



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/08.29.12.28-PUD

**ESTUDOS DO CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL
SOBRE A AMÉRICA DO SUL EM PERÍODOS
MAGNETICAMENTE CALMOS E PERTURBADOS**

Patrícia Mara de Siqueira Negreti

Relatório de Pós-Doutorado
Período: Junho/2016 - Junho/2018
Supervisor: Dr. Eurico Rodrigues
de Paula

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RNE268>>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos
Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia
Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra
(CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/08.29.12.28-PUD

**ESTUDOS DO CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL
SOBRE A AMÉRICA DO SUL EM PERÍODOS
MAGNETICAMENTE CALMOS E PERTURBADOS**

Patrícia Mara de Siqueira Negreti

Relatório de Pós-Doutorado
Período: Junho/2016 - Junho/2018
Supervisor: Dr. Eurico Rodrigues
de Paula

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RNE268>>

INPE
São José dos Campos
2018



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

RESUMO

Neste relatório de pós-doutorado é apresentado um estudo da ionosfera equatorial e de baixas latitudes sobre a região da América do Sul, utilizando como parâmetro de análise o Conteúdo Eletrônico Total (*Total Electron Content* - TEC), em conjunto com parâmetros geomagnéticos (Sym-H, AE e Kp) e parâmetros do vento solar. Foram utilizados também dados de magnetômetros para complementar o estudo. Foram realizadas observações da variabilidade dia-a-dia do TEC e seu comportamento durante períodos calmos e perturbados. Estudos de eventos HILDCAAs (*High Intensity Long Duration Continuous AE Activity*) e seus efeitos na ionosfera foram realizados, assim como análise de períodos geomagneticamente perturbados caracterizados por tempestades magnéticas. Foram realizadas também análises estatísticas da correlação entre o TEC e o fluxo solar medido pelo índice F10.7, de 2008 a 2014. A fim de observar os gradientes no TEC considerando diversos cenários, foi utilizado um software de cálculo de TEC desenvolvido por Gopi Seemala (Seemala and Valladares, 2011) que calcula o TEC de cada estação receptora de GPS separadamente. Nesta pesquisa foram estudados fenômenos geofísicos de larga escala que afetam a ionosfera terrestre e que modificam o TEC, com ênfase na região equatorial e de baixas latitudes. Um exemplo são as tempestades geomagnéticas, que ocorrem usualmente durante os períodos de máxima atividade solar. O fenômeno de penetração de campos elétricos é responsável por alterar consideravelmente o TEC na região de baixas latitudes, e será também considerado nesse estudo, a partir da análise dos dados de magnetômetros localizados na região Brasileira e na região Peruana. Além disso, foi estudada a relação dos fenômenos HILDCAAs (*High Intensity Long Duration Continuous AE Activity*) com a ionosfera equatorial e de baixas latitudes por meio do parâmetro TEC. O estudo do TEC durante períodos magneticamente calmos e perturbados é muito importante, pois ele afeta os sinais eletromagnéticos que atravessam a ionosfera causando um retardo no sinal, bem como afeta a amplitude da cintilação ionosférica, afetando conseqüentemente os sistemas de telecomunicações orientados por satélites.

Sumário

1	Introdução	4
2	Metodologia	8
2.1	Dados Geomagnéticos	12
2.2	Dados Interplanetários	12
3	Aplicação do cálculo do TEC no estudo ionosférico de baixas latitudes	14
3.1	Características anuais do TEC	14
3.2	Características Sazonais do TEC	23
3.3	Eventos HILDCAAs	24
3.3.1	Evento de 13-31 de Março de 2013	26
3.3.2	Evento de 02-20 de Agosto de 2013	30
3.4	Tempestade geomagnética de setembro/2017	34
4	Dependência do TEC com o parâmetro F10.7	39
4.1	Dependência anual de 2008 a 2014	40
4.2	Dependência sazonal observada em 2008	46
4.3	Dependência sazonal observada em 2009	49
4.4	Dependência sazonal observada em 2010	52
4.5	Dependência sazonal observada em 2011	55
4.6	Dependência sazonal observada em 2012	58
4.7	Dependência sazonal observada em 2013	61
4.8	Dependência sazonal observada em 2014	64
5	Conclusões e considerações finais	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1 Introdução

Este relatório de pós doutorado apresenta os resultados relativos à pesquisa desenvolvida no período 06/2016 - 06/2018, cujos objetivos principais foram:

- a) análise do TEC observado no período de mínima atividade solar (2008) e no período de máxima atividade solar (2014) do Ciclo Solar 24;
- b) ampliação do cálculo de TEC abrangendo os anos de 2009-2014, sobre a região da América do Sul;
- c) análise do TEC em períodos de ocorrência de HILDCAAs (*High Intensity Long Duration Continuous AE Activity*) e
- d) análise do TEC em períodos de ocorrência de tempestades magnéticas.
- e) análise estatística da correlação entre o TEC e o fluxo solar F10.7.

O estudo da ionosfera terrestre é um tópico importante em Clima Espacial. A ionosfera é formada pelas radiações solares nas faixas do ultravioleta, extremo ultravioleta, raios X e partículas energéticas, absorvidas por colisões com os constituintes neutros atmosféricos. À medida que esta radiação penetra na atmosfera mais densa, a produção de elétrons aumenta até um nível máximo. Abaixo deste nível, apesar do aumento na densidade da atmosfera neutra, a produção de elétrons decresce, pois a maior parte da radiação ionizante já foi absorvida e a taxa de perda predomina sobre a taxa de produção de elétrons. Uma importante característica da ionosfera é que nesta camada a ionização existe em quantidade suficiente para alterar a propagação de ondas de rádio (Rishbeth e Garriot, 1969). A densidade eletrônica ionosférica está diretamente relacionada ao grau de influência nos sinais de ondas eletromagnéticas. A densidade eletrônica em determinada altitude e localização depende do fluxo de radiação solar, da composição dos constituintes neutros e dos efeitos dinâmicos de ventos neutros e campos elétricos. Um parâmetro relacionado à densidade eletrônica ionosférica é o Conteúdo Eletrônico Total (*Total Electron Content – TEC*), que representa o número de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde a superfície terrestre até uma determinada altura na atmosfera, e cuja área da base é unitária. Este parâmetro ionosférico é medido em unidades de TEC (*Total Electron Content Unit – TECU*), onde 1 TECU corresponde a 1×10^{16} elétrons/m². Dessa forma, as variações desse parâmetro causam alterações na propagação de ondas eletromagnéticas devido à refração ionosférica, como mencionado anteriormente. Assim, é possível a utilização de sinais recebidos dos satélites do GNSS (*Global Navigation Satellite System*), mais precisamente do GPS (*Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global*) que é parte integrante do

GNSS, por meio de redes regionais ou globais de observação para calcular o TEC. A magnitude do TEC varia com a atividade solar. Em períodos de atividade máxima, o TEC máximo diurno pode atingir valores maiores do que 100% em relação aos valores observados nos períodos de mínima atividade (Negreti, 2012). Variações diurnas e sazonais também podem ser observadas nos diferentes estágios do ciclo solar. Os períodos de máxima atividade solar são caracterizados por um aumento no número de manchas solares e geralmente são responsáveis por causar as tempestades geomagnéticas e tempestades ionosféricas. As manchas solares são fenômenos temporários presentes na fotosfera solar e são visualizadas como regiões escuras. Elas são causadas por atividade magnética intensa na superfície solar e formam regiões de temperatura reduzida em relação a sua vizinhança, daí a aparência escura no espectro visível. Como manifestação da atividade magnética intensa, as regiões ativas associadas às manchas solares abrigam fenômenos secundários como os laços coronais (*loops*) e reconexão magnética. A maioria das explosões solares (*solar flares*) e ejeções de massa coronal (*Coronal Mass Ejection* – CME) são originadas em regiões magneticamente ativas relacionadas às manchas solares. Durante tempestades magnéticas, o vento solar perturbado comprime a magnetosfera terrestre, e intensos campos elétricos são mapeados ao longo das linhas de campo magnético para a ionosfera de altas latitudes. Estes campos elétricos penetram na ionosfera em baixas latitudes, e em altas latitudes produzem uma rápida convecção de plasma que também dirige os ventos neutros por meio de colisões. Ao mesmo tempo, partículas energéticas precipitam na baixa termosfera e abaixo dela, expandindo a zona auroral, e aumentando a condutividade ionosférica. As intensas correntes elétricas alinhadas ao campo acoplam a ionosfera de altas latitudes com a magnetosfera, e o aumento de deposição de energia causa um aquecimento considerável dos gases ionizado e neutro. A expansão não uniforme resultante da termosfera produz gradientes de pressão que impelem fortes ventos neutros. A circulação termosférica perturbada altera a composição da atmosfera neutra e move o plasma ao longo das linhas de campo magnético, alterando as taxas de produção e recombinação das espécies ionizadas. Enquanto isso, os ventos neutros perturbados produzem campos elétricos de polarização por efeito dínamo, conforme colidem com o plasma na presença do campo magnético terrestre. Estes campos elétricos, por sua vez, afetam os ventos neutros e o plasma, ilustrando que os constituintes neutros e o plasma ionosférico estão acoplados. As tempestades ionosféricas ocorrem na ionosfera como resposta às tempestades magnéticas. Tais tempestades podem ter efeitos significativos e adversos nos sofisticados sistemas tecnológicos terrestres, que estão tornando-se cada vez mais importantes aos governos, corporações e cidadãos. As tempestades ionosféricas estão relacionadas a grandes variações no TEC global. Os efeitos dessas tempestades incluem quedas de energia e *blackouts*

devido à indução de correntes elétricas nas linhas de transmissão de energia (em altas latitudes), danos em satélites causados por partículas de alta energia, aumento no risco de exposição humana à radiação no espaço e em aeronaves que viajam em altas latitudes, modificações do arraste atmosférico nos satélites, erros no GPS e nos sistemas de navegação por VLF (*Very Low Frequency*), perda de comunicação de HF (*High Frequency*), e interrupção de *links* UHF (*Ultra High Frequency*) de satélites devido a cintilações. Um aspecto estudado neste trabalho é o efeito dos campos elétricos de penetração (*Prompt Penetration Electric Fields* - PPEFs) na ionosfera durante as tempestades magnéticas. Os PPEFs são observados quando o campo elétrico zonal ionosférico (gerado pelo dínamo ionosférico) apresenta uma assinatura semelhante ao campo elétrico interplanetário, denotando assim que o campo interplanetário, externo, penetrou na ionosfera. Esse fenômeno pode ser verificado desde o setor polar até a ionosfera equatorial (Kelley et al., 2003). A penetração do campo interplanetário e sua superposição ao campo elétrico zonal causa alterações na dinâmica ionosférica, que pode ser verificada a partir da análise do TEC. Um importante aspecto da dinâmica ionosférica em baixas latitudes é a formação da Anomalia de Ionização Equatorial (AIE), que consiste na formação de picos de ionização em torno do equador geomagnético, na faixa de aproximadamente $\pm 10^\circ - 20^\circ$ de latitude, resultando numa distribuição de ionização conforme a visualizada na Figura 1.1. Esta distribuição de ionização ocorre devido ao efeito fonte, que por sua vez é gerado pela deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ na região equatorial. Sobre o equador geomagnético, a direção do campo geomagnético é perpendicular ao campo elétrico zonal ionosférico diurno, gerado pelo dínamo ionosférico. Dessa forma, por meio da deriva $\vec{E} \times \vec{B}$, o plasma é elevado na região equatorial até grandes altitudes, posteriormente sendo depositado na região das cristas da anomalia devido aos efeitos gravitacionais e de gradiente de pressão que agem sobre o plasma. Formam-se assim as cristas da AIE, que são as regiões de densidade eletrônica aumentada observadas em torno do equador geomagnético. Cabe ressaltar que as modificações no desenvolvimento da anomalia equatorial é uma das manifestações mais perceptíveis da resposta do sistema termosfera-ionosfera equatorial às perturbações magnetosféricas (Abdu et al., 1993; de Siqueira et al., 2011). Tais modificações ocorrem tanto devido aos campos elétricos quanto aos ventos termosféricos, durante os períodos de tempestade e são responsáveis pelos efeitos nos sistemas de transmissão de ondas eletromagnéticas, já mencionados anteriormente.

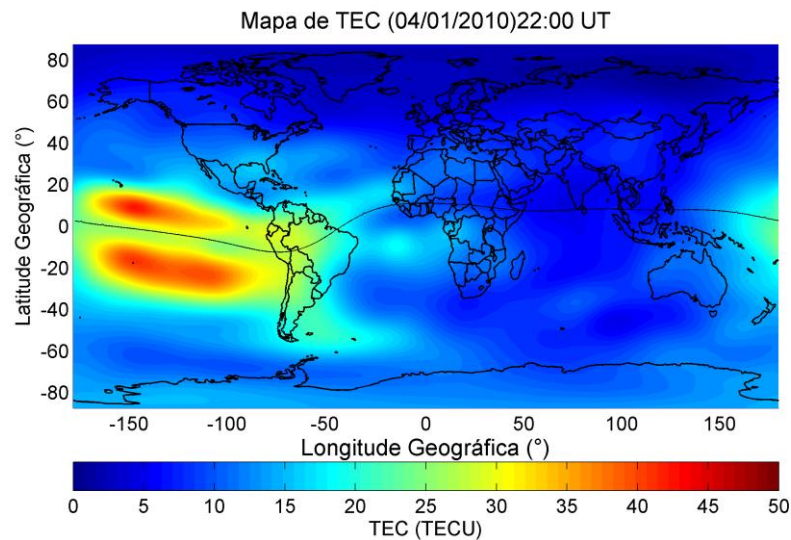


Figura 1.1. Mapa de TEC calculado para o dia 04 de Janeiro de 2010 as 22:00 UT (Universal Time), mostrando os picos da AIE.

Como mencionado anteriormente, neste trabalho será apresentada também uma análise do TEC observado durante eventos HILDCAAs. Os eventos de atividade geomagnética auroral intensificada e contínua, denominados HILDCAAs, foram definidos em Tsurutani e Gonzalez (1987). Tais eventos caracterizam-se principalmente por um aumento na atividade auroral, identificado pelo aumento no índice AE, com picos da ordem de 1000 nT e duração mínima de 2 dias. Além disso, esses eventos devem ocorrer fora da fase principal de tempestades geomagnéticas, sendo comum sua ocorrência durante a fase de recuperação das tempestades. Um outro critério para que o evento seja denominado HILDCAA é que o índice AE não pode ser menor que 200 nT por mais que duas horas no período considerado. Um fenômeno geralmente associado à ocorrência de HILDCAAs são os feixes rápidos do vento solar (*High Speed Streams* – HSS) acompanhados de regiões de interação corrotante (*Corotating Interaction Regions* – CIR). Com o intuito de entender o mecanismo do acoplamento vento solar-ionosfera durante eventos de HSS, Verkhoglyadova et al. (2013) analisaram o papel do mecanismo dos PPEFs. Os autores verificaram uma correlação entre o campo elétrico interplanetário (*Interplanetary Electric Field* – IEF) para leste, as ocorrências de HSS e a variabilidade diurna do TEC. Eles sugeriram que os PPEFs são responsáveis por uma resposta ionosférica imediata (até algumas horas) durante os intervalos de CIR/HSS. Existem evidências adicionais de campos elétricos de penetração contínua e da resposta ionosférica imediata durante HILDCAAs (Wei et al., 2008; Koga et al., 2011), o que é uma explicação para aumentos no TEC observados nesses períodos. Além disso, os HSS podem causar um aumento na deposição de energia auroral e

consequentemente um aquecimento do plasma nessa região, levando à ocorrência de HILDCAAs e posteriormente de campos elétricos de dínamo perturbado (*Disturbance Dynamo – DD*). Dessa forma, uma ação combinada dos PPEFs e do mecanismo de dínamo perturbado pode contribuir para uma resposta da ionosfera/termosfera durante longos períodos após a ocorrência dos HSSs.

2 Metodologia

O TEC tem sido amplamente utilizado para o estudo ionosférico, uma vez que tal parâmetro é relativamente de fácil aquisição (utilizando dados do GPS e métodos apropriados) e retrata a dinâmica ionosférica de forma conveniente para o estudo científico. O estudo do TEC é importante em Clima Espacial, uma vez que esse parâmetro afeta a propagação de sinais via satélite, impactando nos sistemas tecnológicos terrestres, como por exemplo o GNSS (*Global Navigation Satellite System*), em que pode ocorrer perda na precisão do posicionamento devido a modificações ionosféricas.

Neste trabalho o TEC foi calculado utilizando-se o software GPS_TEC desenvolvido por Gopi Seemala (Seemala and Valladares, 2011) e disponibilizado em <http://seemala.blogspot.com/>. O cálculo do TEC baseia-se no índice de refração ionosférico, que é diferente da unidade e afeta os sinais do GPS ao longo da visada satélite-receptor (Coco, 1991, Wanninger, 1993, Klobuchar, 1996). O cálculo do TEC é feito utilizando-se as observáveis do GPS (pseudodistância e fase da portadora), que são disponibilizados em arquivos RINEX diários e são obtidas pelos receptores. RINEX refere-se a um formato padronizado de dados de GPS (*Receiver Independent Exchange Format*). São arquivos escritos em ASCII que possuem uma seção de cabeçalho e uma seção de dados, em que as observações dos satélites visíveis são divididas em intervalos de tempo, sendo que um arquivo contém dados de um dia completo. Existem três tipos de arquivos RINEX obtidos a partir das medidas dos sinais de GPS: arquivos de dados de observação, dados de navegação e dados meteorológicos. Os arquivos de observação e navegação são utilizados no cálculo do TEC. Um efeito significativo da refração ionosférica é o atraso sofrido pelo sinal, que é proporcional ao número de elétrons na seção transversal volumétrica do caminho percorrido, medido em unidades de TEC, ou TECU (TEC units). Os receptores de GPS trabalham com duas frequências L1 (1575,42 MHz) e L2 (1227,6 MHz) a fim de compensar o atraso ionosférico. O atraso ionosférico na portadora L1 de frequência f_1 é dado por (Klobuchar, 1996):

$$t_1 = 40.3 \times (\text{TEC}) / (c \cdot f_1^2), \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo. Um receptor de duas frequências (f_1 e f_2) mede a diferença no atraso entre as duas frequências, $\Delta t = t_2 - t_1$, dado por

$$\Delta t = (40.3/c) \times \text{TEC} \times [(1/f_2^2) - (1/f_1^2)]. \quad (2)$$

Assim, o atraso medido entre as frequências L1 e L2 é utilizado para calcular o TEC ao longo da linha de visada satélite-receptor. O cálculo do TEC utilizando o método acima, que utiliza somente a observável pseudodistância, resulta em uma medida ruidosa, enquanto o TEC calculado a partir da observável fase da portadora fornece um resultado mais preciso de TEC relativo, no entanto a medida a partir da fase possui um número desconhecido de ciclos de fase, ocorridos antes do sinal ser medido no receptor. O TEC absoluto é obtido utilizando-se ambas medidas, a partir da pseudodistância e a partir da fase. Assim, o TEC obtido a partir da pseudodistância fornece a escala correta do TEC, enquanto a medida a partir da fase fornece a precisão necessária na medida. As medidas realizadas de TEC inclinado (na linha de visada satélite-receptor) são a soma do TEC inclinado real, do *bias* (erro no sinal) do satélite b_S e do *bias* do receptor b_R . Assim, o TEC vertical pode ser expresso por

$$\text{VTEC} = [\text{STEC} - (b_R + b_S)] / S(E), \quad (3)$$

onde STEC é o TEC inclinado medido, E é o ângulo de elevação do satélite, em graus, $S(E)$ é a função de mapeamento com ângulo de zênite z no ponto subionosférico (IPP - *ionospheric piercing point*) e VTEC é o TEC vertical no IPP. A função de mapeamento é dada por (Mannucci et al., 1993; Langley et al., 2002):

$$S(E) = \frac{1}{\cos(z)} \left\{ 1 - \left(\frac{R_E \cos(E)}{R_E + h_S} \right)^2 \right\}^{-0,5}, \quad (4)$$

onde R_E é o raio médio terrestre em km e h_S é a altura efetiva da ionosfera acima da superfície da Terra (assumida 400 km). O TEC absoluto é obtido a partir da equação (4) utilizando os *bias* do satélite publicados pela Universidade de Bern e os *bias* dos receptores são calculados minimizando a variabilidade do TEC entre 02:00 LT e 06:00 LT (Rama Rao et al., 2006; Seemala and Valladares, 2011).

No Brasil foram recuperados dados da rede da RBMC/IBGE (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017) com um total de aproximadamente 135 estações receptoras espalhadas em todo o território nacional. Na Figura 2.1 são mostradas as localizações das estações receptoras sobre o território brasileiro.



Figura 2.1. Localização das estações da rede RBMC/RIBaC.

FONTE: IBGE (2017).

Além dos dados de estações receptoras localizadas sobre o território brasileiro, foram utilizados também dados de estações localizadas ao longo da América do Sul, pertencentes à rede RAMSAC (Argentina) e outras bases de dados nos demais países da América do Sul. A disposição das estações da rede RAMSAC pode ser visualizada na Figura 2.2, enquanto as estações nos demais países da América do Sul são visualizadas na Figura 2.3.

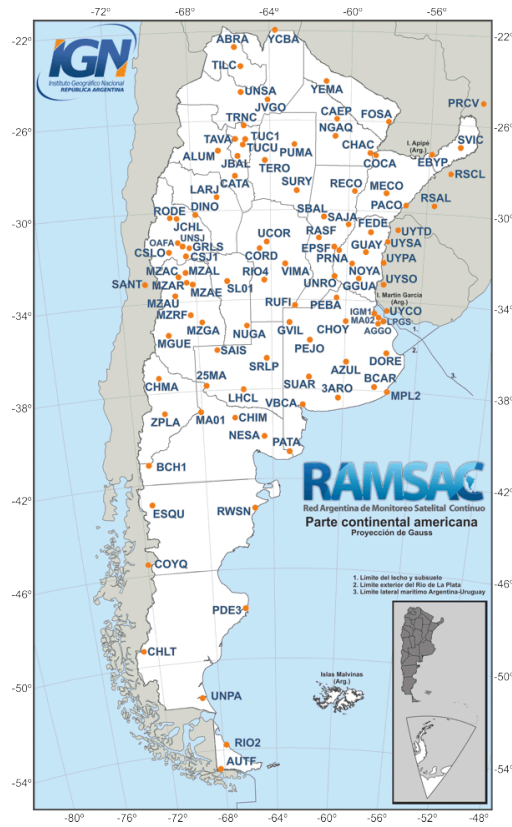


Figura 2.2. Localização das estações da rede RAMSAC.

Fonte: IGN (2017).



Figura 2.3. Localização das redes receptoras nos demais países da América do Sul.

Fonte: SOPAC (2017).

Os dados das redes receptoras mencionadas anteriormente podem ser acessados nas seguintes bases de dados:

- **SOPAC:** *Scripps Orbit and Permanent Array Center Garner GPS Archive* – Repositório que contém arquivos de observação e navegação provenientes de redes globais de receptores GPS. Desta base de dados foram selecionadas estações localizadas em países da América do Sul, América Central, Antártida, e ilhas no Oceanos Atlântico Esta base de dados fica disponível no endereço <<ftp://garner.ucsd.edu/pub/rinex/>>.
- **RBMC/IBGE:** Os arquivos de observação e navegação desta base de dados podem ser acessados em <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/download/tela_inicial.php?tipo=8>.
- **RAMSAC:** *Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo* – Rede de estações receptoras localizada no território argentino. Os arquivos desta base de dados podem ser acessados em <<http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/DescargaRinex>>.

2.1 Dados Geomagnéticos

Foram utilizados dados geomagnéticos para avaliar as respostas geomagnéticas às perturbações provenientes do Sol. Foram obtidos os índices AE, Sym-H e Kp. Estes dados estão disponíveis na base de dados de baixa resolução temporal OMNIWeb (OMNI2) da NASA, acessível no endereço eletrônico <<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html/>>.

2.2 Dados Interplanetários

Os parâmetros do plasma do vento solar e do campo magnético interplanetário utilizados neste trabalho foram medidos pelo satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*) e obtidos na base de dados HRO (*High Resolution Omni*) OMNIWeb da NASA. Esses dados têm resolução temporal de 1 minuto e possuem uma correção de atraso de tempo. Isso significa que é aplicado um atraso nas observações, calculado por modelos, correspondente ao tempo decorrido entre o instante em que a estrutura do vento solar é observada no ACE e o instante posterior de sua interação na magnetopausa, que é efetivamente o momento de interesse na análise (NASA, 2017). É importante ressaltar aqui que o satélite ACE orbita o ponto Lagrangeano L1 do sistema

Sol-Terra, situado a $1,5 \times 10^6$ km da Terra e a $1,5 \times 10^8$ km do Sol, o que implica em uma visão privilegiada do vento solar, do campo magnético interplanetário e das partículas emitidas pelo Sol.

Como mencionado anteriormente, durante os eventos de penetração de campos elétricos o campo elétrico zonal ionosférico apresenta assinatura semelhante ao campo elétrico interplanetário (*Interplanetary Electric Field – IEF*). Daí a importância de se observar estes parâmetros a fim de compará-los e analisar a penetração de campos elétricos durante períodos perturbados e calmos. Neste trabalho foi analisada a componente na direção amanhecer-crepúsculo do campo elétrico interplanetário, que é definida como:

$$E_y = V_{SWx} B_z, \quad (5)$$

em que:

E_y é a componente na direção y (amanhecer-crepúsculo) do campo elétrico interplanetário,

V_{SWx} é a componente na direção x da velocidade do vento solar,

B_z é a componente na direção z do campo magnético interplanetário.

Os resultados apresentados neste trabalho referem-se ao ciclo solar 24 (atual), que é caracterizado por um mínimo estendido (2008-2009), comparado ao mínimo do ciclo anterior, e um máximo solar menos intenso que o anterior, como pode-se observar na Figura 2.4. Observe também que o último máximo solar é caracterizado por dois picos, ocorridos em 2012 e 2014.

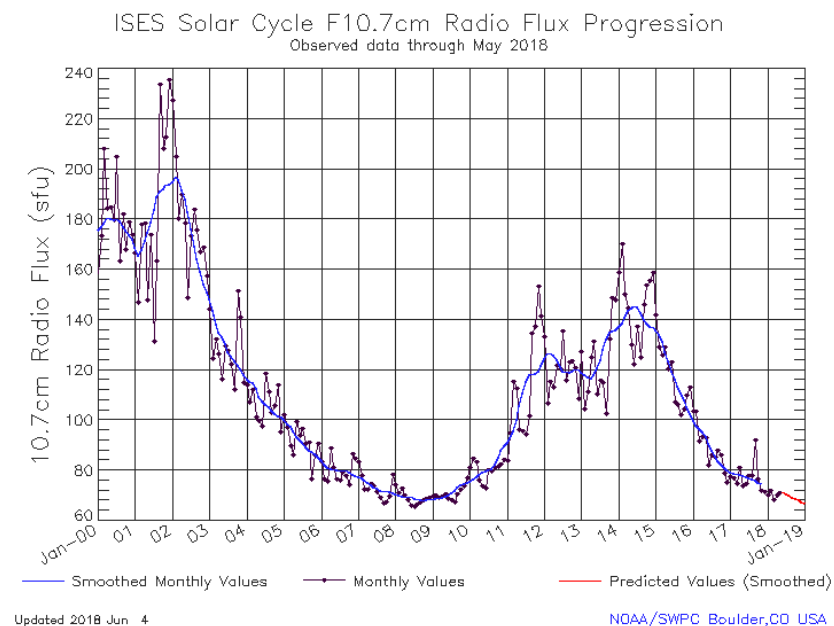


Figura 2.4. Progressão do número de manchas solares no Ciclo Solar 24.

Fonte: NOAA (2018).

3 Aplicação do cálculo do TEC no estudo ionosférico de baixas latitudes

Conforme mencionado anteriormente, o software GPS_TEC foi utilizado para calcular o TEC utilizando dados de estações receptoras de GPS como parâmetro de entrada, na região da América do Sul. Análises das características anuais e sazonais do TEC, assim como da resposta ionosférica durante eventos HILDCAAs foram realizadas, conforme as seções apresentadas a seguir.

3.1 Características anuais do TEC

Foi calculado o TEC sobre a América do Sul para o período de 2008 a 2014, utilizando todas as estações receptoras de GPS disponíveis nessa região. Todos os dias do ano foram incluídos nessa análise. Inicialmente pretendeu-se excluir os dias magneticamente perturbados ($K_p \geq 3$), no entanto a exclusão de todos os dias que apresentaram tal atividade magnética comprometeria a análise do TEC anual, uma vez que foi observada uma alta amostragem de dias com $K_p \geq 3$. Assim, optou-se por adicionar todos os dias do ano na análise. Dessa forma, as perturbações também poderão ser visualizadas. As estações receptoras utilizadas nessa análise foram Areq (Arequipa, Peru), Salu (São Luís) e Onrj (Rio de Janeiro), conforme visualizadas na Figura 3.1. A distribuição anual do TEC observada nestas estações é mostrada nas Figuras 3.2 a 3.8, para o período 2008-2014, englobando o período de mínimo solar (2008-2009), e o pico de máximo solar do Ciclo Solar 24 (2012-2014).

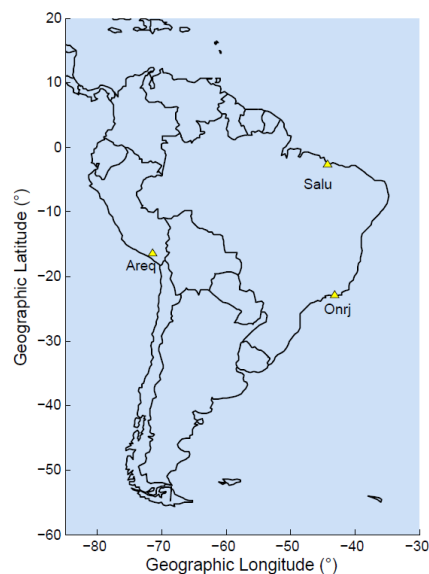


Figura 3.1. Localização das estações receptoras de GPS utilizadas nessa análise.

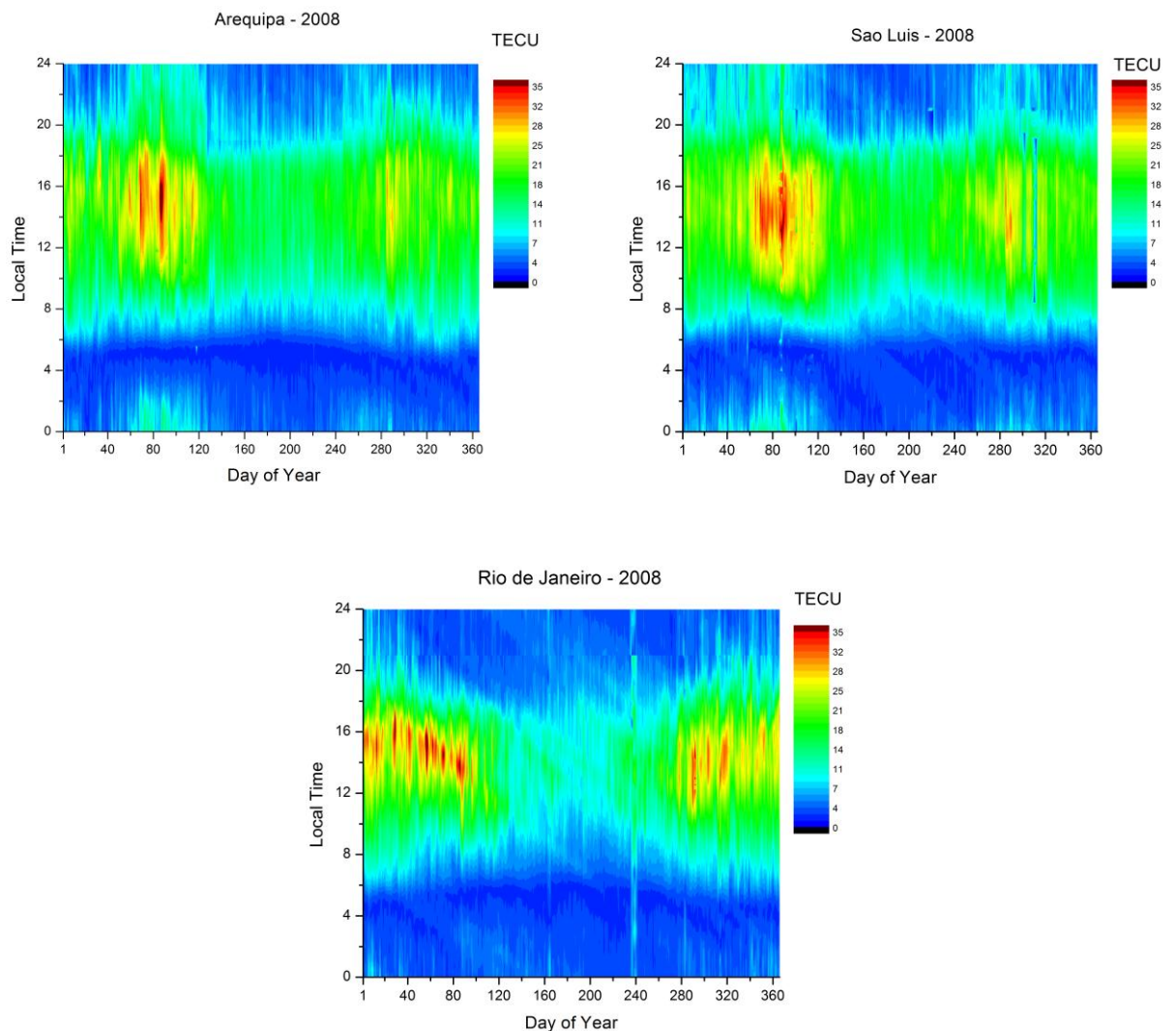


Figura 3.2. Variabilidade dia-a-dia do Conteúdo Eletrônico Total sobre Arequipa, São Luís e Rio de Janeiro, durante o ano de 2008.

Observando-se os resultados obtidos no ano de mínima atividade solar, 2008, é interessante notar na Figura 3.2 a diferença do comportamento do TEC sobre os três setores. Uma característica marcante é a grande variabilidade dia-a-dia do TEC. Além disso, percebe-se que sobre a região equatorial (Arequipa e São Luís), o TEC apresenta comportamento diferenciado ao longo do ano, comparado à região da crista da Anomalia Equatorial. Sobre a crista da anomalia (Rio de Janeiro), o TEC é elevado de forma distribuída nos períodos de equinócio e verão, enquanto na região equatorial, evidencia-se nos períodos de equinócio. É importante notar a assimetria equinocial, visível no gráfico de Arequipa e São Luís, em que o TEC é maior no equinócio de outono comparado ao equinócio de primavera. Estudos recentes

têm revelado que a assimetria equinocial do TEC é um fenômeno de baixas latitudes (Liu et al., 2010). Estes estudos indicam a existência de diferenças equinociais nos ventos, no entanto, apenas a ação dos ventos não é suficiente para explicar essa diferença. Jonah (2013), utilizando o modelo SAMI2, mostrou que a assimetria equinocial pode ser explicada por diferenças na temperatura dos íons e na razão O/N_2 , que é maior em Março, causando maiores valores de TEC no equinócio de Março (outono), em relação ao equinócio de Setembro (primavera).

Uma outra característica observada na Figura 3.2 são os valores do TEC nas duas estações equatoriais (Areq e Salu) durante o inverno, que são maiores que os valores sobre a crista da AIE (Sjsp). Comparando-se a estação de Arequipa com São Luís, que possuem ângulos de declinação diferentes, como mencionado anteriormente, observa-se que os valores em Arequipa no equinócio de outono são ligeiramente maiores que em São Luís.

O ano de 2009 apresentou a menor atividade geomagnética do Ciclo Solar 24 e o início da fase ascendente. Na Figura 3.3 observa-se o TEC obtido nos 3 setores estudados, mostrando que neste ano o TEC apresentou comportamento diferente em relação a 2008. Em 2009, sobre a região equatorial e sobre a crista da AIE, o TEC apresentou valores maiores no equinócio de primavera. Os valores do TEC são maiores sobre a crista da AIE, como esperado. Em 2009, comparando-se as estações de Arequipa e São Luís, o TEC apresenta valores maiores em Arequipa no equinócio de primavera, embora não haja diferenças significativas no equinócio de outono observadas em ambas. Nas estações equatoriais, o TEC no inverno é maior que na estação da crista da AIE.

O ano de 2010 configura-se como o primeiro ano de atividade solar ascendente. Neste ano, como observado na Figura 3.4, os equinócios de outono e primavera apresentam os maiores valores do TEC ao longo do ano. Em 2010, não há diferenças significativas no TEC comparando-se Arequipa e São Luís, enquanto em ambas o TEC no inverno é maior que na estação da crista da AIE.

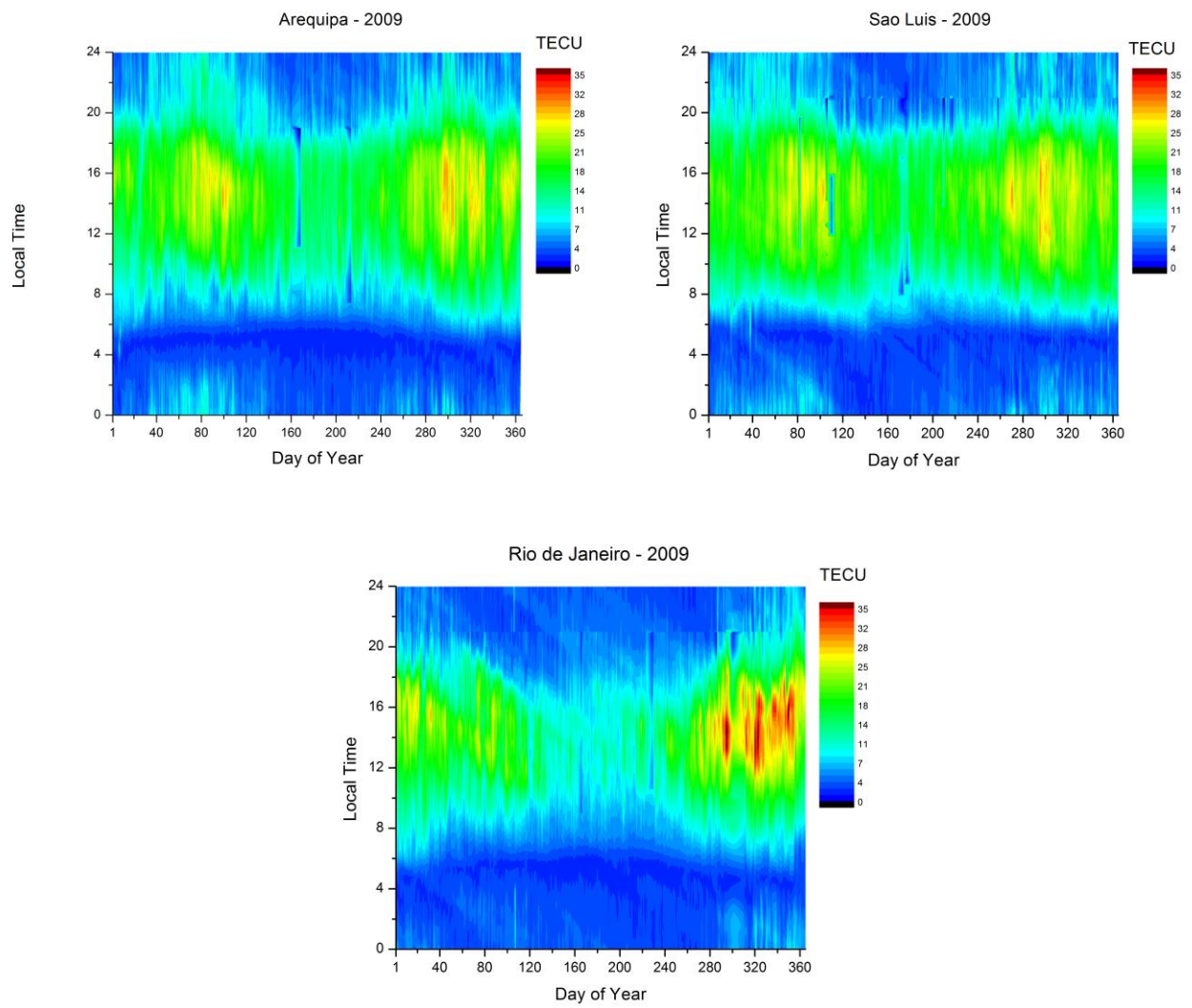


Figura 3.3. Variabilidade dia-a-dia do Conteúdo Eletrônico Total sobre Arequipa, São Luís e Rio de Janeiro, durante o ano de 2009.

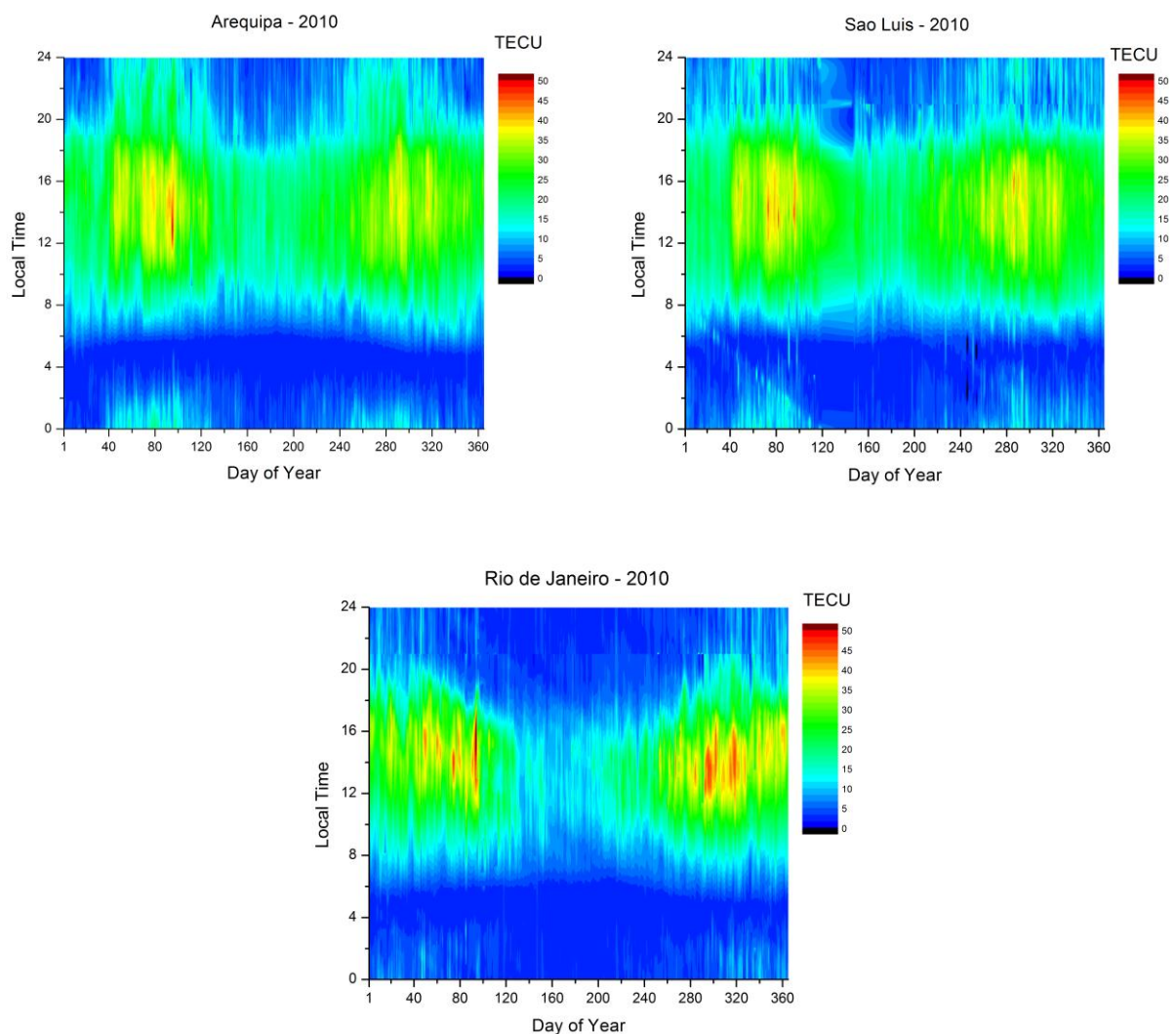


Figura 3.4. Variabilidade dia-a-dia do Conteúdo Eletrônico Total sobre Arequipa, São Luís e Rio de Janeiro, durante o ano de 2010.

No ano de 2011, como observado na Figura 3.5, os maiores valores do TEC apresentam-se no equinócio de primavera. Sobre a crista da AIE observam-se valores de TEC maiores também no setor do anoitecer, em torno de 20:00 LT, no equinócio de primavera, inclusive com valores aumentados relacionados ao pico pré-reversão, que causa um aumento no efeito fonte e um segundo pico no TEC no setor do anoitecer. Em 2011, comparando-se as estações de Arequipa e São Luís, o TEC apresenta valores pronunciadamente maiores em Arequipa no equinócio de primavera, enquanto em ambas o TEC no inverno é maior que na estação da crista da AIE. É importante ressaltar os níveis cada vez maiores de TEC observados ao longo da fase ascendente do ciclo solar.

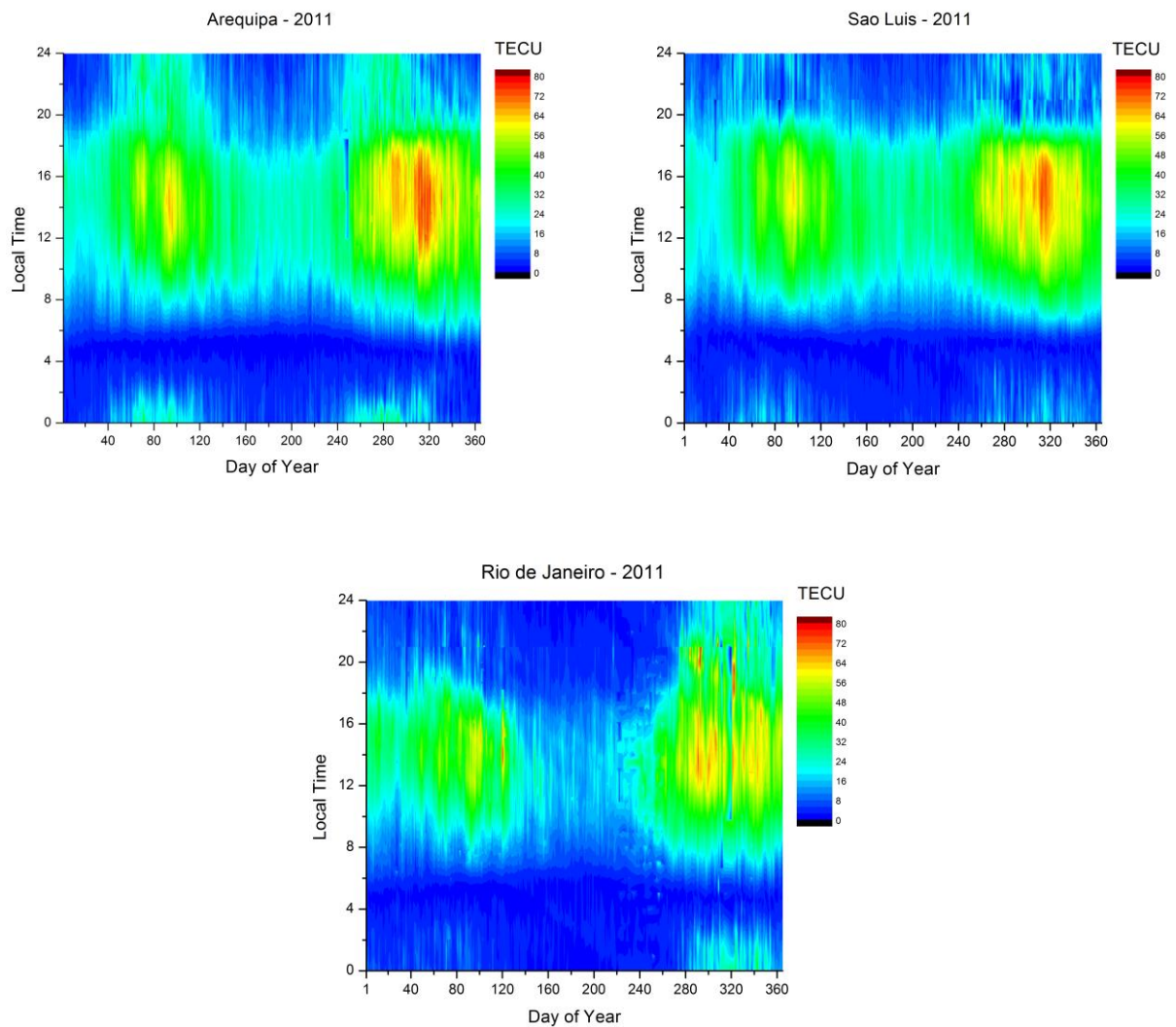


Figura 3.5. Variabilidade dia-a-dia do Conteúdo Eletrônico Total sobre Arequipa, São Luís e Rio de Janeiro, durante o ano de 2011.

O ano de 2012 configura-se como o primeiro pico de máxima atividade solar observada no Ciclo Solar 24. Neste ano, como mostrado na Figura 3.6, sobre a região equatorial o TEC apresenta valores maiores no equinócio de primavera em relação ao outono, enquanto sobre a crista da AIE os valores são maiores no equinócio de outono. Neste ano são observados também os valores aumentados do TEC no setor do anoitecer, especialmente sobre a crista da AIE. Em 2012, comparando-se as estações de Arequipa e São Luís, o TEC apresenta valores ligeiramente maiores em Arequipa nos equinócios, enquanto em ambas o TEC no inverno é maior que na estação da crista da AIE.

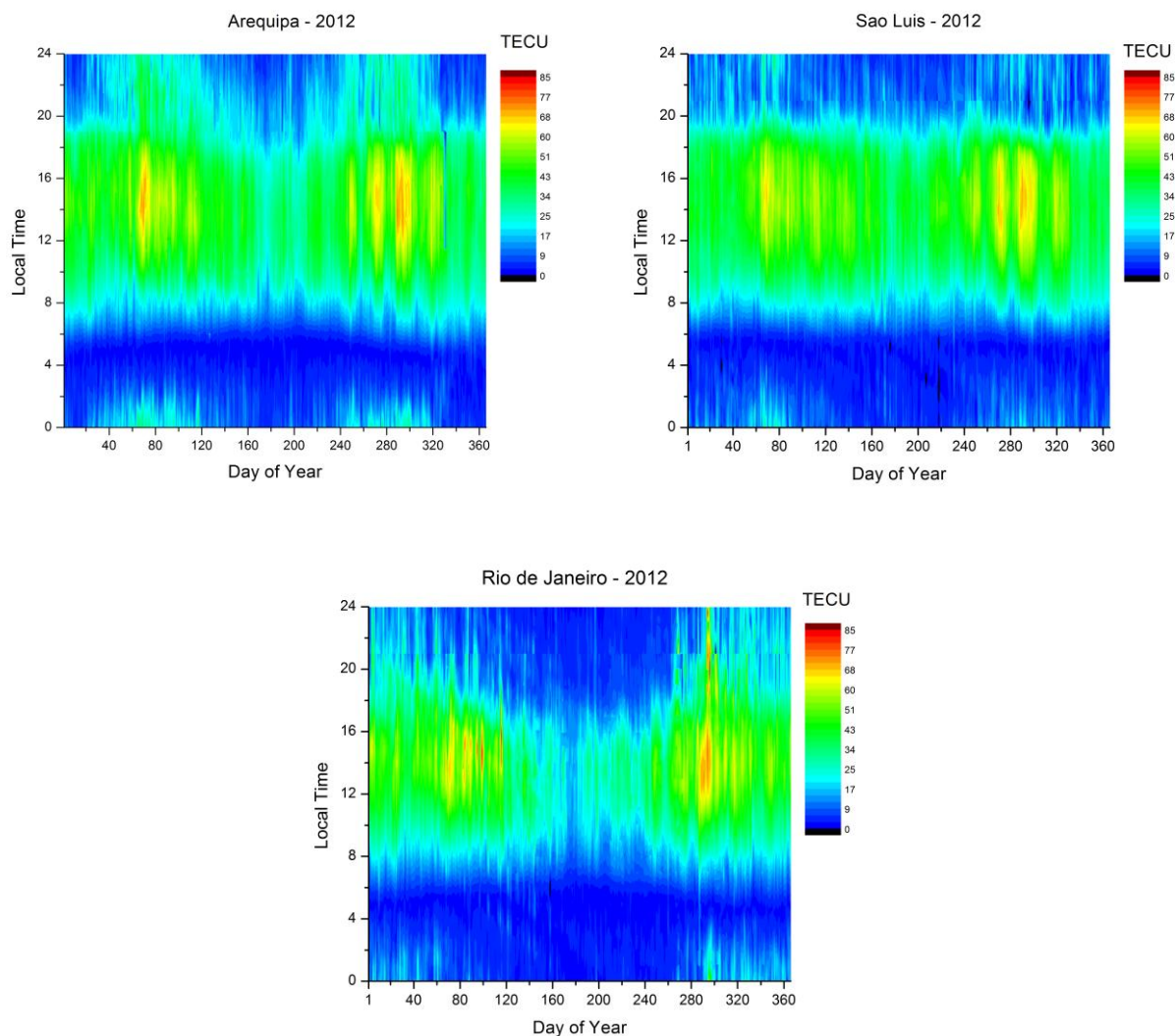


Figura 3.6. Variabilidade dia-a-dia do Conteúdo Eletrônico Total sobre Arequipa, São Luís e Rio de Janeiro, durante o ano de 2012.

A Figura 3.7 apresenta os resultados obtidos para os 3 setores no ano de 2013. O ano de 2013 configura-se com um nível diminuído de atividade solar, o que resultou em valores de TEC ligeiramente menores, comparado a 2012. Em 2013, comparando-se as estações de Arequipa e São Luís, o TEC apresenta valores maiores em Arequipa no equinócio de primavera, enquanto em ambas o TEC no inverno é maior comparado à estação da crista da AIE. Neste ano são observados também os valores aumentados do TEC no setor do anoitecer, especialmente sobre a crista da AIE.

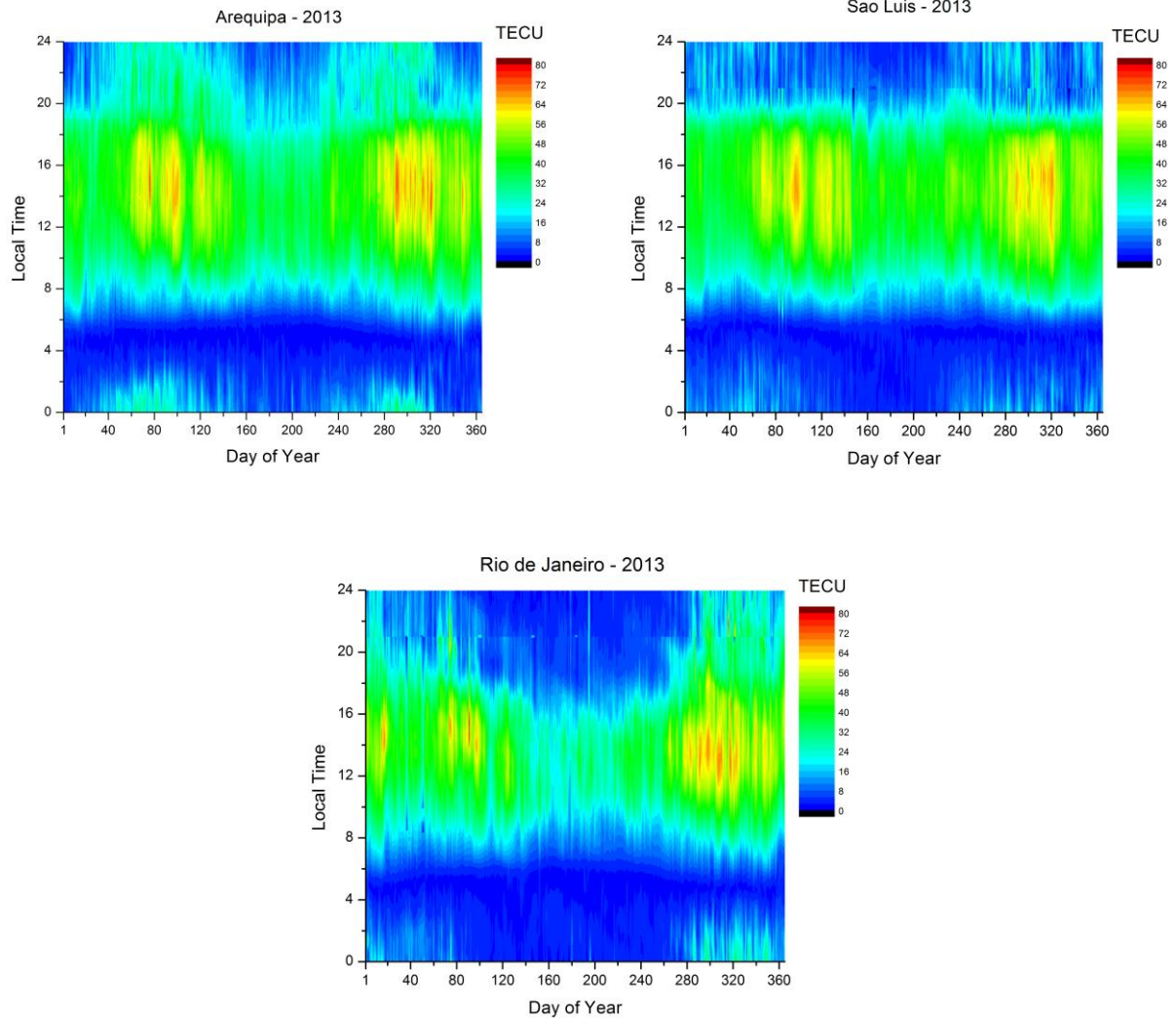


Figura 3.7. Variabilidade dia-a-dia do Conteúdo Eletrônico Total sobre Arequipa, São Luís e Rio de Janeiro, durante o ano de 2013.

A Figura 3.8 apresenta os resultados obtidos para os 3 setores no ano de 2014. O ano de 2014 configura-se como o segundo pico de máxima atividade solar no Ciclo Solar 24, o que resultou nos maiores valores de TEC observados nesse ciclo. Neste ano são observados também os valores aumentados do TEC no setor do anoitecer, especialmente sobre a crista da AIE, configurando o pico pré reversão. Em 2014, comparando-se as estações de Arequipa e São Luís, o TEC apresenta valores ligeiramente maiores em Arequipa nos equinócios, enquanto em ambas o TEC no inverno é maior que na estação da crista da AIE. Além disso, nesse ano o TEC apresentou-se maior no equinócio de outono nas três localidades.

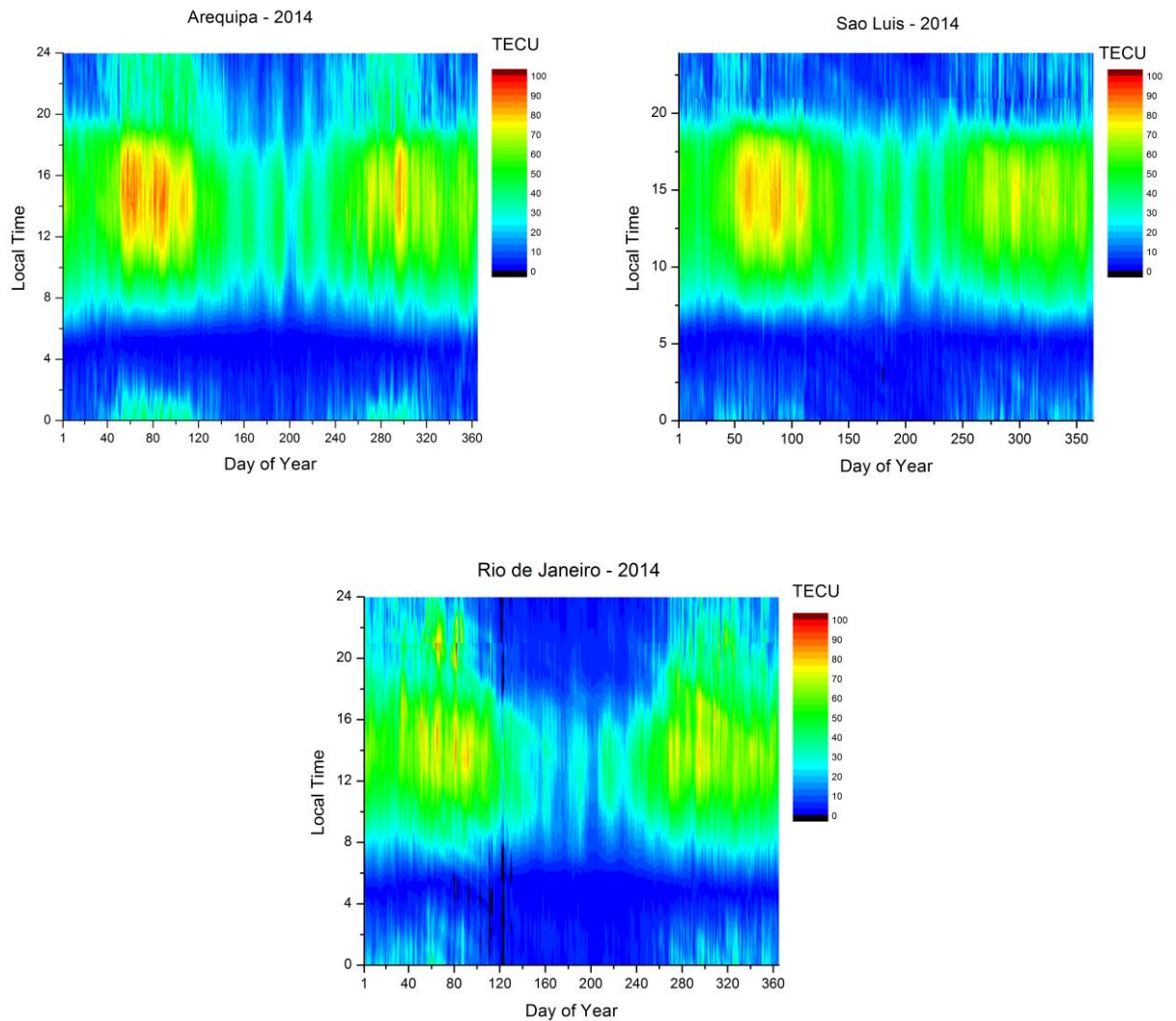


Figura 3.8. Variabilidade dia-a-dia do Conteúdo Eletrônico Total sobre Arequipa, São Luís e Rio de Janeiro, durante o ano de 2014.

Os resultados apresentados anteriormente nas Figuras 3.2 a 3.8 referentes às diferenças observadas entre Arequipa e São Luís, em que majoritariamente o TEC sobre Arequipa é maior que em São Luís, pode-se atribuir à diferença do ângulo de declinação de ambas localidades. Arequipa apresenta um ângulo de declinação pequeno ($-5,54^\circ$) comparado a São Luís ($-21,02^\circ$), de modo que os tubos de fluxo de plasma relativos às linhas de campo geomagnético são mais simétricos sobre Arequipa, e mais inclinados sobre São Luís. Dessa forma, a eficiência do processo de iluminação solar e da deposição de plasma sobre Arequipa é maior, uma vez que nessa localidade os tubos de fluxo são mais alinhados aos terminadores. Sobre São Luís os tubos de fluxo são inclinados e portanto essa eficiência é menor, uma vez que o terminador fica desalinhado com as linhas de campo geomagnético. Assim, tanto no amanhecer quanto no

anoitecer, há regiões do tubo de fluxo que já estão iluminadas pelo Sol, enquanto outras regiões ainda estão no setor noturno, o que diminui a eficiência de ionização.

3.2 Características Sazonais do TEC

Nesta seção são apresentados resultados de uma análise sazonal do TEC sobre a região equatorial, em dois setores longitudinais (Arequipa - Peru e São Luís - Brasil). Foram calculadas médias de três meses para cada estação, sendo elas: solstício de verão (Novembro, Dezembro, Janeiro), Outono (Fevereiro, Março, Abril), solstício de inverno (Maio, Junho, Julho), Primavera (Agosto, Setembro, Outubro). Foram considerados apenas os dias magneticamente calmos nessa análise, ou seja, quando o índice geomagnético K_p foi menor ou igual a 3. Algumas características são observadas nos gráficos da Figura 3.9. Pode-se notar o TEC maior nos equinócio de outono em relação ao verão. Os menores valores de TEC são observados durante o inverno, nos dois setores longitudinais, como esperado.

Pode-se identificar na Figura 3.9 a assimetria equinocial tanto em 2008 (quadros "a" e "c"), quanto em 2014 (máximo solar, quadros "b e "d"), em que o TEC no equinócio de outono é maior comparado ao equinócio de primavera.

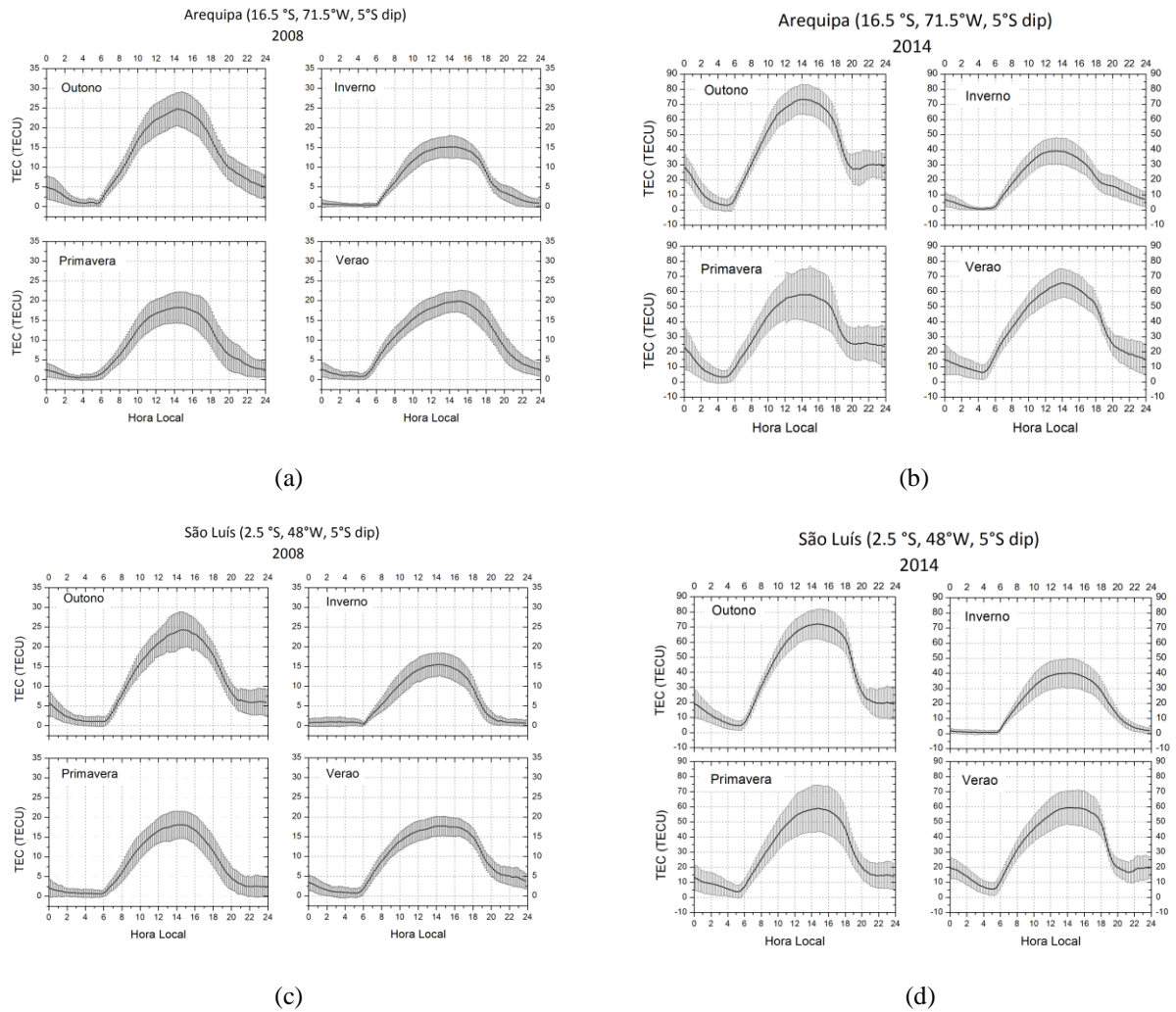


Figura 3.9. Variação sazonal do Conteúdo Eletrônico Total sobre a região equatorial, em Arequipa (quadros "a" e "b") e São Luís (quadros "c" e "d"). São mostrados os resultados para os anos de 2008 (quadros "a" e "c") e 2014 (quadros "b" e "d"). As barras do desvio padrão também são apresentadas nos gráficos.

3.3 Eventos HILDCAAs

Nesta seção serão apresentados dois eventos HILDCAAs observados no Ciclo Solar 24, ocorridos em 2013. Os dois eventos ocorreram após tempestades geomagnéticas, como será mostrado. O primeiro período analisado foi 14-31 de Março de 2013 durante o equinócio. O segundo período analisado foi 02-20 de Agosto de 2013, na transição do solstício de inverno para o equinócio de primavera. Foram utilizados dados de 4 estações receptoras de GPS para análise dos eventos, sendo elas: Areq, Salu, Bogt (Bogotá - Colômbia) e Poli (São Paulo). A Figura 3.10 apresenta a localização das estações, assim como a localização de Jicamarca e Piura

(Peru), cujos dados de magnetômetro foram usados para analisar a intensidade do eletrojato equatorial, assim como a ocorrência de penetração de campos elétricos.

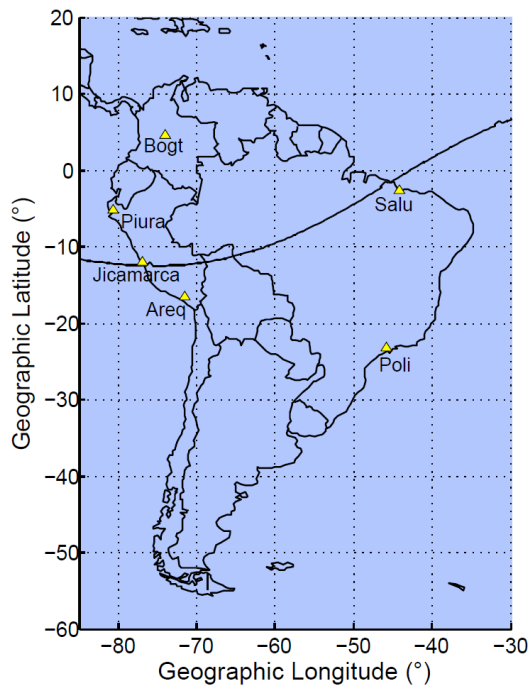


Figura 3.10. Localização das 4 estações de GPS (Bogt, Areq, Poli e Salu) e dos dois magnetômetros (Jicamarca e Piura) utilizados nesta análise.

Anteriormente à análise das respostas do TEC durante esses dois períodos, foi realizada uma breve estatística relacionada à variabilidade dia-a-dia do TEC em dias calmos. O objetivo foi mensurar a variabilidade dia-a-dia típica de dias calmos na região da América do Sul, a fim de verificar quantitativamente o efeito dos eventos analisados nesta seção. Foi observado que as estações Salu e Areq (equatoriais) apresentaram uma variabilidade dia-a-dia típica dentro de ~7%. Nas estações Bogt e Poli (sobre as cristas da AIE) essa variabilidade está na faixa de ~10% - 17%. Os dias calmos considerados nessa análise foram os dias 07-12 de Março (relativo ao evento de Março) e 27 de Julho a 01 de Agosto (relativo ao evento de Agosto).

3.3.1 Evento de 13-31 de Março de 2013

A Figura 3.11 mostra os parâmetros do vento solar e os parâmetros geomagnéticos para o evento de Março. O dia 13 de Março pode ser usado como referência de dia calmo para estes parâmetros, enquanto a referência de padrão calmo usada para o TEC é a média dos dias 07-12 de Março. Em todos esses dias de referência, o índice Kp não ultrapassou o valor 3.

A tempestade geomagnética iniciou-se em 17 de Março, em torno de 06:00 UT. O início súbito da tempestade pode ser verificado no índice Sym-H, que se intensifica até aproximadamente 30 nT. Neste momento o vento solar apresenta um aumento de ~450km/s para ~650km/s, caracterizando o choque na magnetopausa. A fase principal da tempestade inicia-se às 06:15 UT e dura até 20:30 UT. Foi uma tempestade geomagnética intensa, em que o Sym-H atingiu -132 nT, o índice AE máximo foi 2689 nT, e o índice Kp atingiu 7- em 17 de Março. Após as 20:30 UT deste dia, teve início a fase de recuperação da tempestade, durando entre 2 e 3 dias. O evento HILDCAA neste período configura-se nos dias 27-30 de Março, em que o índice AE apresenta-se elevado ao longo destes quatro dias.

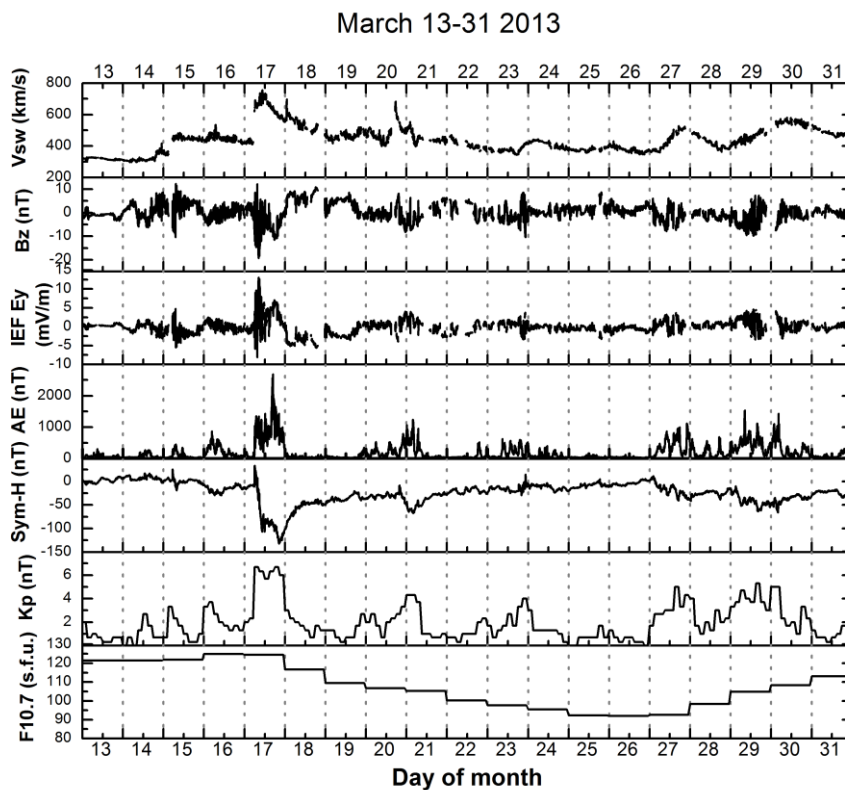


Figura 3.11. A partir do primeiro quadro: Velocidade do vento solar, componente Bz do campo magnético interplanetário (IMF - Interplanetary Magnetic Field), componente Ey do campo elétrico interplanetário (IEF), índice AE, índice Sym-H, índice Kp e fluxo solar F10.7 observados no período 13-31 de Março de 2013.

A Figura 3.12 apresenta o TEC observado no mesmo período, sobre as estações de GPS mencionadas anteriormente. As curvas de TEC fornecem uma visão local do comportamento da ionosfera durante períodos perturbados. O valor médio de dias calmos (07-12 de Março) (linha azul) é apresentado juntamente aos valores observados nos dias perturbados (linha vermelha). Em 15-16 de Março podem-se observar valores aumentados de TEC sobre Poli e Bogt, ~30% maiores, em relação ao padrão calmo. Nestes dias, foram observadas pequenas perturbações nos parâmetros do vento solar, que se mostraram efetivas nas modificações ionosféricas. A causa mais provável dos aumentos no TEC observados nestes dois dias é a ação de PPEFs, que intensificam o TEC na região das cristas da AIE. Em 17 de Março, são observados aumentos no TEC sobre as quatro estações analisadas, durante as fases inicial e principal da tempestade geomagnética. Os aumentos máximos no TEC observados em 17 de Março em cada estação, comparados ao padrão calmo, foram: 34% em Areq, 19% em Salu, 38% em Bogt e 18% em Poli (aumentos significativamente maiores que os observados na variabilidade dia-a-dia mencionada anteriormente).

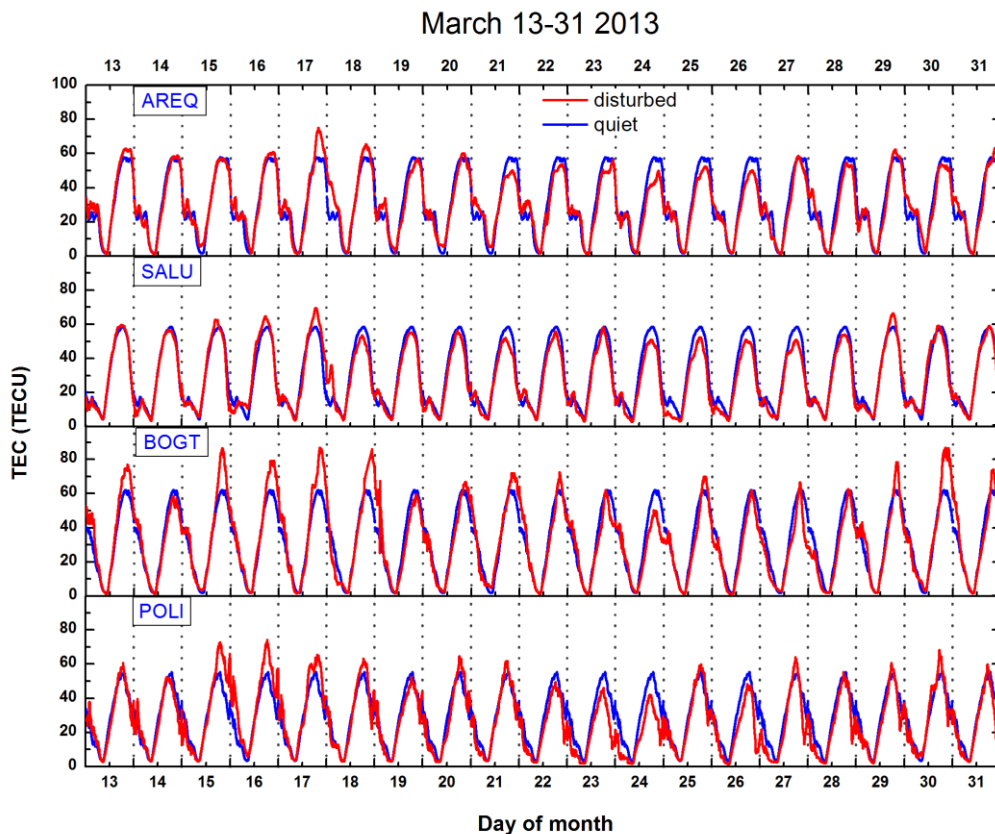


Figure 3.12. TEC observado nas estações de GPS Areq, Salu, Bogt e Poli, no período 13-31 de Março de 2013. A linha azul refere-se ao padrão de referência calmo, e a linha vermelha são as observações no período.

Seguindo adiante para os dias 20-25 de Março, na Figura 3.12, observa-se que o TEC é ligeiramente menor que o padrão de referência, principalmente no setor equatorial (estações Areq e Salu). Nestes dias, o fluxo solar estava diminuindo, o que é consistente com menores valores de TEC.

Em 28 de Março, observa-se uma diminuição no índice AE, tornando o evento HILDCAA (27-30 de Março) menos caracterizado. Dessa forma, não foram observados aumentos significativos no TEC durante este evento HILDCAA ocorrido em Março, com exceção do dia 30 de Março que apresenta aumentos consideráveis no TEC sobre Bogt (38% maior) e Poli (20% maior). Estes aumentos são causados por PPEFs, principalmente.

A fim de verificar a ocorrência de PPEFs durante as perturbações analisadas aqui, são apresentados na Figura 3.13, o ΔH de Jicamarca-Piura e o IEF E_y , dado por:

$$E_{rec} = V_{SW} B_T [\sin(\theta/2)]^2, \quad (6)$$

onde V_{SW} é a velocidade do vento solar, θ é o ângulo horário entre o eixo z e a componente transversal do campo magnético interplanetário \mathbf{B}_T , ($\mathbf{B}_T = \mathbf{B}_y + \mathbf{B}_z$ em coordenadas GSM) (Gonzalez et al., 1994). Esta retificação de meia onda do IEF E_y considera apenas a contribuição positiva (que aponta para o anoitecer) do campo, sendo esta a contribuição geofetiva para penetração de campos elétricos (Burton et al., 1975). Considerando o dia 13 de Março como referência calmo para os dados de ΔH , o valor máximo observado neste dia foi 79 nT, sem assinatura de PPEFs. Tais assinaturas caracterizam-se por variações rápidas e intensas observadas no ΔH , que coincidem com variações do E_{rec} . Pode-se observar que no dia 14 de Março, algumas perturbações estão presentes, consistentes com as variações do E_{rec} . A relação entre o ΔH e o campo elétrico zonal ionosférico é válida apenas para o período diurno, que abrange das 11:00 - 23:00 UT em Jicamarca e Piura. É possível observar períodos de alta correlação entre o ΔH e o E_{rec} , o que denota a ocorrência de PPEF. Seguindo esta metodologia, os PPEFs mais intensos foram observados nos dias 14, 17, 20 e 27-29 de Março. Apesar da assinatura de PPEF intensa observada em 29 de Março, não foi observada resposta intensa no TEC neste dia. Isso ocorre principalmente devido aos PPEFs observados serem de curta duração, não havendo PPEFs de longa duração. Sabe-se que os PPEFs são mais efetivos em causar modificações no TEC se forem de longa duração (de Siqueira et al., 2011). O ΔH em 30 de Março é maior que o observado em 13 de Março, denotando maiores derivas verticais ionosféricas e maiores campos elétricos zonais, que se mostraram ser a principal fonte de aumentos no TEC observados no dia 30. Com exceção do dia 30 de Março, a resposta geral deste

evento HILDCAA foi considerada fraca, principalmente porque no dia 28 de Março o índice AE ficou abaixo de 1000 nT, não sendo caracterizado neste dia como um evento HILDCAA. No entanto, este evento mostra a eficiência dos PPEFs em promover modificações ionosféricas em baixas latitudes, mesmo durante perturbações consideradas fracas. O principal resultado observado neste evento, portanto, é que os PPEFs são a principal fonte de modificações no TEC durante períodos perturbados, especialmente considerando-se a modulação da AIE.

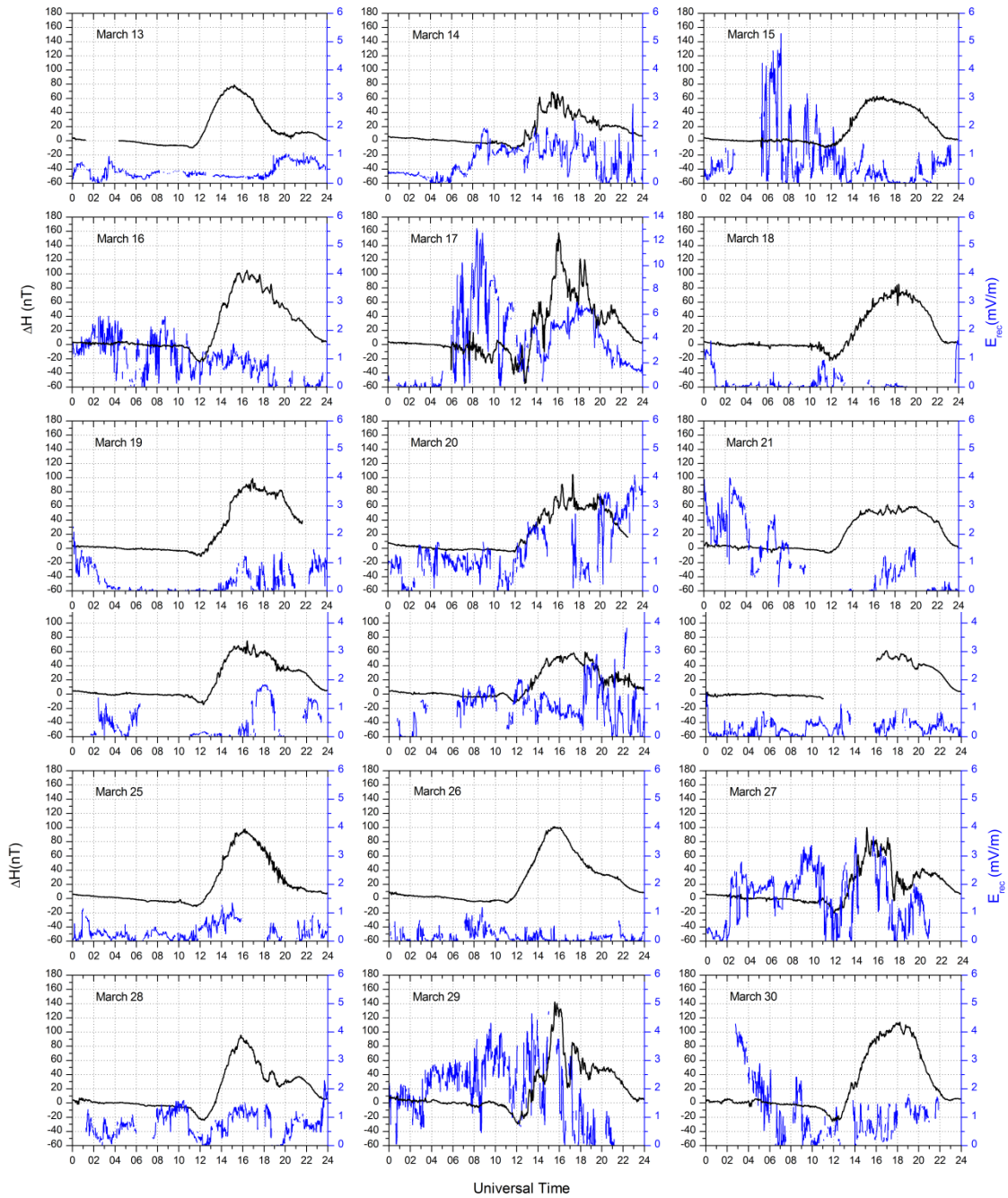


Figura 3.13. ΔH Jicamarca-Piura (linha preta) e IEF E_{rec} (linha azul) de 13 a 30 de Março de 2013, mostrando a ocorrência de PPEF.

3.3.2 Evento de 02-20 de Agosto de 2013

Nas Figuras 3.14 e 3.15 são mostrados os parâmetros do vento solar, índices geomagnéticos e valores de TEC observados no evento HILDCAA ocorrido no período 14-17 de Agosto de 2013. É mostrado todo o período de 02 a 20 de Agosto, uma vez que em 04-08 de Agosto há ocorrência de uma tempestade magnética moderada. O padrão de referência calmo para o TEC é a média do TEC observado nos dias 27 de Julho a 1º de Agosto de 2013 (linha azul na Figura 2.15), em que o índice Kp foi menor que 3 em todo o período. Em relação aos dados de magnetômetro, o primeiro dia do período (2 de Agosto) foi considerado o dia calmo para comparação.

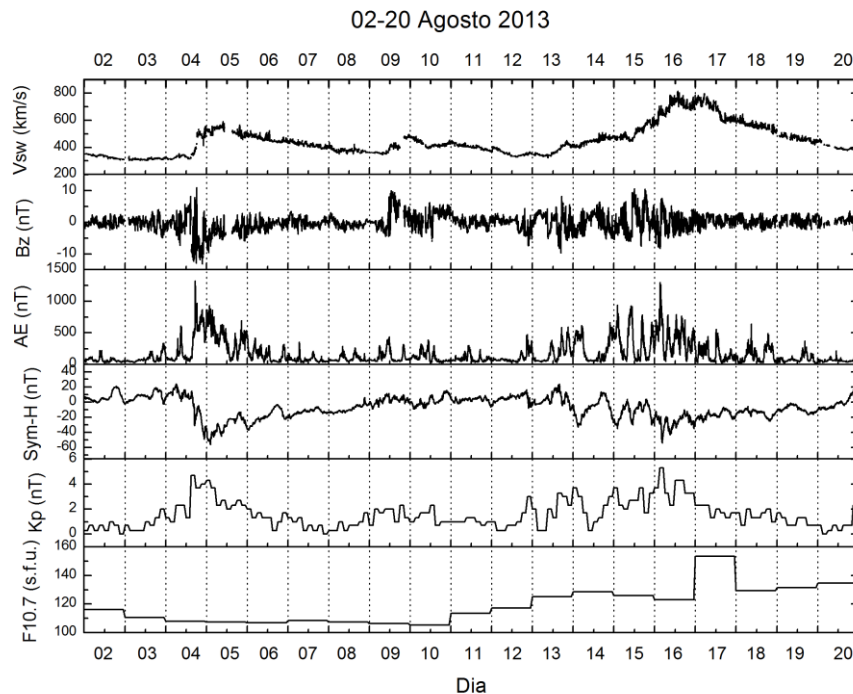


Figura 3.14. Parâmetros do vento solar e índices geomagnéticos observados no período 02-20 de Agosto de 2013.

Na Figura 3.15 observam-se as variações no TEC tanto durante a tempestade magnética, ocorrida em 04-05 de Agosto de 2013, quanto durante o evento HILDCAA que sucedeu a tempestade. Observa-se que sobre Poli, o TEC aumenta durante todo o período, desde a tempestade magnética, comparado ao padrão de referência calmo. No entanto, o aumento observado durante o evento HILDCAA é muito mais pronunciado do que durante a tempestade. Nas outras estações o mesmo padrão é observado, uma vez que durante o evento HILDCAA o TEC aumentou de forma muito mais significativa do que durante a tempestade magnética. Uma

explicação para esse aumento significativo no TEC durante o evento HILDCAA é o fenômeno de penetração de campos elétricos, que pode ocorrer continuamente durante o período do evento, causando aumentos nas derivas verticais ionosféricas na região equatorial, e aumentos na ionização.

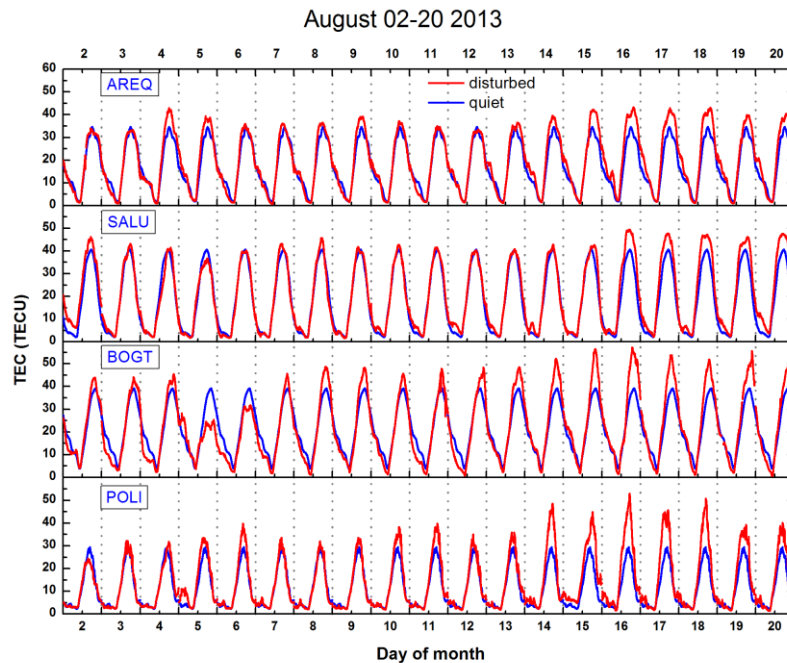


Figura 3.15. TEC observado nas estações equatoriais de Areq e Salu, e estações localizadas sobre a crista da AIE, Bogt (norte) e Poli (sul), no período 02-20 de Agosto de 2013.

A Figura 3.16 apresenta as observações de magnetômetros na região equatorial da América do Sul, mais precisamente o parâmetro ΔH . As grandes variações observada no ΔH são compatíveis com penetração de campos elétricos, especialmente nos períodos em que o ΔH apresenta assinatura semelhante à do campo elétrico interplanetário, mostrado na linha em azul. Observa-se que os PPEFs mais pronunciados ocorreram em 04, 05, 13, 15 e 16 de Agosto, ou seja, durante a fase principal da tempestade geomagnética, e durante o evento HILDCAA, com exceção do dia 13 de Agosto que apresenta perturbações nos parâmetros do vento solar (incursões para sul no IMF B_z) e atividade geomagnética moderada, no entanto este dia é anterior ao início do evento HILDCAA. PPEFs também são observados nos dias 14 e 17-19 de Agosto, demonstrando que esse cenário perturbado pode prevalecer por vários dias e é altamente governado pelas forçantes do vento solar. O ponto principal a se observar neste evento de Agosto, é a resposta intensa da ionosfera ao evento HILDCAA, relacionada principalmente à ocorrência de PPEFs durante todo o período.

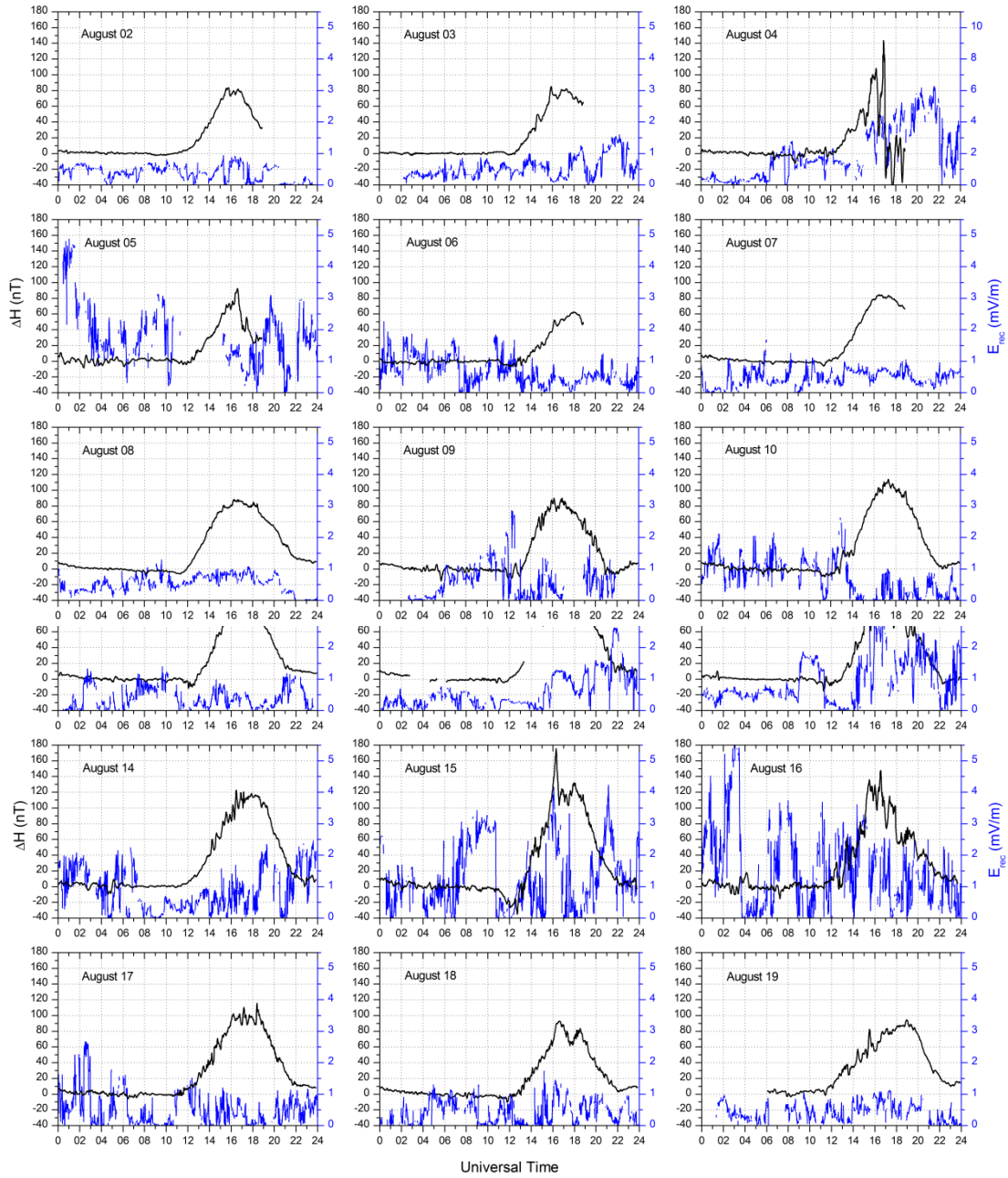


Figura 3.16. ΔH (linha preta) e IEF E_y (linha azul) para os dias 02 de Agosto (dia calmo), 04-08 de Agosto (tempestade geomagnética) e 14-17 de Agosto (HILDCAA), 2013, mostrando a ocorrência de PPEF.

A Tabela 3.1 apresenta os aumentos observados no TEC em relação ao padrão de referência calmo, para o período analisado. Os aumentos são muito maiores que os observados na variabilidade dia-a-dia típica da região.

Tabela 3.1. Aumentos observados no TEC comparados ao padrão de referência calmo (evento de Agosto).

Data/Estação	Areq	Salu	Bogt	Poli
14 de Agosto	15%	-	33%	65%
15 de Agosto	23%	-	43%	55%
16 de Agosto	26%	22%	46%	82%
17 de Agosto	26%	17%	38%	58%
18 de Agosto	23%	17%	33%	75%
19 de Agosto	15%	15%	43%	34%
20 de Agosto	17%	17%	36%	38%

Os TECs observados neste evento HILDCAA foram muito maiores que os observados durante a tempestade geomagnética anterior ao evento. Também é notável que a estação Poli apresentou os aumentos mais pronunciados no TEC, respondendo mais efetivamente às perturbações em relação à estação Bogt (ambas sobre as cristas da AIE, sendo Poli a estação sul, e Bogt a estação norte). Esta assimetria na resposta em diferentes hemisférios é geralmente atribuída a ventos meridionais (Balan et al., 1997). Com base nesses resultados, é mostrado que um evento HILDCAA pode ser mais efetivo em gerar respostas ionosféricas em comparação a uma tempestade geomagnética.

Vários outros eventos HILDCAA foram analisados, com padrão semelhante de resultados, entretanto não são mostrados aqui.

3.4 Tempestade geomagnética de setembro/2017

Nesta seção será apresentada uma análise da tempestade geomagnética intensa ocorrida em 07-08 de Setembro de 2017. O período analisado foi 06-10 de Setembro de 2017, e o dia calmo utilizado como referência na análise foi o dia 06 de Setembro, que apresentou Kp máximo de 3,3. Na Tabela 3.2 são mostradas as estações receptoras de GPS e magnetômetros utilizados na análise do TEC e da ocorrência de penetração de campos elétricos.

Tabela 3.2. Coordenadas das estações receptoras de GNSS utilizadas nesta análise

Estação	Latitude	Longitude	Inclinação magnética
Belém (Bele)	-1,40°	-48,45°	-1,398°
Boa Vista (Boav)	2,83°	-60,70°	18,696°
Manaus (Naus)	-3,01°	-60,05°	8,109°
Brazília (Braz)	-15,93°	-47,86°	-26,296°
Cachoeira Paulista (Chpi)	-22,68°	-44,98°	-37,385°
São Luís (Salu)	-2,60°	-44,21°	-8,734°
Petrolina	-9,50°	-40,50°	-24,95°
Tatuoca	-1,20°	-42,50°	-8,212°
Vassouras	-22,40°	-43,65°	-38,280°

A Figura 3.17 apresenta as condições solares, geomagnéticas e ionosféricas no período analisado. É possível observar na Figura 3.17, pelo índice Sym-H, a presença de perturbações geomagnéticas devido à estrutura de vento solar mais rápido que atingiu a magnetosfera terrestre em 07 de Setembro, dando início à tempestade geomagnética no dia 07. A continuidade da tempestade deu-se com a fase principal que durou até o início do dia 08 de Setembro, em que o Sym-H apresentou valor mínimo de -146 nT às 01:10 UT no dia 08, quando iniciou-se a fase de recuperação da tempestade geomagnética. A fase principal da tempestade geomagnética é denotada por um intenso campo magnético interplanetário orientado para sul (valores negativos do IMF Bz), que perdurou das ~20:45 UT do dia 07 até as ~02:00 UT do dia 08 de Setembro, sendo este o cenário mais favorável à penetração do campo elétrico interplanetário para a ionosfera de baixas latitudes.

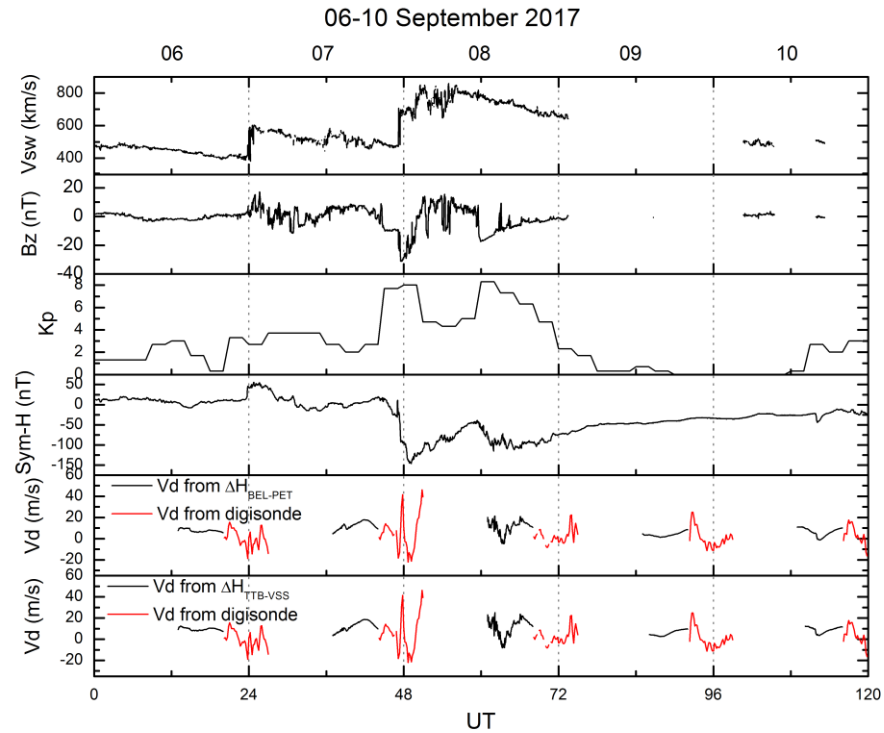


Figura 3.17. Parâmetros do vento solar, geomagnéticos e ionosféricos observados no período de 06-10 de Setembro de 2017, durante a tempestade geomagnética iniciada em 07 de Setembro.

Como mencionado anteriormente, foi utilizado o ΔH , que é a subtração da componente H do campo geomagnético observada em duas estações estrategicamente posicionadas, sendo uma delas em latitudes equatoriais, e a outra em baixas latitudes. A subtração das observações entre ambas é realizada a fim de se excluir o campo magnético gerado pela corrente de anel, presente nas medidas do campo geomagnético em latitudes baixas e equatoriais, resultando assim em uma medida relacionada apenas ao campo magnético devido ao eletrojato equatorial. O ΔH é uma importante informação sobre a ocorrência de penetração de campos elétricos (PPEF) uma vez que denota a intensidade do eletrojato equatorial, que é diretamente afetado pelos PPEFs. O ΔH é, portanto, uma aproximação qualitativa para o campo elétrico zonal ionosférico diurno, na região equatorial, respondendo prontamente às penetrações de campos elétricos. Neste trabalho a rotina para obtenção do ΔH consistiu em:

a) Obter os dados da componente horizontal H do campo geomagnético medidos pelos quatro magnetômetros envolvidos, a partir das bases de dados Intermagnet (em colaboração com o Observatório Nacional do Rio de Janeiro, onde foram obtidos os dados de Tatuoca e Vassouras) (INTERMAGNET, 2018) e Amber (*Amber Network* do Boston College) (AMBER, 2018). Os dois conjuntos de dados foram obtidos por meio de solicitação direta à instituição responsável

pela manutenção da base de dados, uma vez que não estavam acessíveis na base de dados online das respectivas instituições.

b) Cálculo da média do valor de *background* do H de cada estação, utilizando para isso dados das 5 horas corridas em que o H apresentou os menores valores, em torno da meia noite local. O valor médio de *background* foi calculado para cada dia analisado.

c) Subtração do valor de *background* de todo o conjunto de dados para cada dia, gerando o H calibrado para cada dia, obtendo-se assim as curvas apresentadas na Figura 3.18 (mostrados apenas os dados de Belém e Petrolina).

d) Com os valores de H devidamente calibrados, é possível calcular o ΔH propriamente dito.

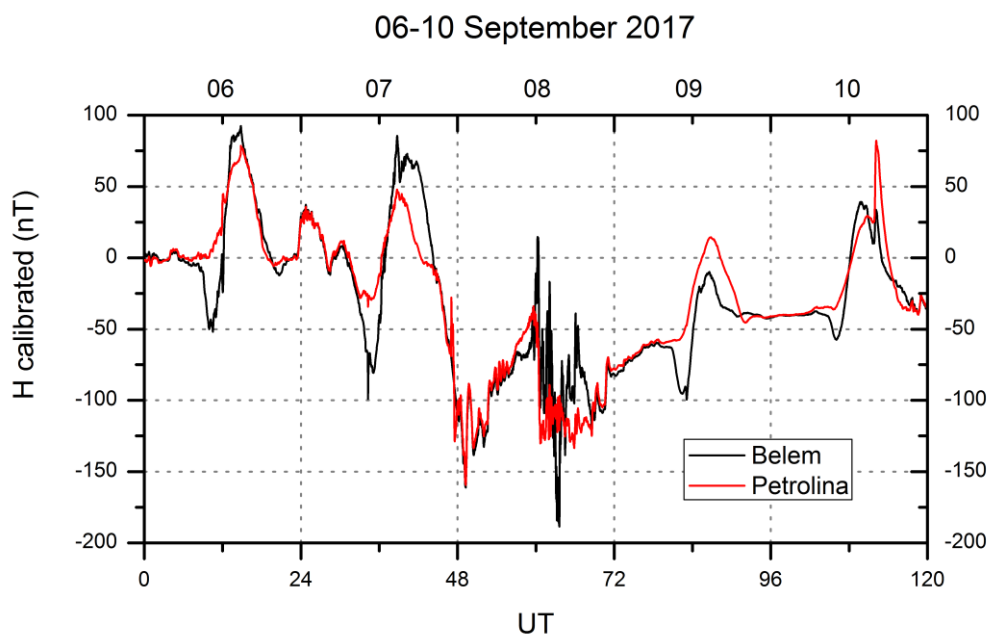


Figura 3.18. Componente horizontal H calibrada do campo geomagnético, obtida a partir dos magnetômetros de Belém e Petrolina, em que foi subtraído o valor de *background* do campo geomagnético.

A Figura 3.19 mostra os resultados de ΔH obtidos subtraindo-se as componentes horizontais do campo geomagnético observado pelas estações de magnetômetro de Belém, Petrolina (ΔH Belém-Petrolina), Tatuoca e Vassouras (ΔH Tatuoca-Vassouras).

Foram utilizados os dois conjuntos de dados de magnetômetros (Belém-Petrolina e Tatuoca-Vassouras) a fim de se verificar se existia diferença significativa no resultado de ΔH obtido por ambos pares de magnetômetros. Como pode-se observar na Figura 3.19, a diferença não é significativa, e portanto os dois ΔH descrevem satisfatoriamente o comportamento do campo elétrico zonal ionosférico (diurno) na região equatorial. Dessa forma, optou-se por utilizar o ΔH Belém-Petrolina para comparar com o campo elétrico interplanetário (IEF E_y) a fim de

observar a ocorrência de PPEFs, o que é mostrado na Figura 3.20. Observa-se que a partir do dia 08 de Setembro (após 48 horas do início do período analisado) o ΔH torna-se muito perturbado, com grandes variações, muitas delas coincidentes com o IEF E_y , denotando a penetração do campo elétrico interplanetário para a ionosfera de baixas latitudes. Valores positivos perturbados do $\Delta H_{\text{Bel-Pet}}$ são compatíveis com aumentos no campo elétrico zonal equatorial durante o dia, o que contribui para aumentos significativos no TEC.

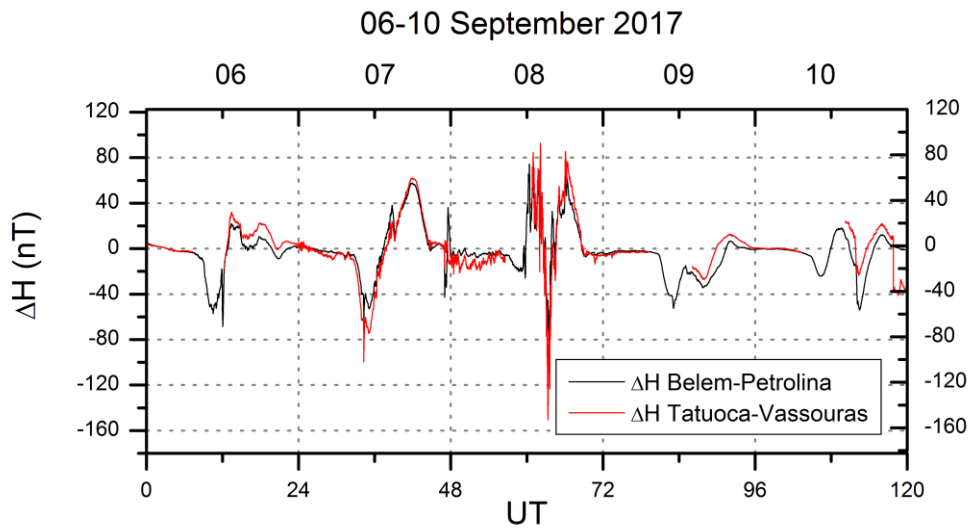


Figura 3.19. Diferença ΔH da componente horizontal H do campo geomagnético, obtida a partir dos magnetômetros de Belém, Petrolina (ΔH Belém-Petrolina), Tatuoca e Vassouras (ΔH Tatuoca-Vassouras).

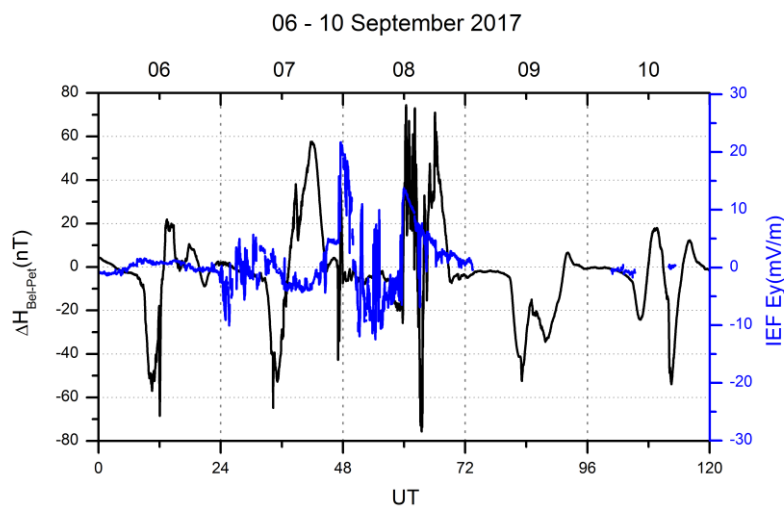


Figura 3.20. ΔH Belém-Petrolina (curva preta) e campo elétrico interplanetário na direção amanhecer-anoitecer (IEF E_y) (curva azul), denotando a penetração do campo elétrico interplanetário para a ionosfera equatorial.

Como mencionado anteriormente, no dia 08 de Setembro há uma intensa incursão para sul do IMF Bz, o que resulta em um IEF Ey direcionado do amanhecer para o anoitecer (*duskward*), sendo esta a configuração efetiva para que o IEF Ey penetre na ionosfera de baixas latitudes, somando-se ao campo elétrico zonal ionosférico diurno, intensificando-o. Dessa forma, durante estes eventos de PPEFs, a ionosfera equatorial e de baixas latitudes responderá majoritariamente com a intensificação da anomalia equatorial, pois o campo elétrico zonal mais intenso será responsável por elevar o plasma ionosférico da região equatorial até maiores altitudes no setor diurno, por meio da deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, aumentando o TEC nas regiões das cristas da anomalia. De fato, o que se observa durante a fase principal de tempestades geomagnéticas, em associação à penetração de campos elétricos, é um aumento na ionização, e no TEC, em toda a região equatorial e de baixas latitudes. Esse aumento generalizado no TEC nas regiões equatorial e de baixas latitudes é observado na Figura 3.21, que mostra a resposta do TEC observada em estações posicionadas ao longo do território brasileiro (coordenadas geográficas mostradas anteriormente na Tabela 3.2).

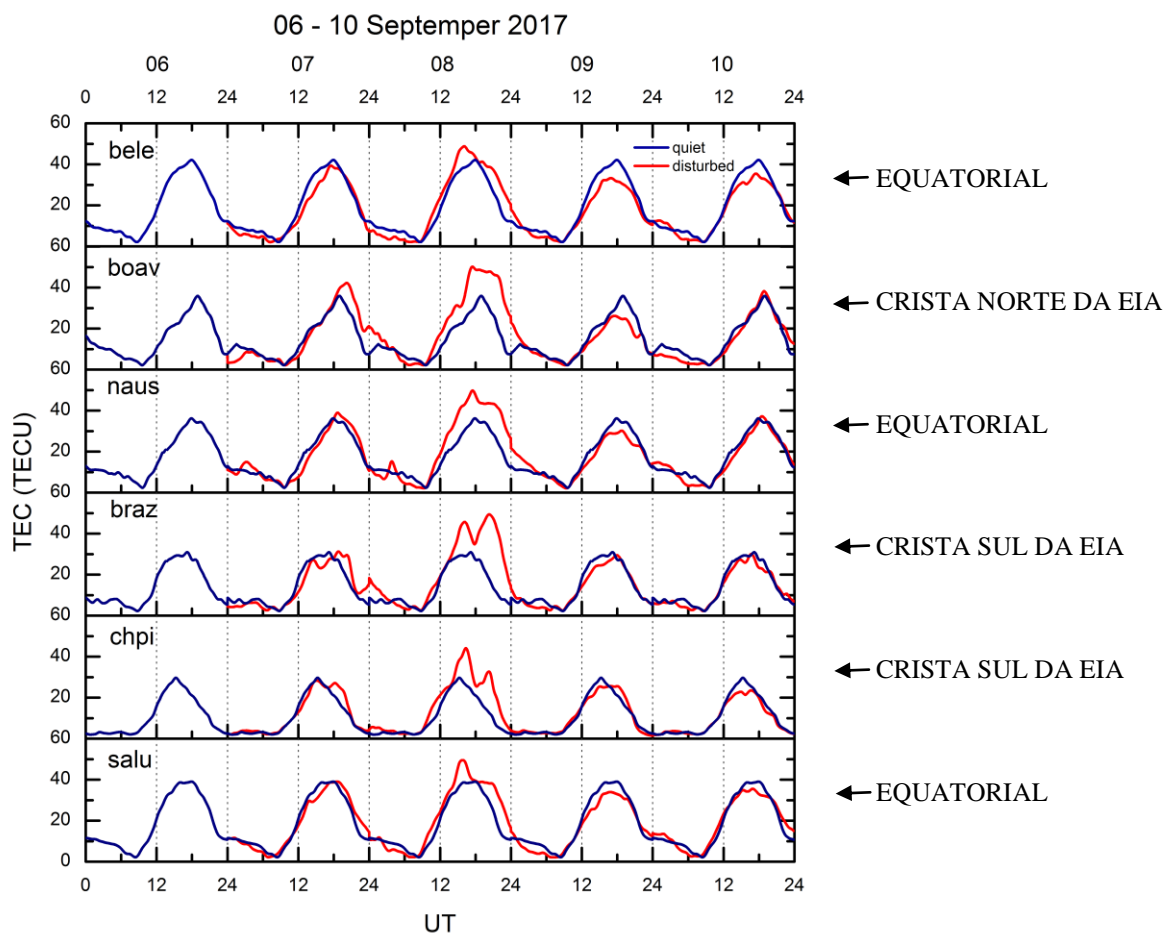


Figura 3.21. Conteúdo eletrônico total observado nas estações receptoras de GPS Bele, Boav, Naus, Braz, Chpi e Salu. À direita é indicada a posição geográfica (geomagnética) das estações.

É possível observar na Figura 3.21 que em todas as estações analisadas há um aumento significativo no TEC no dia 08 de Setembro, durante a fase principal da tempestade geomagnética, coincidente com o PPEF observado na Figura 3.20. Em contrapartida, no dia 09 de Setembro observa-se uma diminuição no TEC, também em todas as estações analisadas (algumas mais sutis). Essa diminuição é compatível com a ação do dínamo perturbado, uma vez que a tempestade geomagnética já encontrava-se em fase de recuperação no dia 09. No dia 10 de Setembro observa-se o início da recuperação do TEC a valores próximos dos observados no dia de referência calmo.

As tempestades geomagnéticas foram extensivamente estudadas nos últimos anos, principalmente com a disseminação dos dados do sistema GNSS, abertos em bases de dados online, permitindo assim uma análise global da resposta ionosférica a esses eventos. A resposta ionosférica às tempestades geomagnéticas difere principalmente no que se refere à hora local da ocorrência do início e fase principal da tempestade, assim como à intensidade da tempestade geomagnética. Mas de um modo geral, o comportamento da ionosfera de baixas latitudes, considerando a ionização quantificada pelas observações de TEC, é majoritariamente de intensificação durante a fase principal (que dura cerca de um dia) e diminuição durante a fase de recuperação, mais especificamente no primeiro dia da fase de recuperação.

4 Dependência do TEC com o parâmetro F10.7

Nesta seção serão apresentadas as curvas de correlação do TEC em relação ao fluxo solar em 10,7 cm, denominado F10.7, em análises anuais e sazonais, de 2009 a 2014 (fase ascendente e máximo do ciclo solar).

Conforme já foi extensivamente estudado e apresentado na literatura, as radiações solares nas faixas do extremo ultravioleta (EUV) e raios-X são responsáveis por causar fotoionização das moléculas neutras atmosféricas, produzindo íons que dão origem à ionosfera. Tais íons podem recombinar e formar constituintes neutros ou ionizar outras moléculas neutras, por meio de recombinação dissociativa. Estas distribuições iônicas dependem da latitude, longitude, hora local, estação do ano e atividade solar, e podem alterar substancialmente as propagações de ondas eletromagnéticas afetando comunicações de rádio, como já mencionado anteriormente. O TEC é um parâmetro muito importante na análise da ionização e suas variações, sendo fortemente controlado pela atividade solar, especialmente o fluxo solar na faixa EUV. O fluxo solar F10.7 é um indicador importante da atividade solar e tem sido amplamente utilizado na

análise das respostas ionosféricas à atividade solar, especialmente respostas do parâmetro foF2 (Lastovicka et al., 2006; Wintoft, 2011; Mielich and Bremer, 2013). Neste trabalho será mostrada a resposta do TEC ao F10.7 na região da América do Sul, em que espera-se uma correlação linear e uma dependência sazonal e com a atividade solar, conforme já mostrado em estudos anteriores (Chakraborty and Hajra, 2008; Min et al., 2009). Os anos analisados foram de 2008 a 2014, englobando o mínimo e o máximo do ciclo solar 24. As estações receptoras de GPS utilizadas nesta análise foram: Arequipa (equatorial, setor peruano), Bogotá (crista norte da Anomalia de Ionização Equatorial), Cachoeira Paulista (ou Rio de Janeiro na falta de dados em Cachoeira Paulista, ambas na crista sul da Anomalia de Ionização Equatorial) e São Luís (equatorial, setor brasileiro). Os dados de TEC utilizados, de cada estação receptora, foram calculados para cada dia do período de 7 anos analisado, em taxa amostral de 10 minutos. Médias diárias foram calculadas para cada estação receptora, em todo o período. Dessa forma, viabilizou-se a estatística entre os dados de TEC e os dados diários de F10.7. Inicialmente foi elaborada a estatística de correlação anual entre o F10.7 e o TEC. Em seguida, os dados foram divididos a fim de se obter a correlação sazonal. As estações do ano analisadas foram outono (Fevereiro, Março e Abril), inverno (Maio, Junho, Julho), primavera (Agosto, Setembro, Outubro) e verão (Novembro, Dezembro, Janeiro, do mesmo ano). Esta seleção de meses foi feita para as três estações receptoras de GPS localizadas no hemisfério sul (Arequipa, Cachoeira Paulista ou Rio de Janeiro e São Luís). Para a estação receptora de GPS localizada em Bogotá (hemisfério norte), as estações do ano foram definidas em outono (Agosto, Setembro, Outubro), inverno (Novembro, Dezembro, Janeiro, do mesmo ano), primavera (Fevereiro, Março e Abril) e verão (Maio, Junho, Julho). As seções a seguir, de 4.1 a 4.8, mostram esta análise.

4.1 Dependência anual de 2008 a 2014

Serão apresentados nesta seção os resultados obtidos para a análise anual realizada no período 2008-2014. Foi realizada a estatística considerando a correlação entre as observações de TEC diárias, e as observações diárias de fluxo solar F10.7. As Figuras 4.1 a 4.4 apresentam os resultados obtidos considerando Arequipa, Bogotá, Cachoeira Paulista e São Luís, respectivamente. Sete quadros são apresentados em cada uma das Figuras 4.1 a 4.4, relativos a cada ano analisado. Os coeficientes de correlação são apresentados juntamente a cada quadro. A Figura 4.5 mostra em apenas um gráfico os coeficientes de correlação obtidos nas estações receptoras analisadas, em todo o período.

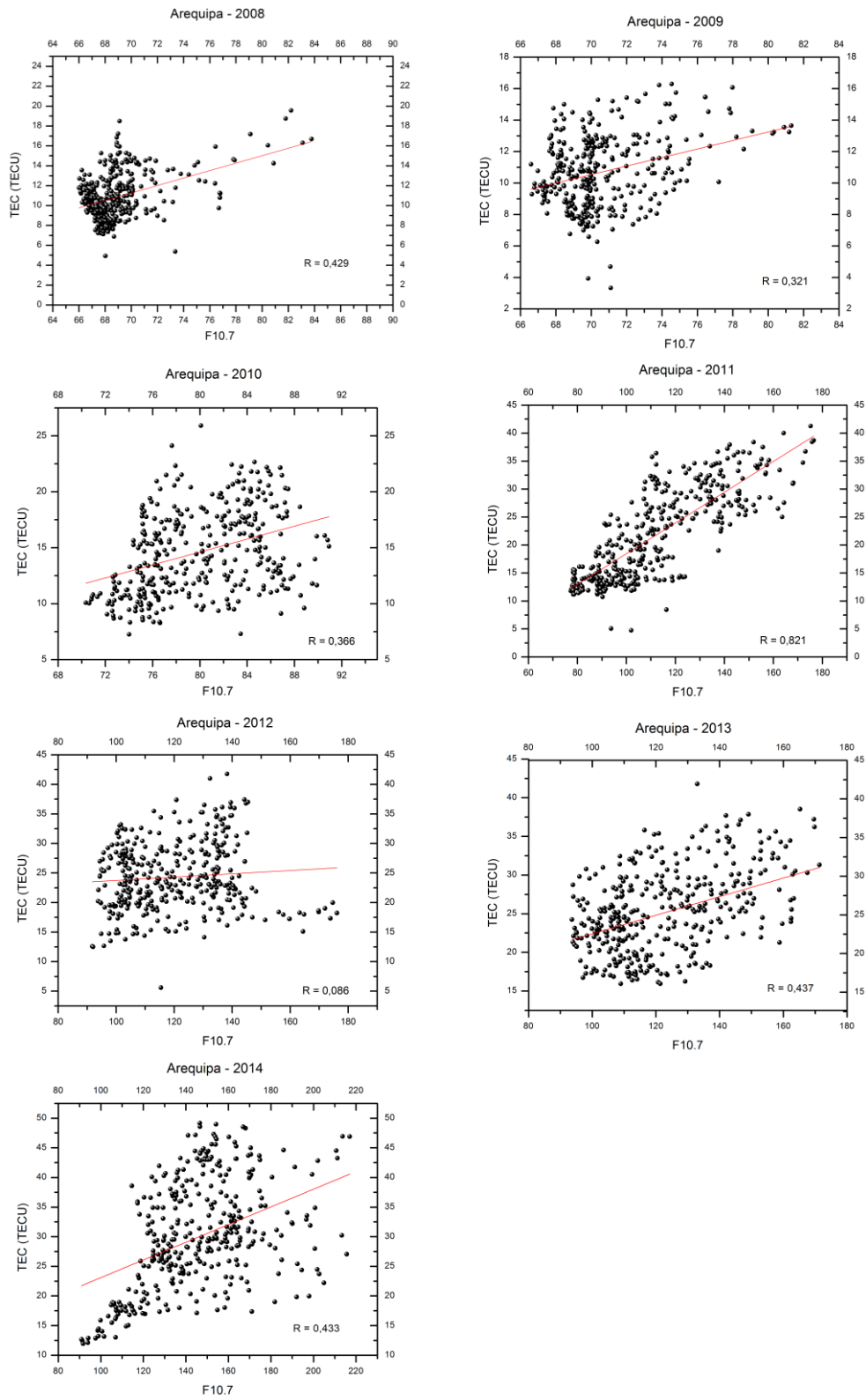


Figura 4.1. Dependência anual do TEC com o F10.7 em Arequipa, de 2008 a 2014.

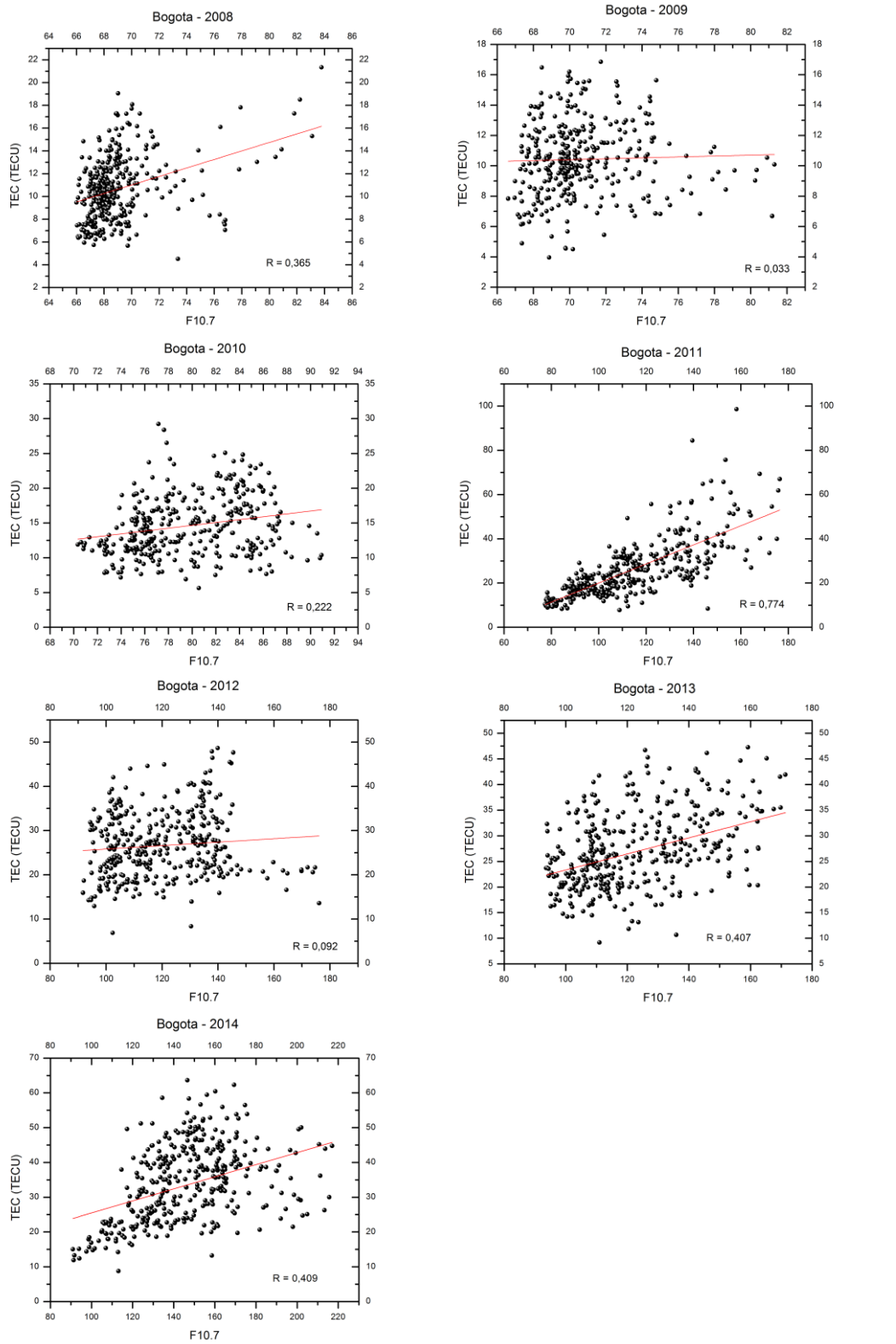


Figura 4.2. Dependência anual do TEC com o F10.7 em Bogotá, de 2008 a 2014.

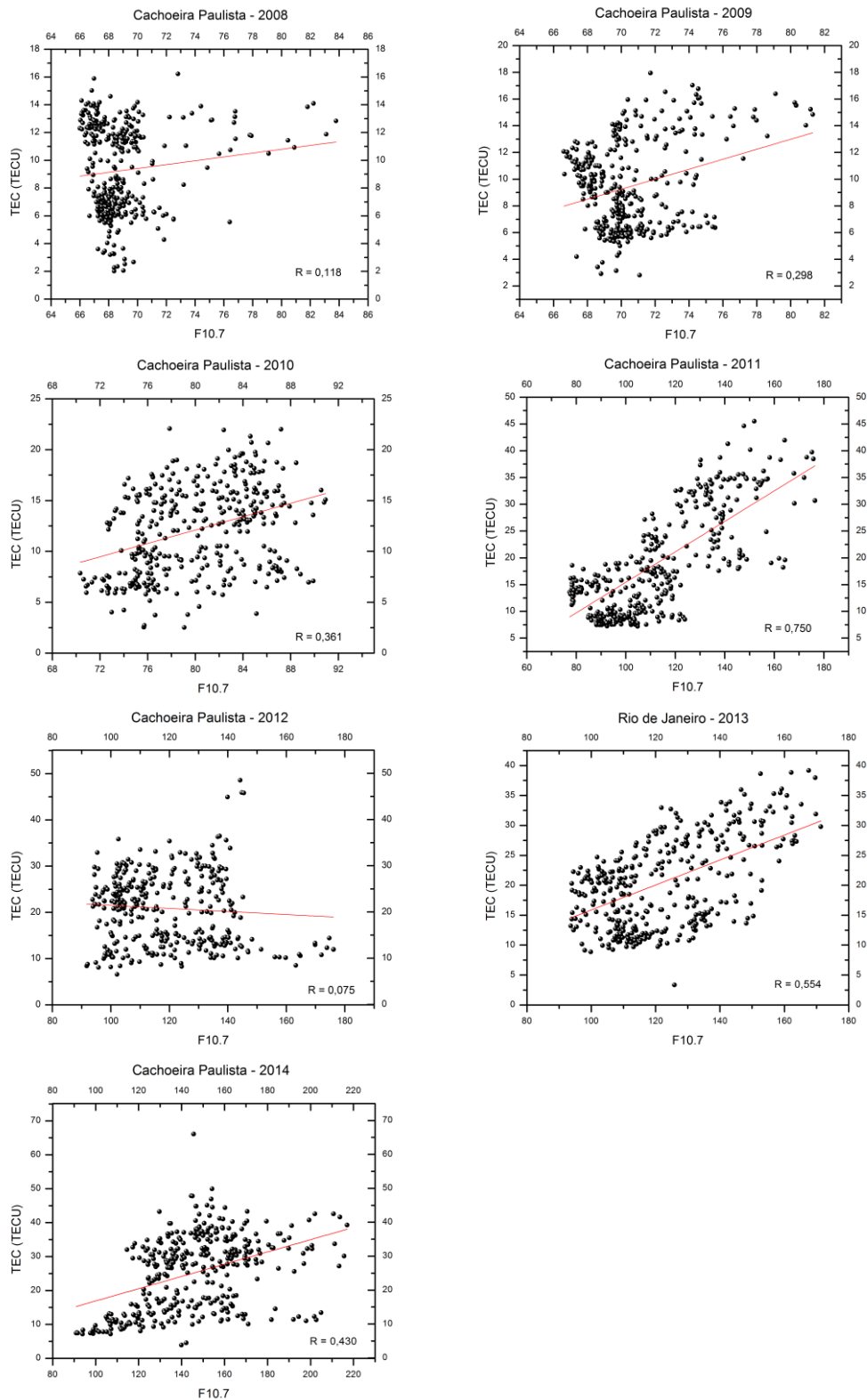


Figura 4.3. Dependência anual do TEC com o F10.7 em Cachoeira Paulista de 2008 a 2012 e 2014, e Rio de Janeiro em 2013.

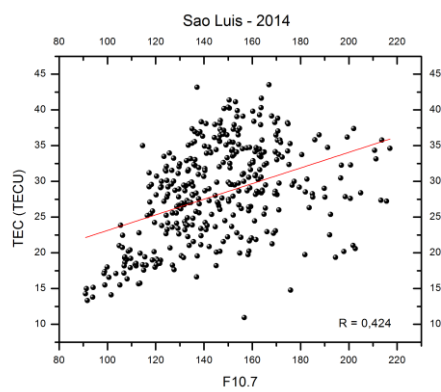
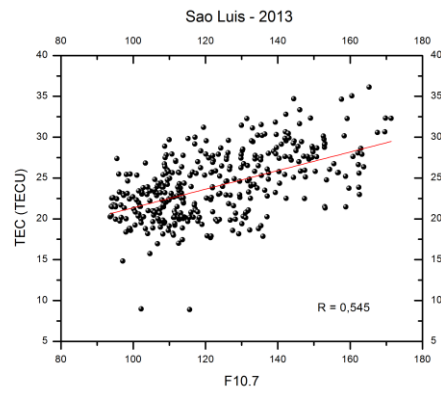
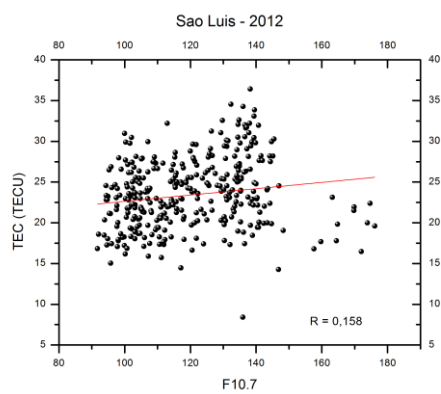
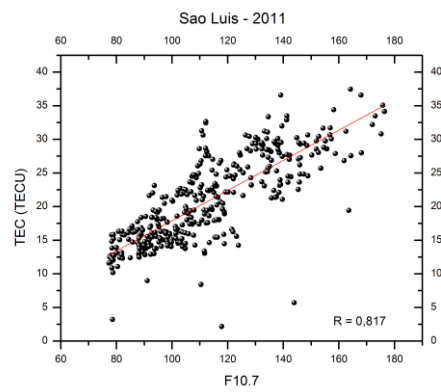
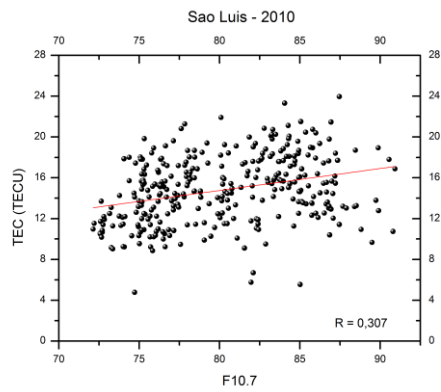
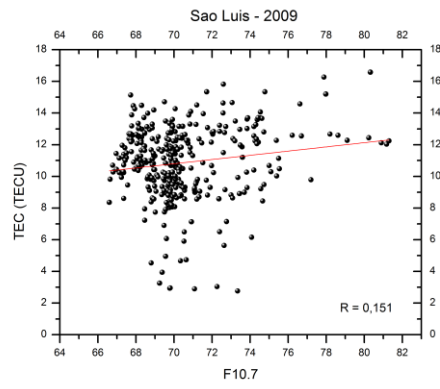
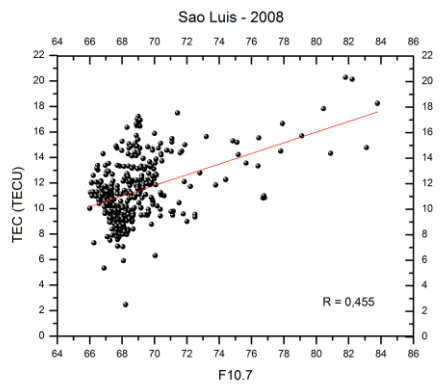


Figura 4.4. Dependência anual do TEC com o F10.7 em São Luís, de 2008 a 2014.

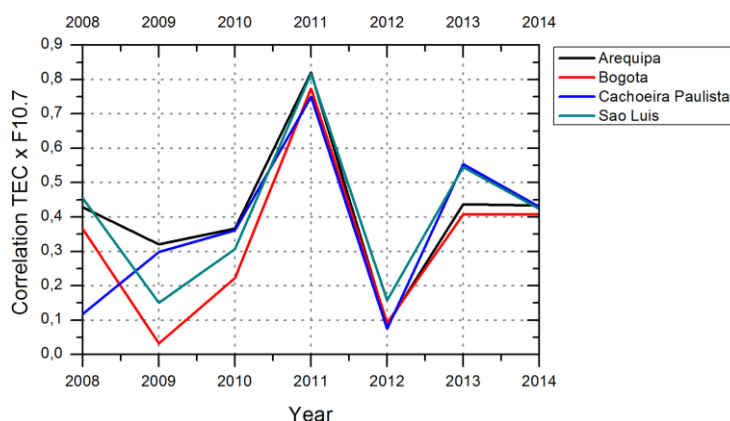


Figura 4.5. Correlações obtidas entre os dados de TEC e F10.7, nas quatro estações receptoras analisadas, entre 2008 e 2014.

Na Figura 4.5 é possível observar que os valores de correlação durante o mínimo solar (2008-2009) e em 2010 não ultrapassam 0,450. Esse cenário muda abruptamente em 2011, quando todas as estações de GPS mediram valores de TEC que apresentaram correlações muito altas com o F10.7. No entanto as correlações não se mantêm nesse patamar, e diminuem drasticamente em 2012, também em todas as localidades analisadas. A partir de 2013 os valores de correlação voltam a aumentar, mas ficam entre 0,400 e 0,550. Outros estudos já mostraram resultados semelhantes, com altos valores de correlação entre o TEC e o F10.7 apenas em 2011 (D'ujanga et al., 2017; Patel et al., 2017). No ano de 2011 é observado o primeiro aumento significativo nas forçantes solares, o que pode ser observado na Figura 2.4, mostrada no início deste trabalho, em que os valores mensais do F10.7 apresentam um pico significativo comparado aos três anos anteriores (2008 a 2010). Assim, esse aumento na atividade solar em 2011, após um longo período de atividade solar extremamente calma, aparentemente é a causa principal da alta correlação entre TEC e F10.7 observada neste ano (D'ujanga et al., 2017). Em contrapartida, em 2012 as correlações apresentaram os menores valores observados no período, mesmo com o aumento significativo da atividade solar em relação a 2011. Isso mostra que embora o efeito inicial da recuperação da atividade solar em 2011 tenha se mostrado o principal forçante para os aumentos no TEC observados, o mesmo não ocorreu nos anos seguintes.

4.2 Dependência sazonal observada em 2008

As Figuras 4.6 a 4.9 mostram a dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2008. Na Figura 4.10 é mostrado um sumário das correlações obtidas em 2008.

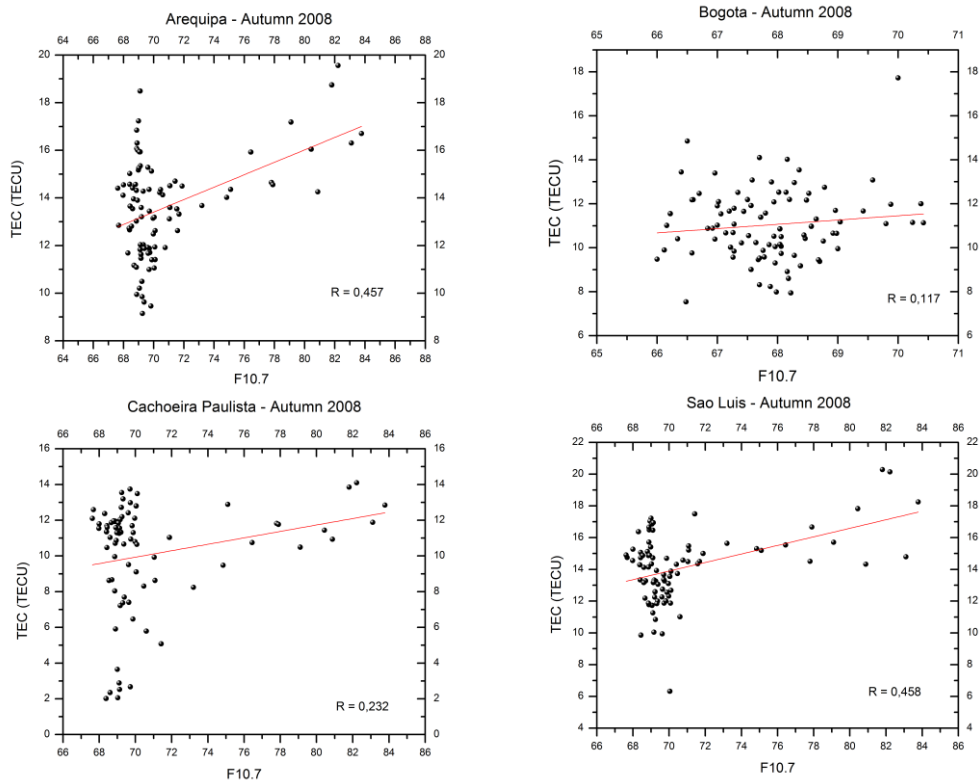


Figura 4.6. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no outono de 2008, nas estações analisadas.

Na Figura 4.10 é possível observar que as correlações em 2008 são muito baixas ao longo de todo o ano, sempre abaixo de 0,45. Observa-se também um comportamento oposto de Bogotá em relação às demais localidades. Apesar da estação de Bogotá estar localizada a $\sim 4,5^\circ\text{N}$ de latitude geográfica, e $\sim 28,2^\circ\text{N}$ de inclinação magnética, a composição de fatores dinâmicos e da termosfera neutra aparentemente resultam em um comportamento ionosférico semelhante ao de São Luís, também localizada na zona equatorial mas no hemisfério sul. Considerando esta hipótese, esperaria-se uma curva semelhante à de São Luís.

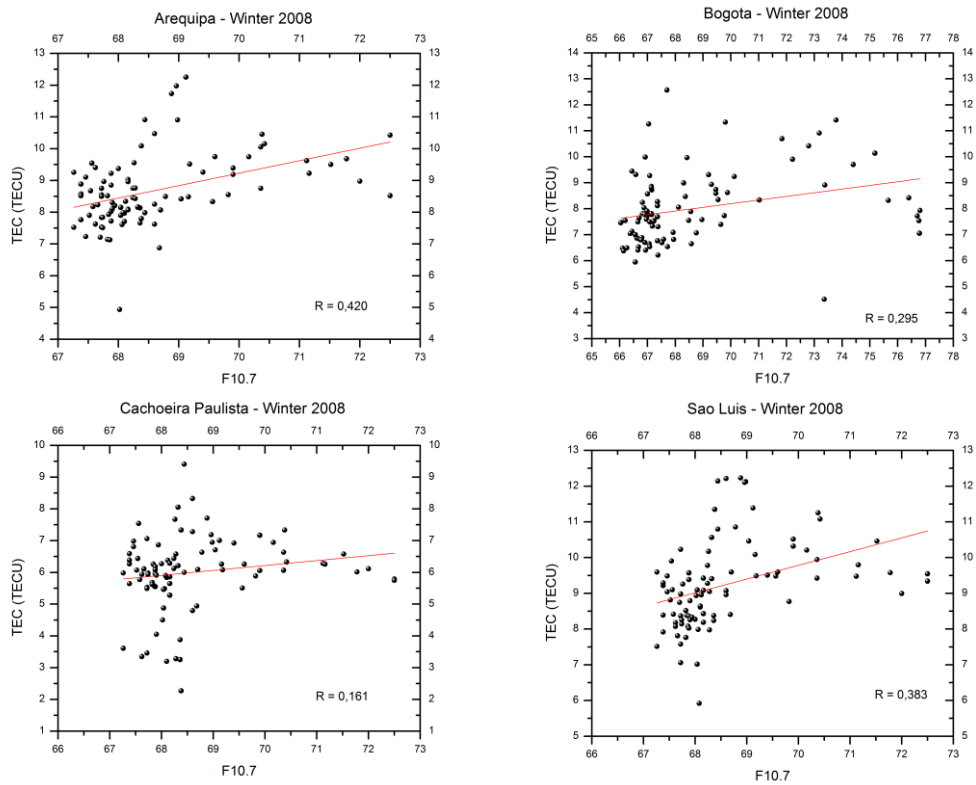


Figura 4.7. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no inverno de 2008, nas estações analisadas.

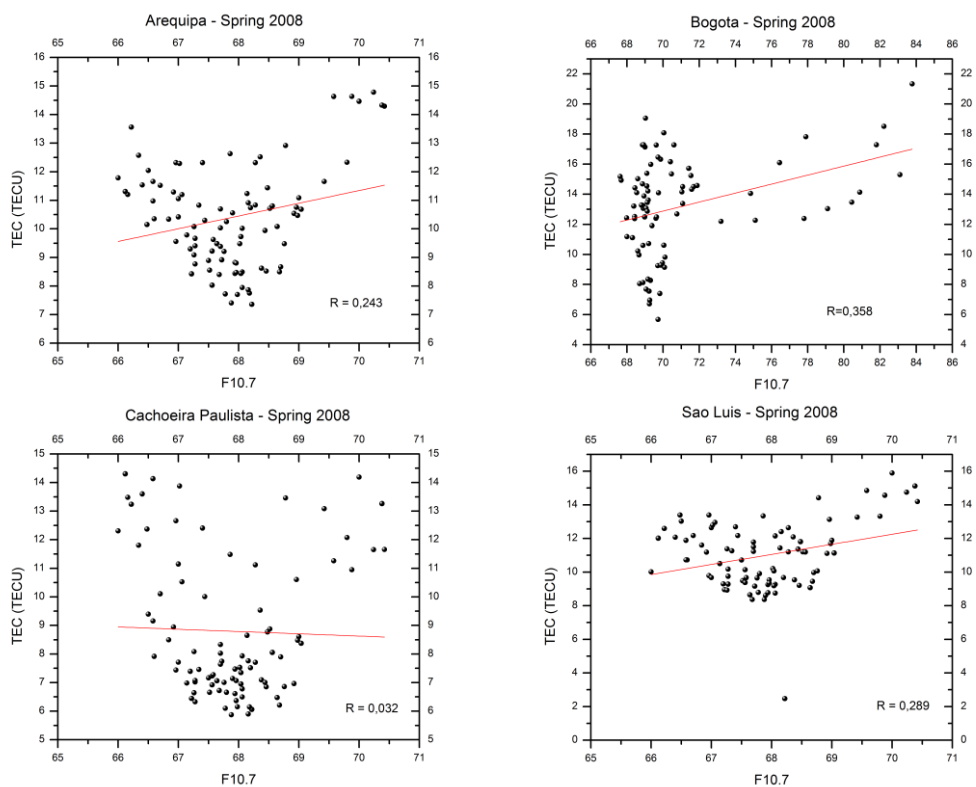


Figura 4.8. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 na primavera de 2008, nas estações analisadas.

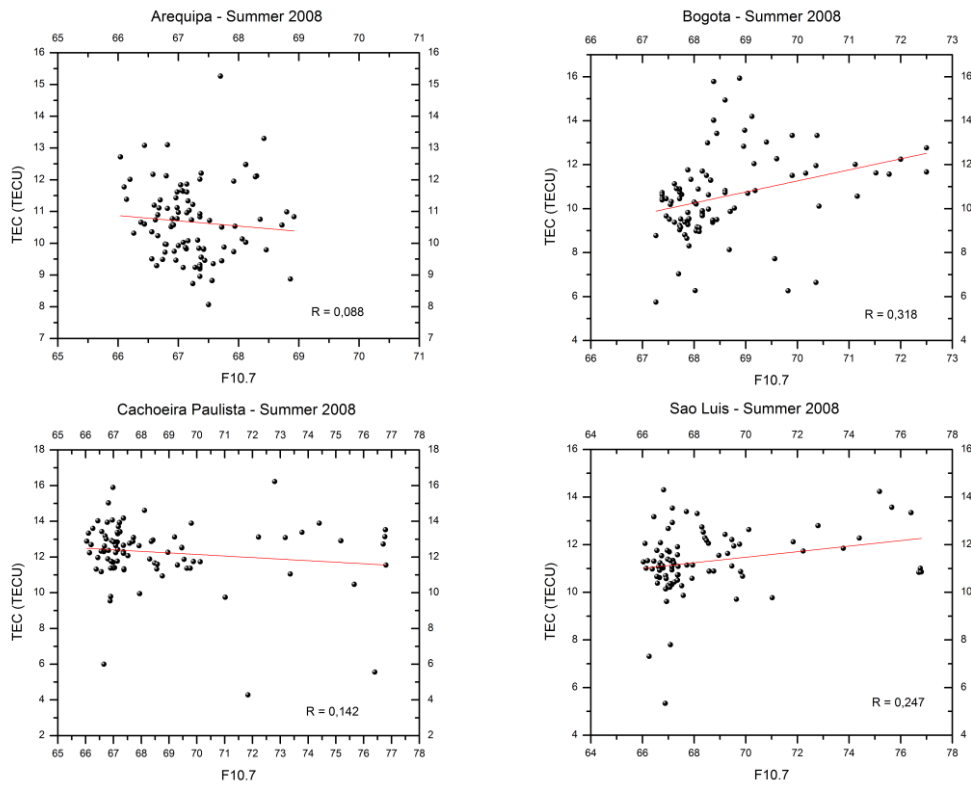


Figura 4.9. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no verão de 2008, nas estações analisadas.

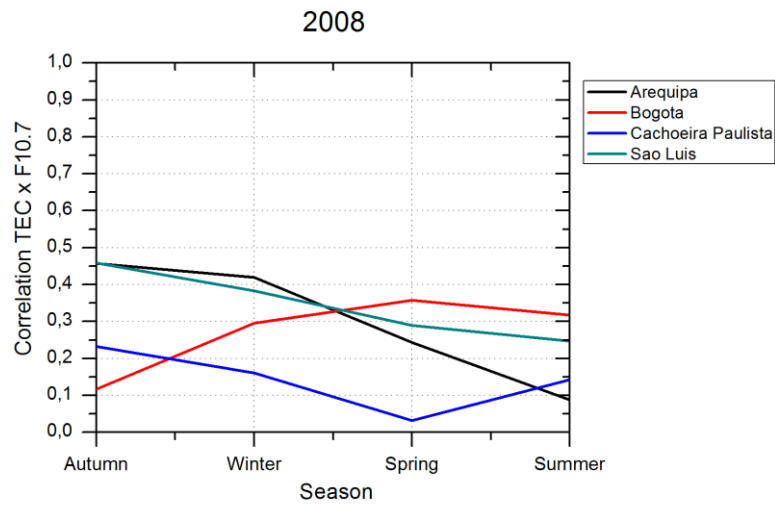


Figura 4.10. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2008, nas estações analisadas.

4.3 Dependência sazonal observada em 2009

As Figuras 4.11 a 4.14 mostram a dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2009. Na Figura 4.15 é mostrado um sumário das correlações obtidas em 2009.

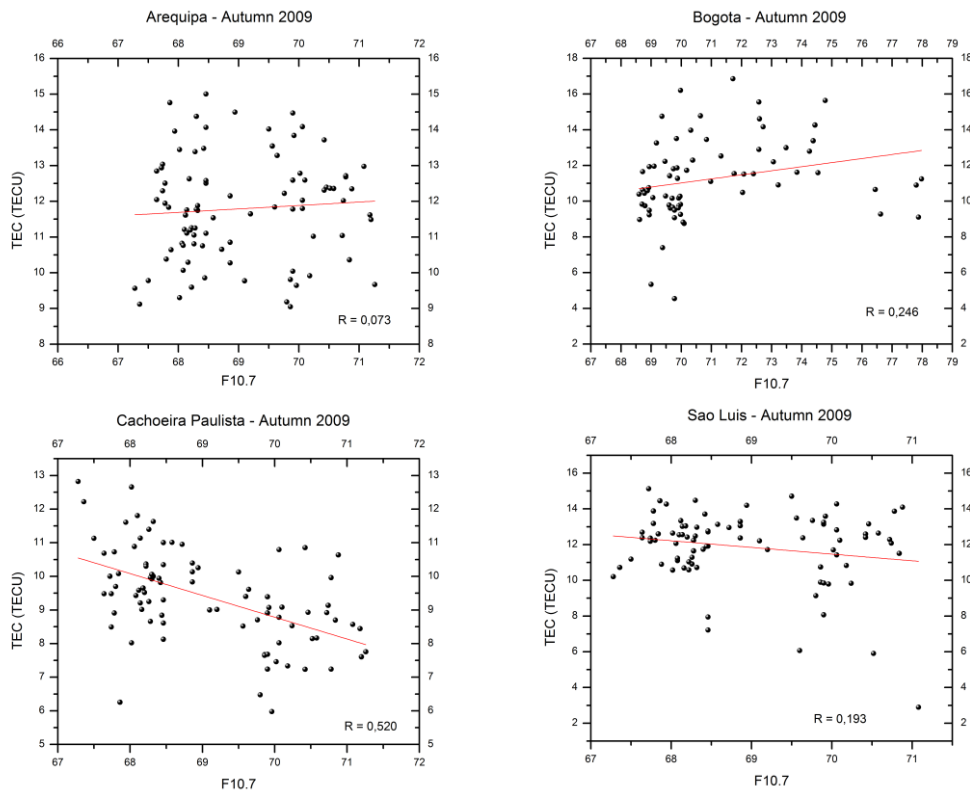


Figura 4.11. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no outono de 2009, nas estações analisadas.

No ano de 2009, as correlações apresentaram valores mais altos comparado a 2008. Neste ano, as correlações observadas em Bogotá seguem o mesmo padrão das demais localidades, diferindo em relação a 2008, quando apresentou comportamento oposto das demais localidades. Isso mostra que mesmo com atividade solar muito baixa, uma vez que 2008-2009 foi o período de menor atividade observada no ciclo solar 24, nos dois anos houve diferentes fatores agindo na eletrodinâmica ionosférica. Outro fator marcante na Figura 4.15 é que a sazonalidade está bem definida nos dados, e durante a primavera são observadas as maiores correlações entre o F10.7 e o TEC.

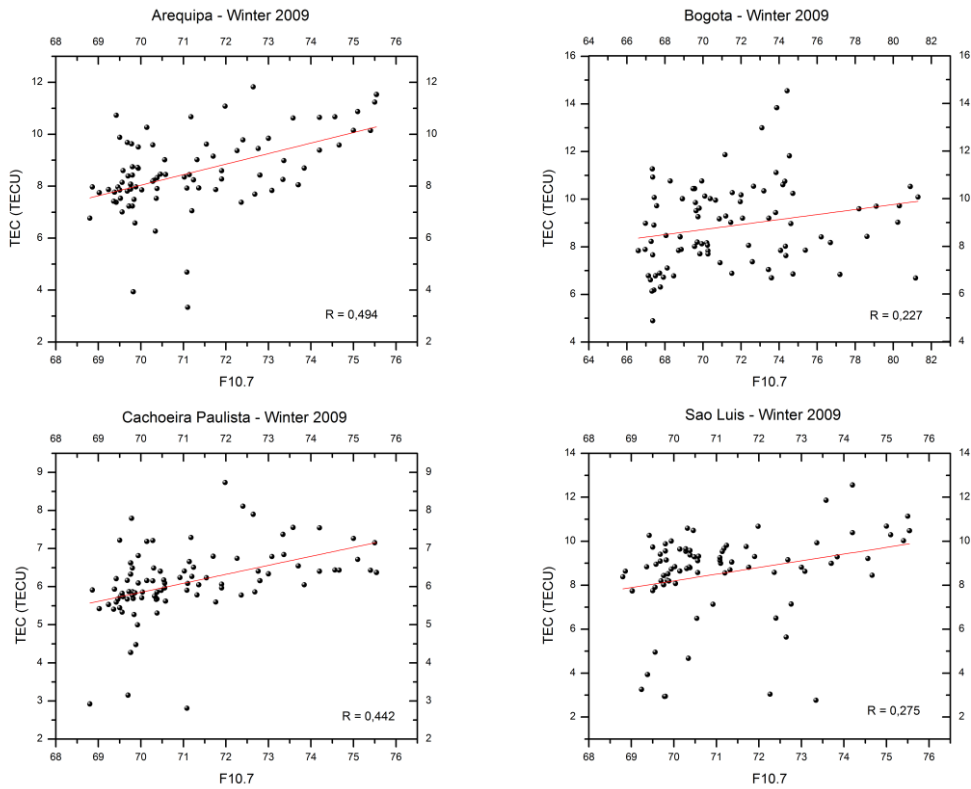


Figura 4.12. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no inverno de 2009, nas estações analisadas.

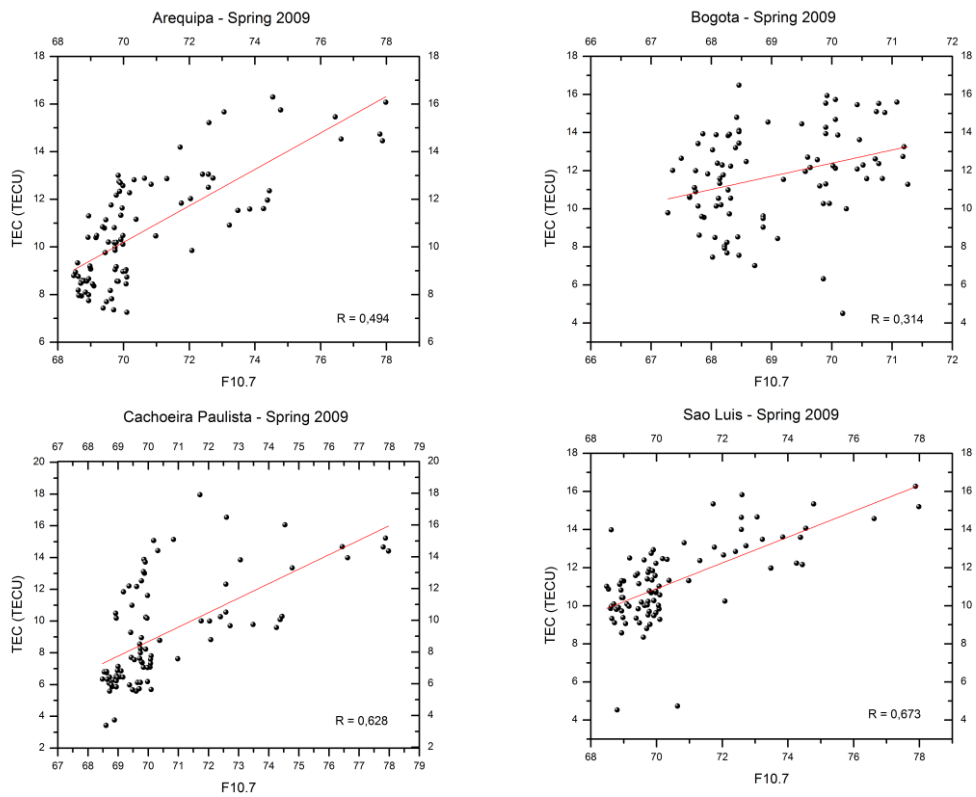


Figura 4.13. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 na primavera de 2009, nas estações analisadas.

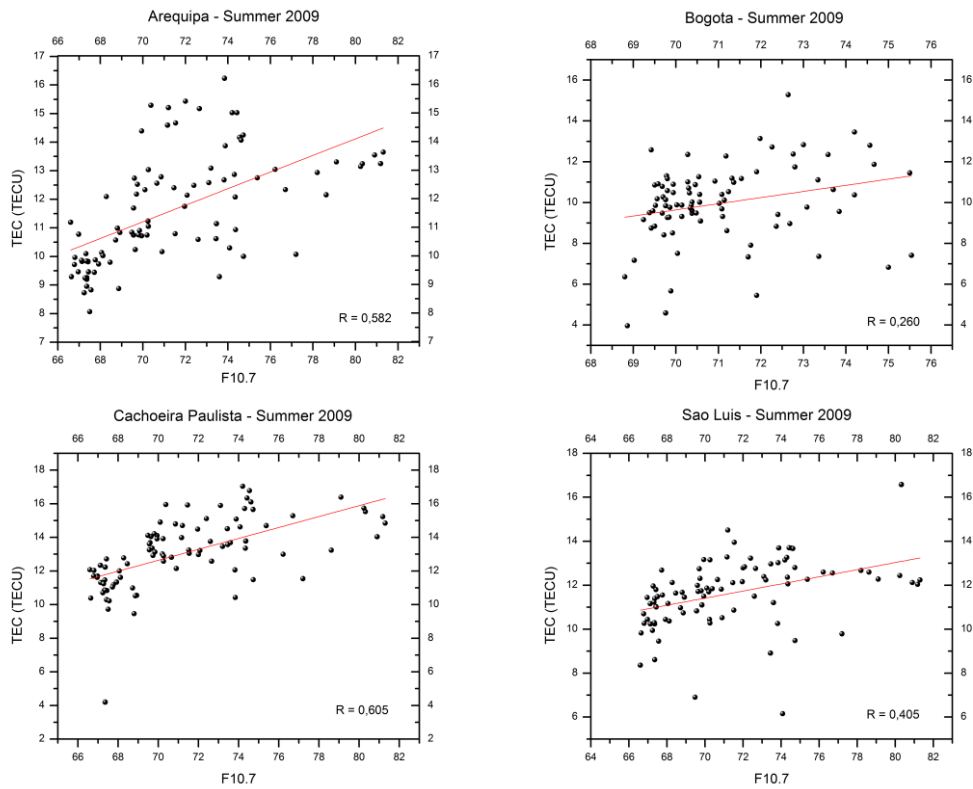


Figura 4.14. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no verão de 2009, nas estações analisadas.

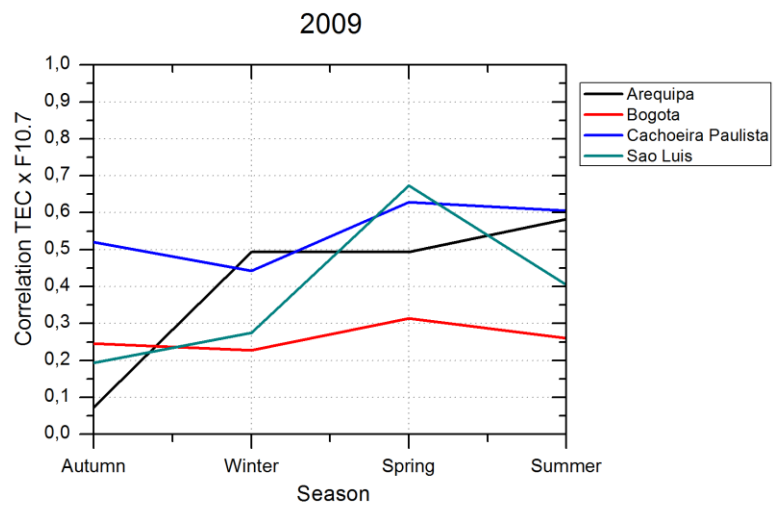


Figura 4.15. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2009, nas estações analisadas.

4.4 Dependência sazonal observada em 2010

As Figuras 4.16 a 4.19 mostram a dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2010. Na Figura 4.20 é mostrado um sumário das correlações obtidas em 2010.

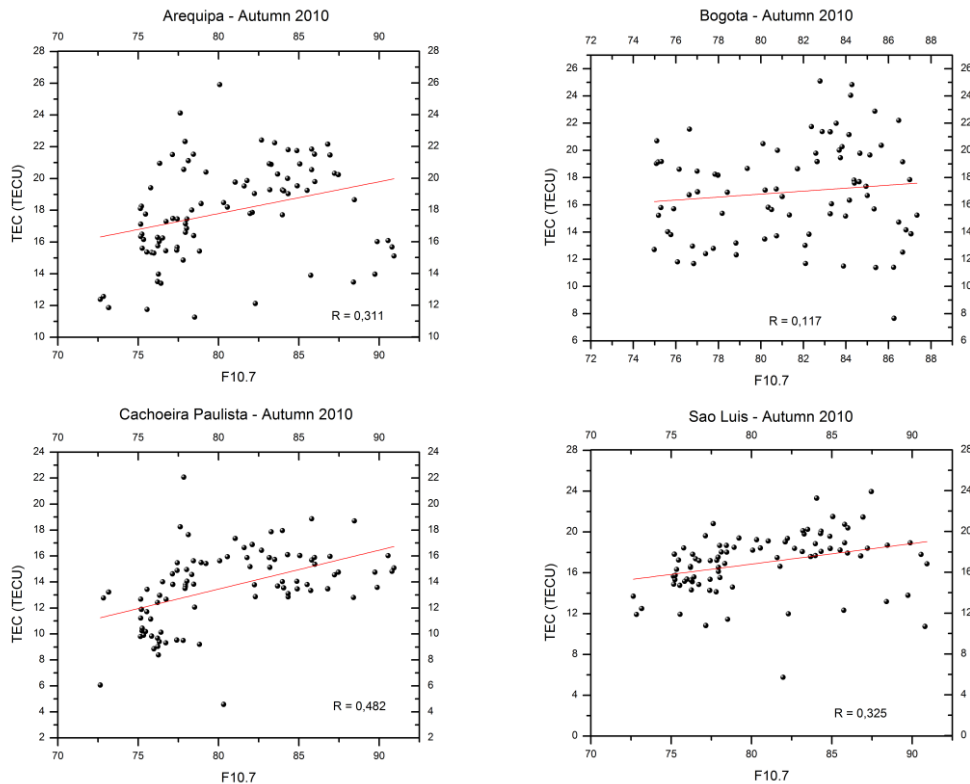


Figura 4.16. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no outono de 2010, nas estações analisadas.

Observa-se na Figura 4.20 que durante 2010 as correlações observadas são muito baixas, sendo que apenas Bogotá apresenta correlação acima de 0,5 no verão. Neste ano, a sazonalidade não segue o mesmo padrão observado em 2009, e na primavera são observados os menores valores de correlação do ano de 2010, nas quatro localidades. Um ponto marcante nas Figura 4.20 é que no verão as correlações foram maiores, evidenciando a maior ionização na ionosfera ocorrida devido à maior insolação.

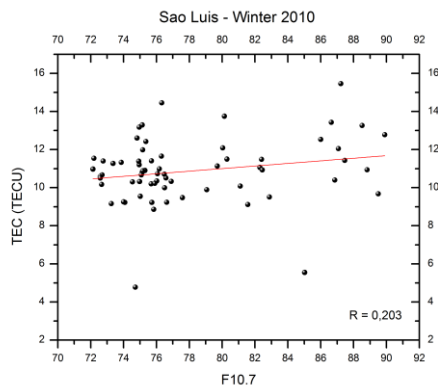
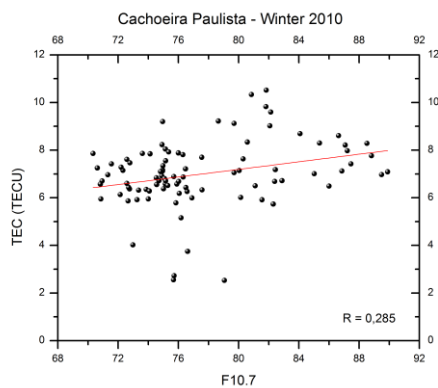
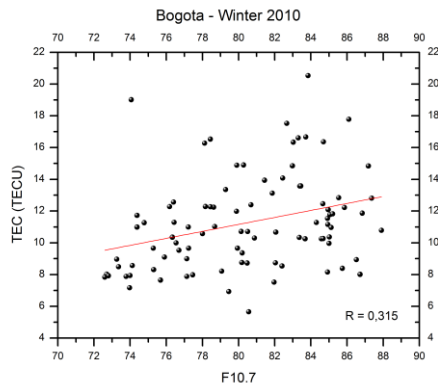
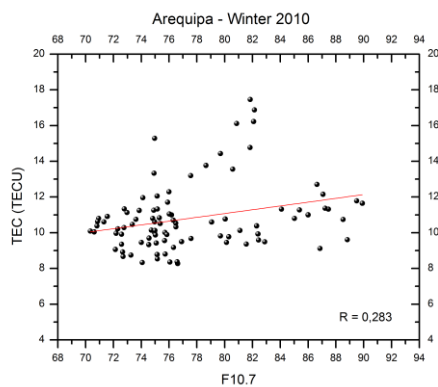


Figura 4.17. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no inverno de 2010, nas estações analisadas.

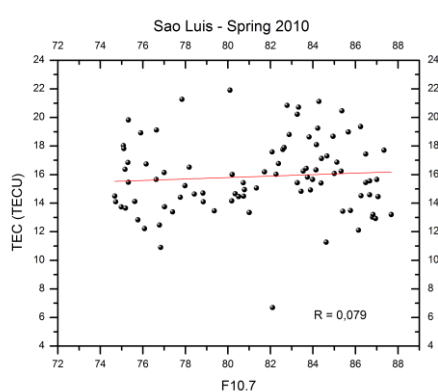
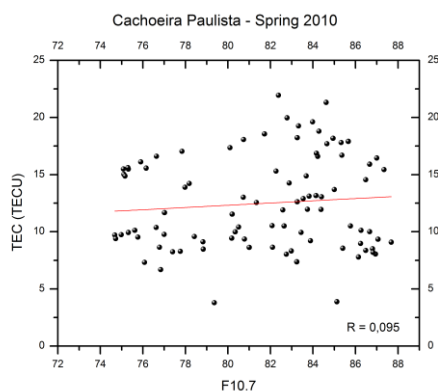
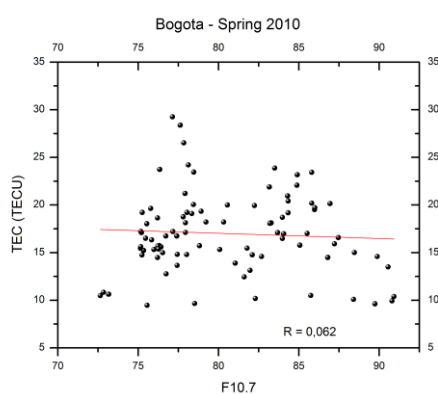
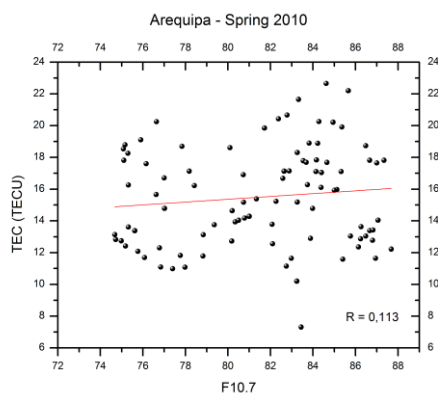


Figura 4.18. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 na primavera de 2010, nas estações analisadas.

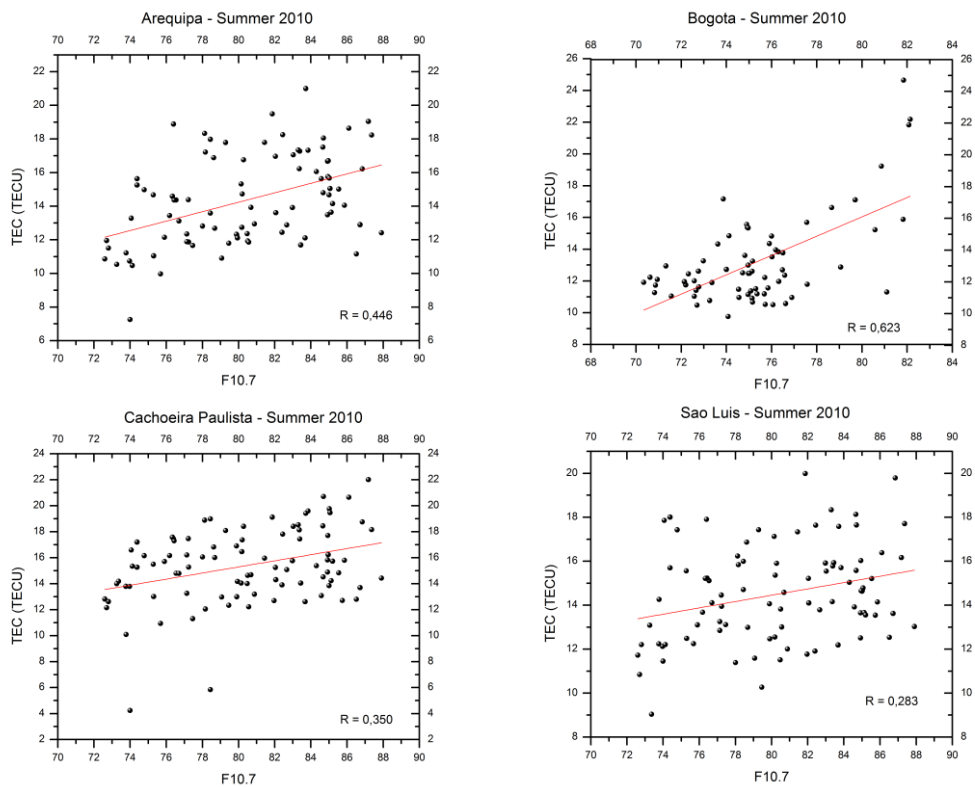


Figura 4.19. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no verão de 2010, nas estações analisadas.

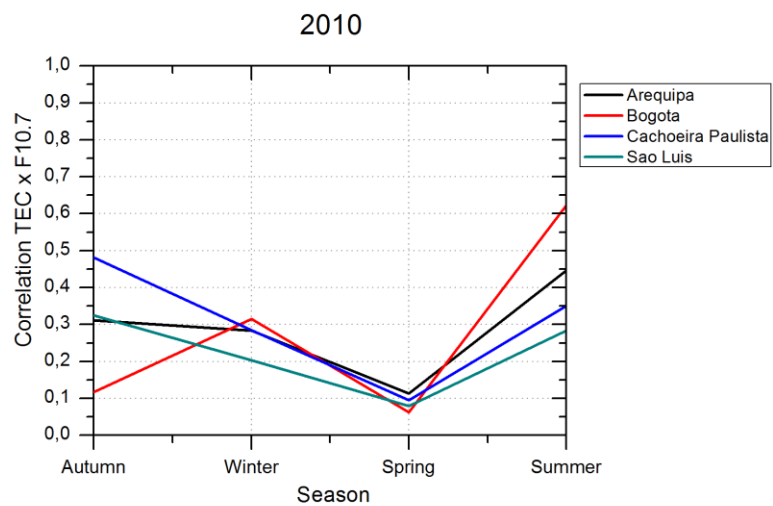


Figura 4.20. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2010, nas estações analisadas.

4.5 Dependência sazonal observada em 2011

As Figuras 4.21 a 4.24 mostram a dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2011. Na Figura 4.25 é mostrado um sumário das correlações obtidas em 2011.

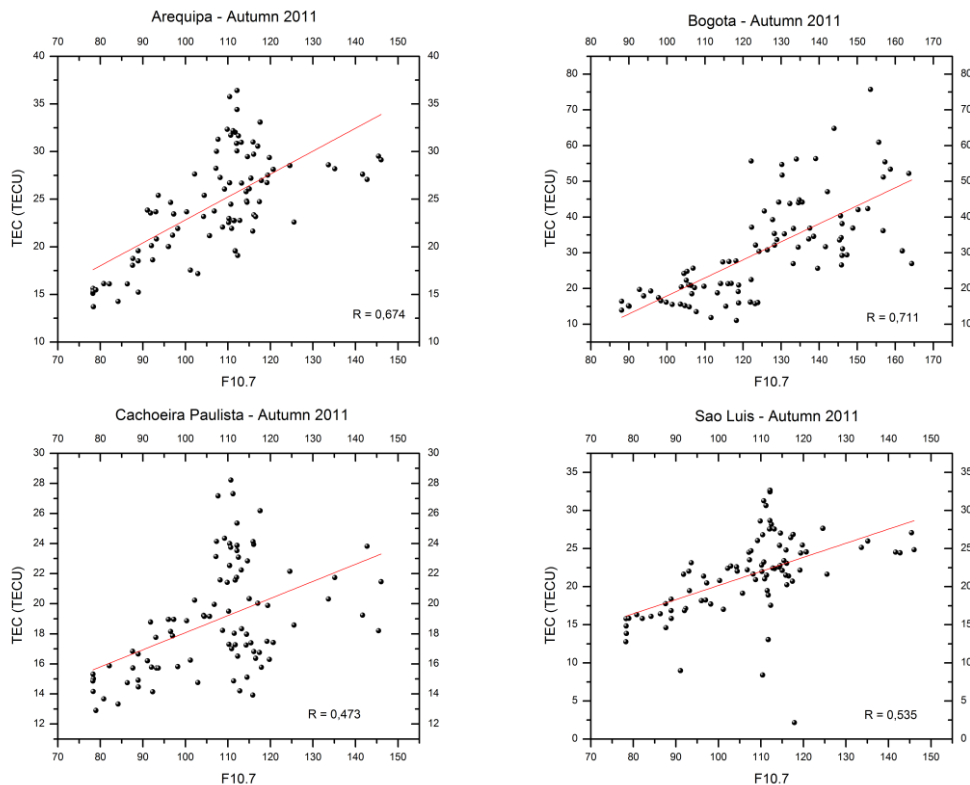


Figura 4.21. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no outono de 2011, nas estações analisadas.

As Figura 4.22 e 4.24 apresentam uma particularidade dos dados no inverno e no verão, respectivamente. São observados dois grupos de dados distintos na Figura 4.22, em Bogotá, e na Figura 4.24, em Arequipa, Cachoeira Paulista e São Luís. Essa subdivisão nos grupos de pontos observados nos gráficos deu-se devido aos meses escolhidos para compor os meses de inverno em Bogotá e verão nas demais localidades (Novembro, Dezembro e Janeiro, do mesmo ano). Como o mês de Janeiro de 2011 apresenta fluxo solar muito inferior ao observado nos meses de Novembro e Dezembro, isso refletiu-se na subdivisão observada nos dados. No entanto, optou-se por manter a metodologia que considera o mesmo ano para compor as divisões sazonais para análise, método este utilizado nos demais trabalhos já realizados anteriormente.

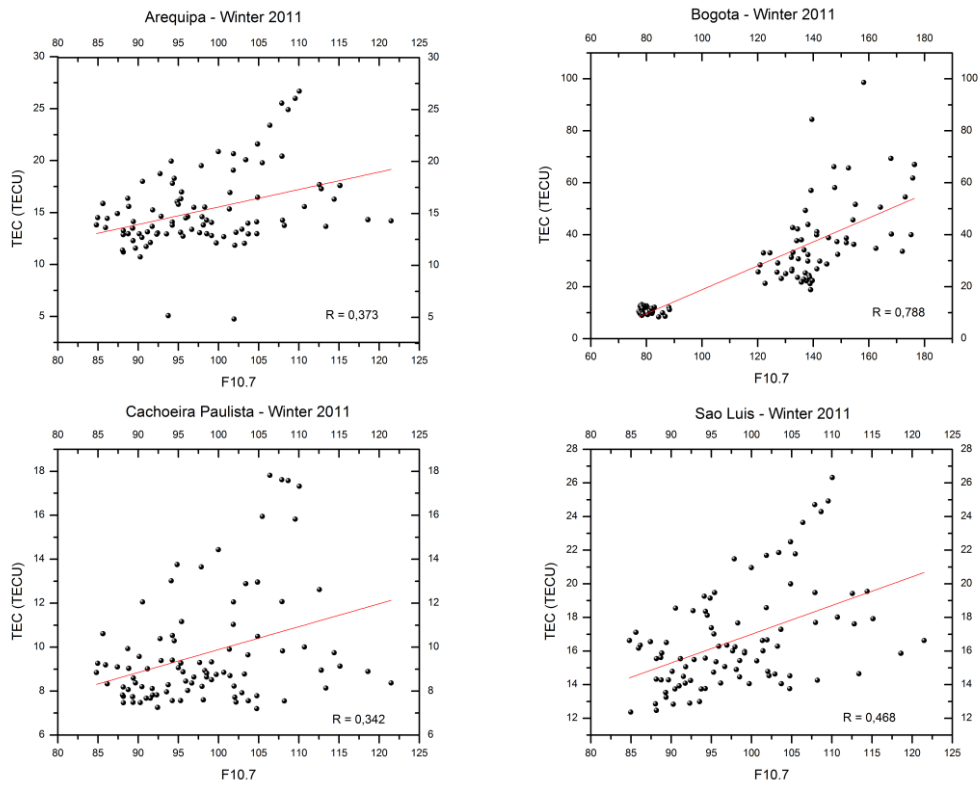


Figura 4.22. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no inverno de 2011, nas estações analisadas.

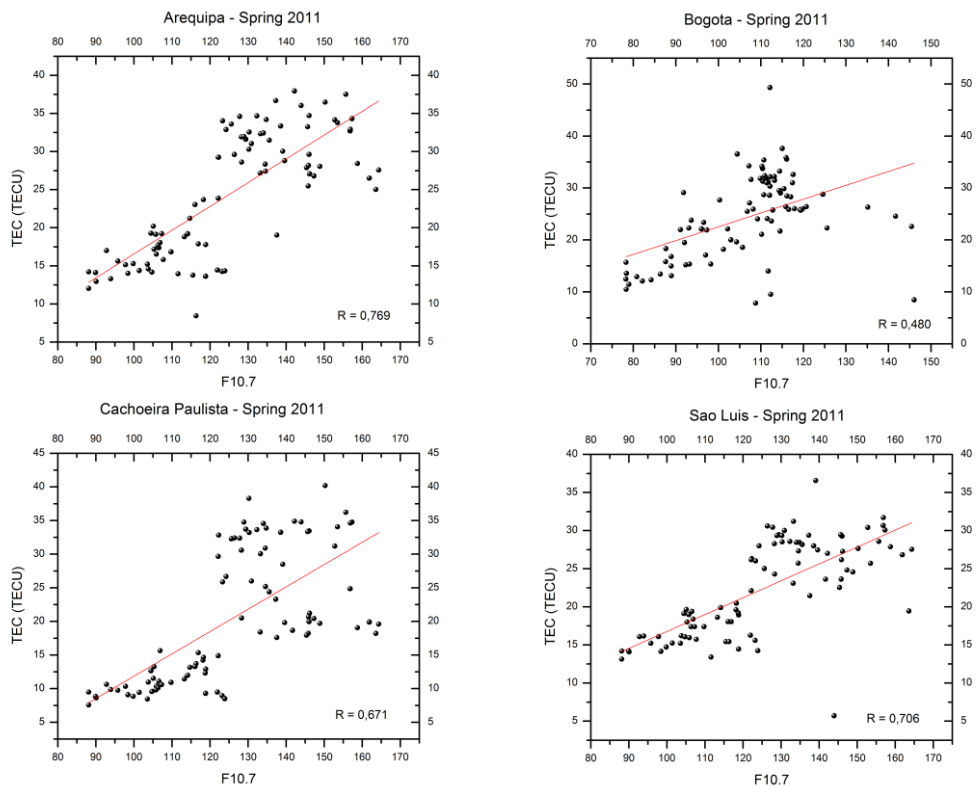


Figura 4.23. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 na primavera de 2011, nas estações analisadas.

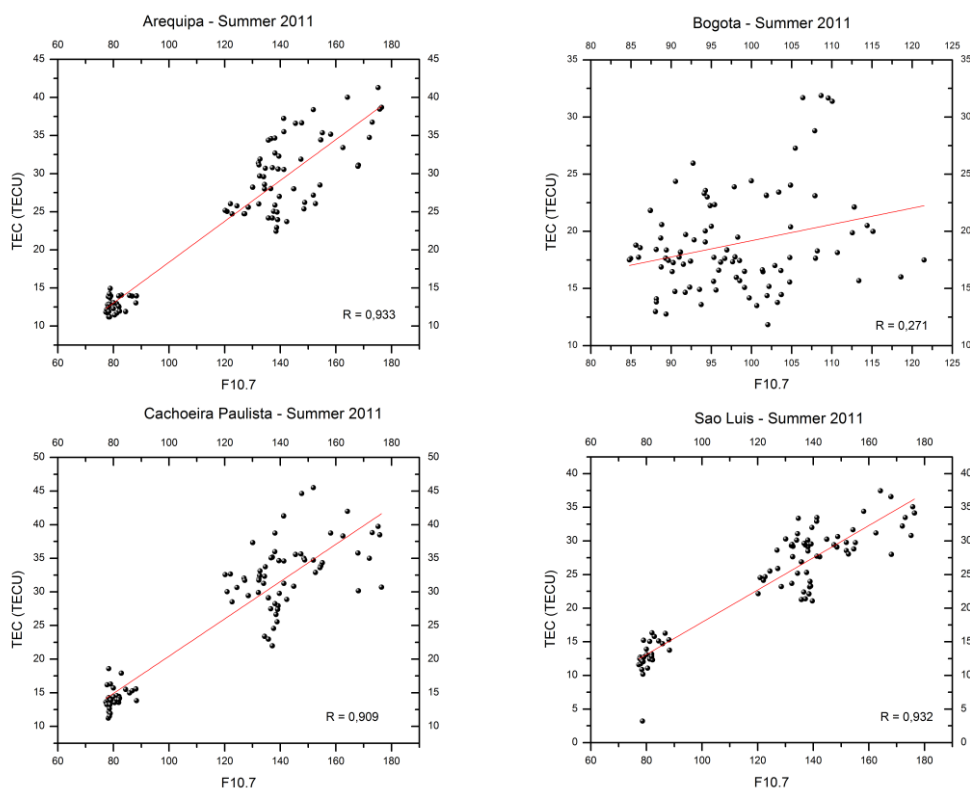


Figura 4.24. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no verão de 2011, nas estações analisadas.

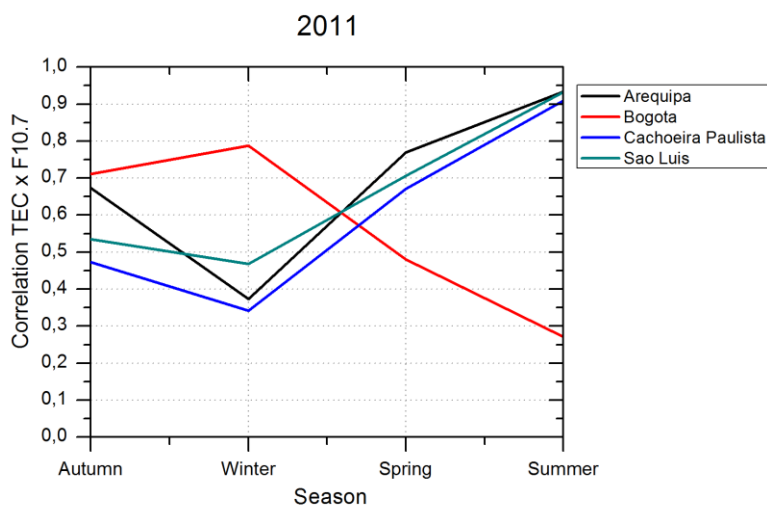


Figura 4.25. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2011, nas estações analisadas.

Como já mencionado na seção 4.1, em 2011 foram observados os maiores valores de correlação entre o TEC e o F10.7, o que se evidencia na Figura 4.25. Neste ano, os maiores valores de correlação são observados na primavera e verão (com exceção de Bogotá, que apresenta comportamento oposto e tem maior correlação observada no inverno). Com o aumento da atividade solar a partir de 2011, a maior correlação observada na primavera está mais

relacionada a fatores geodinâmicos e eletrodinâmicos, do que a fatores solares. Sabe-se que o TEC apresenta os maiores valores nos equinócios, como demonstrado na seção 3.1, e este comportamento evidencia-se com o aumento da atividade solar. No entanto, apenas é possível afirmar que maiores valores de TEC são observados com o aumento da atividade solar, o que já foi exaustivamente demonstrado na literatura, mas o que se observa é apenas um aumento geral do TEC em todas as estações do ano, sem necessariamente apresentar uma característica sazonal relacionada à atividade solar. Além disso, características anuais e semi-anuais do TEC foram demonstradas na seção 3.1, que corrobora que maiores valores de TEC são observados nos equinócios, e estes aumentos serão proporcionalmente maiores, em todas as estações, de acordo com o aumento da atividade solar.

4.6 Dependência sazonal observada em 2012

As Figuras 4.26 a 4.29 mostram a dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2012. Na Figura 4.30 é mostrado um sumário das correlações obtidas em 2012.

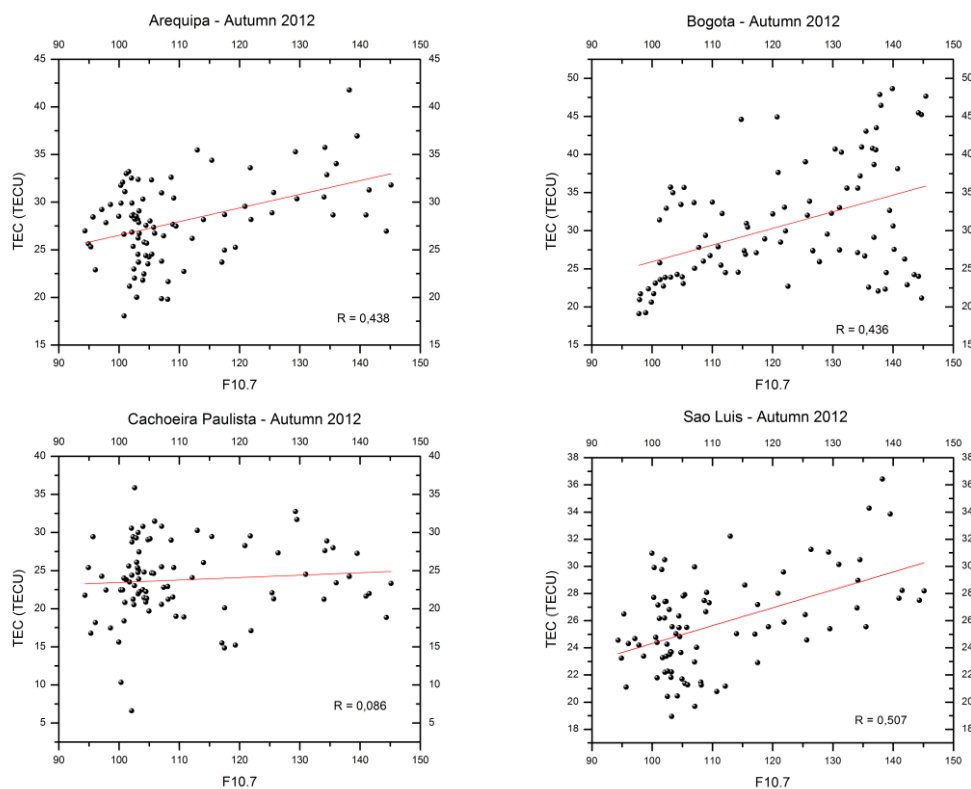


Figura 4.26. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no outono de 2012, nas estações analisadas.

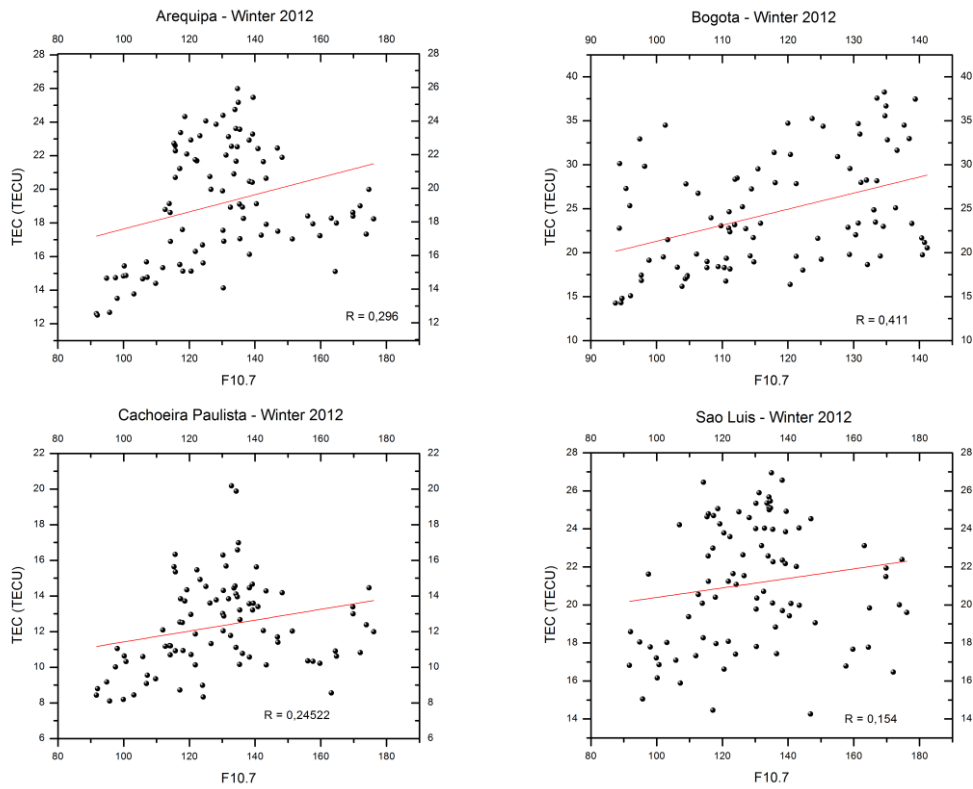


Figura 4.27. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no inverno de 2012, nas estações analisadas.

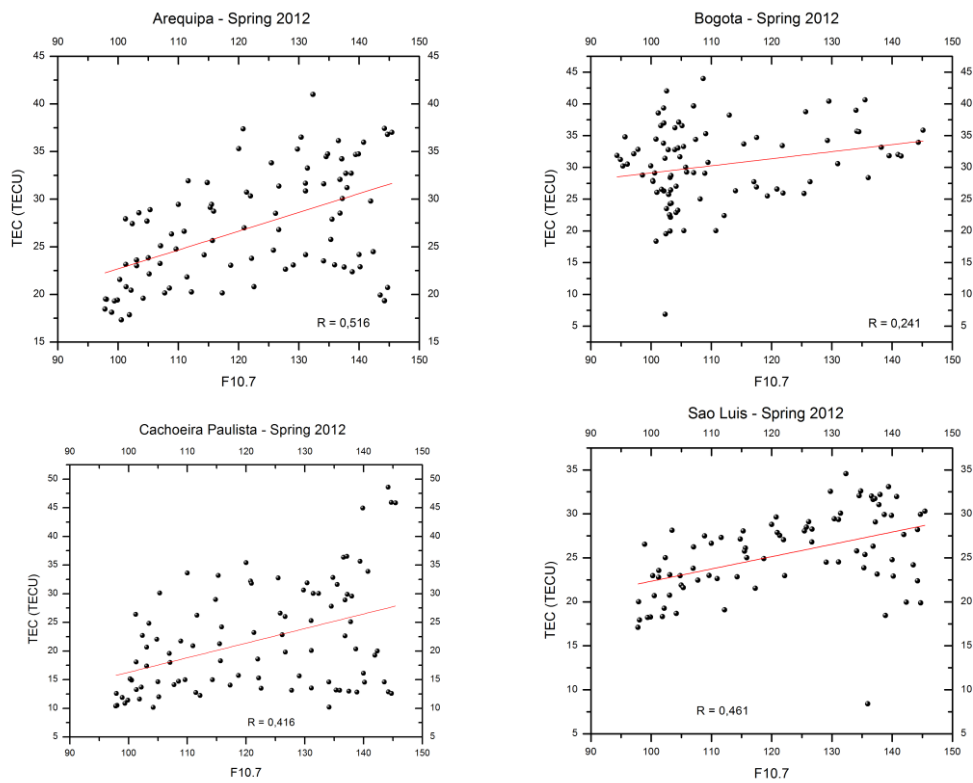


Figura 4.28. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 na primavera de 2012, nas estações analisadas.

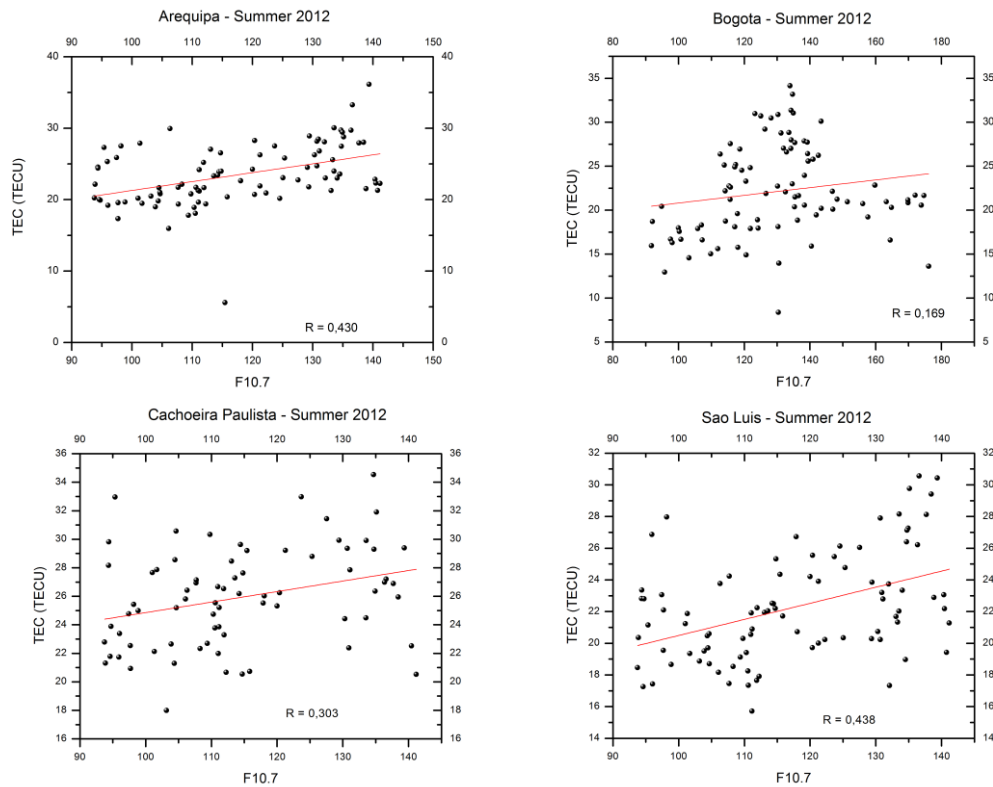


Figura 4.29. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no verão de 2012, nas estações analisadas.

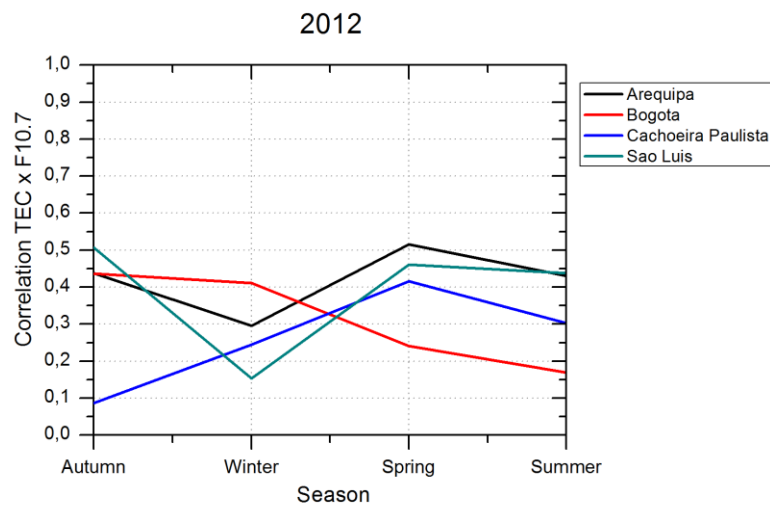


Figura 4.30. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2012, nas estações analisadas.

Na Figura 4.30 é possível observar que as correlações novamente são muito baixas considerando a sazonalidade, mesmo com o aumento da atividade solar e dos valores de F10.7 no ano de 2012, comparado ao mínimo solar. A estação localizada em Bogotá apresentou comportamento oposto às demais localidades, mas sem grandes diferenças nos valores de correlação. Outra característica importante observada na Figura 4.30 é que os resultados refletem

na realidade o comportamento sazonal do TEC devido a diversos fatores termosféricos e eletrodinâmicos existentes na ionosfera, como menores valores de correlação no inverno e maiores no solstício de primavera. Na realidade, este resultado está intrinsecamente relacionado ao fato do TEC apresentar maiores valores na primavera, e menores no inverno, em 2012 (vide seção 3.1).

4.7 Dependência sazonal observada em 2013

As Figuras 4.31 a 4.34 mostram a dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2013. Na Figura 4.35 é mostrado um sumário das correlações obtidas em 2013.

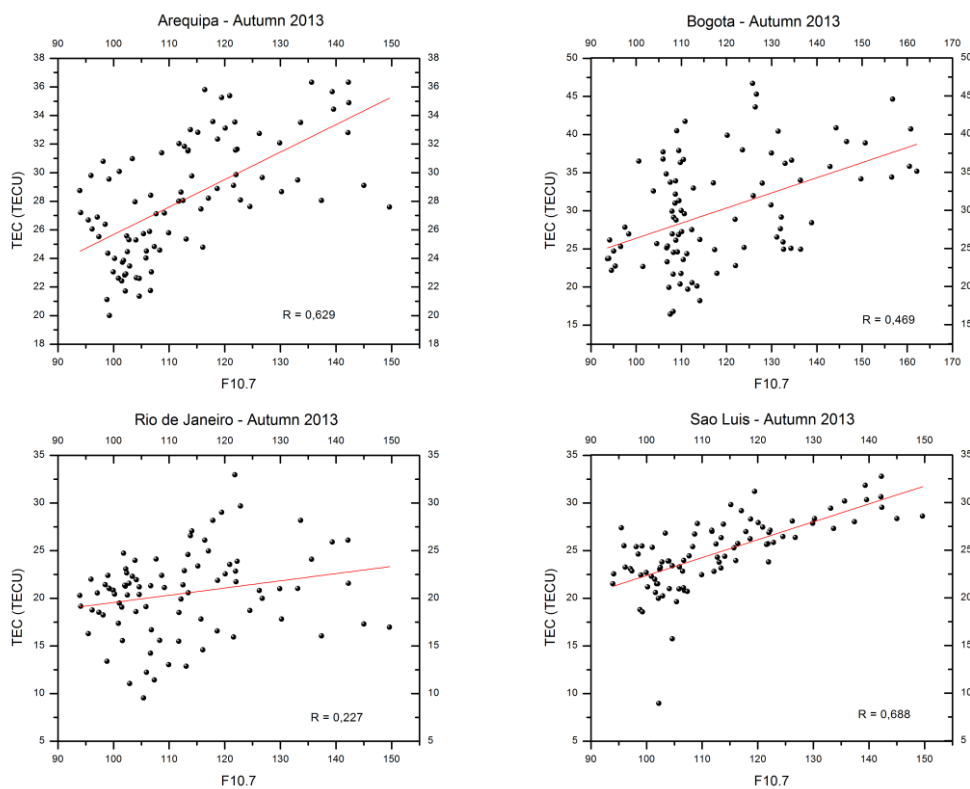


Figura 4.31. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no outono de 2013, nas estações analisadas.

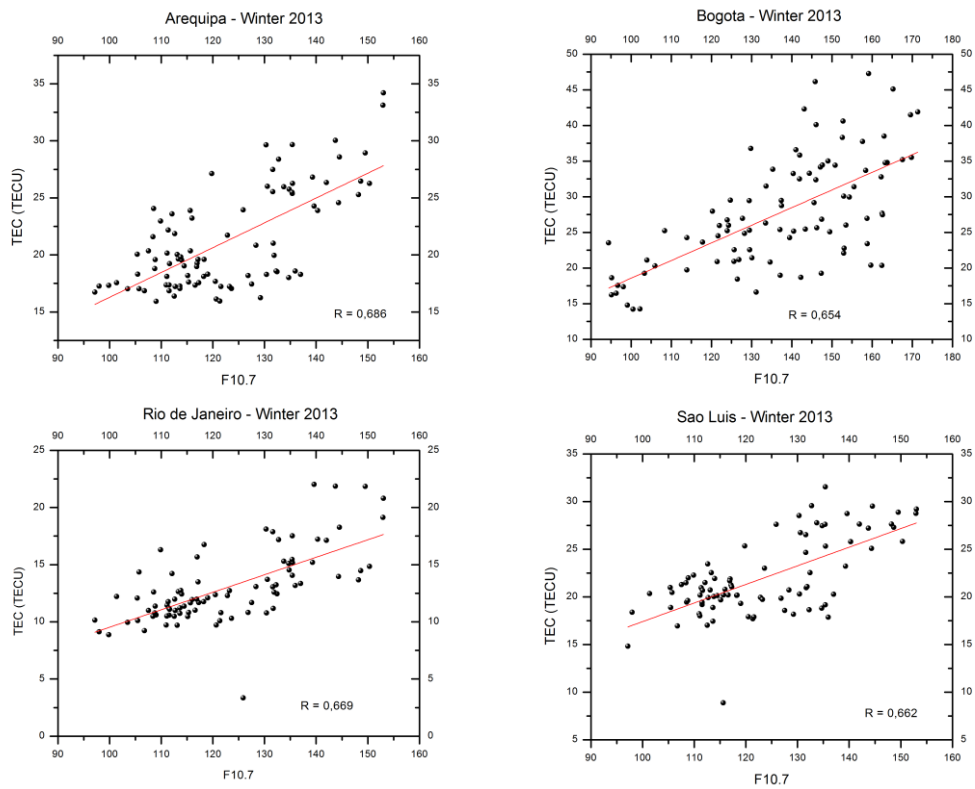


Figura 4.32. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no inverno de 2013, nas estações analisadas.

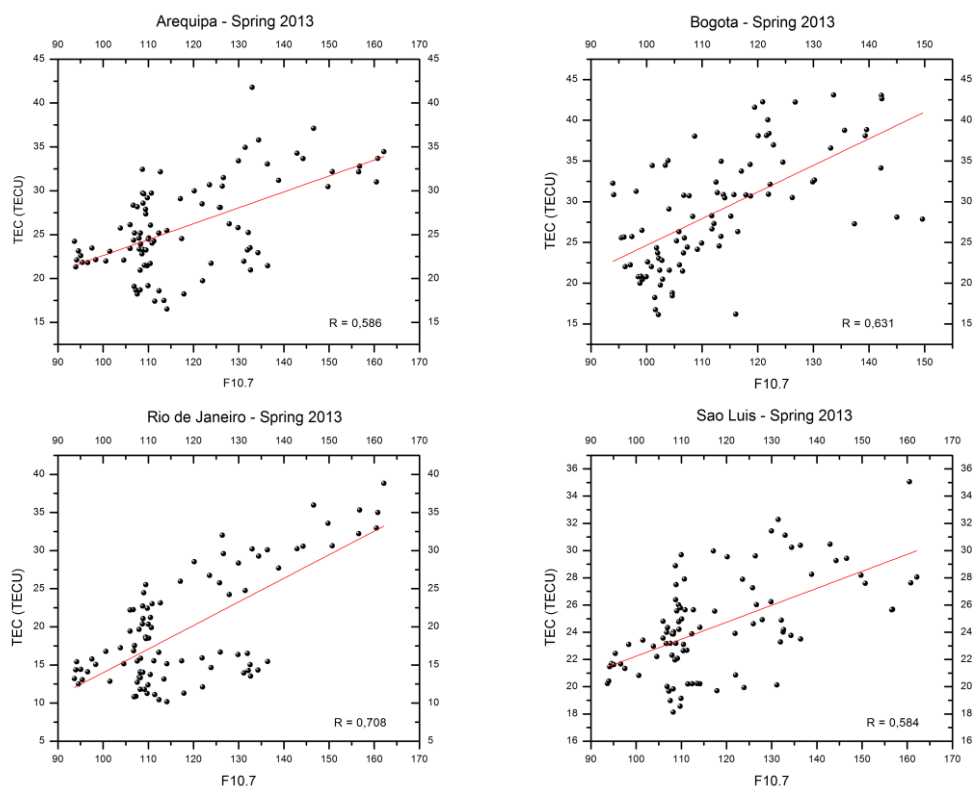


Figura 4.33. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 na primavera de 2013, nas estações analisadas.

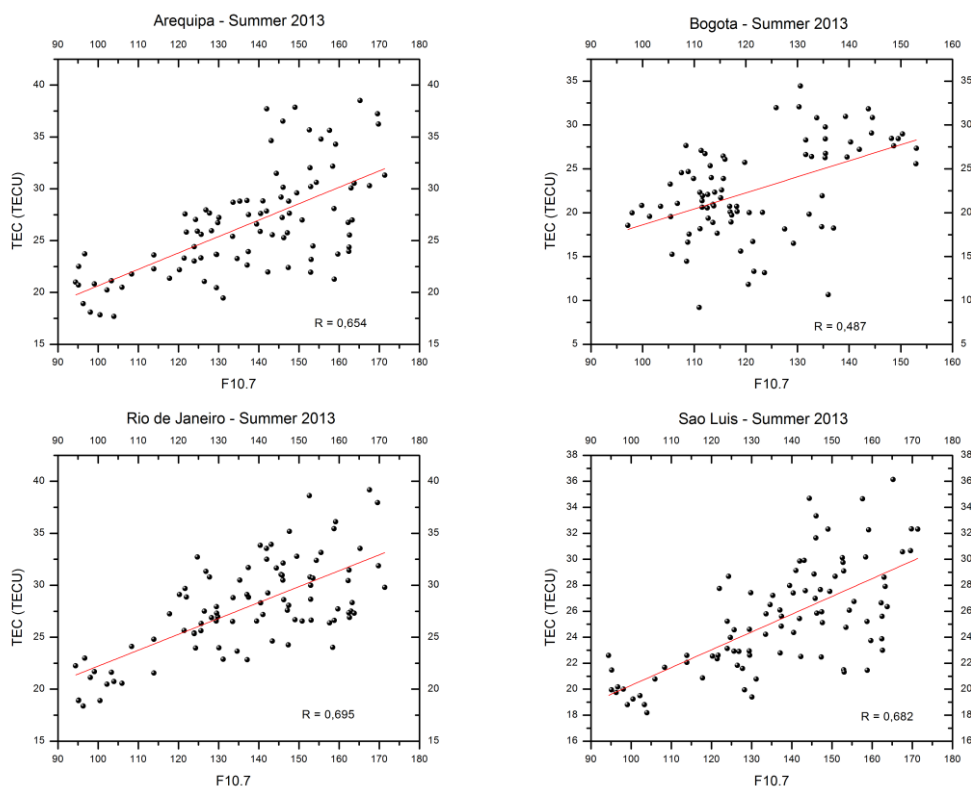


Figura 4.34. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no verão de 2013, nas estações analisadas.

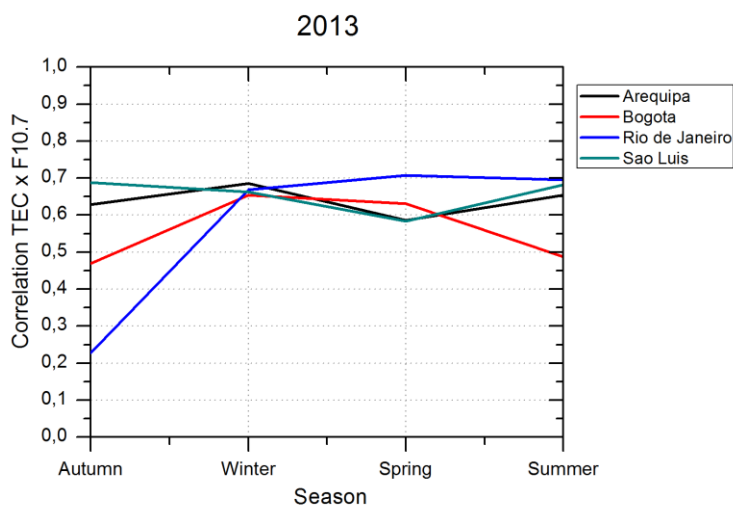


Figura 4.35. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2013, nas estações analisadas.

Na Figura 4.35 é possível observar que não há grande variação nas correlações obtidas ao longo de 2013, com exceção de Rio de Janeiro que apresentou correlação muito baixa no outono. Dessa forma, não foi observada uma dependência sazonal significativa entre o TEC e o F10.7 em 2013, em que as correlações apresentaram valores entre 0,5 e 0,7 nas quatro estações do ano.

Uma característica marcante é que no ano de 2013 os valores de correlação são ligeiramente maiores que os observados em 2012.

4.8 Dependência sazonal observada em 2014

As Figuras 4.36 a 4.39 mostram a dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2014. Na Figura 4.40 é mostrado um sumário das correlações obtidas em 2014.

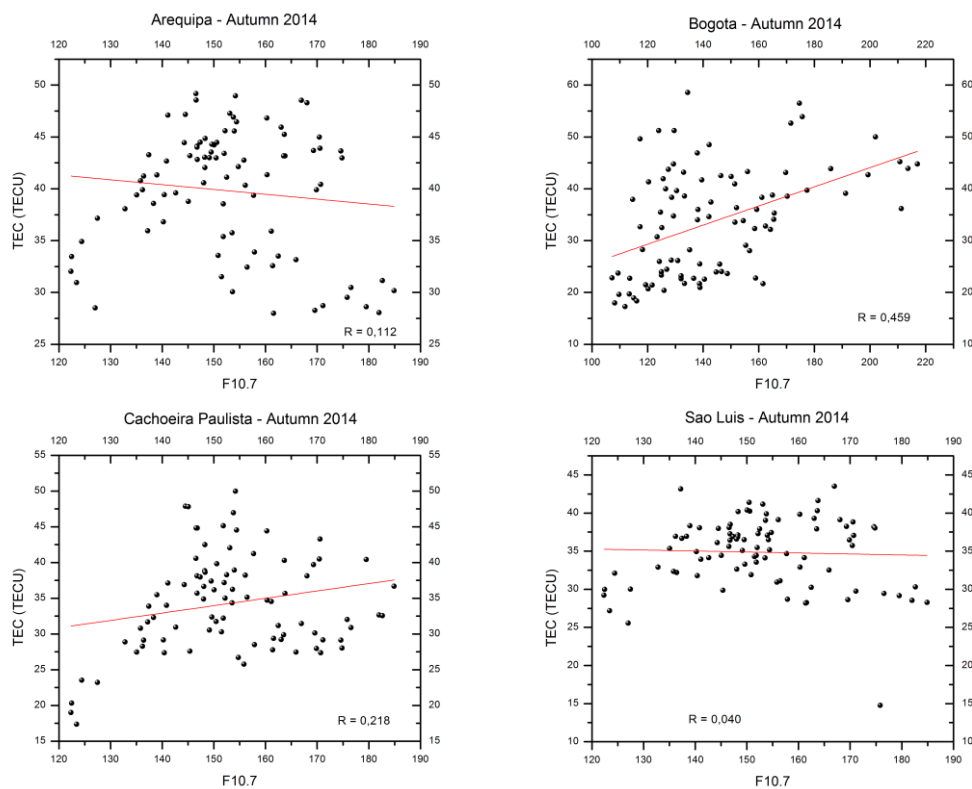


Figura 4.36. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no outono de 2014, nas estações analisadas.

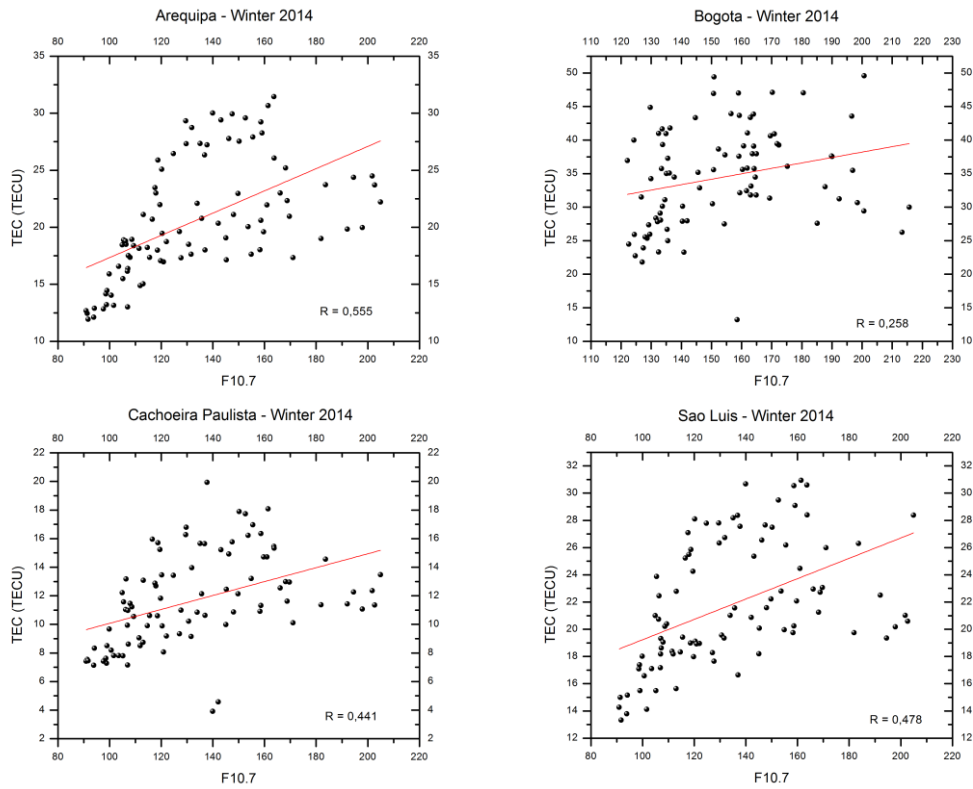


Figura 4.37. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no inverno de 2014, nas estações analisadas.

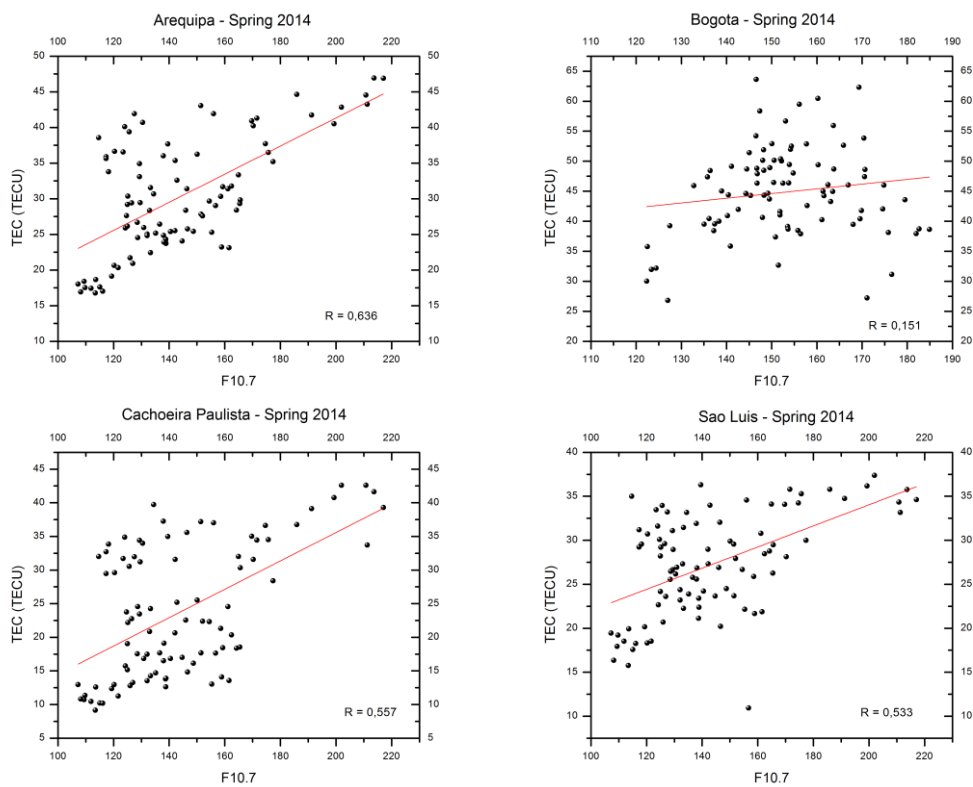


Figura 4.38. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 na primavera de 2014, nas estações analisadas.

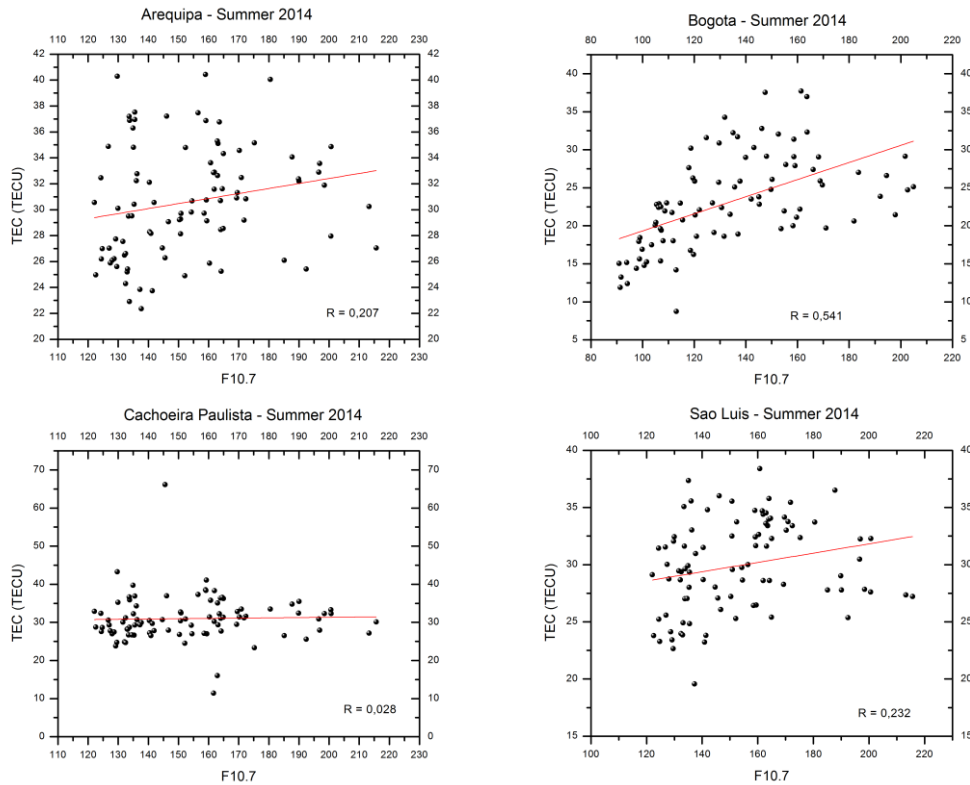


Figura 4.39. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 no verão de 2014, nas estações analisadas.

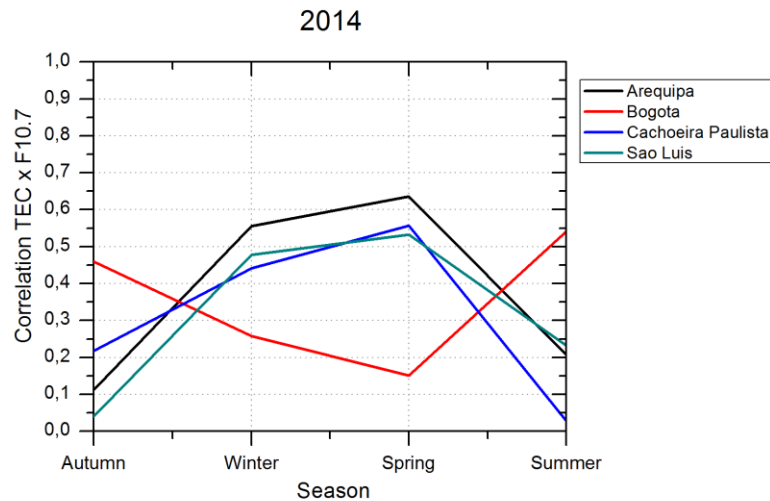


Figura 4.40. Dependência sazonal do TEC com o F10.7 observada em 2014, nas estações analisadas.

Na Figura 4.40 observa-se que as correlações sazonais obtidas no ano de 2014 diferem do comportamento observado nos anos anteriores. O primeiro ponto a ser mencionado são os resultados obtidos em Bogotá, que novamente apresentam comportamento oposto em relação às outras localidades. Como mencionado anteriormente, provavelmente uma conjunção de fatores termosféricos e eletrodinâmicos, especialmente ventos, faça com que esta estação comporte-se

aproximadamente como a estação de São Luís, embora localize-se no hemisfério norte. Outra característica interessante são os baixos valores de correlação observados no verão, proporcionais aos observados também no outono. Os maiores valores foram observados, inesperadamente, no inverno, e como esperado, na primavera.

5 Conclusões e considerações finais

O Conteúdo Eletrônico Total desempenha um papel importante no estudo ionosférico tanto em períodos magneticamente calmos, quanto perturbados. Durante os períodos perturbados, as principais características observadas em baixas latitudes são o aumento do TEC devido aos campos elétricos de penetração. Além dos PPEFs, o mecanismo de dínamo perturbado causa diminuições no TEC durante a fase de recuperação da tempestade, uma vez que está associado a um campo elétrico que aponta para oeste no setor diurno, sobrepondo-se ao campo elétrico zonal de períodos calmos e inibindo a deriva $E \times B$. A inibição da deriva $E \times B$ na região equatorial durante a ação do dínamo perturbado resulta em diminuição no TEC. Além disso, modificações na termosfera neutra devido aos ventos neutros são responsáveis por aumentar a recombinação de ionização, resultando em valores diminuídos no TEC. Durante eventos HILDCAAs, os PPEFs também desempenham um papel importante no aumento do TEC em baixas latitudes. É importante a utilização dos dados de magnetômetro a fim de se identificar a ocorrência de penetração de campos elétricos. Medidas de deriva vertical obtidas por radar, como o radar de Jicamarca, são as mais indicadas para analisar os eventos de PPEFs. No entanto, radares desse tipo são raros (há apenas o de Jicamarca na América do Sul), além de que são colocados em funcionamento em apenas alguns dias do ano, devido ao alto custo de operação. Dessa forma, as medidas de magnetômetro são uma alternativa razoável para se analisar o comportamento do campo elétrico zonal ionosférico, além de serem de fácil aquisição.

Foram analisadas as variações sazonais e anuais do TEC, revelando resultados já bastante conhecidos como TEC maior durante os equinócios em relação ao verão, e os menores valores de TEC observados durante o inverno. Os gráficos de variabilidade dia-a-dia do TEC revelam a alta variabilidade desse parâmetro, sendo governado não somente pelas forçantes solares, como também forçantes magnetosféricas e da termosfera neutra. Foi observado que no período 2009-2014 as regiões equatorial e da crista da AIE apresentam maiores valores do TEC no equinócio de primavera. No entanto, no ano de 2008 a assimetria equinocial foi observada, revelando

valores de TEC maiores no equinócio de outono comparado ao equinócio de primavera. Essa assimetria não foi observada sobre a crista da AIE em 2008. Um outro resultado importante foram os valores de TEC maiores em Arequipa do que em São Luís, considerando que ambas são localidades equatoriais, mas com ângulos de declinação diferente. O maior ângulo de declinação da estação receptora de São Luís é provavelmente responsável pelos menores valores de TEC observados nessa estação, uma vez que as linhas de campo magnético e os tubos de fluxo de plasma associado a essas linhas de campo estão desalinhados em relação ao terminador, resultando em ionização diminuída.

Muitos aspectos ainda podem ser estudados considerando as variações no TEC na região equatorial, como detalhar as diferenças dos setores longitudinais na região da América do Sul, e analisar os eventos HILDCAA que ocorridos na fase descendente de atividade solar, ou seja, a partir de 2015. Além disso, cada tempestade magnética apresenta um resultado diferente de acordo com a hora local de ocorrência da tempestade, e a sazonalidade. Dessa forma, é importante a continuidade de análise desses eventos.

A tempestade magnética ocorrida em Setembro de 2017 foi apresentada na seção 3.4 e foi mostrado o importante papel dos PPEFs no aumento significativo observado no TEC em todas as estações receptoras analisadas, durante a fase principal da tempestade. Em contrapartida, observa-se também a diminuição característica no TEC durante a fase de recuperação, também em todas as estações analisadas (algumas mais sutis). Essa diminuição é compatível com a ação do dínamo perturbado, uma vez que a tempestade geomagnética já encontrava-se em fase de recuperação no dia 09 de Setembro. No dia 10 de Setembro observa-se o início da recuperação do TEC a valores próximos dos observados no dia de referência calmo. As tempestades geomagnéticas foram extensivamente estudadas nos últimos anos, principalmente com a disseminação dos dados do sistema GNSS, abertos em bases de dados online, permitindo assim uma análise global da resposta ionosférica a esses eventos. A resposta ionosférica às tempestades geomagnéticas difere principalmente no que se refere à hora local da ocorrência do início e fase principal da tempestade, assim como à intensidade da tempestade geomagnética. Mas de um modo geral, o comportamento da ionosfera de baixas latitudes, considerando a ionização quantificada pelas observações de TEC, é majoritariamente de intensificação durante a fase principal (que dura cerca de um dia) e diminuição durante a fase de recuperação, mais especificamente no primeiro dia da fase de recuperação.

Foi apresentado um estudo estatístico da relação entre o TEC e o F10.7, no capítulo 4. Observou-se que as correlações foram significativamente maiores em 2011, como mostrado

também em outros estudos. Quanto ao comportamento sazonal desta correlação, sabe-se que o TEC apresenta os maiores valores nos equinócios, como demonstrado na seção 3.1, e este comportamento evidencia-se com o aumento da atividade solar. No entanto, apenas é possível afirmar que maiores valores de TEC são observados com o aumento da atividade solar, o que já foi exaustivamente demonstrado na literatura, mas o que se observa é apenas um aumento geral do TEC em todas as estações do ano, sem necessariamente apresentar uma característica sazonal relacionada à atividade solar. Além disso, características anuais e semi-anuais do TEC foram demonstradas na seção 3.1, que corrobora que maiores valores de TEC são observados nos equinócios, e estes aumentos serão proporcionalmente maiores, em todas as estações, de acordo com o aumento da atividade solar. Dessa forma, não foi possível observar um padrão de correlação a partir da sazonalidade, entre o TEC e o F10.7.

Agradecimentos: A bolsista agradece à CAPES através do programa PNPd, que permitiu o desenvolvimento deste trabalho científico, e à Divisão de Aeronomia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela oportunidade de desenvolvimento do projeto, assim como ao supervisor Eurico Rodrigues de Paula por fornecer as condições necessárias ao bom andamento do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdu, M. A., Walker, G. O., Reddy, B. M., de Paula, E. R., Sobral, J. H. A., Fejer, B. G., Szuszczewicz, E. P. Global scale equatorial ionization anomaly (EIA) response to magnetospheric disturbances based on the May-June 1987 SUNDIAL-coordinated observations. **Annales Geophysicae**, v. 11, p. 585-594, 1993.

African Meridian B-Field Education and Research (AMBER). **SAMBA-AMBER Magnetometers Data Center**. Disponível em: <<http://magnetometers.bc.edu/index.php/amber2>>. Acesso em: 11 Jun. 2018.

Balan, N., G. J. Bailey, M. A. Abdu, K. I. Oyama, P. G. Richards, J. MacDougall, and I. S. Batista (1997), Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the F3 layer, **Journal of Geophysical Research**, 102, 2047–2056, doi:10.1029/95JA02639.

Burton, R. K., R. L. McPherron, and C. T. Russell (1975), An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst, *J. Geophys. Res.*, 80, 4204.

Chakraborty, S. K. and Hajra, R., Solar control of ambient ionization of the ionosphere near the crest of the equatorial anomaly in the Indian zone, **Annales Geophysicae**, 26, 47–57, doi:10.5194/angeo-26-47-2008, 2008.

Coco, D. S., Coker, C., Dahlke, S. R., Clynch, J. R. Variability of GPS satellite differential group delay biases. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 27, n. 6, p. 931-938, 1991.

De Siqueira, P. M., De Paula, E. R., Muella, M. T. A. H., Rezende, L. F. C., Abdu, M. A., Gonzalez, W. D. Storm-time total electron content and its response to penetration electric fields over South America, **Annales Geophysicae**, 29, 1765-1768, doi: 10.5194/angeo-29-1765-2011, 2011.

D'ujanga, F. M., Opio, P. and Twinomugisha F., Variation of the Total Electron Content with Solar Activity During the Ascending Phase of Solar Cycle 24 Observed at Makerere University, Kampala. In: Fuller-Rowell, T., Yizengaw, E., Doherty, P. H., and Basu, S. *Ionospheric Space Weather: Longitude and Hemispheric Dependences and Lower Atmosphere Forcing, Geophysical Monograph 220*, American Geophysical Union. Published 2017 by John Wiley & Sons, Inc. 2016.

Gonzalez, W. D., J. A. Joselyn, Y. Kamide, H. W. Kroehl, G. Rostoker, B. T. Tsurutani, and V. M. Vasylunas (1994), What is a geomagnetic storm?, *J. Geophys. Res.*, 99(A4), 5771-5792, doi: 10.1029/93JA02867.

International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET). **Intermagnet**. Disponível em: <<http://www.intermagnet.org/index-eng.php>>. Acesso em: 11 Jun. 2018.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/cartogramas/RBMC_2017.png>. Acesso em: 16 Out. 2017.

Instituto Geográfico Nacional (IGN). **RAMSAC - Mapa de la Red**. Disponível em: <<http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/Mapa>>. Acesso em 16 Out. 2017.

Jonah, O. F., **Analysis of Total Electron Content (TEC) variation obtained from Global Positioning System (GPS) data over South America**. 2013, 123 p. Dissertation (Master in Space Geophysics) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Kelley, M. C. Makela, J. J., Chau, J. L., Nicolls, M. J. Penetration of the solar wind electric field into the magnetosphere/ionosphere system. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 1158, p. 1-3, doi:10.1029/2002GL016321, 2003.

Klobuchar, J. A., **Ionospheric Effects on GPS**, in: Global Positioning System: Theory and Applications, Vol 2, edited by: Parkinson, B. W. and Spilker, J. J., Progress in Astronautics and Aeronautics, 164, p. 485, 1996.

Koga, D., Sobral, J. H. A., Gonzalez, W. D., Arruda, D. C. S., Abdu, M. A., de Castilho, V. M., Mascarenhas, M., Gonzalez, A. C., Tsurutani, B. T., Denardini, C. M., and Zamlutti, C. J.: Electrodynamic coupling processes between the magnetosphere and the equatorial ionosphere during a 5-day HILDCAA event, **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 73, 148–155, 2011.

Langley, R., Fedrizzi, M., Paula, E., Santos, M., and Komjathy, A., Mapping the low latitude Ionosphere with GPS, **GPS World**, 13(2), 41–46, 2002.

Lastovicka, J., Mikhailov, A., Ulich, T., Bremer, J., Elias, A. G., Long-term trends in foF2: A comparison of various methods. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 68(17), 1854-1870, 2006.

Liu, L., M. He, X. Yue, B. Ning, and W. Wan, Ionosphere around equinoxes during low solar activity. **Journal of Geophysical Research**, 115, A09307, doi:10.1029/2010JA015318, 2010.

Mannucci, A. J., Wilson, B. D., and Edwards, C. D., A new method for monitoring the earth's ionospheric total electron content using the GPS global network, Proc. of ION GPS-93, Inst of Navigation, 1323–1332, 1993.

Mielich, J., Bremer, J., Long-term trends in the ionospheric F2 region with different solar activity indices. **Annales Geophysicae**, 31(2), 291-303, doi:10.5194/angeo-31-291-2013, 2013.

Min, K., J. Park, H. Kim, V. Kim, H. Kil, J. Lee, S. Rentz, H. Lu'hr, and L. Paxton, The 27-day modulation of the low-latitude ionosphere during a solar maximum, **Journal of Geophysical Research**, 114, A04317, doi:10.1029/2008JA013881, 2009.

- National Aeronautics and Space Administration (NASA). **One min and 5-min solar wind data sets at the Earth's bow shock nose**. 2017 . Disponível em: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/omni_min_data.html>. Acesso em: 16 Out. 2017.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). **Sunspot Number Progression**. 2018. Disponível em: <<http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>>. Acesso em: 18 Jun. 2018.
- Negreti, P. M. S. **Estudo do Conteúdo Eletrônico Total na região brasileira em períodos magneticamente perturbados**. 2012. 291 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
- Patel, N. C., Karia, S. P. and Pathak, K. N., GPS-TEC Variation during Low to High Solar Activity Period (2010-2014) under the Northern Crest of Indian Equatorial Ionization Anomaly Region. **Positioning** , 8, 13-35, doi:10.4236/pos.2017.82002, 2017.
- Rama Rao, P. V. S., S. Gopi Krishna, K. Niranjan, and D. S. V. V. D. Prasad, Study of spatial and temporal characteristics of L-band scintillations over the Indian low-latitude region and their possible effects on GPS navigation, **Annales Geophysicae**, 24, 1567–1580, 2006.
- Rishbeth, H. and Garriott, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York, London: Academic Press, 1969. 331 p. ed. 14. ISBN (0125889402).
- Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC). **SOPAC Online Map Interface**. 2017. Disponível em: <<http://sopac.ucsd.edu/map.shtml>>. Acesso em: 16 Out. 2017.
- Seemala, G. K., and C. E. Valladares (2011), Statistics of total electron content depletions observed over the South American continent for the year 2008, **Radio Science**, 46, RS5019, doi:10.1029/2011RS004722, 2011.
- Tsurutani, B. T., and Gonzalez, W. D. The cause o high-intensity Long Duration Continuous AE Activity (HILDCAAS): Interplanetary Alfven wave trains, **Planetary Space Science**, Vol. 35, No. 4, pp. 405-412, 1987.
- Verkhoglyadova, O. P., B. T. Tsurutani, A. J. Mannucci, M. G. Mlynczak, L. A. Hunt, A. Komjathy, and T. Runge, Ionospheric VTEC and thermospheric infrared emission dynamics during corotating interaction region and high-speed stream intervals at solar minimum: 25 March to 26 April 2008. **Journal of Geophysical Research**, 116, A09325, doi:1029/2011JA016604, 2011.
- Wanninger, L. **Ionospheric Monitoring Using IGS Data**, paper presented at the *IGS Workshop*, Institute of Geological Sciences, Bern, Switzerland, March 1993.
- Wei, Y., Hong, M., Wan, W., Du, A., Lei, J., Zhao, B., Wang, W., Ren, Z., and Yue, X.: Unusually long lasting multiple penetration of interplanetary electric field to equatorial ionosphere under oscillating IMF Bz, **Geophysical Research Letters**, 35, L02102, doi:10.1029/2007GL032305, 2008.

Wintoft, P., The variability of solar EUV: A multiscale comparison between sunspot number, 10.7 cm flux, LASP MgII index, and SOHO/SEM EUV flux. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 73(13), 1708-1714, 2011.