

PADRÕES PARA CLASSIFICAÇÃO DOS ÍNDICES DE IRREGULARIDADES DA IONOSFERA: I_{ROT} E ROTI

VINÍCIUS AMADEU STUANI PEREIRA ¹

PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO ²

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT, Presidente Prudente, SP

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

^{1,2} Departamento de Cartografia

vi_stuani@hotmail.com; paulo@fct.unesp.br

RESUMO – O monitoramento das regiões de irregularidades na densidade de elétrons da ionosfera, bem como a classificação dos níveis de intensidade, podem ser realizados por meio de índices, como f_p , F_p , I_{ROT} e ROTI. Padrão de classificação para o índice F_p , o qual é estimado com base nos valores de f_p , é fornecido na literatura, sendo F_p menor 50 representando baixos níveis de irregularidades, F_p entre 50 e 200 irregularidades moderadas e valor superior a 200 caracterizando fortes níveis de irregularidades. Em relação aos índices I_{ROT} e ROTI não são disponíveis na literatura padrões que classificam o nível de irregularidades com base nesses índices. Assim, um experimento foi realizado no sentido de determinar os limiares para a classificação das irregularidades a partir de I_{ROT} e ROTI. Os intervalos obtidos foram: $I_{ROT} \leq 0,5$ e $ROTI \leq 0,05$ – baixos níveis de irregularidades, $0,5 < I_{ROT} \leq 2,0$ e $0,05 < ROTI \leq 0,2$ – moderado níveis de irregularidades, e $I_{ROT} > 2,0$ e $ROTI > 0,2$ – fortes níveis de irregularidades.

ABSTRACT – The monitoring of regions of electron density irregularities in the ionosphere, as well as the classification of intensity levels, may be performed through indexes, as f_p , F_p , I_{ROT} and ROTI. Classification standard for the F_p index, which is estimated based on the values of f_p , is provided in the literature, with F_p lower than 50 representing low levels of irregularities, F_p between 50 and 200 moderate irregularities and value exceeding 200 featuring strong levels irregularities. Regarding I_{ROT} and ROTI indexes are not available in the literature standards that classify the level of irregularities based on these indices. Thus, an experiment was carried out in order to determine the thresholds for classification of irregularities from I_{ROT} and ROTI. The intervals were obtained: $I_{ROT} \leq 0.5$ and ≤ 0.05 ROTI – low levels of irregularities, $0.5 < I_{ROT} \leq 2.0$ and $0.05 < ROTI \leq 0.2$ – moderate levels of irregularities, and $I_{ROT} > 2.0$ and $ROTI > 0.2$ – strong levels of irregularities.

1 INTRODUÇÃO

Os sinais eletromagnéticos transmitidos pelos satélites GNSS precisam percorrer diferentes camadas da atmosfera terrestre até serem captados pelos receptores, sofrendo assim diversos efeitos sistemáticos, os quais devem ser levados em consideração no momento de determinar as coordenadas de um ponto.

As principais fontes de erros nos sinais GNSS advêm do multicaminho, da troposfera e da ionosfera, com destaque para essa última camada que, após a desativação da técnica SA (*Selective Availability*) em 1º de maio de 2000, tornou-se a maior fonte de erro sistemático no posicionamento (MONICO, 2008).

No momento em que os sinais se propagam através da ionosfera, os mesmos estão sujeitos a um atraso no tempo de propagação e mudanças na fase, amplitude e polarização. A dimensão do efeito sistemático devido à ionosfera é diretamente proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*), isto é, ao número total de elétrons presentes ao longo da trajetória percorrida pelo sinal do satélite ao receptor, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal.

O principal problema é que o TEC varia no tempo e no espaço em razão do fluxo de ionização solar, da atividade geomagnética, do ciclo de manchas solares, do ângulo zenital do Sol, estação do ano, hora local, direção do raio vetor do satélite e localização geográfica, sendo de difícil tratamento (SEEBER, 2003; LEICK, 1995).

Dentre os diversos efeitos oriundos da camada ionosférica, podem-se destacar o efeito fonte, que origina a anomalia equatorial, que consiste em duas faixas de alta densidade do plasma ionosférico localizadas nas regiões tropicais que circundam paralelamente ao Equador magnético (CHATTERJEE; CHAKRABORTY, 2013); e a cintilação ionosférica, que são flutuações da amplitude ou fase de uma onda de rádio, resultado da sua propagação

através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons, provocando um enfraquecimento no sinal e ocasionando em muitos casos a perda de sintonia com o mesmo (WEBSTER, 1993).

Com os experimentos já realizados (PEREIRA; CAMARGO, 2013; OLADIPO; SCHULER, 2013; CHU et al., 2008; SHAN et al., 2002) verifica-se que é possível, a partir de redes ativas, realizar estudos do comportamento da camada ionosférica utilizando dados GNSS coletados com receptores de dupla frequência. Com esses dados podem calcular o TEC, o ROT (*Rate of Change of TEC*) e índices de irregularidades da ionosfera, tais como: f_p e F_p (MENDILLO et al., 2000), I_{ROT} (PI et al., 1997) e ROTI (WANNINGER, 1993); bem como alguns índices específicos para o estudo da cintilação ionosférica: S_4 e σ_ϕ (VAN DIERENDONK et al., 1993), S_ϕ (FORTE, 2007) e σ_{CHAIN} (MUSHINI et al., 2011).

Em detrimento as irregularidades da ionosfera, os níveis da mesma podem ser classificados com relação aos valores obtidos do índice F_p . Valores $F_p \leq 50$ representam baixos níveis de irregularidades, $50 < F_p \leq 200$ significa a presença de moderadas irregularidades e, quando $F_p > 200$, representa a ocorrência de fortes níveis de irregularidades (MENDILLO et al., 2000). Já para os índices I_{ROT} e ROTI não são disponíveis na literatura padrões que classificam o nível de irregularidade da ionosfera com base nos valores dos referidos índices.

Portanto, este trabalho visa à determinação de padrões para a classificação das irregularidades da ionosfera para os índices I_{ROT} e ROTI, utilizando como base o padrão classificatório do índice F_p .

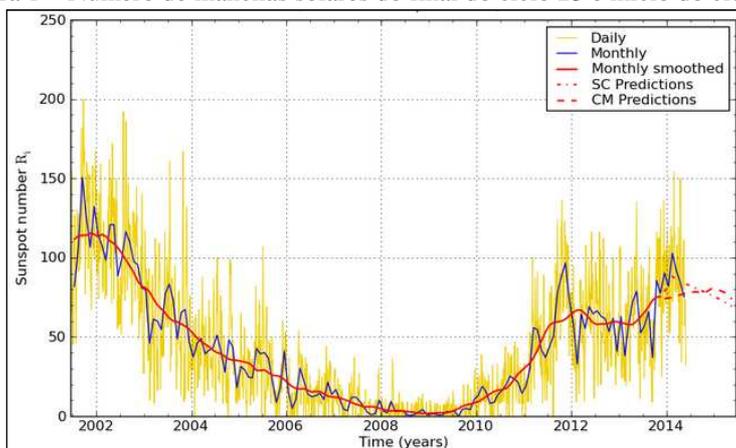
2 IONOSFERA, VARIAÇÕES DO TEC E IRREGULARIDADES

A ionosfera é a parte ionizada da atmosfera terrestre, situada numa faixa a partir de, aproximadamente, 50 km de altitude até 1.000 km da superfície da Terra, sendo formada por partículas livres carregadas, ou seja, íons e elétrons (LIN, 1997).

O principal parâmetro que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GNSS é o TEC, que representa o número de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde o receptor até o satélite (MATSUOKA; CAMARGO, 2004); e as principais variáveis que influenciam o estado da ionosfera são as variações temporais (diurna, sazonal e ciclo de longos períodos), variações da radiação solar, influências da latitude, longitude, campo geomagnético, dentre outras (LEICK, 1995).

A principal razão da existência da variação diurna é a radiação solar, e ao longo do dia a densidade de elétrons depende da hora local, sendo que seu valor máximo ocorre entre as 12 e 16 horas local e um segundo máximo ocorre na região de baixas latitudes logo após o pôr do Sol, entre 21 e 22 horas local, sendo geralmente maior que o primeiro (WEBSTER, 1993). A densidade de elétrons também varia durante os meses do ano em uma determinada região, em parte devido à variação sazonal do ângulo zenital do Sol, e também devido às mudanças na atmosfera neutra da qual a ionosfera é criada (McNAMARA, 1991). Valores máximos da densidade de elétrons, para o hemisfério Sul, ocorrem aproximadamente nos meses de março, abril, setembro e outubro (equinócios de outono e primavera) e valores mínimos nos meses de solstícios de inverno e verão. As variações de ciclos de longos períodos na densidade de elétrons, com ciclos de aproximadamente 11 anos, são associadas às ocorrências de manchas solares, e o aumento de ionização é proporcional ao número de manchas; atualmente a atividade solar encontra-se no ápice do ciclo solar 24, conforme pode ser visualizado pelo número de manchas na Figura 1.

Figura 1 – Número de manchas solares do final do ciclo 23 e início do ciclo 24.



Fonte: <<http://sidc.oma.be/html/wolfjmmms.html>>. Acesso em: 22 jun. 2014.

A variação na quantidade da emissão dos raios ultravioleta e raios-X pelo Sol provoca um efeito no nível de ionização da atmosfera terrestre, com períodos que variam de minutos a semanas (WEBSTER, 1993). Três tipos de

fenômenos estão associados a essa variação. O primeiro deles é associado aos eventos solares, tais como as explosões solares, que são caracterizadas por um rápido aumento de energia na superfície do Sol. O segundo tipo de variação da radiação solar está associado aos buracos na coroa, que são as fontes das correntes do vento solar de alta velocidade, mais comuns no período de declínio da atividade solar. O terceiro efeito está relacionado às manchas solares (McNAMARA, 1991).

O campo geomagnético da Terra exerce grande influência na variação da densidade de elétrons, pois controla o movimento das partículas ionizadas na ionosfera. Então, qualquer perturbação no campo geomagnético resultará em modificações nas condições de transporte do meio ionizado. As variações mais comuns observadas no campo geomagnético são aquelas produzidas através das correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera. Além destas, podem ocorrer variações bruscas e muito intensas, provocadas pelas tempestades solares (KIRCHHOFF, 1991). As tempestades geomagnéticas ocorrem em conjunto com as tempestades ionosféricas e têm as mesmas causas: explosões solares, corrente de vento solar de alta velocidade, provenientes de buracos na coroa, e desaparecimentos súbitos de filamentos; uma intensa explosão solar pode aumentar a densidade de elétrons em 10 vezes (McNAMARA, 1991). Este aumento de ionização dá origem a uma série de fenômenos denominados genericamente de Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS), no qual afetam a propagação de ondas eletromagnéticas, que podem ser muito atenuadas. Sandford (1999) enfatiza que durante eventos de DIS podem ocorrer rápidas cintilações ionosféricas nos sinais GNSS, prejudicando a desempenho de rastreamento do receptor, que podem ocasionar, inclusive, em perdas de sinal. Na região equatorial e de baixas latitudes estão presentes efeitos significativos da cintilação ionosférica e este efeito é maior na região equatorial e de baixas latitudes do que na região de altas latitudes (EL GIZAWY, 2003). Essa região também é afetada pela anomalia equatorial ou de Appleton (APPLETON, 1946), e a maior densidade de elétrons desta anomalia ocorre nas regiões entre as latitudes geomagnéticas de 10° a 20° N e S, causando alta concentração de elétrons nos dois lados do Equador magnético (CHATTERJEE; CHAKRABORTY, 2013).

3 ÍNDICES DE IRREGULARIDADES DA IONOSFERA

As estimativas dos índices de irregularidades (f_p , F_p , I_{ROT} e $ROTI$) se baseiam na taxa de variação do TEC (ROT). O ROT é calculado através da razão da diferença entre os TEC's obtidos consecutivamente entre duas épocas (ΔTEC), pelo intervalo de tempo decorrido entre as respectivas determinações (Δt):

$$ROT = \frac{TEC_{t_2} - TEC_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta TEC}{\Delta t} \quad (1)$$

O TEC na direção do satélite ao receptor pode ser obtido utilizando as pseudodistâncias (P) advindas dos códigos em L1 e L2, a partir da seguinte combinação linear (MATSUOKA; CAMARGO, 2004):

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[(P_{2r}^s - P_{1r}^s) - e_{p21} \right], \quad (2)$$

onde f_1 e f_2 representam as frequências das portadoras em L1 e L2, respectivamente. O termo e_{p21} representa os erros sistemáticos não eliminados na combinação linear entre as pseudodistâncias e os erros aleatórios.

O TEC também pode ser obtido a partir da combinação linear entre as medidas de fase da portadora (Φ) em L1 e L2 (MATSUOKA; CAMARGO, 2004):

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[(\lambda_2 \Phi_{2r}^s - \lambda_1 \Phi_{1r}^s) - (\lambda_1 N_{1r}^s - \lambda_2 N_{2r}^s) - e_{\Phi 21} \right], \quad (3)$$

onde λ_1 e λ_2 são os comprimentos de onda em L1 e L2, respectivamente, $e_{\Phi 21}$ representa os erros sistemáticos não eliminados na combinação linear entre as fases e os erros aleatórios, e N as ambiguidades de cada portadora.

Como a magnitude da precisão da fase é da ordem centimétrica a milimétrica, ao contrário da pseudodistância que é da ordem métrica (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008), utiliza-se as medidas da fase para o cálculo do ROT. Substituindo a equação (3) na equação (1) e realizando as devidas simplificações e adaptações, pode-se obter uma estimativa do ROT tendo como parâmetro apenas as medidas de fase das portadoras L1 e L2, não sendo necessário

calcular o TEC propriamente dito. A equação a seguir apresenta o cálculo do ROT para o sistema GPS, onde as medidas de fase são dados em metros, e não em ciclos:

$$\text{ROT} = \frac{9,52 \cdot 10^{16} \left[(\Phi_{2t_2} - \Phi_{2t_1}) - (\Phi_{1t_2} - \Phi_{1t_1}) \right]}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

3.1 Índice f_p

O índice f_p (*phase fluctuation*) é o valor da mediana dos ROT's para um período de 15 minutos, sendo os ROT's estimados a cada minuto. O índice é calculado para cada satélite de uma determinada estação e é sempre maior ou igual a zero (MENDILLO et al., 2000):

$$f_p(n, \text{hr}, i) = \text{Mediana}|\text{ROT}|, \quad (5)$$

onde n é o número do satélite, hr é a hora cheia (00-24 TU (Tempo Universal)), i número da seção, com duração de 15 minutos, contida em uma hora cheia, ou seja, $i = 1, 2, 3$ ou 4 .

O uso do valor da mediana é com o intuito de eliminar os picos de ruídos. Assim, para diversas combinações de satélites e estações, o índice representa a resolução espacial das irregularidades ionosféricas (MENDILLO et al., 2000).

3.2 Índice F_p

O índice F_p é estimado para cada estação, a cada hora cheia. Representa o valor médio dos índices f_p obtidos para todos os satélites observados em uma estação no período de uma hora, que é obtido por meio da equação (MENDILLO et al., 2000):

$$F_p(\text{hr}) = \frac{\sum_n^{\text{nsat}} \left[\sum_i^k f_p(n, \text{hr}, i) / k \right]}{\text{nsat}(\text{hr})} \cdot 1000, \quad (6)$$

onde nsat é o número total de satélites observados durante o período de uma hora e k é o número de valores de f_p disponíveis em cada hora ($k = 0, 1, 2, 3$ ou 4).

A utilização do índice destina-se a retratar o nível geral de irregularidades ionosféricas presentes na vizinhança de uma determinada estação. Um valor $F_p \leq 50$ representa baixos níveis de irregularidades; $50 < F_p \leq 200$ significa a presença de irregularidades moderadas, e quando $F_p > 200$ representa a ocorrência de fortes níveis de irregularidades ionosféricas (MENDILLO et al., 2000).

3.3 Índice I_{ROT}

Wanninger (1993) apresenta um índice para caracterizar flutuações da fase como diagnóstico de irregularidades ionosféricas, denominado I_{ROT} . O índice, calculado para um período de 15 minutos, é baseado no RMS (Root Mean Square) dos ROT's:

$$I_{\text{ROT}} = 10 \text{RMS}(\text{ROT}). \quad (7)$$

3.4 Índice ROTI

Devido ao fato de que as flutuações da fase em pequena escala não estavam sendo identificadas nos índices já existentes, Pi et al. (1997) sugerem que um índice para a taxa de variação do TEC poderia ser determinado com base no desvio-padrão do ROT em um intervalo de cinco minutos. Denominado de ROTI, o índice é obtido a partir da equação:

$$\text{ROTI} = \sqrt{\langle \text{ROT}^2 \rangle - \langle \text{ROT} \rangle^2}, \quad (8)$$

onde $\langle \rangle$ representa a média.

4 DETERMINAÇÃO DOS PADRÕES PARA A CLASSIFICAÇÃO DOS ÍNDICES I_{ROT} E $ROTI$

Para a determinação dos parâmetros classificatórios das irregularidades da ionosfera a partir dos índices I_{ROT} e $ROTI$ baseou-se no padrão do índice F_p , fornecido em Mendillo et al. (2000).

O experimento consistiu em estimar os índices F_p , I_{ROT} e $ROTI$ utilizando o programa *Ion_Index* (PEREIRA; CAMARGO, 2013) para algumas estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), para o período de baixa atividade solar (21 de novembro de 2007), sem considerar as constantes multiplicativas “1000” do índice F_p (equação (6)) e “10” do I_{ROT} (equação (7)). Como os índices I_{ROT} e $ROTI$ são similares (RMS e desvio-padrão do ROT), com exceção da constante multiplicativa “10” do I_{ROT} e do intervalo de tempo dos dados – 15 minutos do I_{ROT} e 5 minutos do $ROTI$ – foi considerada, para fins de análise, que o índice F_p também é similar ao I_{ROT} e $ROTI$, ressaltando-se que o F_p consiste na média da mediana do ROT, sendo a mediana do ROT também obtida com um intervalo de coleta de 15 minutos.

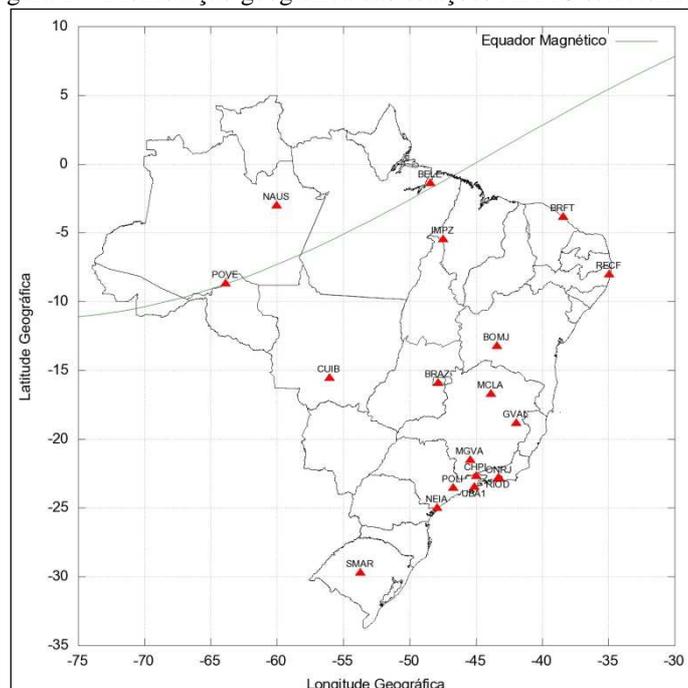
Dessa forma, com a supressão da constante multiplicativa “1000” da equação do F_p , os valores finais do padrão classificatório foram divididos por “1000”, obtendo: $F_p \leq 0,05$ baixos níveis de irregularidades; $0,05 < F_p \leq 0,2$ moderados níveis de irregularidades e $F_p > 0,2$ fortes níveis de irregularidades.

De acordo com essas adaptações realizaram-se as análises dos índices I_{ROT} e $ROTI$ com base no novo padrão classificatório do F_p e, por conseguinte, verificou-se se essas análises eram condizentes com as análises para o índice F_p , considerado como padrão conhecido/real. As estações do dia 21 de novembro de 2007 selecionadas para as análises são mostradas na Tabela 1. Já a localização geográfica das estações é mostrada na Figura 2.

Tabela 1 – Estações RBMC selecionadas para o experimento.

Estação	Município/UF	Estação	Município/UF
BELE	Belém/PA	MGVA	Varginha/MG
BOMJ	Bom Jesus da Lapa/BA	NAUS	Manaus/AM
BRAZ	Brasília/DF	NEIA	Cananéia/SP
BRFT	Euzébio/CE	POLI	São Paulo/SP
CHPI	Cachoeira Paulista/SP	POVE	Porto Velho/RO
CUIB	Cuiabá/MT	RECF	Recife/PE
GVAL	Governador Valadares/MG	RIOD	Rio de Janeiro/RJ
IMPZ	Imperatriz/MA	UBA1	Ubatuba/SP
MCLA	Montes Claros/MG	SMAR	Santa Maria/RS

Figura 2 – Distribuição geográfica das estações RBMC selecionadas.



Os índices de irregularidades da ionosfera foram calculados para todas as estações, mas, para fins de exemplificação, somente são apresentadas os índices das estações BELE, BRAZ, RIOD e SMAR. Porém, as análises foram realizadas considerando todas as estações e se baseiam no comportamento gráfico dos índices, bem como nos coeficientes de correlação de Pearson entre os índices F_p e I_{ROT} , F_p e $ROTI$, e entre I_{ROT} e $ROTI$, com o intuito de verificar o grau de correlação entre os índices após essas adaptações.

Nas Figuras 3 a 6 são mostrados os índices de irregularidades da ionosfera estimados para as estações BELE, BRAZ, RIOD e SMAR, e a Tabela 2 apresenta os coeficientes de correlação de todas as estações selecionadas.

Figura 3 – Índices F_p , I_{ROT} e $ROTI$ da estação BELE.

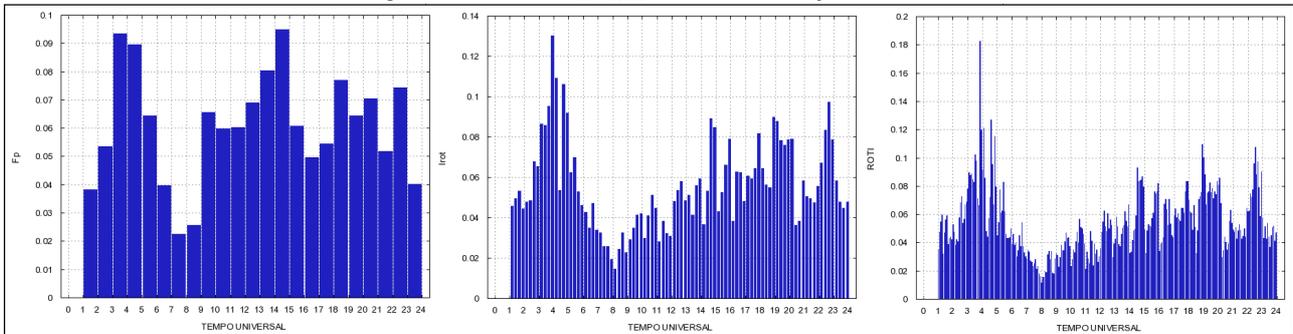


Figura 4 – Índices F_p , I_{ROT} e $ROTI$ da estação BRAZ.

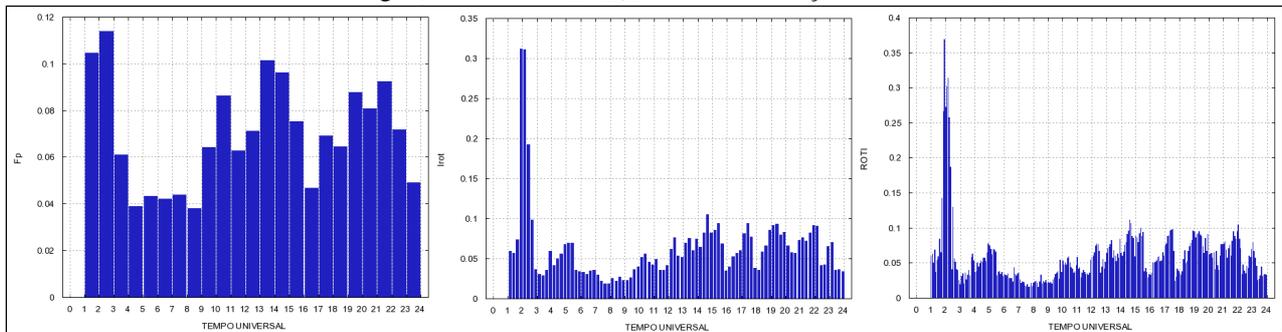


Figura 5 – Índices F_p , I_{ROT} e $ROTI$ da estação RIOD.

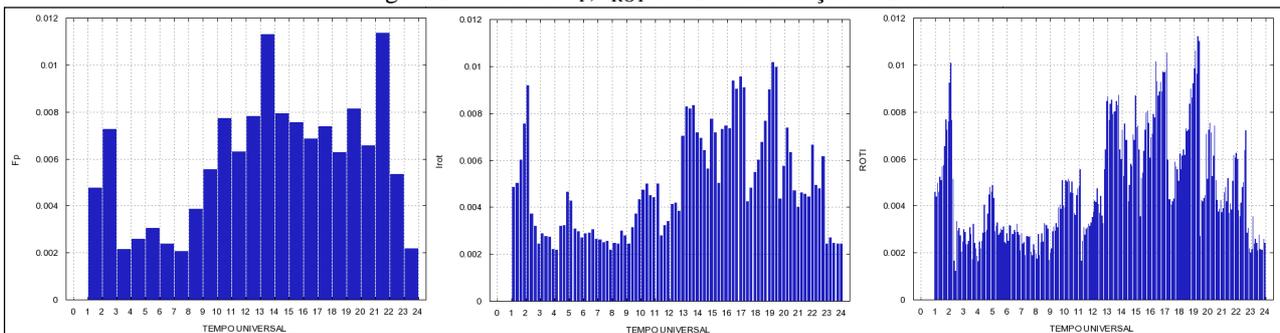
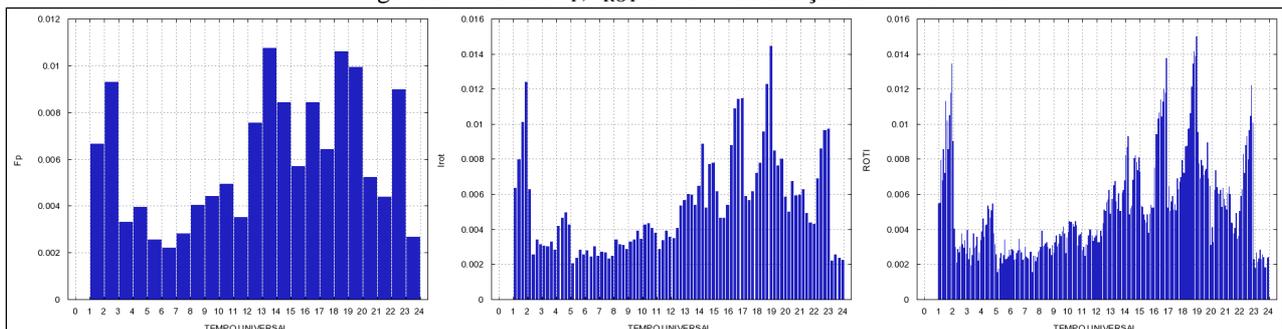


Figura 6 – Índices F_p , I_{ROT} e $ROTI$ da estação SMAR.



Pode-se verificar pelas Figuras 3 a 6 que os valores dos índices I_{ROT} e $ROTI$ são homólogos ao índice F_p , sendo os valores da estação BELE (Figura 3) não superiores a 0,1 e inferiores a 0,05 em sua grande maioria, que de acordo com o padrão classificatório consiste em moderado níveis de irregularidades. Destacam-se os picos nas horas 04h e 05h, dos índices I_{ROT} e $ROTI$ devido aos intervalos de tempo utilizados nos cálculos (15 e 5 minutos, respectivamente) serem inferiores do que o F_p (1 hora), que contribui para a detecção de pequenas variações de irregularidades. O mesmo ocorre para a estação BRAZ (Figura 4), onde os valores não foram superiores a 0,12, o que caracteriza moderado níveis de irregularidades, com exceção para os índices I_{ROT} e $ROTI$ para o período 02-03h, que atingiram valores superiores a 0,3 (fortes níveis de irregularidades). Em relação às estações RIOD e SMAR (Figuras 5 e 6), os valores obtidos tanto para F_p quanto para I_{ROT} e $ROTI$ não ultrapassaram a casa de 0,02, classificando assim o nível das irregularidades como baixa. O fato das estações SMAR e RIOD apresentarem valores inferiores às estações BELE e BRAZ se deve aos efeitos da anomalia equatorial sobre as regiões de Belém e Brasília.

Tabela 2 – Coeficientes de correlação de Pearson entre os índices F_p , I_{ROT} e $ROTI$.

Estação	$\rho_{F_p/I_{ROT}}$	$\rho_{F_p/ROTI}$	$\rho_{I_{ROT}/ROTI}$
BELE	0,8075	0,8071	0,9988
BOMJ	0,7774	0,7773	0,9989
BRAZ	0,8344	0,8457	0,9972
BRFT	0,7449	0,7307	0,9992
CHPI	0,7662	0,7550	0,9991
CUIB	0,7287	0,7280	0,9989
GVAL	0,7399	0,7311	0,9992
IMPZ	0,7269	0,7408	0,9990
MCLA	0,7522	0,7502	0,9992
MGVA	0,8255	0,8141	0,9989
NAUS	0,8637	0,8670	0,9992
NEIA	0,7785	0,7388	0,9936
POLI	0,8187	0,8067	0,9989
POVE	0,8035	0,8158	0,9985
RECF	0,7008	0,7098	0,9977
RIOD	0,7709	0,7602	0,9985
UBA1	0,8025	0,8015	0,9994
SMAR	0,8025	0,8015	0,9994

Observado a correspondência gráfica entre os valores dos índices I_{ROT} e $ROTI$ com o índice F_p para todas as estações, e com base nos valores dos coeficientes de correlação (Tabela 2), que foram superiores a 0,7 (o que caracteriza moderada a forte correlação), conclui-se que os níveis das irregularidades ionosféricas obtidos pelos índices I_{ROT} e $ROTI$ podem ser classificados a partir de adaptações ao padrão de classificação do índice F_p .

Para obter os padrões classificatórios dos índices propostos por Wanninger (1993) e Pi et al. (1997) basta multiplicar os limiares 0,05 e 0,2 pelas constantes multiplicativas, ou seja, por “10” para o I_{ROT} e por “1” para o $ROTI$. Portanto:

- Padrão classificatório do índice I_{ROT} :
 - $I_{ROT} \leq 0,5$ – baixos níveis de irregularidades;
 - $0,5 < I_{ROT} \leq 2,0$ – moderado níveis de irregularidades; e
 - $I_{ROT} > 2,0$ – fortes níveis de irregularidades.
- Padrão classificatório do índice $ROTI$:
 - $ROTI \leq 0,05$ – baixos níveis de irregularidades;
 - $0,05 < ROTI \leq 0,2$ – moderado níveis de irregularidades; e
 - $ROTI > 0,2$ – fortes níveis de irregularidades.

Wanninger (1993) relata-se que valores de $I_{ROT} > 2,0$ caracterizam fortes níveis de irregularidades, e em Pi et al. (1997) valores de $ROTI > 0,2$ indicam fortes níveis de irregularidades da ionosfera. No entanto, os autores não explicitam claramente os padrões de classificação dos índices; eles apenas fazem conclusões a respeito dos valores.

5 CONCLUSÕES

Os índices I_{ROT} e ROTI representam/detalham melhor as irregularidades da ionosfera do que o índice F_p , devido ao fato de ambos serem estimados a partir de períodos de dados menores do que o índice F_p (para o índice I_{ROT} o período é de 15 minutos e para o ROTI é de 5 minutos, ao passo que para o F_p é de 1 hora). Portanto, conclui-se que os índices I_{ROT} e ROTI identificam as flutuações em pequena escala, ao contrário do índice F_p que retrata um nível geral de irregularidades.

Entretanto, padrões classificatórios das irregularidades para os índices I_{ROT} e ROTI não são apresentados na literatura, ao contrário do F_p , proposto por Mendillo et al. (2000). Assim, por meio da análise dos referidos índices, obtidos para um conjunto de estações da RBMC, para o dia 21 de novembro de 2007 (baixa atividade solar), constatou-se que os comportamentos dos mesmos são similares, como pode ser verificados nos valores dos coeficientes de correlação obtidos nos experimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores desse projeto agradecem à FAPESP (proc. n° 2013/19147-1) pela bolsa de Mestrado, ao CNPq pela bolsa Produtividade em Pesquisa (proc. n° 309924/2013-8) e apoio à Pesquisa (proc. n° 479965/2013-7) e ao IBGE pelo fornecimento dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPLETON, E. V. Two anomalies in the ionosphere. *Nature*, 157, 691, 1946.

CHATTERJEE, S.; CHAKRABORTY, S. K. Variability of ionospheric scintillation near the equatorial anomaly crest of the Indian zone. *Ann. Geophys.*, v.31, p.697-711, 2013.

CHU, F. D.; LEE, C. C.; CHEN, W. S.; LIU, J. Y. A study of long-term climatology of ionospheric irregularities by using GPS phase fluctuations at the Brazilian longitudes. *Advances in Space Research*, v.41, p.645-649, 2008.

EL GIZAWY, M. L. *Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users*. 2003. 173p. Msc Dissertation – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20171, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

FORTE, B. On the relationship between the geometrical control of scintillation indices and the data detrending problems observed at high latitudes. *Annals of Geophysics*, v.50, n.6, p.699-706, 2007.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. New York: Springer-Verlag Wien, 2008. 516p.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. *Introdução à geofísica espacial*. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149p.

LEICK, A. *GPS satellite surveying*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.

LIN, L. S. A novel approach to improving the accuracy of real-time ionospheric delay estimation using GPS. *Proceedings of The 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation - ION GPS-97*, Kansas City, Sept. 16-19, p.169-178, 1997.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para produção de mapa da ionosfera para região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.56, n.1, p.14-27, 2004.

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

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

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

MUSHINI, S. C.; JAYACHANDRAN, P. T.; LANGLEY, R. B.; MACDOUGALL, J. W.; POKHOTELOV, D. Improved amplitude and phase scintillation indices derived from wavelet detrended high latitude GPS data. *GPS Solutions*, v.16, n.3, p.363-373, 2011.

OLADIPO, O. A.; SCHÜLER, T. Equatorial ionospheric irregularities using GPS TEC derived index. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.92, p.79-82, 2013.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Estimativa e análise de índices de irregularidades da ionosfera utilizando dados GNSS de redes ativas. In: *Boletim de Ciências Geodésicas*. Curitiba: UFPR, v.19, n.3, p.374-390, 2013.

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.

SANDFORD, W. H. The impact of solar winds on navigation aids. *Journal of Navigation*, v.52, n.1, p.42-46, 1999.

SEEBER, G. *Satellite geodesy*. 2nd ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SHAN, S. J.; LIU, J. Y.; KUO, F. S.; LIU, C. C.; TSAI, H. F. GPS phase fluctuations observed along the American sector during low irregularity activity months of 1997-2000. *Earth Planets Space*, v.54, p.141-152, 2002.

VAN DIERENDONK, A. J.; KLOBUCHAR, J. A.; HUA, Q. Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers. In: *Proceedings of the Institute of Navigation*. Alexandria (VA): [s.n.], p.1324-1333, 1993.

WANNINGER, L. Ionospheric monitoring using IGS data. *Paper presented at the IGS Workshop*, Inst. of Geol. Sci., Bern, Switzerland, 1993.

WEBSTER, I. *A regional model for prediction of ionospheric delay for single frequency users of the Global Positioning System*. 1993. Msc Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.