesse contexto, objetiva-se, com esta pesquisa, avaliar a influência da ionosfera e da atividade solar na acurácia do PPP utilizando observáveis GPS de simples frequência em diferentes regiões do Brasil com aplicação de análise de

séries temporais. Adicionalmente, uma vez que a densidade de elétrons na ionosfera depende da atividade solar, mostra-se também pertinente a análise de índices solares como o número de manchas solares e o fluxo solar a 10,7 cm para uma visão mais abrangente do comportamento da ionosfera e de sua influência no posicionamento por GPS.

IONOSFERA

A ionosfera consiste na componente da alta atmosfera eletricamente carregada, caracterizada por suas partículas livres, neutras e carregadas, constituindo-se em um meio dispersivo quando se considera a propagação de sinais eletromagnéticos (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; KELLEY, 2009).

Dentre os parâmetros que exercem forte influência na variação da densidade de elétrons na ionosfera pode-se destacar a localização geográfica, uma vez que a estrutura ionosférica global não é homogênea. Fundamentando-se nesta não homogeneidade, divide-se a ionosfera em três grandes regiões de acordo com a latitude geomagnética: altas latitudes, médias latitudes e região equatorial. Salienta-se que as amplitudes dessas regiões da ionosfera não podem ser projetadas na superfície terrestre com exatidão (MATSUOKA, 2007).

A região equatorial está situada entre $\pm 30^\circ$ do equador geomagnético. No entanto, essa região ainda pode ser subdividida entre a região equatorial propriamente dita, situada aproximadamente entre $\pm 5^\circ$ do equador geomagnético, e a região de baixas latitudes, aproximadamente entre -5° e -30° e 5° e 30° do equador geomagnético (MATSUOKA, 2007). Efeitos significativos de cintilação são observados nessa região, com os efeitos mais fortes acontecendo aproximadamente $\pm 10^\circ$ de latitude geomagnética (EL GIZAWY, 2003; JEREZ; PEREIRA; ALVES, 2017; JEREZ et al., 2020).

As variações temporais do TEC ocorrem: 1) diurnamente, em consequência das mudanças em algumas regiões da ionosfera ocasionadas pelos processos de fotoionização (quando há absorção da radiação por átomos e moléculas produzindo elétrons livres) e recombinação dos elétrons aos íons (à noite); 2) em virtude dos processos de transporte orientado pelo campo geomagnético; 3) sazonalmente, que ocorrem devido à mudança do ângulo zenital do Sol e da intensidade do fluxo de ionização; 4) devido às variações de ciclos de longos períodos – de aproximadamente 11 anos – relacionadas às ocorrências de manchas solares; 5) devido a irregularidades como a cintilação ionosférica e a anomalia equatorial de ionização (MONICO, 2008; VANI, 2014; SILVA, 2018).

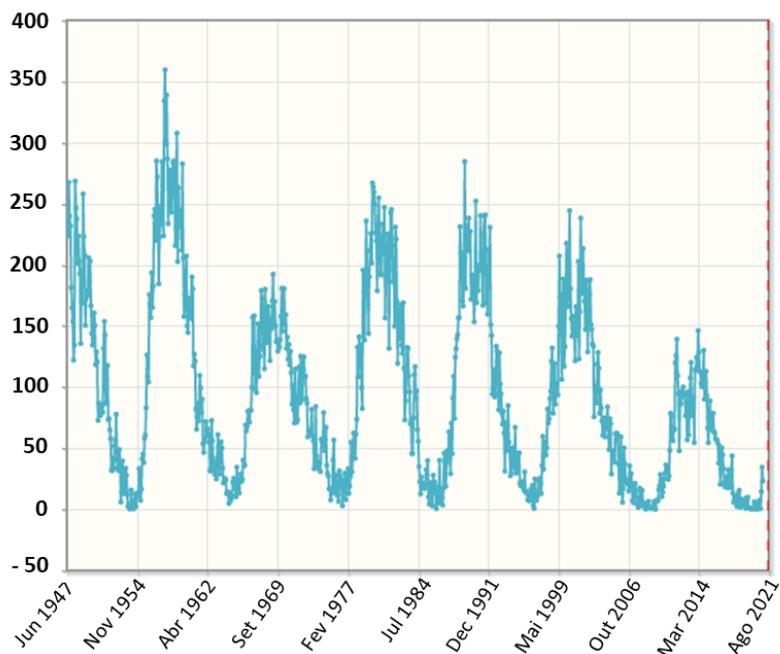
Diversos trabalhos que descrevem detalhadamente a ionosfera podem ser encontrados na literatura, tais como Webster (1993), Dal Poz (2005), Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008), Kelley (2009), Vani (2014), Prol (2015), Lopes e Marques (2020) e Prol e Hoque (2021).

MANCHAS SOLARES E FLUXO SOLAR A 10,7 CM

Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008) afirmam que as manchas solares são regiões com forte magnetismo que aparecem como áreas escuras na

superfície do sol. Dessa forma, tendem a se formar em grupos e são rodeadas por regiões mais brilhantes que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta, ocasionando mudanças na densidade de elétrons na ionosfera da Terra (DAL POZ, 2005). Uma mancha solar normalmente apresenta um diâmetro maior que o diâmetro da Terra, e seu período de duração pode variar de alguns dias à várias rotações solares – cada rotação corresponde a 27 dias, aproximadamente (McNAMARA, 1991; SCHAER, 1999). O número médio mensal de manchas solares dos últimos seis ciclos solares pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Número médio mensal de manchas solares– Ciclos solares

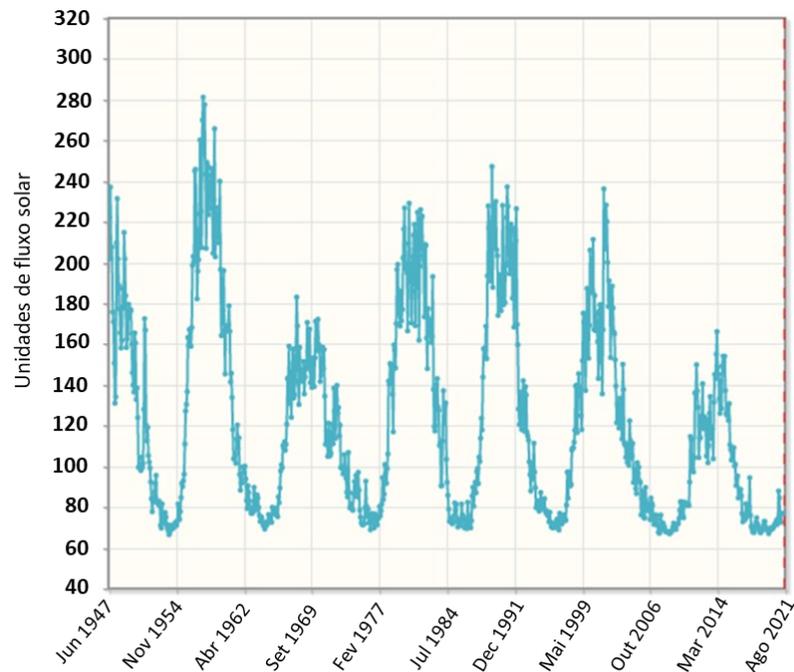


Fonte: Staff Viewer (2021).

Matsuoka et al. (2012) salientam que quanto maior o número de manchas solares, maior é o nível de radiação solar (Raios-X e EUV – Ultravioleta extremo). Esta radiação solar, que produz fotoionização, é normalmente substituída pelo fluxo solar a 10,7 cm (2800 MHz) nos modelos ionosféricos, já que, além deles possuírem alta correlação, o fluxo solar a 10,7 cm é um índice confiável e de fácil obtenção, apresentando poucas falhas ou problemas de calibração. Tal índice é comumente chamado de F10,7, e é um excelente indicador da atividade solar, sendo um dos registros de atividade solar mais antigos em uso, cujas mensurações são efetuadas consistentemente desde 1947. Diferente de outros índices solares, o F10,7 pode ser medido com confiança e acurácia diariamente da superfície da Terra, independente das condições climáticas. Ademais, destaca-se que as emissões de rádio F10,7 se originam na alta cromosfera e na parte baixa da corona solar, e por isso se correlaciona bem com outras importantes emissões que se formam na mesma região da atmosfera solar (NOAA, 2021).

A Figura 2 mostra os valores médios mensais do fluxo solar a 10,7 cm desde 1947.

Figura 2 – Fluxo solar a 10,7 cm, valores médios mensais ajustados



Fonte: Staff Viewer (2021).

Disponibilizado em “unidades de fluxo solar ou *solar flux units – sfu*” em que $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$, o F10,7 diário pode variar de pouco menos de 50 sfu até mais de 300 sfu ao longo do ciclo solar. Como a órbita da Terra ao redor do Sol é elíptica, considerando uma mesma emissão solar, a Terra recebe uma radiação menor quando está mais longe do sol (afélio, em julho) do que quando está mais próxima (periélio, no início de janeiro). Portanto, o valor do fluxo solar diário deve ser corrigido dessa diferença de distância, sendo ajustado para a distância média Terra-Sol – 1 unidade astronômica (TAPPING, 2013).

ARQUIVOS DO TEC

Diversas instituições e centros de pesquisa tem estimado e disponibilizado produtos associados ao TEC. Nesse sentido, o centro de análises associado do IGS (*International GNSS Service*) tem fornecido produtos contendo VTEC (*Vertical TEC – TEC na direção vertical*) desde 1998. Tais produtos são derivados dos dados coletados pela sua rede de receptores de dupla frequência. Os produtos da ionosfera são disponibilizados em soluções rápidas, com latência menor que 24 horas, solução final com latência de aproximadamente 11 dias, além de previsões para um e dois dias (CDDIS, 2021). Detalhes sobre algumas metodologias para a cálculo do TEC pode ser consultada em Carmo (2018).

Atualmente os valores de VTEC são disponibilizados diariamente como mapas no formato IONEX (*IONosphere map EXchange format*), cujos grids apresentam resolução espacial de 5° longitude por 2,5° de latitude e resolução temporal de 2 horas. Roma-Dollase et al. (2017) destacam que diversos centros de análise participam da geração desses mapas, tais como: o CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*); a ESA/ESOC (*European Space Agency/European Space*

Operations Center); o JPL (*Jet Propulsion Laboratory*); o UPC (*Polytechnical University of Catalonia*); o NRCan (*Natural Resources Canada*); e a CAS (*Chinese Academy of Sciences*). Maiores detalhes sobre os mapas da ionosfera podem ser consultados em Aguiar (2010) e Roma-Dollase et al. (2017).

Desde 2002, para cada dia, os arquivos IONEX produzidos individualmente pelos centros de análise supramencionados são combinados para resultar em um único arquivo global do VTEC, ou mapa global da ionosfera (*Global Ionospheric Maps – GIMs*) (PENHA, 2011). Os arquivos finais podem ser encontrados em: <<https://cdis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/>>.

Serviços de PPP online, como o IBGE-PPP, oferecido pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), utilizam os arquivos IONEX para a correção de parte dos efeitos decorrentes do adiantamento ou atraso da propagação dos sinais ocasionados pela ionosfera, visando melhorar os resultados do processamento de arquivos de observação que contenham apenas a observável L1 (receptores de simples frequência, por exemplo). De fato, a utilização destes arquivos pelo IBGE-PPP proporcionou uma melhoria na precisão das coordenadas determinadas utilizando a observável L1 de aproximadamente 40% na planimetria e 50% na altimetria (IBGE, 2020). Portanto, o IBGE-PPP não elimina completamente os erros inerentes à ionosfera.

IBGE-PPP

O IBGE-PPP (IBGE-PPP, 2021) é um serviço online gratuito e consiste em uma adaptação do CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System - PPP*) (atualmente versão 1.05/11216 – atualizada em 07/04/2017) para uso no Brasil, processando dados GPS e GLONASS de maneira isolada e/ou simultânea. Este serviço fornece resultados acurados tanto na realização do IGS na época de coleta dos dados (atualmente IGB14, compatível e alinhado com o ITRF2014 – *International Terrestrial Reference Frame 2014*), quanto no SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000). Neste último, disponibiliza-se as coordenadas também na época de referência do sistema (2000,4), cuja redução das coordenadas é efetuada aplicando-se as velocidades extraídas do VEMOS2009 (Modelo de Velocidade para o SIRGAS 2009) (COSTA et al., 2012; DREWES; HEIDBACH, 2012; IBGE, 2020).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros considerados no IBGE-PPP para o processamento de dados GNSS.

Tabela 1 – Estratégia de processamento do IBGE-PPP

Parâmetros IBGE-PPP	
Intervalo das observações	15 segundos
Produtos orbitais	NRCan finais/precisos (GPS/GLONASS)
Modelo de cargas oceânicas	FES2004
Modelo de carga atmosférica	Não aplicado
Maré Terrestre	IERS Conventions, 2010
Parâmetros absolutos de calibração e offset do centro de fase das antenas dos satélites e receptores	PCV.I14 (ANTEX format)
Máscara de elevação	10°
Realização do referencial	IGb14
Sistemas GNSS	GPS e GLONASS
Ionosfera	IONEX/BRDC (L1) ou L3 (L1L2)
Modelo a priori do atraso troposférico	Modelo Davis/GPT2 (Global Pressure and Temperature 2)
Função de Mapeamento	GMF
Componente úmida do atraso troposférico	Estimada
Gradientes horizontais	Estimada

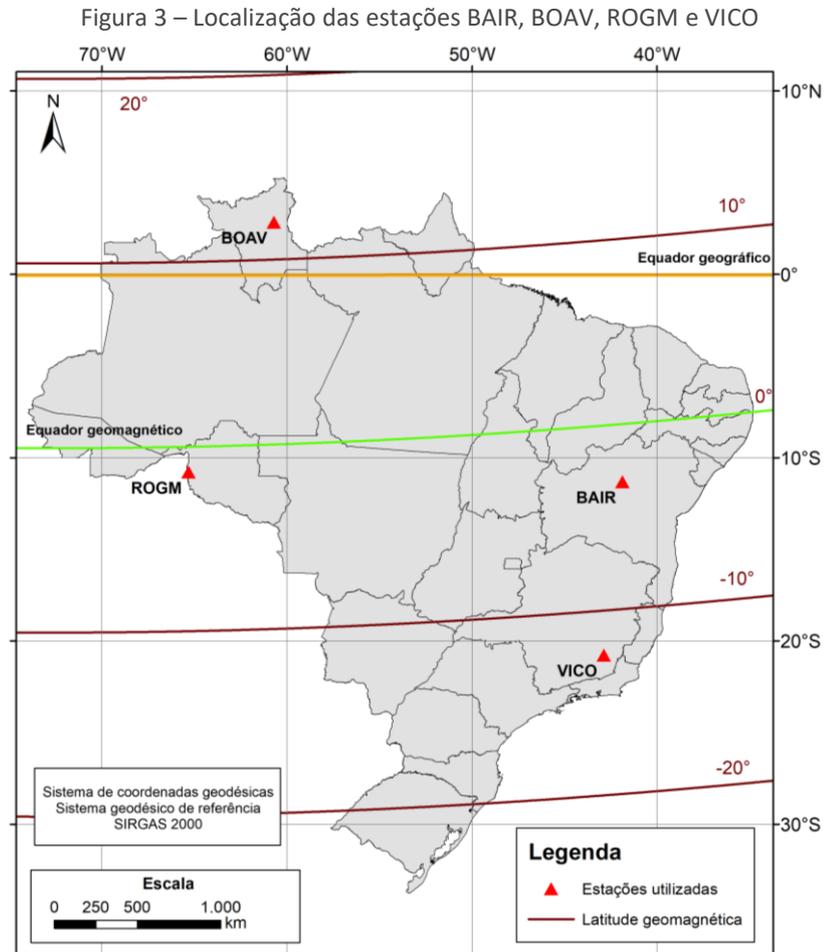
Fonte: Adaptado de Braga e Dal Poz (2019).

Salienta-se que há outros serviços de PPP disponibilizados online. No entanto, enfatizou-se o IBGE-PPP devido à sua utilização nesta pesquisa, a partir do programa computacional denominado RINEX-EDITION. Tal programa viabiliza a construção de séries temporais de informações posicionais (coordenadas cartesianas X, Y, Z ; elipsoidais ϕ, λ, h e as precisões de ambas) a partir de dados GNSS (GPS e GLONASS) das estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento contínuo dos Sistemas GNSS) (RBMC, 2021; COSTA et al., 2018) em conjunto com o serviço online IBGE-PPP. Caso necessário, é possível editar os arquivos RINEX de forma automatizada utilizando o TEQC (*Translation, Editing and Quality Check*) (ESTEY; MEERTENS, 1999; UNAVCO, 2021). Para mais informações sobre as funções e metodologia empregada pelo RINEX EDITION consultar Nascimento et al. (2017).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foram utilizados dados de observação GNSS (GPS e GLONASS) de quatro estações da RBMC – BOAV (2,8°N, 60,7°W; 12,1°N latitude geomagnética), ROGM (10,7°S, 65,3°W; 1,4°S latitude geomagnética), BAIR (11,3°S, 41,9°W; 3,1°S latitude geomagnética) e VICO (20,8°S, 42,8°W; 12,5°S latitude geomagnética) – com janela de rastreamento de 24 horas, disponibilizados gratuitamente pelo IBGE em sua página eletrônica. A disposição e identificação das estações podem ser verificados nas Figura 3. As estações foram escolhidas de forma a ilustrar e comparar a variação do VTEC nas regiões equatorial e de baixas latitudes, nas quais o Brasil está localizado e, portanto, são mais afetadas pela atividade irregular da ionosfera (AGUIAR; KOZELINSKI, 2015). Além disso, buscou-se representar as regiões geográficas brasileiras de forma a garantir uma ampla distribuição espacial entre as estações.

Também foram utilizados dados do VTEC no formato IONEX, disponibilizados pelo IGS; dados do número de manchas solares, disponibilizados pelo SILSO (*Sunspot Index and Long-term Solar Observations*) e dados de fluxo solar (10,7 cm) ajustados, disponibilizados pelo NRCAN. Salienta-se que o IGS, SILSO e NRCAN disponibilizam os referidos dados gratuitamente em suas respectivas páginas eletrônicas.



Fonte: Adaptado de Chulliat *et al.* (2014).

As séries temporais relacionadas às quatro estações selecionadas são referentes ao período de 01/01/2010 a 31/05/2017, totalizando 2.708 dias, aproximadamente 7,5 anos.

Utilizando o *software* RINEX EDITION, editou-se os arquivos RINEX disponíveis para as estações escolhidas, obtendo-se arquivos contendo apenas observações GPS L1/C1, que foram processados no IBGE-PPP. Dessa forma, foram obtidas as séries temporais de dados posicionais (coordenadas cartesianas X, Y, Z ; elipsoidais ϕ, λ, h e as precisões de ambas) referenciados ao SIRGAS2000, época de coleta dos dados, das quatro estações. No entanto, o IBGE-PPP também fornece as coordenadas referenciados ao SIRGAS2000 na época 2000,4, mas estas não são disponibilizadas pelo RINEX EDITION por não estarem disponíveis no arquivo de sumário do processamento.

Nesse sentido, reduziu-se as coordenadas SIRGAS2000 da época de coleta dos dados (t_o) para a época de referência ($t = 2000,4$) aplicando-se a Equação 1 (CARVALHO et al., 2015):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{d(t)} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{d(t_o)} + \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_d (t - t_o), \quad (1)$$

em que $[X, Y, Z]_{d(t)}^T$ são as coordenadas da estação na época e referencial de interesse (d); $[X, Y, Z]_{d(t_o)}^T$ são as coordenadas cartesianas da estação na época de origem e referencial de interesse (d); $[V_X, V_Y, V_Z]_d^T$ são os vetores velocidade do ponto considerado na época t_o .

As componentes de velocidade adotadas neste trabalho foram determinadas com o VEMOS2009 (Modelo de Velocidade para o SIRGAS, versão 2009) e são referenciadas ao ITRF2005 (DREWES; HEIDBACH, 2012). Salienta-se que este modelo apresenta um resultado satisfatório nos processos de redução/atualização de coordenadas no território brasileiro, como mostrado por Freitas, Dal Poz e Nascimento (2021).

Com as séries posicionais das quatro estações reduzidas à época $t = 2000,4$ observou-se que estas apresentaram períodos de falhas (ausência de dados). Como as análises estatísticas executadas no *software* R exige que as séries não apresentem dados faltantes, fez-se necessário preencher os períodos de falhas. Dentre os diversos métodos para preenchimento de dados faltantes em séries temporais disponíveis no *software* R, utilizou-se a função `na.interp()` do pacote `forecast` (HYNDMAN, 2016) fundamentando-se nos resultados apresentados em Moritz et al. (2015). Esta função aplica uma interpolação linear para séries não sazonais e uma decomposição em tendência, sazonalidade e ruído (STL) para séries com sazonalidade e/ou tendência. Nesse caso, se retira as componentes de tendência e sazonalidade, aplica-se a interpolação e posteriormente as componentes são reinseridas (MORITZ et al., 2015).

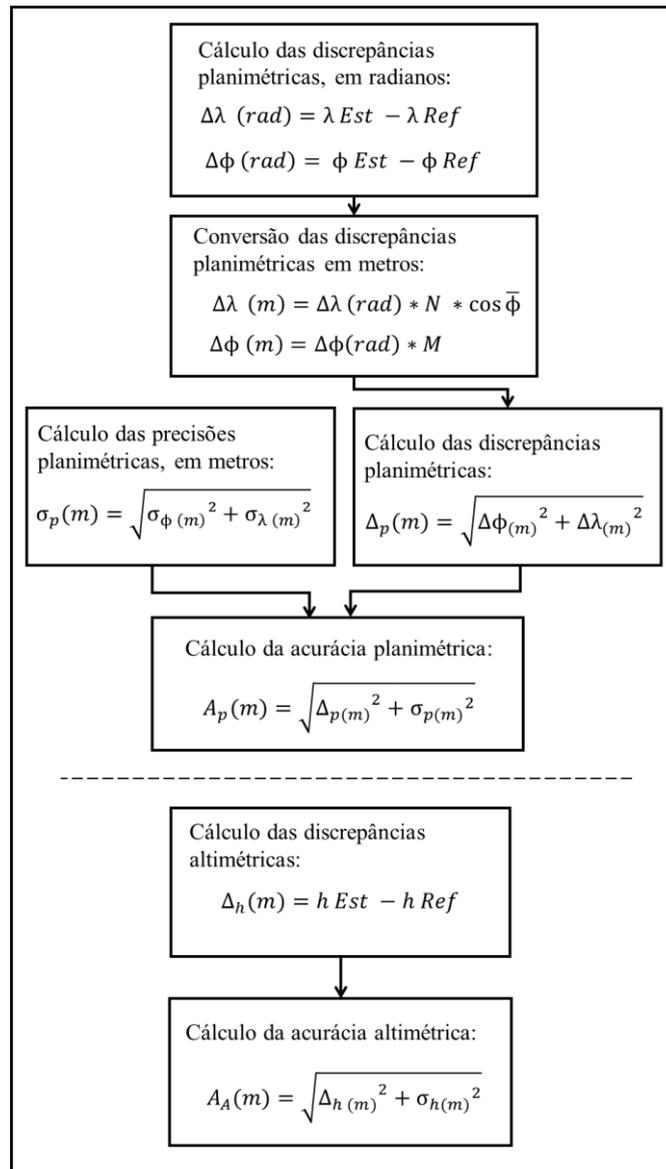
É importante frisar que os deslocamentos verticais derivados dos dados coletados por receptores GNSS podem refletir efeitos de maiores amplitudes relacionados aos deslocamentos associados às estações, tais como: o de marés terrestres, de marés polares e de carga oceânica. No entanto, tais efeitos são considerados e modelados no IBGE-PPP e, portanto, considerou-se que as séries temporais refletem principalmente uma parcela significativa dos efeitos de primeira ordem da ionosfera. Como mencionado anteriormente, o IBGE-PPP utiliza os arquivos IONEX para a correção de parte dos efeitos de primeira ordem da ionosfera.

Salienta-se que foi aplicado às séries posicionais um simples filtro de médias móveis centradas de ordem 12 (doze) através da função `ma()` pertencente ao pacote `forecast`, como realizado por Nascimento et al. (2017), com o objetivo de suavizar as curvas e reduzir as oscilações dos ruídos (resíduos) das séries. As análises apresentadas nesta pesquisa foram efetuadas sobre as séries posicionais filtradas.

De posse das séries posicionais reduzidas e das coordenadas de referência, obtidas nos descritivos de cada estação, também em SIRGAS2000 na época $t = 2000,4$, procedeu-se ao cálculo das acurácias posicionais. Todos os modelos

matemáticos e etapas necessárias nesta etapa são mostrados no fluxograma disposto na Figura 4. Como as discrepâncias são obtidas em unidade curvilínea (radiano), fez-se necessário a conversão destas para unidade linear (metro). Salienta-se que as precisões utilizadas ($\sigma\varphi$, $\sigma\lambda$ e σh) foram fornecidas pelo IBGE-PPP.

Figura 4 – Sequência para o cálculo das discrepâncias, precisões e acurácias



Fonte: Autoria própria (2021).

Salienta-se que λEst é a longitude estimada; λRef é a longitude de referência; φEst é a latitude estimada; φRef é a latitude de referência; $h Est$ é a altitude geométrica estimada; $h Ref$ é a altitude geométrica de referência; M é o raio de curvatura da seção meridiana; N o raio de curvatura da seção primeiro vertical; e $\bar{\varphi}$ é a média entre as latitudes de referência e estimada.

As séries do VTEC foram obtidas a partir de uma rotina implementada em MATLAB para a leitura e interpolação dos arquivos IONEX. Inicialmente calculou-se o valor médio diário do VTEC a partir dos dados disponíveis de 2 em 2h. Na

sequência, como os valores do VTEC são fornecidos nestes arquivos em uma grade de 5° longitude por 2,5° de latitude, realizou-se uma interpolação linear espacial para a obtenção dos valores correspondentes à localização das estações utilizadas. Destaca-se que as séries do VTEC já apresentaram curvas suavizadas, dispensando assim a aplicação do filtro de médias móveis.

Adicionalmente, as séries do número total diário de manchas solares foram obtidas em SILSO (2021), enquanto as séries referentes aos valores diários do fluxo solar a 10,7 cm foram obtidas em Spaceweather (2021). Saliencia-se que os dados de manchas solares utilizados para as estações correspondem ao número total de manchas contidos nos dois hemisférios solar.

Após a construção das séries temporais, procedeu-se a elaboração de scripts no *software* R para a análise exploratório-estatística dos dados. Inicialmente elaborou-se os gráficos das séries em estudo para avaliação do comportamento do conjunto de dados por meio de inspeção visual para identificação de possíveis discontinuidades e características como tendência e/ou sazonalidade. A normalidade das séries foi verificada com a aplicação dos testes Shapiro-Wilk, a um nível de significância $\alpha = 5\%$. As séries de acurácia posicional e de índices solares e VTEC tiveram sua independência testada com a aplicação do teste Qui-quadrado a um nível de significância $\alpha = 5\%$. Considerando a possibilidade de ocorrência de tendência e sazonalidade aplicou-se os testes de Cox-Stuart e Kruskal-Wallis, a um nível de significância $\alpha = 5\%$, para teste da existência de tais características.

No *software* R, o teste de Cox-Stuart é aplicado através da função `cox.stuart.test()` disponível no pacote `randtests` (CAEIRO; MATEUS, 2014) para a análise de tendência; o teste de Kruskal-Wallis utiliza a função `kruskal.test()` disponível no pacote `stats` (R CORE TEAM, 2021) para análise de sazonalidade; o teste de Shapiro-Wilk utiliza a função `shapiro.test()` do pacote `stats`. Tais testes de hipóteses supramencionados fornecem o parâmetro valor de prova (p-valor ou significância), que possibilita a adoção da regra de decisão associada à rejeição da hipótese nula (H_0) de forma que: (i) se $p\text{-valor} \leq \alpha$, rejeita-se H_0 ; (ii) se $p\text{-valor} > \alpha$, não se rejeita H_0 . Detalhes sobre a descrição e aplicações dos testes estatísticos empregados podem ser conferidos em Morettin e Tolo (2006) e Box, Jenkins e Reinsel (2008).

Por fim, efetuou-se a análise de correlação entre as séries baseando-se no coeficiente de correlação linear de Spearman (ρ). Este coeficiente mede a intensidade da relação linear entre variáveis ordinais, portanto, os conjuntos de dados a serem considerados devem estar ordenados. Interpretou-se o coeficiente de correlação ρ de acordo com Franzblau (1958):

- Se $|\rho| < 0,20$, a correlação é negligenciável;
- Se $0,20 < |\rho| < 0,40$, a correlação é fraca;
- Se $0,40 < |\rho| < 0,60$, a correlação é moderada;
- Se $0,60 < |\rho| < 0,80$, a correlação é forte;
- Se $|\rho| > 0,80$, a correlação é muito forte.

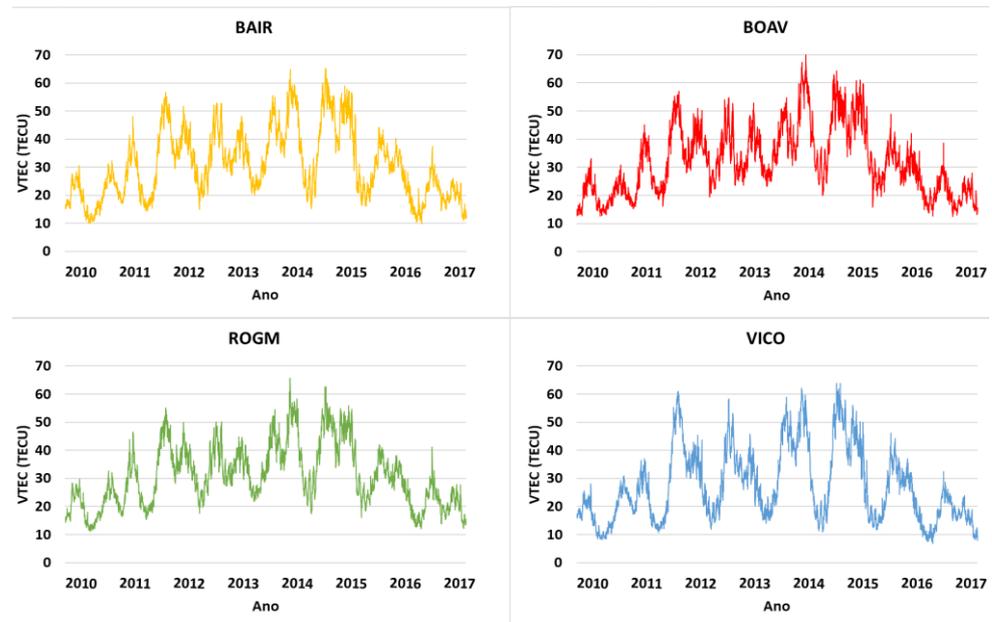
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, salienta-se que com a finalidade de melhorar a visualização e o entendimento, bem como tornar as análises mais claras e consistentes, optou-se por apresentar os resultados de forma separada, conforme os experimentos descritos na sequência.

ANÁLISE DAS SÉRIES DO VTEC

Considerando que as estações BAIR e ROGM estão situadas na região equatorial geomagnética e as estações BOAV e VICO em regiões de baixas latitudes pode-se observar uma diferença de magnitude do VTEC entre elas. Adicionalmente, verificou-se que os maiores picos ocorreram na estação VICO entre os anos de 2011 e 2014, o que pode ser justificável por sua proximidade da região da AIE (Anomalia de Ionização Equatorial), também conhecida como Anomalia de Appleton. Tal anomalia é caracterizada por apresentar os maiores valores globais (picos) de densidade eletrônica para a região de baixa latitude geomagnética (NOGUEIRA, 2009). A Figura 5 mostra o comportamento do VTEC ao longo período considerado nas séries para cada estação.

Figura 5 – Séries do valor médio diário do VTEC para as quatro estações consideradas



Fonte: Autoria própria (2021).

Conforme Tabela 2, a estação VICO apresentou o menor valor médio do VTEC. As estações BAIR e ROGM, situadas na região geomagnética equatorial e próximas ao equador geomagnético apresentaram valores de VTEC muito próximos. De fato, esse comportamento se justifica por estas estações estarem em latitudes geomagnéticas próximas, com diferença de aproximadamente $1,7^\circ$. A estação BOAV, por estar mais ao norte dentre as estações analisadas, apresentou o maior valor médio do VTEC e o terceiro maior desvio padrão.

O valor médio da acurácia planimétrica da estação VICO seguiu o mesmo comportamento do VTEC, conforme Tabela 2. Por outro lado, a acurácia altimétrica

apresentou o menor valor médio nas estações BAIR e BOAV. Destaca-se que as médias consideradas para o VTEC foram obtidas das séries do VTEC médio diário. Nesse sentido, como há variação diária do TEC para horários específicos em diferentes posições, estas dependentes do azimute e elevação dos satélites, a utilização da média das séries pode ter degradado os resultados. Ademais, a estação VICO, próxima à região da AIE também pode ter seus resultados “maquiados” pela média das séries, uma vez que os efeitos desta anomalia são mais evidentes em épocas específicas e dependem, por exemplo, de fatores como a posição geográfica, os ventos meridionais, tempestades magnéticas etc. (NOGUEIRA, 2009).

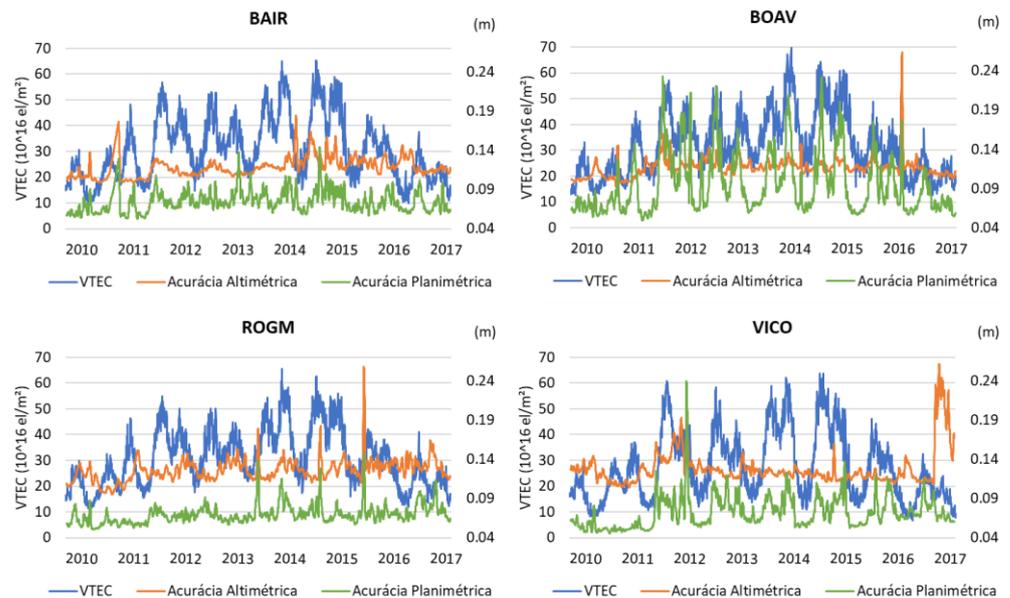
Tabela 2 – Média e desvio padrão (DP) das séries do VTEC médio diário, acurácia altimétrica e acurácia planimétrica

Estação	VTEC (TECU)				Acurácia A. (m)		Acurácia P. (m)	
	média	DP	Máx.	Mín.	média	DP	média	DP
BAIR	29,2	12,1	65,3	9,9	0,117	0,013	0,073	0,014
BOAV	30,2	11,8	69,9	12,6	0,117	0,013	0,080	0,038
ROGM	29,5	10,9	65,6	11,2	0,126	0,014	0,068	0,012
VICO	24,2	13,0	63,8	6,7	0,122	0,023	0,068	0,020

Fonte: Autoria própria (2021).

Considerando as séries do VTEC médio diário (escala à esquerda) e das acurácias planimétrica e altimétrica (escala à direita) dispostas na Figura 6, pode-se notar que há similaridade significativa no comportamento entre as séries do VTEC e da acurácia planimétrica das estações BOAV e VICO, seguida pela estação BAIR. Tal similaridade não foi tão evidente para a estação ROGM, mesmo estando localizada nas proximidades do equador geomagnético. Nesse sentido, evidencia-se que a influência da atividade ionosférica na acurácia planimétrica, para dados de simples frequência, é dependente de sua localização geográfica. Noutro ângulo, ao observar as séries do VTEC e de acurácia altimétrica, verifica-se que maiores similaridades ocorreram na estação ROGM, destacando que a atividade ionosférica afeta mais as componentes altimétricas das estações próximas ao equador geomagnético.

Figura 6 – Séries do VTEC médio diário, acurácia altimétrica e planimétrica nas quatro estações consideradas



Fonte: Autoria própria (2021).

Picos podem ser observados nas séries das acurácias planimétricas e altimétricas das estações BAIR, BOAV e ROGM entre os anos de 2010 e 2011; 2016 e 2017; 2015 e 2016, respectivamente. Tais picos podem ter sido gerados no procedimento de preenchimento dos períodos de falhas. No entanto, suas causas devem ser investigadas. Adicionalmente, um comportamento anômalo pode ser observado na série da acurácia altimétrica da estação VICO entre os anos de 2016 e 2017 e também deve ter sua causa avaliada. Salienta-se que tal anomalia é evidenciada na série temporal de componente vertical da estação VICO disponibilizada por SIRGAS (2021).

Fundamentando-se na Tabela 2 e Figura 7 verifica-se que o maior valor para a acurácia planimétrica média foi evidenciado na estação BOAV e os menores nas estações ROGM e VICO. No entanto, a estação VICO apresentou maior desvio padrão em relação a ROGM, o que pode estar associado à sua proximidade da região da AIE. Considerando a acurácia altimétrica média observou-se que o maior valor foi observado para a estação ROGM e os menores para as estações BAIR e BOAV, respectivamente. Em relação às estações utilizadas, a estação BOAV apresentou a maior média e desvio padrão para a acurácia planimétrica, assim como o menor valor de acurácia altimétrica média e menor desvio padrão.

ANÁLISE DAS SÉRIES DO FLUXO SOLAR A 10.7CM E DO NÚMERO DE MANCHAS SOLARES

Considerando que o ciclo solar 24 teve início em 2008 e atingiu seu ápice em abril de 2014, verifica-se que o período considerado nas séries compreende a fase de ascensão, a fase máxima e de declínio do referido ciclo, como pode ser verificado na Figura 2.

Fundamentando-se nas séries do fluxo solar a 10,7cm e do número de manchas solares dispostas nas Figuras 7 e 8, pode-se verificar que existe uma

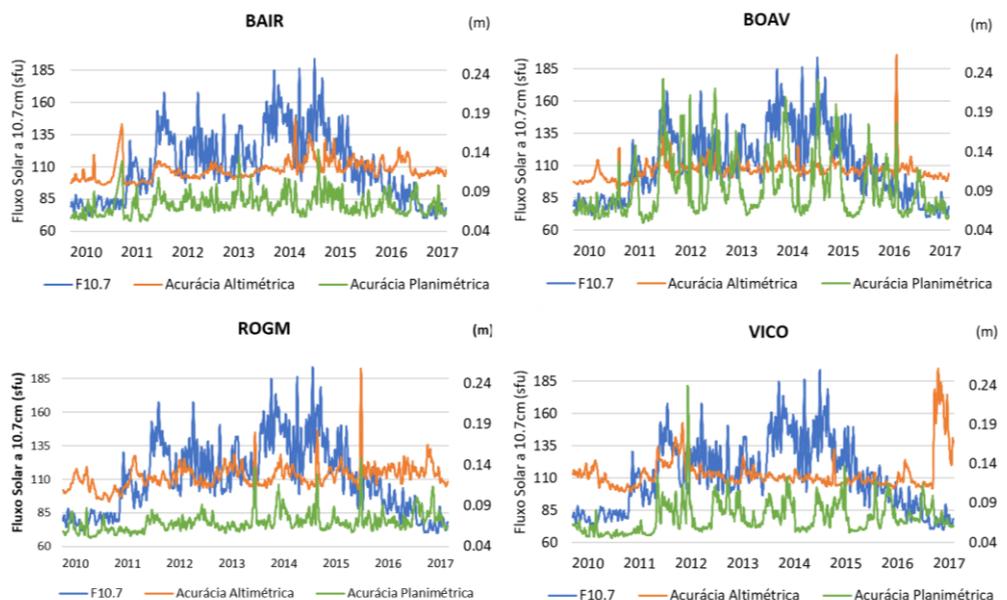
similaridade de comportamento entre tais variáveis, comprovando assim que quanto maior o número de manchas solares, maior é o nível de radiação solar e, conseqüentemente, maior o fluxo solar a 10,7cm.

Quando as séries do fluxo solar a 10,7cm são comparadas com as séries de acurácias planimétrica e altimétrica, evidenciadas na Figura 7, verifica-se que há relação no comportamento entre tais variáveis. Nesse caso, o efeito do fluxo solar foi mais evidente na acurácia planimétrica das estações BOAV, VICO e BAIR. Tal similaridade de comportamento não foi claramente evidenciada para as séries de acurácia altimétrica das estações consideradas. Contudo, salienta-se que o IBGE-PPP, como mencionado anteriormente, aplica os arquivos IONEX para a mitigação dos efeitos ionosféricos no posicionamento efetuado com dados de simples frequência, em que o maior percentual de redução ocorre para a componente altimétrica, o que pode justificar a baixa significância dos efeitos do fluxo solar na acurácia de tal componente.

Nesse contexto, Aguiar e Camargo (2006) mostram que a modelagem da atividade diária do efeito ionosférico possibilitou uma redução nas discrepâncias planimétricas e altimétricas médias, sendo que as reduções apresentadas variaram ao longo do dia e foram dependentes do horário considerado. Nesse sentido, como se utilizou nesta pesquisa os valores de acurácia planimétrica e altimétrica diários, isso pode ter influenciado os resultados obtidos.

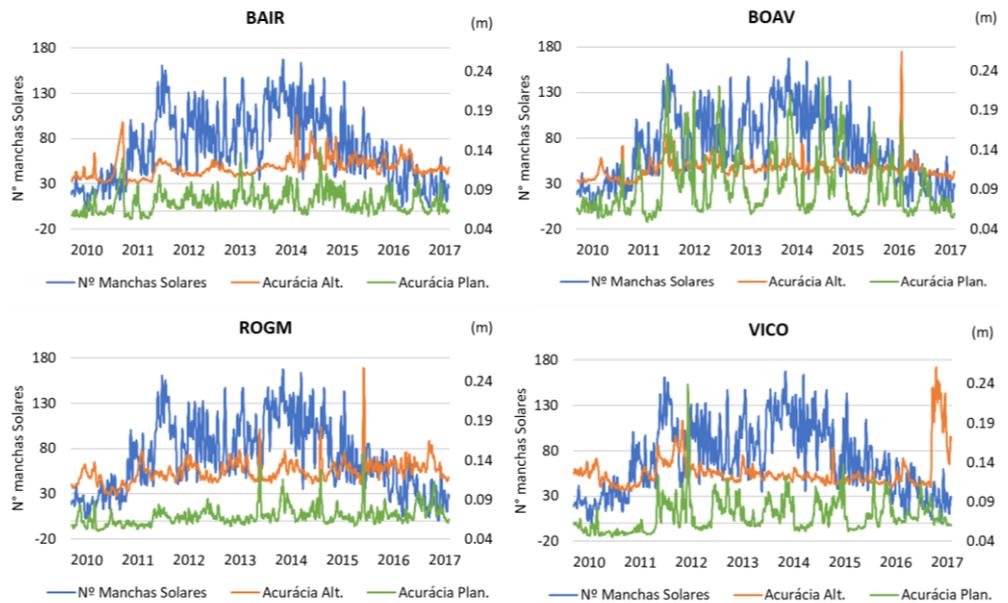
Comportamento similar ao observado entre o fluxo solar a 10,7cm com as séries de acurácias planimétrica e altimétrica pode ser verificado entre as séries do número de manchas solares e das acurácias planimétrica e altimétrica dispostas na Figura 8.

Figura 7 – Séries do Fluxo solar a 10.7cm, acurácia altimétrica e planimétrica nas quatro estações consideradas



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 8 – Comparação entre as séries do número de manchas solares, acurácia altimétrica e planimétrica



Fonte: Autoria própria (2021).

Nesse contexto, verificou-se que a fase máxima do ciclo solar não exerceu influência significativa nas acurácias para o mesmo período, assim como os períodos de ascensão e declínio não apresentaram similaridade quanto ao comportamento das séries das acurácias posicionais.

ANÁLISES SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DAS SÉRIES TEMPORAIS

Após a aplicação do teste de Shapiro-Wilk para normalidade, constatou-se que o conjunto de dados que compõe cada uma das séries consideradas não apresenta distribuição normal. A independência foi atestada fundamentando-se nos resultados do teste Qui-quadrado, em que se analisou o pareamento das séries da acurácia planimétrica e altimétrica com as séries de índices solares e VTEC. Os resultados mostraram que todas as séries são independentes.

Quanto à sazonalidade, verificou-se que os resultados obtidos com a aplicação do teste de Kruskal-Wallis foram variados, em que as séries do VTEC e das acurácias planimétricas apresentaram sazonalidade nas quatro estações, como pode ser visualizado nas Figuras 5 e 6. Ademais, constatou-se que as séries do F10,7 e do número de manchas solares não apresentaram sazonalidade. Salienta-se que a sazonalidade evidenciada pelo VTEC pode estar associada, dentre outros fatores, à ação dos ventos meridionais (NOGUEIRA, 2009).

Considerando o teste de Cox-Stuart verificou-se que a série da acurácia altimétrica apresentou comportamento tendencioso nas quatro estações. Noutro ângulo, apenas a série de acurácia planimétrica da estação BAIR não apresentou tendência, ou seja, apresentou tendência em três estações (BOAV, RGOM e VICO). O VTEC não apresentou tendência nas quatro estações consideradas.

Todos os resultados dos testes de tendência e sazonalidade das séries podem ser visualizados no Tabela 3.

Tabela 3 – Testes de tendência (T) e sazonalidade (S) das séries

Série	BAIR		BOAV		ROGM		VICO	
	T	S	T	S	T	S	T	S
VTEC	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Acur. Alt.	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Não
Acur. Plan.	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Autoria própria (2021).

Nesse sentido, verifica-se que o VTEC e a acurácia planimétrica apresentam similaridade quanto a ocorrência de sazonalidade em todas as estações, o que ocorre somente para a acurácia altimétrica da estação ROGM. Tal fato pode estar associado à sua proximidade com o equador geomagnético.

ANÁLISES SOBRE AS CORRELAÇÕES

Em termos das correlações, optou-se pela utilização do coeficiente de correlação de Spearman, justificável pela não normalidade das séries analisadas.

A série do fluxo solar a 10,7 cm apresentou correlação de 93,5% com o número de manchas solares, mostrando que o F10,7 é um bom indicador da atividade solar. Em relação ao VTEC, verificou-se que este apresentou maior correlação com o F10,7 do que com as séries do número de manchas solares em todas as estações. Essa alta correlação do F10,7 com o conteúdo total de elétrons condiz com os resultados esperados, como explicado anteriormente. Além disso, constatou-se que uma maior correlação do VTEC com os índices solares está diretamente ligada à proximidade da estação com a linha do equador geográfico, uma vez que essa região recebe maior radiação solar. As correlações entre as séries do VTEC, F10,7 e número de manchas solares podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Correlações entre VTEC, F10,7 e nº de manchas solares

Parâmetros	BAIR (%)	BOAV (%)	ROGM (%)	VICO (%)
VTEC/Nº Manchas	68,3	75,9	71,2	58,2
VTEC/F10,7	74,5	82,1	77,4	64,3

Fonte: Autoria própria (2021).

As correlações entre as séries de acurácia altimétrica e a série F10,7 dispostas na Tabela 5 mostram que correlação moderada de 51,3% foi observada para estação BOAV. Já nas demais estações a correlação foi fraca, não atingindo 33,0%. Portanto, o fluxo solar a 10,7 cm não se mostrou um índice satisfatório para o estudo do comportamento da acurácia altimétrica através de series temporais de dados diários.

Fundamentando-se na série do número de manchas solares e de acurácias altimétricas, verificou-se que sua maior correlação ocorreu na estação BOAV (48,3%), não atingindo 23,0% nas demais estações. Assim, o número de manchas solares também não se mostrou um índice satisfatório para o estudo do comportamento da acurácia altimétrica através de series temporais de dados diários.

Tabela 5 – Correlações da acurácia altimétrica

Parâmetros	BAIR (%)	BOAV (%)	ROGM (%)	VICO (%)
VTEC	31,0	50,8	6,6	-11,0
F10,7	32,7	51,3	3,9	6,9
Nº manchas solares	23,4	48,3	4,7	12,0

Fonte: Autoria própria (2021).

As correlações fracas e moderadas desses índices solares com a acurácia altimétrica contrastam com os resultados encontrados no trabalho desenvolvido por Matsuoka et al. (2012), onde foi obtida uma correlação de 80% da acurácia altimétrica com o número de manchas solares e 85% com o F10,7 na estação POAL, para um conjunto de dados de 10 anos (janeiro de 2002 a dezembro de 2011). Salienta-se que no trabalho supracitado os autores usaram dados mensais e processaram apenas o código C/A modulado na portadora L1 e no presente trabalho processou-se o código C/A e fase da onda portadora L1. Adicionalmente, como já destacado anteriormente, a aplicação dos arquivos IONEX pelo IBGE-PPP proporciona uma redução nos efeitos da ionosfera e, portanto, pode ter influenciado os resultados.

Analisando as séries da acurácia planimétrica com o F10,7, pode-se observar que os maiores valores de correlação foram 50,4% e 45,0% para as estações BOAV, e BAIR, respectivamente. As demais correlações foram fracas e não atingiram 36,0%. Desta forma, foi possível observar um impacto moderado do F10,7 na acurácia planimétrica nas estações BAIR e BOAV.

A maior correlação da acurácia planimétrica com o número de manchas solares foi 46,2% na estação BOAV. As demais correlações não atingiram 37,0%, com a menor ocorrendo na VICO (20,8%). Desta forma, o número de manchas solares não se mostrou um índice satisfatório para o estudo do comportamento da acurácia planimétrica através de séries temporais de dados diários.

Considerando as séries do VTEC, observou-se que sua maior correlação ocorreu com a acurácia altimétrica na estação BOAV, 50,8%. As demais correlações não atingiram 32,0%, com a VICO apresentando uma correlação inversa de 11,0%, conforme apresentado na Tabela 4. Logo, não se constatou uma forte influência do VTEC na acurácia altimétrica no PPP.

No trabalho desenvolvido por Collischonn et al. (2014) utilizando dados processados apenas com o código C/A modulado na portado L1, foi verificada uma correlação significativa entre a atividade ionosférica e índices solares com a acurácia planimétrica e altimétrica, sendo maior nesta última. Destaca-se que neste estudo não foi aplicado nenhum modelo para correção do efeito devido à ionosfera, além da utilização de valores médios mensais do VTEC e F10.7. Além disso, o período considerado no estudo corresponde ao ciclo solar de número 23, cuja atividade solar apresentou maior magnitude, o que pode ter contribuído para a significância das correlações lineares obtidas. Segundo Dorian (2016) o ciclo solar 24, no qual o período de 2010 a 2017 considerado nesta pesquisa está inserido, é o ciclo mais fraco dos últimos cem anos e um dos ciclos de menor intensidade se comparado aos 23 anteriores. Como uma maior atividade solar contribui para melhorias na correlação, já que fenômenos de maior amplitude tendem a atenuar

os erros existentes na correlação, as características dos ciclos podem ter influenciado os resultados.

Para a acurácia planimétrica, as maiores correlações com o VTEC foram 71,7% e 63,7%, nas estações BOAV e VICO, respectivamente, com as demais correlações sendo de 55,8% e 32,8% (ver Tabela 6). Portanto, foi possível notar uma forte influência da ionosfera na acurácia planimétrica de coordenadas estimadas pelo IBGE-PPP com dados de 24h, contendo observáveis GPS L1/C1 para as estações BOAV e VICO. A influência foi moderada para a estação BAIR e fraca para a ROGM.

Tabela 6 – Correlações da acurácia planimétrica

Parâmetros	BAIR (%)	BOAV (%)	ROGM (%)	VICO (%)
VTEC	55,8	71,7	32,8	63,7
F10,7	45,0	50,4	21,5	35,6
Nº manchas solares	43,0	46,2	21,6	33,0

Fonte: Autoria própria (2021).

Essas correlações entre o VTEC e a acurácia planimétrica, assim como sua variação em diferentes estações, estão de acordo com os resultados encontrados no trabalho supracitado desenvolvido por Collischonn et al. (2014).

CONSIDERAÇÃO FINAL, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foram investigadas as influências da ionosfera e das atividades solares na acurácia do IBGE-PPP através de séries temporais no período de 2010 a 2017, utilizando dados GPS diários com observações L1/C1. Diante dos resultados obtidos, foi possível observar uma forte influência do VTEC na acurácia planimétrica das estações BOAV e VICO. Por outro lado, essa influência não pôde ser observada na acurácia altimétrica para as estações em questão. Nesse sentido, destaca-se que outras estratégias, como a utilização de dados médios mensais do VTEC e F10.7 podem evidenciar resultados diferentes dos aqui encontrados.

O fluxo solar a 10,7 cm e o número de manchas solares não exibiram uma forte influência sobre a acurácia do PPP, seja planimétrica ou altimétrica, apesar de eles serem eficientes índices da atividade solar, que é responsável pela variação temporal do TEC na ionosfera.

Salienta-se que devido ao atual ciclo solar ter sido fraco, com sua fase máxima apresentando um baixo número de manchas solares (o que significa menor nível de radiação solar, e conseqüentemente, menor nível de ionização) pode ter prejudicado as correlações analisadas, uma vez que fenômenos de maior magnitude tendem a atenuar os erros existentes na correlação.

Por fim, recomenda-se para trabalhos futuros aplicar outras soluções de PPP que permitam ao usuário maior domínio sobre os parâmetros de processamento uma vez que podem permitir uma melhor avaliação dos efeitos da ionosfera no PPP. Além disso, recomenda-se a aplicação de análises que considerem, além das séries posicionais e dos índices aqui utilizados, séries temporais de índices geomagnéticos tais como o DST (*Disturbance Storm-Time*), Kp (*Planetarische*

Kennziffer) e AE (*Auroral Electrojet*) para se determinar a influência, intensidade e duração das tempestades geomagnéticas no PPP.

Analysis of ionospheric and solar influences in the IBGE-PPP's positional accuracy using time series

ABSTRACT

The ionosphere is one of the main sources of systematic errors in GPS positioning for single-frequency receiver users. The main parameter to describe the ionospheric effect is the TEC (Total Electron Content), which is not constant and does not vary regularly. As the density of electrons in the ionosphere depends on solar activity, the analysis of the behavior of solar indices such as the number of sunspots and the solar flux at 10.7cm is also relevant for a more comprehensive view of the behavior of the ionosphere and its influence in GPS positioning. This work aims to evaluate the influence of the ionosphere and solar activity on the accuracy of Precise Point Positioning (PPP) using GPS/L1 observables through time series. Based on the results obtained, it was possible to observe a strong correlation between the VTEC and sunspot series, ranging between 58.2% and 75.9%, and between the VTEC and F10.7 series, ranging between 64.3% and 82, 1%. Furthermore, there was a strong influence of VTEC on the planimetric accuracy of the BOAV and VICO stations - a correlation of 71.7% and 63.7%, respectively. However, this influence on altimetric accuracy had a maximum value of 50.8% in the analyzed stations.

PALAVRAS-CHAVE: VTEC. IBGE-PPP. Ionosphere. Solar flux at 10.7 cm. Sunspots.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, C. R. **Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion): implementação em tempo real**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 159p, 2005.

AGUIAR, C. R. **Grade Ionosférica para Aplicações em Posicionamento e Navegação com GNSS**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 256p, 2010.

AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Modelagem em tempo real do erro sistemático das observáveis GPS devido à ionosfera. **Bol. Ciênc. Geod.**, v.12, n.1, p.101-120, 2006.

AZAMBUJA, J. L. F. **Potencialidades de serviços on-line de posicionamento por ponto preciso em aplicações geodésicas: uma análise envolvendo longo período de dados das estações da RBMC**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Porto Alegre, RS, 102p, 2015.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons. 2008, 768 p.

BRAGA, F. L. S.; DAL POZ, W. R. Potencialidades do PPP no Software Bernese com Compatibilizações de Sistemas Geodésicos de Referência e de Tempo. **Rev. Bras. Cartogr.**, v. 71, n. 3, p. 726-755, 2019. DOI: 10.14393/rbcv71n3-47483.

CAEIRO, F.; MATEUS, A. **Package ‘randtests’: Testing randomness in R**. Version 1.0. 2014. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/randtests/randtests.pdf>>. Acesso em: jun. 2021.

CAMARGO P. O. **Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores de uma Frequência**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 191 p, 1999.

CARMO, C. S. **Estudo de diferentes técnicas para o cálculo do conteúdo eletrônico total absoluto na ionosfera equatorial e de baixas latitudes**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W. R.; LAROCCA, A. P. C. Compatibilização de Referenciais de Coordenadas e Velocidades Com Estimativa de Precisão. **Boletim**

de **Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 3, 2015. ISSN 1982-2170. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/43215>>. Acesso em: jan. 2021.

CDDIS (2021). **GNSS Atmospheric Products**. Disponível em: <https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/atmospheric_products.htm>. Acesso em: mai. 2021.

CHULLIAT, A.; S. MACMILLAN; P. ALKEN; C. BEGGAN; M. NAIR; B. HAMILTON; A. WOODS; V. RIDLEY; S. MAUS and A. THOMSON, 2014. **The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020**, NOAA National Geophysical Data Center, Boulder, CO. Disponível em: <10.7289/V5TH8JNW>. Acesso em: fev. 2021.

COLLISCHONN, C.; MATSUOKA, M. T.; LIMA, E.M.; WAICHEL, F. S.; CAMARGO, P.O. Correlação do Posicionamento Por Ponto GNSS Com a Ionosfera e com Índices de Atividade Solar no Período de 2002 a 2011. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n.4, p.927-946, 2014. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=393933926010>>. Acesso em: mar. 2021.

COSTA, S. M. A.; MANTOVANI, G.; SCOFANO, F.; LIMA, M. A. A.; SILVA, A. L.; MOURA JÚNIOR, N. J. Ampliação e modernização da RBMC. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2018, Recife. **Anais do VII SIMGEO**. p. 440-450.

COSTA, S. M. A.; MATOS, A. C. O. C; BLITZKOW, D. Validation of the land water storage from gravity recovery and climate experiment (GRACE) with gauge data in the amazon basin. **Bol. Ciênc. Geod.** v. 18, n. 2, p. 262-281, 2012. DOI: 10.1590/S1982-21702012000200006.

DAL POZ, W. R. **Posicionamento Relativo Na Região Equatorial Em Diversas Condições Ionosféricas**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 161p., 2005.

DORIAN, P. Weakest Solar Cycle in More Than a Century Now Heading Towards Next Solar Minimum, 2016. Disponível em: <<https://www.vencoreweather.com/blog/2016/2/1/1245-pm-weakest-solar-cycle-in-more-than-a-century-now-heading-towards-next-solar-minimum>>. Acesso em: jan. 2021.

DREWES, H.; HEIDBACH, O. The 2009 horizontal velocity field for South America and the Caribbean. **Geodesy for Planet Earth**, Heidelberg, BL, v. 136, p. 657-664, jul. 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1_81.

EL GIZAWY, M. L. **Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users**. 2003. 173 f. Thesis (Master of Science) – Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, 2003.

ESTEY, L. H.; MEERTENS. C. M. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data. **GPS Solutions**. v. 3, n. 1, p. 42-49, 1999. DOI: 10.1007/PL00012778.

ETTI JUNIOR, P. T.; ALVES, D. B. M.; SILVA, C. M. KLOBUCHAR AND NEQUICK G IONOSPHERIC MODELS COMPARISON FOR MULTI-GNSS SINGLE-FREQUENCY CODE POINT POSITIONING IN THE BRAZILIAN REGION. **Bol. Ciênc. Geod.**, v. 25, n. 3, e2019016, 2019. DOI: 10.1590/s1982-21702019000300016.

FRANZBLAU, A. N. **A primer of statistics for non-statisticians**. Harcourt Brace & Compant, New York, 1958.

FREITAS, K. X. S.; DAL POZ, W. R.; NASCIMENTO, L. A. Avaliação do Impacto da Compatibilização de Referencial das Velocidades na Redução de Coordenadas no PPP. **Rev. Bras. Cartogr**, v. 73, n. 1, 2021. DOI: 10.14393/rbcv73n1-55416.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. 1.ed. New York: Springer-Wien, 2008. 518p.

HYNDMAN, R. J. **Package ‘forecast’**: Forecasting Functions for Time Series and Linear Models. Version 7.3. 2016. Disponível em: <<https://cran.rproject.org/web/packages/forecast/forecast.pdf>>. Acesso em: 29 set 2020.

IBGE (2020). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual do usuário - IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS. Versão: maio 2020. Editor: Coordenação de Geodésia - Diretoria de Geociências. Brasil. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>. Acesso em: 16 set. 2020.

IBGE-PPP (2021). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobreposicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-posprocessamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: mai. 2021.

ITRF (2020) International Terrestrial Reference Frame. Call for participation. Disponível em: <http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/CFP-ITRF2020.pdf>. Acesso em: mai. 2021.

JEREZ, G. O.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; PROL, F. S.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. Assessment of Global Ionospheric Maps Performance by Means of Ionosonde Data. **Remote Sens.** v. 12, n. 3452, 2020. DOI: 10.3390/rs12203452.

JEREZ, G. O.; PEREIRA, V. A. S.; ALVES, D. B. M. Relação entre índices de irregularidades e de cintilação ionosférica para a região brasileira. **IV Simpósio Brasileiro de Geomática – SBG2017. Presidente Prudente - SP, 24-26 de julho de 2017. Anais p. 589-596.**

KELLEY, M. C. **The Earth's Ionosphere: Plasma physics and eletrodynamics.** [S.l.]: Elsevier, 2009.

KOMJATHY, A.; SPARKS, L.; MANNUCCI, A.J.; XIAOQING, P. An assessment of the current WAAS ionospheric correction algorithm in the south American region. **Journal of the Institute of Navigation.** v. 50, n. 3, p.193-218, 2003.

LOPES, L. J.; MARQUES, H. A. S. Avaliação dos efeitos ionosféricos nos sinais GPS e correlação com índices ionosféricos e geomagnéticos. **Braz. J. of Develop.**, v. 6, n. 9, p.66198-66216, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n9-159.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M; ROSA, G. P. S. Efeitos de Segunda e Terceira Ordem da Ionosfera no Posicionamento GNSS no Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 3, p. 357-374, 2009.

MARQUES, H.; MONICO, G.; GUILHERME, R.; CHUERUBIM, M.; AQUINO, M. Second and Third Order Ionospheric Effects on GNSS Positioning: A Case Study in Brazil. **International Association of Geodesy Symposia.** v. 136, p. 619-625, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1_76.

MATSUOKA, M. T. *et al.*. Impacto de tempestade geomagnética na ionosfera e no posicionamento com GNSS: estudo de caso para 20 de novembro de 2003 na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 1, p. 14-33, 2013.

MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira.** 2007. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2007. 263p.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P.O. Correção Ionosférica Utilizando Os Mapas Globais do TEC do IGS: Avaliação no posicionamento por ponto na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 13, n. 2, p. 253-270, 2007.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Análise da Ionosfera Usando Dados de Receptores GPS Durante um Período de Alta Atividade Solar e Comparação Com Dados de Digissondas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 4, p. 565-582, 2009.

MATSUOKA, M. T.; COLLISCHONN, C; WAICHEL, F. S.; LIMA, E. M. GNSS e atividade solar: correlação entre índices solares e o erro em altitude geométrica no posicionamento por ponto de 2002 a 2010. In: III Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente - SP, 26-28 de julho de 2012. v.2. **Anais** p. 380-381

MCNAMARA, L.F. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Ed. da Unesp, 2 ed., 2008. 476p.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de Séries Temporais**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2006.

MORITZ, S.; SARDÁ, A.; BARTZ-BEIELSTEIN, T.; ZAEFFERER, M.; STORK, J. Comparison of different Methods for Univariate Time Series Imputation in R. **ResearchGate**, p. 1-20, out. 2015. Disponível em: <<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1510/1510.03924.pdf>>. Acesso em: set. 2020.

NASCIMENTO, L. A. **Influência da carga hidrológica na altitude geométrica a partir de análise de séries temporais estimadas no método PPP**. 2016. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Viçosa, MG, 2016.

NASCIMENTO, L. A.; DAL POZ, R.W., SANTOS, A.P.; FREITAS, K.X.S. Geração Automatizada de Séries Temporais de Dados Posicionais Utilizando o IBGE-PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v. 23, n. 1, p. 150 - 165, 2017. DOI: 10.1590/S1982-21702017000100010.

NOAA (2021). National Oceanic And Atmospheric Administration. Disponível em: <<http://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions>>. Acesso em: fev. 2021.

NOGUEIRA, P. A. B. **Estudo da Anomalia de ionização equatorial e dos ventos termosféricos meridionais durante períodos calmos e perturbados na região de baixas latitudes brasileira.** 2009. 146 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

NRCAN (2021). Natural Resources Canada. Disponível em: <<http://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-6-mavg-en.php>>. Acesso em: mar. 2021.

PENHA, J.W.; MATSUOKA, M. T; COLLISCHONN, C. O efeito da ionosfera nas observáveis GPS pelo parâmetro VTEC em diferentes regiões geográficas ionosféricas no Brasil. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE, **Anais** p.2217.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Estimativa e análise de índices de irregularidades da ionosfera utilizando dados GPS de redes ativas. **Boletim de Ciências Geodesicas**, v. 19, n. 3, p. 374-390, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/76591>>. Acesso em: set. 2020.

PROL, F. S. **Tomografia da ionosfera a partir do GNSS e técnicas algébricas: estudo de caso para a região brasileira.** Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) –Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015. 94 f. Disponível: <<http://hdl.handle.net/11449/123727>>. Acesso em: set. 2020.

PROL, F. S.; M. HOQUE, M. Topside Ionosphere and Plasmasphere Modelling Using GNSS Radio Occultation and POD Data. **Remote Sens.** V. 13, n. 1559, 2021. DOI: 10.3390/rs13081559.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: jun. 2021.

R DOCUMENTATION (2021). R Documentation and manuals. Disponível em: <<https://www.rdocumentation.org/packages/forecast/versions/8.1/topics/na.interp>>. Acesso em: 07 mar 2021.

RBMC (2021). REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DOS SISTEMAS GNSS. Dados diários e situação operacional. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/redegeodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuado-sistema-as-gnssrbmc.html?=&t=dados-diarios-e-situacao-operacional>>. Acesso em: mai. 2021.

ROMA-DOLLASE, D.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; KRANKOWSKI, A.; KOTULAK, K.; GHODDOUSI-FARD, R.; YUAN, Y.; GÓMEZ-CAMA, J. M. *Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle*. *Journal of Geodesy*, v.92, n.6, p. 691–706, 2017. DOI: 10.1007/s00190-017-1088-9.

ROSA, G.P.S. **Análise de Séries Temporais de Coordenadas Estimadas com GPS: Uma Proposta Metodológica para Eliminação de Efeitos Sazonais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008. 106 p.

SCHAER, S. **Mapping and predicting the earth's ionosphere using the Global Positioning System**. 1999. 205p. Tese (Ph.D.) - Universidade de Bern, Bern, Suíça.

SILSO (2021). Sunspot Index and Long-term Solar Observations. Disponível em: <<http://sidc.be/silso/>>. Acesso em: mar. 2021.

SILVA, G. A. Anomalia equatorial de ionização e a propagação de sinais de rádio. 2018. 155 p. Tese (Doutorado em Ciências e Aplicações Geoespaciais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

SPACEWEATHER (2021). **Solar radio flux - archive of measurements**. Disponível em: <<https://spaceweather.gc.ca/forecast-prevision/solar-solaire/solarflux/sx-5-en.php>>. Acesso em: jun. 2021.

SIRGAS (2021). Estações de monitoramento contínuo SIRGAS. Disponível em: <<https://www.sirgas.org/pt/stations/>>. Acesso em: nov. 2021.

STAFF VIEWER (2021). Solar Timelines viewer for AFFECTS. Disponível em: <<http://www.staff.oma.be>>. Acesso em: mar. 2017.

SU, K.; JIN, S.; HOQUE, M. M. Evaluation of Ionospheric Delay Effects on Multi-GNSS Positioning Performance. **Remote Sens.**, v. 11, n. 171, 2019. DOI: 10.3390/rs11020171.

TAPPING, K. F. The 10.7 cm solar radio flux (F10.7). **Space Weather**, v. 11, n. 7, p. 394-406, 2013.

UNAVCO (University NAVSTAR Consortium). TEQC - The Toolkit for GNSS Data. 2021. Disponível em: <<https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>>. Acesso em: abr. 2021.

VANI, B. C. **Análise da cintilação ionosférica no Brasil empregando GNSS e técnicas de mineração e visualização de dados.** 2014. 138 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/123206>>.

WEBSTER, I. R. **A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System.** M.Sc.E Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada, 1993, 124 p.

Recebido: 07 jul. 2021

Aprovado: 25 mar. 2022

DOI: 10.3895/rbgeo.v10n1.14495

Como citar: FREITAS, K. X. S.; NASCIMENTO, L. A.; DAL POZ, W. R.. Análise da influência ionosférica e solar na acurácia do IBGE-PPP utilizando séries temporais. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 10, n. 1, p. 020-048, jan./mar. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Krisley Xavier Soares de Freitas

Rua do Cruzeiro, 81 apto 03, CEP 36574-001, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

