

ANÁLISE MULTIVARIADA APLICADA AO ESTUDO DE IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS PARA O TERRITÓRIO BRASILEIRO

Multivariate Analysis Applied to Study of Ionospheric Irregularities for the Brazilian Territory

Ana Lucia Christovam de Souza

Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
ana.lucia@unesp.br

Gabriel Oliveira Jerez

Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
gabriel.jerez@unesp.br

Paulo de Oliveira Camargo

Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Cartografia
paulo.camargo@unesp.br

Vilma Mayumi Tachibana

Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Cartografia
vilma.tachibana@unesp.br

Resumo:

Uma das principais fontes de erro no posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é a ionosfera. Por isso, compreender o impacto causado por esta camada é de grande interesse para atividades da Geodésia, principalmente em aplicações que requerem alta acurácia. Uma das formas de investigar e representar as irregularidades da ionosfera é por meio de índices, que classificam o seu comportamento de acordo com um padrão estabelecido, possibilitando o desenvolvimento de modelos que podem ser aplicados em métodos de posicionamento, bem como auxiliar em tomada de decisão. Neste contexto, o presente trabalho buscou realizar um estudo do comportamento dos índices de irregularidades ionosféricas por meio de 25 estações pertencentes RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) utilizando técnicas de análise multivariada, que permitem inferências sobre a forma como a ionosfera pode atuar no Brasil e também mostrar o seu potencial no estudo de erros sistemáticos. Entre as técnicas aplicadas foram utilizadas a análise de componente principal e análise fatorial, que indicaram que os três índices F_p , I_{ROT} e $ROTI$ utilizados são capazes de descrever o comportamento da camada ionosférica. Foi observado que o índice F_p apresentou uma menor influência na representação dos dados, devido a sua taxa amostral ser de uma hora, enquanto os índices I_{ROT} e $ROTI$ apresentaram comportamento semelhante, o que pode ser explicado pela proximidade de suas taxas amostrais. Além disso, técnicas como a análise de agrupamento e de correspondência mostraram-se importantes ferramentas para visualização do comportamento da ionosfera.

Palavras-chave: GNSS; Irregularidade Ionosférica; Análise Multivariada.

Abstract

One of the major sources of systematic errors in the GNSS (Global Navigation Satellite System) positioning is

the ionosphere. In this way, understand the impact caused by this layer is of great interest to Spatial Geodesy and especially when high accuracy is required. One way to understand the ionosphere is through the ionospheric irregularities indexes, which classify the behavior of the ionosphere according to an established standard, being possible to make predictions and develop models guiding the decision making. Thus, the work conducts a study of the behavior of the ionospheric irregularities indices in Brazilian territory through 25 stations belonging to the Brazilian Continuous Monitoring Network (RBMC), using multivariate techniques showing that they allow inferences about the way the ionosphere acts on Brazil and showing the potential of using these techniques as a way of studying systematic errors. Relating the principal component analysis and factor analysis with indexes of irregularities, this indicated that the three indices F_p , I_{ROT} and $ROTI$ describe well the behavior of the ionospheric layer, with the F_p index showing less influence, due to its sample rate being one hour. The I_{ROT} and $ROTI$ indices present similar behavior, also due to their sample rate being similar. In addition, techniques such as clustering and matching analysis proved to be important tools for visualizing the behavior of the ionosphere.

Keywords: GNSS; Ionospheric Irregularities; Multivariate Analysis.

1. INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre apresenta uma forte influência na propagação dos sinais GNSS (*Global Navigation Satellite System*), sendo a ionosfera considerada uma das principais fontes de erros sistemáticos. As observáveis GNSS se tornaram uma importante fonte de dados para estudos atmosféricos, impulsionado por atividades relacionadas ao posicionamento (LANGLEY et al., 2017). O Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*) é um dos principais parâmetros utilizados para descrever a ionosfera. O TEC é influenciado por diversos fatores, tais como a localização geográfica, a atividade geomagnética, o fluxo de ionização solar e o ciclo solar (SEEBER, 2003). Considerando a localização geográfica, as regiões de baixa latitude são as que apresentam maiores densidade eletrônica; região em que o território brasileiro se encontra. Por esta razão o Brasil é considerado um dos países que mais sofre com os efeitos provocados pela camada ionosférica. Além disso, nessas regiões o efeito ionosférico está associado, entre outros fatores, à Anomalia de Ionização Equatorial (AIE), com maior intensidade no pico da anomalia local, próxima da latitude geomagnética de $\pm 15^\circ$ (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Em relação ao estado da ionosfera, algumas variáveis influenciam o comportamento da mesma. As variações temporais estão associadas às variações diárias, sazonais ou de longo período. As variações diárias ocorrem devido as mudanças nas regiões ionosféricas causadas pela recombinação de elétrons e íons. As variações sazonais estão relacionadas as mudanças na densidade eletrônica devido à alteração do ângulo zenital do Sol e da atmosfera neutra. Os ciclos de longo período correspondem a intervalos de aproximadamente 11 anos, no qual o conteúdo de elétrons livres na ionosfera sofre alterações sendo proporcional ao número de manchas solares (McNAMARA, 1991; SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

A ionosfera pode ser classificada de diversas formas de acordo com as propriedades a serem investigadas. Uma das formas de classificação é de acordo com a taxa de variação do TEC em função do tempo, chamada de ROT (*Rate of Change of TEC*) e também por índice de irregularidades, dos quais destaca-se o I_{ROT} , $ROTI$, f_p e F_p . O índice de irregularidade I_{ROT} é dado em função do RMS (*Root Mean Square*) dos valores de ROT para um intervalo de 15 minutos (WANNINGER, 1993); o índice $ROTI$ é determinado em função do desvio padrão do ROT para o intervalo de 5 minutos, possibilitando a detecção de flutuações de fase de pequena escala (PI et al., 1997); e o índice f_p (*phase fluctuation*) é o valor da mediana dos

valores de ROT para um intervalo de 15 minutos e o índice F_p é o valor médio dos índices f_p para cada satélite no intervalo de uma hora (MENDILLO et al., 2000).

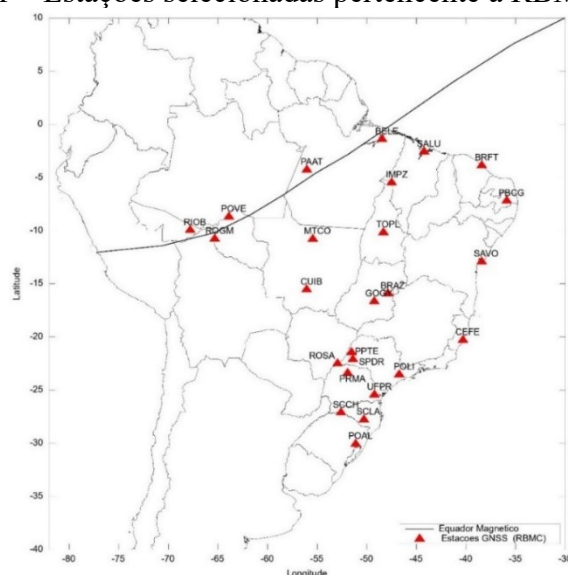
Entre as diversas possibilidades que a estatística proporciona, a análise multivariada é uma importante ferramenta para a interpretação de fenômenos representados por um grande número de variáveis. Entre suas principais vantagens podem ser citadas a redução ou simplificação da estrutura dos dados, predição, além da elaboração de teste de hipóteses (JOHNSON e WICHERN, 2007). Alguns pesquisadores apresentaram estudos sobre o comportamento da camada ionosférica por meio de técnicas multivariadas. Pereira et al. (2014) por meio de dados geodésicos e meteorológicos mostra a capacidade das análises multivariadas em estudar os efeitos da ionosfera, troposfera e multicaminho nos sinais GNSS. Jerez et al. (2019) investiga a influência da camada ionosférica no posicionamento GNSS por meio de técnicas multivariadas.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo utilizar técnicas de análise multivariada para investigar o comportamento dos índices de irregularidades ionosféricas, visando explorar uma possível forma de melhor compreensão do comportamento da ionosfera na região brasileira. As técnicas de análise multivariada empregadas foram análise de componentes principais, análise fatorial, análise de agrupamento e análise de correspondência.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para os experimentos foram considerados os principais índices de irregularidades ionosféricas encontrados na literatura, ou seja, os índices F_p , I_{ROT} e ROTI. Os índices foram estimados por meio do *software* Ion_Index (PEREIRA e CAMARGO, 2016), utilizando 25 estações pertencentes a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), com uma máscara de elevação de 35° , como o objetivo de minimizar os efeitos de multicaminho. A seleção das estações buscou abranger todas as regiões brasileiras, conforme a Figura 1.

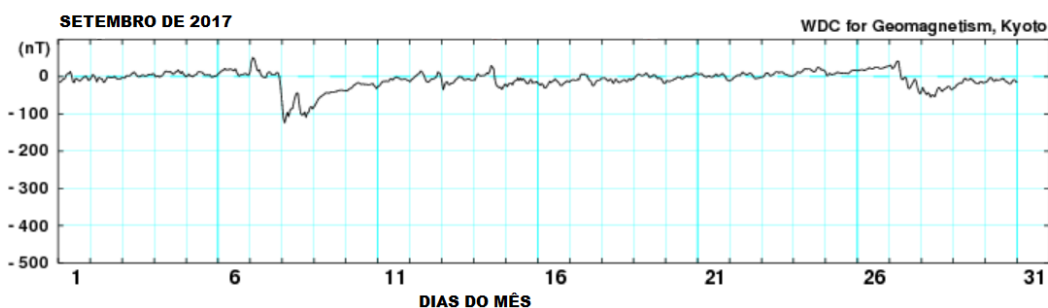
Figura 1 – Estações selecionadas pertencente a RBMC.



Os índices foram estimados para o dia 7 de setembro de 2017, dia este influenciado por uma explosão solar ocorrida no dia 6 de setembro. Essa explosão solar emitiu duas importantes erupções solares. A primeira erupção foi menos significativa que a segunda, onde esta produziu um aumento repentino de 15-16 TECU (TEC units), em regiões de baixa latitude, causando um impacto na propagação das ondas de rádio (YASYUKEVICH et al., 2018).

Explosões solares podem ser detectadas por meio do índice Dst (*Disturbance Strom-Time*), que é capaz de descrever a intensidade e a duração desses eventos geomagnéticos (FEDRIZZI, 2003). Antes do início de um evento o índice aponta um pico de intensidade, que pode ser chamado de fase inicial ou início súbito. Após esse pico inicia-se a fase principal, que é definida pela queda no valor da intensidade do índice, depois de alcançar o mínimo o índice começa a se elevar, chamado de fase de recuperação, até voltar à normalidade, quando não há atividade geomagnética (YAMASHITA, 1999). A classificação do evento geomagnético apresentado por Gonzales et al. (1994) é dividido entre: fraco ($Dst > -50$ nT), moderado ($-50 > Dst > -100$ nT) e intenso ($Dst < -100$ nT). O comportamento do índice Dst para setembro de 2017 pode ser verificado na Figura 2, que indica o acontecimento de uma explosão solar a partir de uma intensa atividade geomagnética. As análises estatísticas foram realizadas com o *software* Minitab 17.1.0.

Figura 2 - Curva Dst entre os dias 1 e 31 de setembro de 2017.



Fonte: Adaptado do Centro Mundial de dados de Geomagnetismo, Kyoto (2020).

3. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos experimentos. As análises foram divididas de acordo com as técnicas utilizadas: análises de componentes principais, análise fatorial, análise de agrupamento e análise de correspondência. Destaca-se que diferentes conjuntos de dados foram utilizados para cada técnica visando a melhor representação do comportamento da camada ionosférica.

3.1. Análise de componentes principais

A análise de componentes principais está associada com a explicação da estrutura de variância e covariância por meio de algumas combinações lineares dos dados originais.

Normalmente a análise revela relações que não poderiam ser observadas previamente, permitindo outras interpretações (JOHNSON e WICHERN, 2007).

Inicialmente foi feita uma análise de componentes principais (CP) para os índices F_p , I_{ROT} , $ROTI$, para a estação RIOB (-9.96°; -67.8°) da RBMC, localizada próxima ao equador geomagnético. É importante ressaltar que os índices de irregularidades são dados em intervalo de tempo diferentes. O índice F_p é estimado a cada uma hora, enquanto o índice I_{ROT} a cada 15 minutos, e o índice $ROTI$ a cada 5 minutos. Portanto, para os índices I_{ROT} e $ROTI$ foi utilizada a mediana dos valores para cada hora, com o objetivo de obter valores representativos das condições ionosféricas, mas também compatíveis com o índice F_p . Assim, os valores obtidos para os índices de irregularidades ionosféricas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1– Índices de Irregularidades Ionosféricas para estação RIOB.

Estação RIOB	Índices de irregularidade ionosférica			
	Hora [TU]	F_p	I_{ROT}	$ROTI$
00h00-01h00		16,421	0,186	0,018
01h00-02h00		9,512	0,136	0,011
02h00-03h00		10,789	0,170	0,016
03h00-04h00		12,248	0,115	0,008
04h00-05h00		8,908	0,109	0,010
05h00-06h00		5,751	0,097	0,009
06h00-07h00		4,680	0,058	0,006
07h00-08h00		2,692	0,031	0,003
08h00-09h00		2,483	0,032	0,003
09h00-10h00		4,455	0,073	0,008
10h00-11h00		11,746	0,048	0,005
11h00-12h00		12,576	0,060	0,006
12h00-13h00		13,604	0,083	0,008
13h00-14h00		10,472	0,070	0,007
14h00-15h00		17,381	0,118	0,012
15h00-16h00		25,129	0,141	0,013
16h00-17h00		21,268	0,174	0,019
17h00-18h00		13,290	0,161	0,016
18h00-19h00		14,936	0,133	0,013
19h00-20h00		19,004	0,129	0,012
20h00-21h00		18,626	0,160	0,016
21h00-22h00		18,482	0,169	0,017
22h00-23h00		15,163	0,143	0,015
23h00-24h00		19,317	0,110	0,011

A partir da matriz de correlação dos índices de irregularidade ionosférica, obteve-se os

autovalores ($\hat{\lambda}_i$) e seus respectivos autovetores (\hat{e}_i):

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_1 &= 2,5870 & \hat{\lambda}_2 &= 0,3921 & \hat{\lambda}_3 &= 0,0209 \\ \hat{e}_1 &= \begin{bmatrix} 0,526 \\ 0,599 \\ 0,603 \end{bmatrix} & \hat{e}_2 &= \begin{bmatrix} -0,850 \\ 0,393 \\ 0,351 \end{bmatrix} & \hat{e}_3 &= \begin{bmatrix} -0,026 \\ -0,697 \\ 0,716 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Os autovetores descrevem os coeficientes das combinações lineares das variáveis índices e representam as CPs (\hat{y}_i). A proporção da variância total amostral explicada por cada componente principal é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Porcentagem da variância total amostral explicada por cada componente principal.

CP	\hat{y}_1	\hat{y}_2	\hat{y}_3
%var	86,23	13,07	0,70

Pelo critério de *Kaiser* deve-se se manter somente a 1^º CP, uma vez que apenas um autovalor é maior que a média dos autovalores (maior que 1,0) e somente essa componente é capaz de explicar 86,23% da variabilidade amostral total. A interpretação das componentes principais é feita com base nas correlações entre as variáveis e as componentes e nos coeficientes dados pelas combinações lineares que resultam nas CPs. A Tabela 3 apresenta os coeficientes de correlação $r_{\hat{y}_i \hat{z}_k} = \hat{e}_{ki} \sqrt{\hat{\lambda}_k}$.

Tabela 3 – Coeficientes de correlação entre as variáveis e os CPs.

$r_{\hat{y}_i \hat{z}_k}$	\hat{y}_1	\hat{y}_2	\hat{y}_3
F_P	0,846	-0,532	-0,003
I_{ROT}	0,963	0,246	-0,100
ROTI	0,969	0,219	0,103

A partir dos coeficientes de correlação entre as variáveis e a 1^º CP (Tabela 3), tem-se que a primeira CP pode ser interpretada como uma soma dos índices F_P e I_{ROT} e ROTI com um peso menor para o índice F_P, uma vez que este índice é dado em intervalo de tempo maior, quando comparado com os demais índices. Além disso, como mencionado anteriormente, a 1^º CP é capaz de explicar 86,23%, mostrando que o comportamento da ionosfera pode ser explicado de maneira satisfatória pelos três índices juntos, uma vez que a 1^º CP por ser descrita como uma soma deles. Tem-se que a 2^º CP, pode ser interpretada como uma média ponderada entre os índices de irregularidade. Desprezando o sinal dos coeficientes, nota-se que índice F_P tem o dobro de importância comparado com os demais índices. Essa CP explica apenas 13,07% da variação total podendo ser desconsiderada na análise. Isso também se aplica a 3^º CP.

De acordo com o critério de *Kaiser*, será utilizado somente a 1^º componente principal para esta análise. As porcentagens das variâncias das variáveis originais explicadas pelas CPs são apresentadas na Tabela 4, bem como as porcentagens acumuladas, que estão entre parênteses:

Tabela 4 – Porcentagem da variabilidade de cada uma das variáveis originais.

	\hat{y}_1	\hat{y}_2	\hat{y}_3
Z_1	71,60%	28,8% (99,9%)	0,10% (100%)
Z_2	92,82%	6,0% (98,8%)	1,18% (100%)
Z_3	94,06%	4,8% (98,86%)	1,14% (100%)

Diante da porcentagem da variabilidade de cada uma das variáveis originais, nota-se que somente a CPI (\hat{y}_1) é capaz de explicar de maneira satisfatória todo o comportamento da ionosfera a partir dos índices de irregularidades.

3.2. Análise fatorial

A análise fatorial descreve a relação entre um conjunto de variáveis em termos de alguns fatores que, em princípio, apresentam aspectos comuns. Esta técnica permite saber o quanto cada fator está associado a cada variável e o quanto o conjunto de fatores explica a variabilidade total dos dados originais (JOHNSON e WICHERN, 2007).

A partir dos autovalores e autovetores encontrados na subseção anterior, estima-se os pesos dos fatores, as comunalidades e as variâncias específicas (Tabela 5). A comunalidade representa a porção da i-ésima variável pelo m fatores comuns; a variância específica é a parte de cada variável que não é explicada pelos fatores comuns.

Tabela 5 - Análise Fatorial.

Variáveis	Carga Fatorial F_1	Comunalidades \tilde{h}_1	Variâncias Específicas $\tilde{\psi}_1$
F_p	0,847	0,717	0,283
I_{ROT}	0,929	0,929	0,071
$ROTI$	0,970	0,941	0,059
% de explicação	0,862		

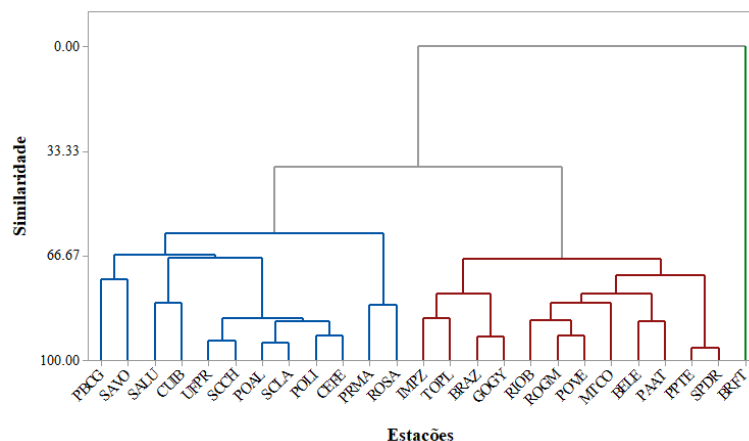
A partir da Tabela 5, nota-se que apenas um único fator consegue explicar 86,2% da variação total, o que já é considerado satisfatório. As comunalidades para todos os índices (0,717; 0,929; 0,941) indicam que este fator é capaz de explicar uma grande porcentagem amostral de cada variável. Apresentando um resultado compatível com o da análise de componentes principais. Além disso, analisando a carga fatorial, nota-se que todos os índices apresentam cargas fatoriais altas, evidenciando que todos os índices de irregularidades utilizados apresentam um elevado potencial na classificação no comportamento da ionosfera. Os índices I_{ROT} e $ROTI$ apresentam cargas fatoriais semelhantes (0,929 e 0,970), esse comportamento se deve o período de coleta dos índices serem similares, 15 minutos e 5 minutos, respectivamente. Ademais, é importante ressaltar que o índice $ROTI$ foi o que apresentou a maior carga fatorial devido ao seu intervalo de coleta ser de 5 minutos, detectando até mesmo as flutuações de pequena magnitude.

3.3. Análise de agrupamento

A análise de agrupamento é uma análise exploratória muito útil na compreensão da natureza complexa de relações multivariadas, o qual classifica pessoas ou objetos sem regras, isto é, observando apenas semelhanças ou dessemelhanças entre elas (JOHNSON e WICHERN, 2007).

Para esta análise foi utilizado somente o índice F_p estimado para todas as estações previamente selecionadas. Essa análise tem por objetivo agrupar as estações de acordo com as regiões em que elas se encontram, uma vez que o comportamento da ionosfera está diretamente relacionado à localização geográfica. A Figura 3 apresenta resultado do método utilizando ligação completa e distância euclidiana.

Figura 3 – Dendograma considerando ligação completa e distância euclidiana.

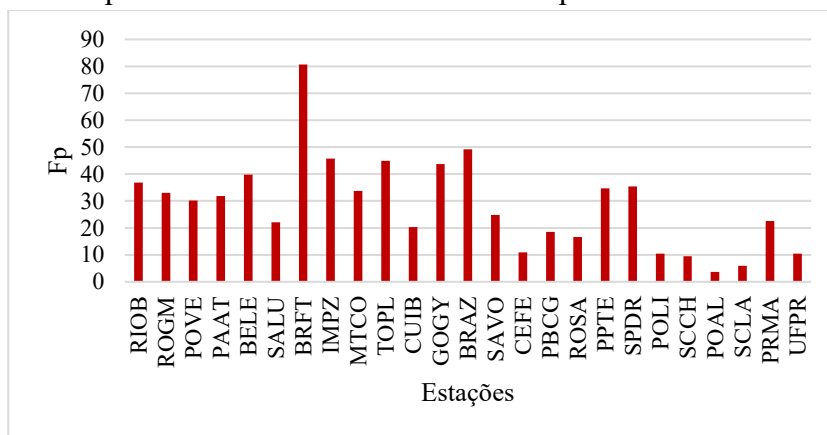


O dendrograma apresentado na Figura 3 foi dividido em 3 *clusters*, nota-se que o agrupamento apresentou um comportamento esperado, de acordo com localização geográfica das estações selecionadas. Os dois maiores *clusters* são representados pelas ligações das linhas de cor azul e vermelho e o terceiro formado somente pela estação BRFT representado em verde.

Os *clusters* foram agrupados em razão da semelhança entre as estações. Considerando o grau de similaridade entre os *clusters*, nota-se que entre eles não foi apresentado um alto grau de similaridade, isso se deve a um *cluster* agrupar somente com estações localizadas em regiões distintas. Para o *cluster* representado em vermelho, nota-se que as estações localizadas próximas ao equador geomagnético apresentaram o maior grau de similaridade. Já para o *cluster* representado em azul, as estações localizadas na região sul, onde a camada ionosférica não exerce uma forte influência sobre as estações, apresentaram maior similaridade. É importante destacar que houve algumas exceções como, por exemplo, as estações PBCG, SAVO, SALU e CUIB, que são estações localizadas mais ao norte, entretanto quando se uniram às demais estações, apresentaram um grau de similaridade menor. A única estação que apresentou um comportamento inesperado foi a estação BRFT,

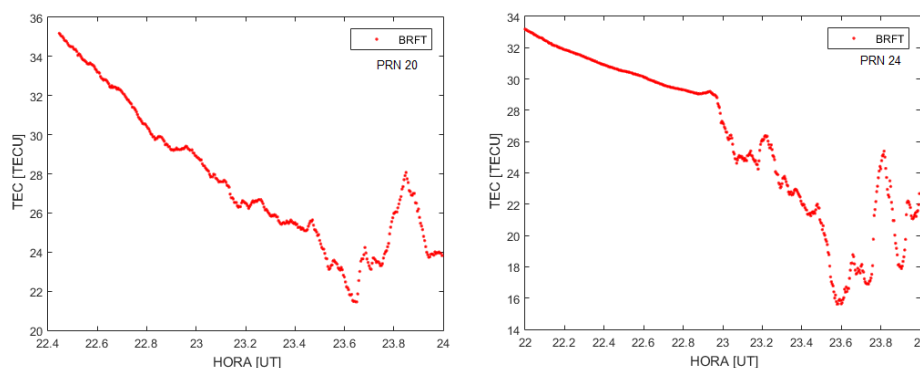
não sendo agrupado com nenhuma outra estação, formando um *cluster*. Esse comportamento pode ser explicado pelo valor discrepante do índice F_p entre as 23-24 horas, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Índice F_p para o horário entre as 23-24 horas para o dia 07 de setembro de 2017



Investigando esse comportamento anômalo do índice F_p para a estação BRFT, foi analisado o TEC para os satélites PRN 20 e 24 e os resultados sugerem a presença de bolhas ionosféricas para o período entre as 23-24 horas, como pode ser visto na Figura 5. A presença de bolha ionosférica pode ser caracterizada como variação abrupta do TEC, devido à baixa densidade de elétrons presente no interior da bolha.

Figura 5 - TEC estimado para satélites PRN 20 e 24 para o dia 07 de setembro de 2017



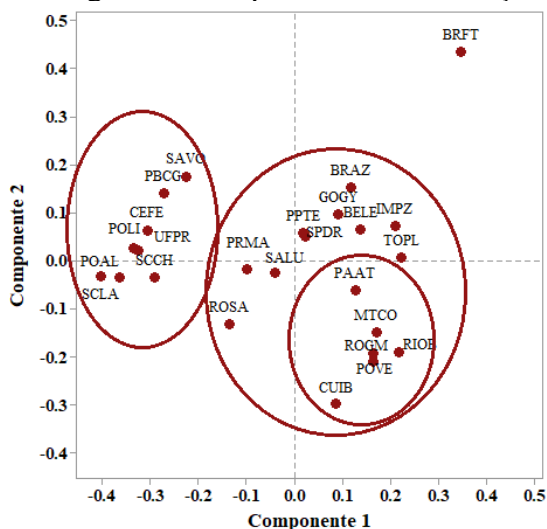
3.4. Análise de correspondência

A análise de correspondência é uma técnica exploratória para representar associações em uma tabela de frequência ou de contagem. Normalmente o resultado inclui a melhor representação bidimensional dos dados (JOHNSON e WICHERN, 2007).

Utilizando dados do índice F_p para as 25 estações foi realizada a análise de correspondência. Esta análise teve o intuito de confirmar as conclusões obtidas na seção

anterior, verificando o agrupamento das estações de acordo com as regiões geográficas em que as estações se encontram. A Figura 5 apresenta o resultado obtido para esta análise.

Figura 5 – Diagrama de dispersão entre as estações GNSS.



De acordo com a Figura 5, nota-se que a análise de correspondência apresentou um comportamento de acordo com o que era esperado. É possível observar que as estações: PAAT, CUIB, ROGM, POVE, RIOB, MTCO formaram um grupo, isso ocorreu devido a essas estações estarem localizadas mais próximas ao equador geomagnético, apresentando uma maior influência da alta variação do TEC causado pela explosão solar. Este grupo pode ser considerado um sub grupo de outro maior, com as estações: BRAZ, GOGY, SPDR, PPTE, SALU, BELE, IMPZ, PRMA, ROSA, SALU, isso pode estar associado ao efeito fonte que contribui com a Anomalia de *Appleton*, que consiste em duas faixas de alta densidade do plasma ionosféricos, localizadas nas regiões tropicais que circulam paralelamente ao equador magnético. A maior intensidade ocorre nos dois lados do equador geomagnético, entre as latitudes geomagnéticas de $\pm 10^\circ$ e $\pm 20^\circ$ (RODRIGUES, 2003). E por fim, o terceiro grupo formado pelas estações SAVO, PBCG, CEFE, POLI, POAL, SCLA, SCCH, UFPR, que se encontram mais ao sul do país, junto com estações encontradas próximas a regiões costeiras. Nota-se também que a estação BRFT não foi classificada em nenhum dos grupos, similar na análise de agrupamento, sendo explicado pela mesma razão.

4. CONCLUSÕES

O uso de técnicas de Análise Multivariada (análise de componentes principais, análise fatorial, análise de agrupamento e análise de correspondência) são importantes ferramentas para visualização e interpretação do comportamento de fenômenos como os observados na ionosfera, por meio dos índices de irregularidades ionosférica.

Em relação à Análises Fatorial e a Análise de Componentes principais nota-se que os

índices I_{ROT} e $ROTI$ apresentam um comportamento semelhantes entre si, isso pode estar associado ao intervalo de tempo de coleta dos índices de 15 e 5 minutos, respectivamente.

A análise de agrupamento pode ser uma técnica interessante para o estudo do comportamento da ionosfera em relação à localização das estações. Notou-se que das estações localizadas próximas ao equador geomagnético apresentaram maior similaridade, formando um *cluster*, já as estações localizadas na região sul também apresentaram maior nível de similaridade formando um novo *cluster*. Destaca-se que a estação BRFT apresentou um comportamento muito discrepante dos dois *clusters*, não sendo agrupado. Este comportamento pode ser explicado pelo valor do índice F_p discrepante em relação às demais estações para o final do dia. Além disso, identificado a presença de bolhas ionosféricas, explicando esse comportamento anômalo para o índice F_p para estação BRFT.

Ademais, a análise de correspondência também se mostrou interessante, uma vez que permitiu uma nova forma de visualização do comportamento do TEC, por conta da significativa correspondência espacial entre grupos devido ao equador geomagnético e a Anomalia de *Appleton*. Além disso, foi possível notar que nos agrupamentos obtidos tanto na análise de agrupamento quanto na análise de correspondência os resultados foram compatíveis, uma vez que, em ambas as análises o critério para o agrupamento das estações foi a localização geográfica das estações. Apesar de os dados serem referentes a um único dia, os resultados obtidos são indicativos de que a análise multivariada pode auxiliar na compreensão do comportamento da ionosfera na região brasileira. A utilização de maior número de informação em estudos futuros pode permitir uma correspondência mais clara entre os comportamentos observados nas estações.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado no PPG Ciências Cartográficas, auxílio à pesquisa (proc. 479965/2013/7) e bolsa PQ (proc. 309924/2013-8).

Referências

FEDRIZZI, M. **Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS**. 2003. 223 f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

GONZALES, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, H.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 99, n. A4, p. 5771-5792, Apr. 1994.

JEREZ, G. O., ALVES, D. B. M., TACHIBANA, V. M. Multivariate analysis of combined GPS/GLONASS point positioning performance in Brazilian regions under different

ionospheric conditions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 187, p. 1-9, 2019.

JOHNSON, R. A., WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 6th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, 2007

LANGLEY, R. B., TEUNISSEN, P. J.G., MONTENBRUCK, O. **Introduction to GNSS**. In: Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Cham, 2017. p. 3-23.

MCNAMARA, L. F. **The ionosphere: Communications, Surveillance, and Direction Finding**. Krieger Publishing Company, Florida, 1991.

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

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. 2.ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O.; TACHIBANA, V. M Análise Multivariada aplicada no estudo dos efeitos da ionosfera, troposfera e multicaminho nos sinais GNSS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 3, 2016.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. **Brazilian active GNSS networks systems for monitoring the ionosphere**, GPS Solutions, v. 21, p. 1013-1025, 2016. DOI 10.1007/s10291-016-0589-y

PI, X.; MANNUCCI, A. J.; LINDQWISTER, U. J.; HO, C. M. **Monitoring of Global Ionospheric Irregularities Using the Worldwide GPS Network**, Geophysical Research. Letters, v.24, n.18, p. 2283-2286, 1997.

MENDILLO, M.; LIN, B.; AARONS, J. **The application of GPS observations to equatorial aeronomy**. Radio Science, v. 35, n.3, p.885-904, 2000.

WANNINGER, L. **Ionospheric monitoring using IGS data**. In: 1993 IGS Workshop, 1993, Berne. Proceedings... Berne: Beuther, G.; Brockmann, E., 1993. p. 351-360.

YAMASHITA, C. S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 1999. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

YASYUKEVICH, Y., ASTAFYEVA, E., PADOKHIN, A., IVANOVA, V., SYROVATSKII, S., PODLESNYI, A. **The 6 September 2017 X-Class Solar Flares and Their Impacts on the Ionosphere, GNSS, and HF Radio Wave Propagation**. Space Weather. 2018. doi:10.1029/2018sw001932