
ESTIMATIVA E ANÁLISE DAS IRREGULARIDADES DA IONOSFERA UTILIZANDO DADOS GPS DE REDES ATIVAS

VINÍCIUS AMADEU STUANI PEREIRA ¹

PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO ²

Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
Departamento de Engenharia Cartográfica, Presidente Prudente, SP
¹ vi_stuani@hotmail.com; ² paulo@fct.unesp.br

RESUMO – A camada ionosférica é a principal fonte de erro sistemático no posicionamento pelo GNSS (*Global Navigation Satellite System*), e está relacionada com o Conteúdo Total de Elétrons (TEC), presente na ionosfera, que por sua vez, é influenciado por diversas variáveis: ciclo solar, época do ano, hora local, localização geográfica e atividade geomagnética. Os receptores GPS (*Global Positioning System*) e GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*) de dupla frequência permitem calcular o erro que ocorre nas observáveis GPS/GLONASS e o TEC. Com taxa de variação do TEC (ROT - *Rate of TEC*) pode-se determinar vários índices que indicam irregularidades da ionosfera, permitindo assim fazer inferências sobre o comportamento da mesma. Atualmente é possível realizar estudos dessa natureza no Brasil graças às diversas Redes Ativas disponíveis, tais como a RBMC/RIBaC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo/Rede INCRA de Bases Comunitárias) e a Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo, que juntas disponibilizam dados de mais de 100 receptores e que possibilitam estudar o comportamento da ionosfera na região brasileira. A pesquisa visa à estimativa e análise das irregularidades da ionosfera, por meio de índices obtidos com dados GNSS. Além de suprir as geociências de informações concisas e coerentes sobre o comportamento da ionosfera.

ABSTRACT - The ionospheric layer is the main source of systematic error in positioning by GNSS (*Global Navigation Satellite System*), and is related to the Total Electron Content (TEC), present in the ionosphere, which in turn is influenced by several variables: cycle solar, time of year, local time, geographical location and geomagnetic activity. The GPS (*Global Positioning System*) and GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*) dual frequency receivers can calculate the error that occurs in the observable GPS / GLONASS and the TEC. Rate of change of TEC (ROT - *Rate of TEC*) can determine several indexes that indicate irregularities in the ionosphere, allowing inferences about the behavior of the same. Currently it is possible to perform such studies in Brazil thanks to the various Active Networks are available, such as RBMC/ RIBaC (Brazilian Network for Continuous Monitoring/INCRA Base Community Network) and GNSS Active Network of São Paulo, which together provide data from more than 100 receivers and allow to study the behavior of the ionosphere in the Brazilian region. The research aims to estimate and analysis of irregularities of the ionosphere, through indices obtained with GNSS data. Besides supplying the geosciences concise and consistent information about the behavior of the ionosphere.

1 INTRODUÇÃO

Com a desativação da técnica SA (*Selective Availability*), ocorrida em 1º de maio de 2000, o erro devido à camada ionosférica tornou-se a maior fonte de erro sistemático no posicionamento com GNSS (*Global Navigation Satellite System*) (CAMARGO, 1999). O erro associado à ionosfera depende do Conteúdo Total de Elétrons (TEC), presente na camada ionosférica, que por sua vez, é influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora local, localização geográfica e atividade geomagnética. Os receptores GPS (*Global Positioning System*) e GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*) de dupla frequência permitem calcular o erro que ocorre nas observáveis GNSS e o TEC. Com base na taxa de variação do TEC (ROT - *Rate of TEC*) e na flutuação da fase podem-se determinar vários índices que indicam irregularidades da ionosfera, permitindo assim fazer inferências sobre o comportamento da mesma, bem como realizar o planejamento e/ou análise dos resultados dos levantamentos com

GNSS. Atualmente é possível realizar estudos dessa natureza no Brasil graças às diversas Redes Ativas disponíveis, com receptores GLS/GLONASS de dupla frequência, tais como a RBMC/RIBaC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo/Rede INCRA de Bases Comunitárias) e a Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo, que juntas disponibilizam dados de mais de 100 receptores que possibilitam estudar o comportamento da ionosfera na região brasileira. Informações sobre a ionosfera são importantes no posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*) e RTK em rede, pois auxiliam na aceitação dos resultados em função da solução ou não da ambiguidade (BARBOSA, 2010). Os índices de irregularidades da ionosfera podem auxiliar no planejamento e/ou análise dos resultados dos levantamentos com GNSS.

2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo apresentar uma metodologia para calcular índices de irregularidades da ionosfera, a partir de dados GPS coletados nas estações das Redes Ativas do Brasil; produzir gráficos da taxa de variação do TEC (ROT) e dos índices de classificação das irregularidades, de forma a permitir inferências sobre o comportamento da ionosfera.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste projeto foram:

- Dados GPS das Redes Ativas, tais como: RBMC/RIBaC e Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo;
- *Software* Dev-C++, versão 4.9.9.2, para a implementação de rotinas para o cálculo dos índices de irregularidades da ionosfera;
- *Software* GNU PLOT, versão 4.2.3, para a produção dos gráficos do ROT e dos índices de irregularidades;
- Programa Mod_Ion para calcular o TEC e ROT.

A primeira etapa da pesquisa consistiu no cálculo do TEC, que representa o número de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde o receptor até o satélite, com área da base unitária (1 m²) (MATSUOKA e CAMARGO, 2004). A unidade do TEC é elétrons/m², entretanto, para propósitos de padronização tem-se adotado como unidade para o TEC o TECU (TEC Unit – Unidade de TEC), sendo 1 TECU = 10¹⁶ elétrons/m². Os valores do TEC foram calculados com o modelo ionosférico (Mod_Ion), desenvolvido na FCT/UNESP (CAMARGO, 1999).

A partir do TEC, com o Mod_Ion, foi determinada a taxa variação (ROT), que é a diferença entre os TECs obtidos consecutivamente entre duas épocas, dividido pelo intervalo de tempo entre suas determinações. Os valores dos ROTs, por sua vez, são utilizados no cálculo dos índices de irregularidades da ionosfera (fp e Fp).

O índice fp (*phase fluctuation*) é o valor da mediana dos ROTs, calculados a cada 60 segundos, durante um período de 15 minutos. O índice fp é calculado para cada satélite de uma determinada estação, e é sempre maior ou igual a zero. O uso do valor da mediana efetivamente elimina os picos de ruídos. Assim, para diversos satélites/estações ele representa a resolução espacial das irregularidades (MENDILLO, LIN e AARONS, 2000).

$$f_p(n, hr, i) = \text{Mediana} \left| \frac{\Delta \text{TEC}}{\text{min}} \right| \quad (1)$$

onde n é o número do satélite, hr é a hora (00-24 UT), i número da seção com duração de 15 minutos dentro de uma hora, ou seja, i = 1, 2, 3 ou 4.

Já o índice Fp é calculado para cada estação, para cada hora. Representa o valor médio de fp de todos os satélites observados em uma estação dentro de uma hora. Fp destina-se a retratar o nível geral de irregularidades presentes na vizinhança de uma determinada estação (MENDILLO, LIN e AARONS, 2000).

$$F_p(hr) = \frac{\sum_n^{nsat} \sum_i^k f_p(n, hr, i)}{nsat \cdot k} \cdot 1000 \quad (2)$$

onde nsat é o número total de satélites observados dentro de uma hora e k é o número de valores fp disponíveis dentro de cada hora (k = 1, 2, 3 ou 4).

A constante multiplicativa (1000) é usada para tornar Fp um índice inteiro. Um valor $F_p \leq 50$ representa baixos níveis de irregularidades; $50 \leq F_p \leq 200$ significa a presença de moderada irregularidade, e quando $F_p \geq 200$ representa a ocorrência de níveis de irregularidades muito forte.

Os dados GNSS da RBMC/INCRA foram obtidos na página do IBGE (www.ibge.gov.br) e os da Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo diretamente no LGE (Laboratório de Geodésia Espacial) da FCT/UNESP. Uma vez calculados os parâmetros de interesse para a pesquisa, os arquivos RINEX foram descartados para não sobrecarregar o servidor de dados, já que os mesmos estão disponíveis nos bancos de dados dos órgãos responsáveis pelo Sistema de Controle Ativo (SCA). Após o desenvolvimento e implementação das rotinas, os dados foram processados, analisados e representados por meio de gráficos e/ou mapas. Índices de irregularidades da ionosfera foram calculados para dois períodos, um de baixa atividade solar (novembro de 2007) e outro de alta atividade solar (outubro de 2003), sendo a de alta atividade afetada ainda por uma explosão solar, com objetivo de analisar o comportamento ionosfera.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram determinados os índices de irregularidades da ionosfera para várias estações das Redes Ativas, para dois períodos específicos: um de baixa atividade solar (21 de novembro de 2007) (figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9) e outro de alta atividade (explosão) solar (28 de outubro de 2003) (figuras 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17). Para fins de exemplificação, serão apresentados os índices de quatro estações, sendo uma de baixa latitude (Fortaleza/CE – BRFT), duas de latitude média (Cuiabá/MT – CUIB; Viçosa/MG – VICO) e outra de alta latitude (Santa Maria/RS - SMAR). A figura 1 apresenta a distribuição geográfica das estações. Um dos motivos da escolha da estação Fortaleza (BRFT) é por estar localizada na região equatorial, que sofre um fenômeno denominado “efeito fonte”. O efeito fonte gera a anomalia equatorial, que consiste em duas faixas de alta densidade do plasma ionosférico, localizadas nas regiões tropicais que circulam paralelamente ao equador magnético (RODRIGUES, 2003).



Figura 1 – Distribuição geográfica das estações.

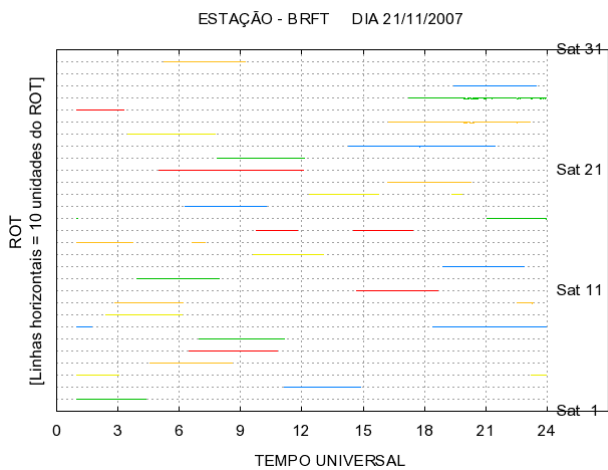


Figura 2 – ROT – Estação Fortaleza/CE, 21/11/2007.

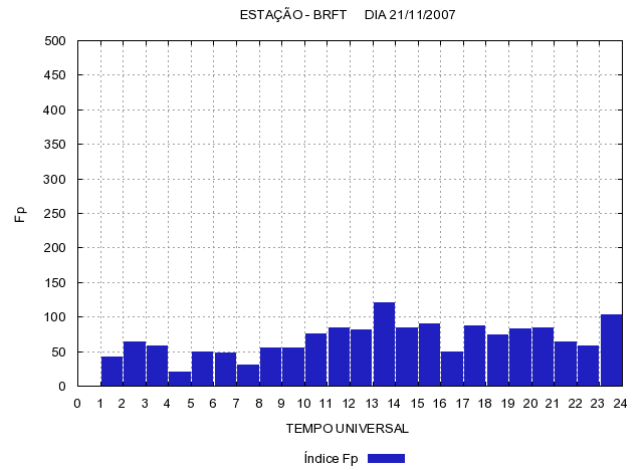


Figura 3 – Índice Fp – Estação Fortaleza/CE, 21/11/2007.

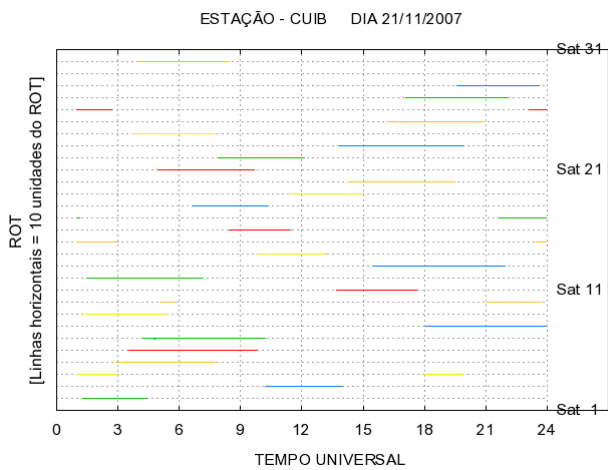


Figura 4 – ROT – Estação Cuiabá/MT, 21/11/2007.

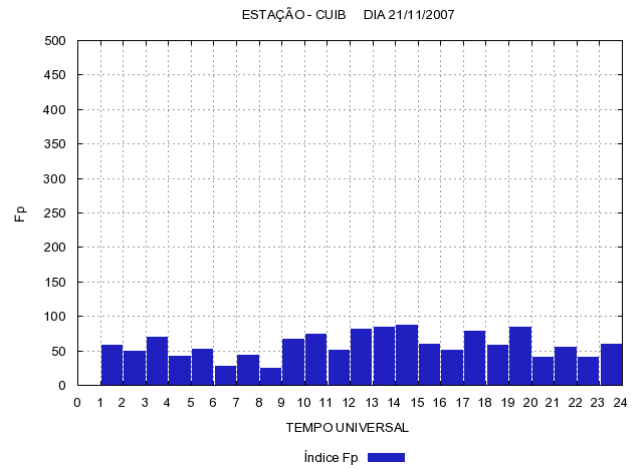


Figura 5 – Índice Fp – Estação Cuiabá/MT, 21/11/2007.

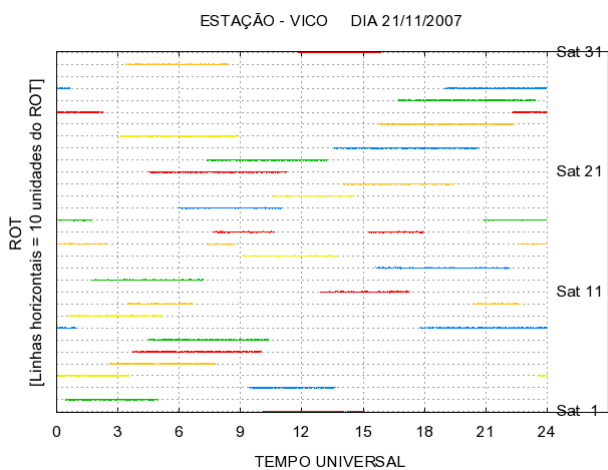


Figura 6 – ROT – Estação Viçosa/MG, 21/11/2007.

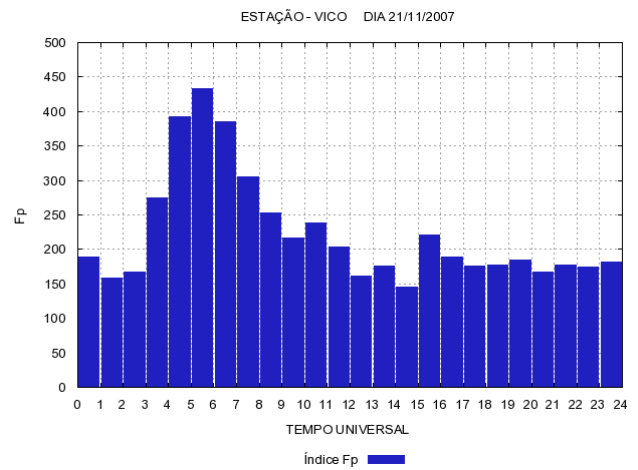


Figura 7 – Índice Fp – Estação Viçosa/MG, 21/11/2007.

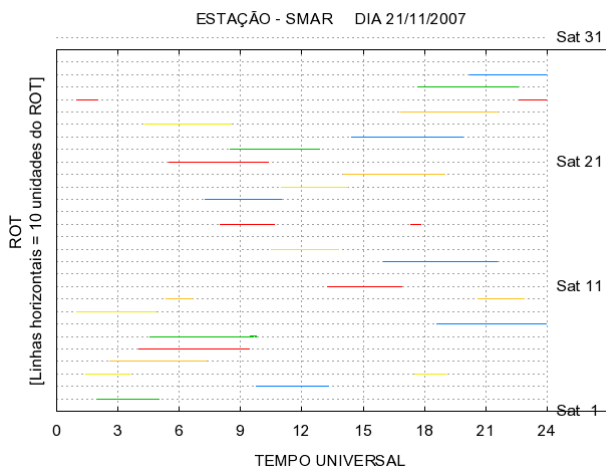


Figura 8 – ROT – Estação Santa Maria/RS, 21/11/2007.

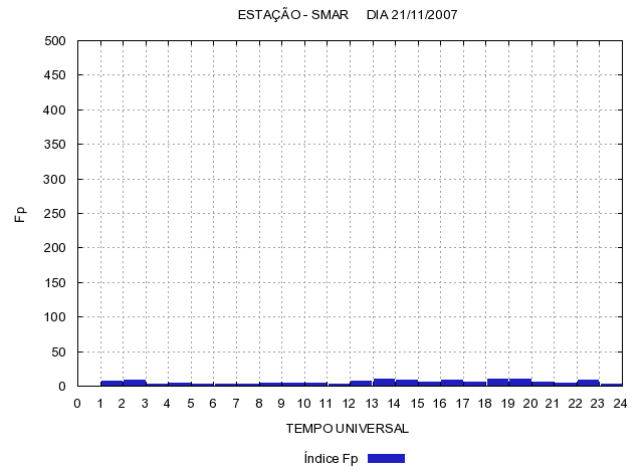


Figura 9 – Índice Fp – Estação Santa Maria/RS, 21/11/2007.

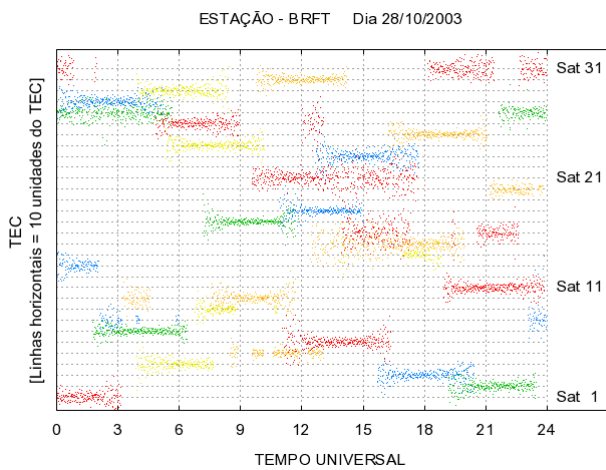


Figura 10 – ROT – Estação Fortaleza/CE, 28/10/2003.

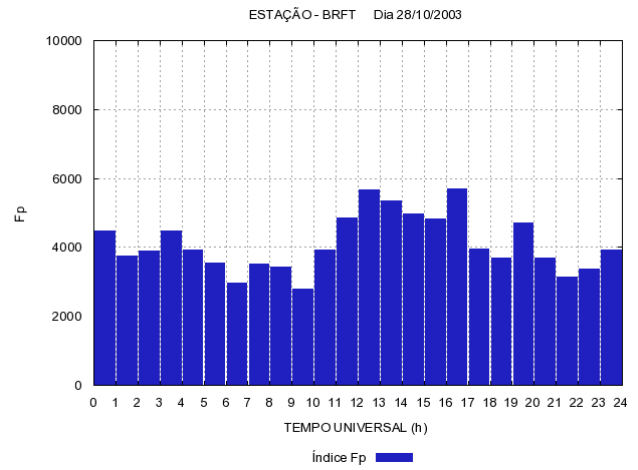


Figura 11 – Índice Fp – Estação Fortaleza/CE, 28/10/2003.

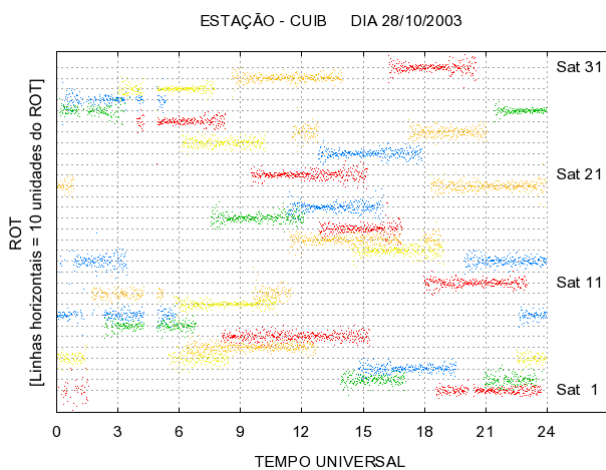


Figura 12 – ROT – Estação Cuiabá/MT, 28/10/2003.

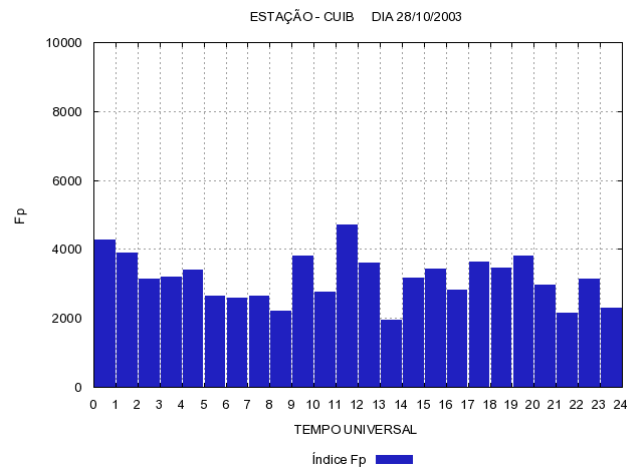


Figura 13 – Índice Fp – Estação Cuiabá/MT, 28/10/2003.

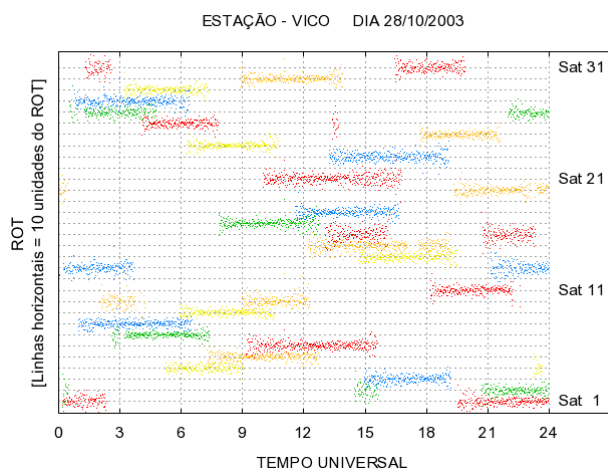


Figura 14 – ROT – Estação Viçosa/MG, 28/10/2003.

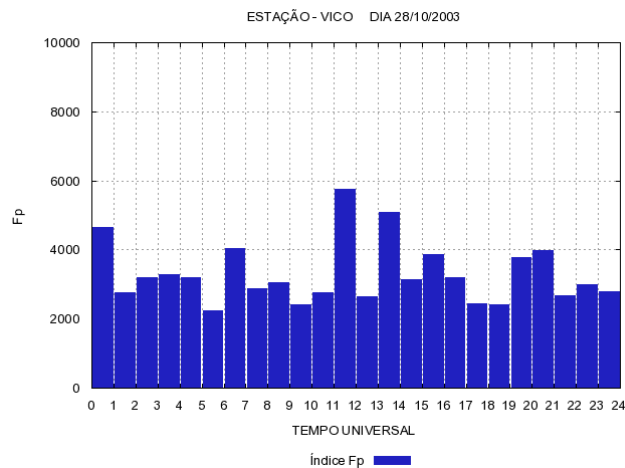


Figura 15 – Índice Fp – Estação Viçosa/MG, 28/10/2003.

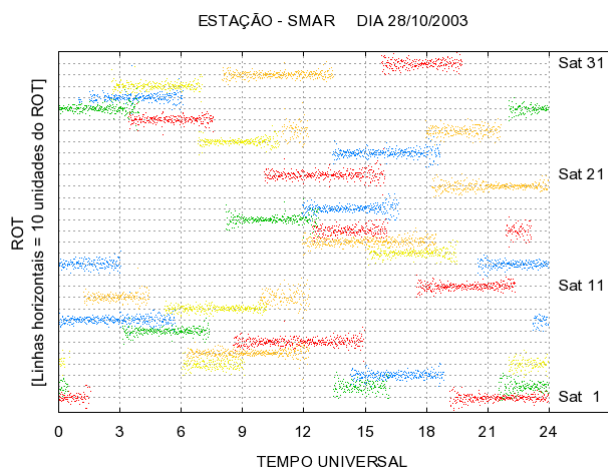


Figura 16 – ROT – Estação Santa Maria/RS, 28/10/2003.

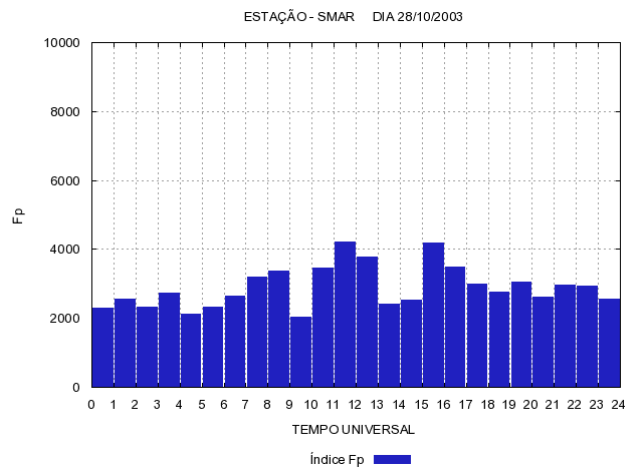


Figura 17 – Índice Fp – Estação Santa Maria/RS, 28/10/2003.

5 CONCLUSÕES

Conforme apresentado nas figuras 2, 4, 6 e 8, tanto para as estações localizadas em latitude baixas, médias como em latitudes altas, as flutuações de fase (ROT) foram mínimas, devido ser um período de baixa atividade solar, o que acarretou baixos valores dos índices de irregularidade da ionosfera (figuras 3, 5, 7 e 9), não sendo superior a 200 para grande parte das estações (com exceção da estação Viçosa, que apresentou pico de aproximadamente 450 às 5 horas), o que, de acordo com Mendillo, Lin e Aaron (2000), representa moderado níveis de irregularidade. Já, as figuras 10, 12, 14 e 16 mostram elevadas flutuações de fase, devido ser um período de alta atividade solar, que por sua vez gerou índices de irregularidades da ionosfera alarmantes (figuras 11, 13, 15 e 17), superiores a 2000, o que significa ocorrência de níveis de irregularidade muito forte. Um dos motivos da estação Fortaleza apresentar valores de Fp maiores do que as demais estações é devido à mesma estar localizada na região equatorial. Uma vez determinado os índices de irregularidades da ionosfera para diversas estações, pode-se realizar o planejamento e/ou análise dos resultados dos levantamentos com GNSS.

AGRADECIMENTOS

Os autores desse projeto agradecem à FAPESP (Processo n° 2011/00986-8) pelo apoio financeiro, por meio da bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, E. M. Integridade, Disponibilidade e Acurácia no Posicionamento RTK e RTK em Rede: Investigação no Contexto da Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, 2010. 140p.

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, 1999. 191p.

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, Presidente Prudente, v. 56, n. 01, p. 14-27, 2004.

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

RODRIGUES, F. S. R. Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. 151p.