



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.13.20.41-TDI

## **DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EMPÍRICO PARA A OBTENÇÃO DA CURVA DO DIA CALMO GEOMAGNETICAMENTE (QDC)**

Sony Su Chen

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Láysa Cristina Araujo Resende Chagas, aprovada em 31 de maio de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TA9JUP>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

## **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

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

### **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:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.13.20.41-TDI

## **DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EMPÍRICO PARA A OBTENÇÃO DA CURVA DO DIA CALMO GEOMAGNETICAMENTE (QDC)**

Sony Su Chen

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Láysa Cristina Araujo Resende Chagas, aprovada em 31 de maio de 2019.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TA9JUP>

INPE  
São José dos Campos  
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Chen, Sony Su.

Ch42d Desenvolvimento de um modelo empírico para a obtenção da curva do dia calmo geomagneticamente (QDC) / Sony Su Chen. – São José dos Campos : INPE, 2019.  
xxviii + 140 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.13.20.41-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadores : Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Láyssa Cristina Araujo Resende Chagas.

1. Campo geomagnético. 2. Variação diurna. 3. Magnetômetro variômetro. 4. Anomalia Magnética da América do Sul. 5. Modelo empírico. I.Título.

CDU 550.380.87

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

## ERRATA

CHEN, S. S. **Desenvolvimento de um modelo empírico para a obtenção da curva do dia calmo geomagneticamente (QDC)**. 2019. 168 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2019.

Página	Ilustração	Onde se lê	Leia-se
73	Figura 6.11	Abril	Março
73	Figura 6.11	Março	Abril
122	Figura A.5	Abril	Março
122	Figura A.5	Março	Abril
123	Figura A.6	Abril	Março
123	Figura A.6	Março	Abril
124	Figura A.7	Abril	Março
124	Figura A.7	Março	Abril
125	Figura A.8	Abril	Março
125	Figura A.8	Março	Abril
126	Figura A.9	Abril	Março
126	Figura A.9	Março	Abril
127	Figura A.10	Abril	Março
127	Figura A.10	Março	Abril
128	Figura A.11	Abril	Março
128	Figura A.11	Março	Abril
129	Figura A.12	Abril	Março
129	Figura A.12	Março	Abril
130	Figura A.13	Abril	Março
130	Figura A.13	Março	Abril
131	Figura A.14	Abril	Março
131	Figura A.14	Março	Abril
132	Figura A.15	Abril	Março
132	Figura A.15	Março	Abril
133	Figura A.16	Abril	Março
133	Figura A.16	Março	Abril
134	Figura A.17	Abril	Março
134	Figura A.17	Março	Abril

Aluno (a): **Sony Su Chen**

**Título: "DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EMPÍRICO PARA A OBTENÇÃO DA CURVA DO DIA CALMO GEOMAGNETICAMENTE (QDC)"**

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em

**Geofísica Espacial/Ciência do Ambiente Solar-Terrestre**

Dr. **Alicia Luisa Clua de Gonzalez Alarcon**



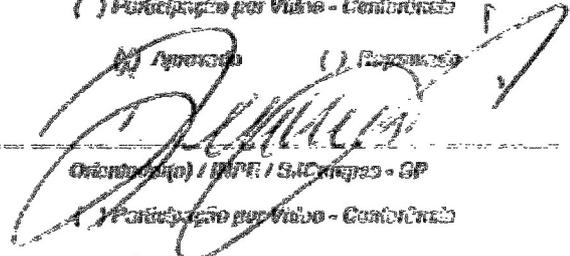
Procedente / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado

Reprovado

Dr. **Clezio Marcos De Nardin**



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado

Reprovado

Dr. **Laysa Cristina Araujo Resende Chagas**



Orientadora(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado

Reprovado

Dr. **Saverino Luiz Guimarães Dutra**



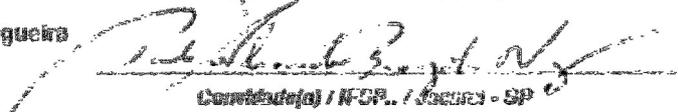
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado

Reprovado

Dr. **Paulo Alexandre Bronzato Nogueira**



Comitê(a) / INPE / Jansen - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado

Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade



*“Não, meu coração não é maior que o mundo.  
É muito menor.  
Nele não cabem nem as minhas dores.  
Por isso gosto tanto de me contar.  
Por isso me dispo,  
por isso me grito,  
por isso frequento os jornais, me exponho cruamente nas livrarias:  
preciso de todos.*

*Sim, meu coração é muito pequeno.  
Só agora vejo nele não cabem os homens.  
Os homens estão cá fora, estão na rua.  
A rua é enorme. Maior, muito maior do que eu esperava.  
Mas também a rua não cabe todos os homens.  
A rua é menor que o mundo.  
O mundo é grande.*

[...].”

CARLOS DRUMMOND DE ANDRADE  
em “Sentimento do Mundo”, 1940



*A meus pais Chen R. K. e Mei Y. J.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e à minha família pelo suporte e apoio que me deram ao longo desta jornada, em especial à minha mãe Mei Yu Jin Chen, ao meu pai Chen Rong Kui e aos meus irmãos.

A meus orientadores Dr. Clezio Marcos De Nardin e Dra. Láysa Cristina Araujo Resende Chagas sou muito grato pela orientação e incentivo à pesquisa científica.

Ao Programa de Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (EMBRACE) pelo fornecimento dos dados utilizados neste trabalho e às principais instituições que cooperaram com magnetômetros a este programa: a Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), a *Low-Latitude Ionospheric Sensor Network* (LISN) e o Laboratório Sino-Brasileiro para Clima Espacial (CBJLSW, *China-Brazil Joint Laboratory for Space Weather*).

A meus amigos da equipe do Programa Embrace/INPE, Débora Azevedo e Fauéz Abrahão de Oliveira Passos, por auxiliarem no monitoramento e operação dos magnetômetros deste programa.

A meus amigos Engs. Francisco de Paula Vitor Mesquita e Wagner Sarjob Coura Borges, pessoas imprescindíveis, que me apoiaram e me auxiliaram durante as campanhas de instalações de magnetômetros do Programa Embrace/INPE.

A meu amigo Dr. Ronan Arraes Jardim Chagas pelo suporte e apoio que me deu para as discussões sobre a análise espectral. A meus colegas de turma, aos professores do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial e aos membros da banca examinadora pelas sugestões e contribuições para a melhoria deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro deste projeto de pesquisa através do Processo 134151/2017-8 e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio na realização deste trabalho (Código de Financiamento 001).

Por fim, mas não menos importante, sou muitíssimo grato à minha amada e doce companheira Flávia Helena Nunes Silva pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho.



## RESUMO

Os dados de magnetômetros da rede Embrace MagNet são utilizados para aplicações de Clima Espacial, e.g., monitoramento dos efeitos das tempestades geomagnéticas. O conhecimento das variações do campo geomagnético durante os períodos magneticamente calmos é necessário para aprimorar as análises sobre os efeitos das tempestades geomagnéticas. Portanto, neste trabalho apresentamos um modelo empírico da variação da componente H do campo geomagnético sobre a América do Sul. Este modelo empírico foi desenvolvido com base nos dados geomagnéticos obtidos a partir de 14 estações magnéticas do setor Sul-Americano entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. Utilizando o método de mínimos quadrados para a obter a Curva do Dia Calmo (QDC) da componente H, em cada estação magnética, foi descrita em função da variação secular, ciclo de atividade solar, dia do ano e hora local. A QDC é calculada com base nos 5 dias magneticamente mais calmos de cada mês para sua estação magnética. Os resultados são discutidos como uma alternativa de previsão da QDC das estações da Embrace MagNet. Finalmente, as análises são apresentadas a partir da comparação entre a QDC calculada a partir do modelo empírico e a QDC calculada a partir dos dados.

Palavras-chave: Campo geomagnético. Variação diurna. Magnetômetro variômetro. Anomalia Magnética da América do Sul. Modelo empírico.



# DEVELOPMENT OF AN EMPIRICAL MODEL FOR OBTAIN THE GEOMAGNETICALLY QUIET DAY CURVE (QDC)

## ABSTRACT

The magnetometer data of the Embrace Magnetometer Network (Embrace MagNet) are used in space weather applications, e.g., monitoring the effects of geomagnetic storms. A good knowledge of the geomagnetic field variation during magnetically quiet time periods is necessary to improve the analysis of the effects of geomagnetic storms. Therefore, in the present work we present an empirical model of the daily variation of the H component of the geomagnetic field over South American sector. The empirical model has been developed based on geomagnetic data obtained from 14 stations along the South America sector from January 2010 to December 2018. Using the least squares fitting method for the geomagnetically Quiet Day Curve (QDC) of the H component at each station was described as a function of secular variation, solar activity, day of year, and local time. The QDC is calculated based on the 5 quietest days for each month at each station. The results are discussed as an alternative to QDC forecasting of the Embrace MagNet stations. Finally, the analysis is presented by comparison between the QDC calculated by the empirical model and the QDC calculated by the magnetic measurements.

Keywords: Geomagnetic field. Diurnal variation. Variometer magnetometer. South America Magnetic Anomaly. Empirical model.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Representação esquemática das fontes de campo magnético que contribuem para o campo magnético terrestre observada no plano meridional. . . . .	4
2.2 Representação das componentes do vetor campo geomagnético. A componente total do campo ( $F$ ) e suas componentes angulares ( $D$ e $I$ ) e retangulares ( $X$ , $Y$ , $Z$ , $H$ e $F$ ). . . . .	5
2.3 Mapa da distribuição global da magnitude da componente total do campo geomagnético para o ano de 2018, obtida a partir do modelo IGRF-12. . . . .	8
3.1 Exemplo do perfil vertical diurno (linha contínua, 12h LT) e noturno (linha tracejada, 00h LT) de densidade eletrônica para a região de Cachoeira Paulista no dia 01 de janeiro de 2011, obtido a partir do modelo IRI-2016. . . . .	15
3.2 Exemplo do perfil vertical diurno (linhas contínuas) e noturno (linhas tracejadas) das condutividades longitudinal ( $\sigma_0$ ), Pedersen ( $\sigma_1$ ) e Hall ( $\sigma_2$ ) para a região de Cachoeira Paulista no dia 01 de janeiro de 2011, obtido a partir do modelo de condutividades de Kyoto. . . . .	20
3.3 Representação esquemática da formação da corrente elétrica do eletrojato equatorial. . . . .	22
3.4 Representação esquemática padrão diurno dos sistemas de correntes Sq. . . . .	24
3.5 Variação diurna média das componentes campo geomagnético das estações magnéticas da <i>Circum-pan Pacific Magnetometer Network</i> (CPMN), durante o período entre Maio e Agosto dos anos 1996 a 2007. . . . .	25
4.1 Distribuição geográfica das estações magnéticas da Embrace MagNet (e candidatas) na América do Sul. . . . .	28
4.2 Fotos do (a) sensor magnético e da (b) unidade de controle e aquisição de dados de um dos magnetômetros da rede Embrace MagNet. . . . .	30
4.3 Exemplo da estrutura dos dados de campo magnético na resolução de um minuto. . . . .	32
4.4 Exemplo de magnetograma das componentes $H$ , $D$ e $Z$ do campo geomagnético medido em Cachoeira Paulista no dia 1 de janeiro de 2011. . . . .	33
5.1 Exemplo de variações no valor da componente horizontal do campo geomagnético em Cachoeira Paulista em janeiro de 2011 e sua correspondente QDC (ou média). . . . .	38

5.2	Exemplo da QDC, com a suavização a partir da média móvel, da componente horizontal do campo geomagnético em Cachoeira Paulista em janeiro de 2011. . . . .	39
5.3	Exemplo do espectro de amplitude da QDC da estação de Cachoeira Paulista no mês de janeiro de 2011. . . . .	41
5.4	Exemplo do espectro de fase da QDC da estação de Cachoeira Paulista no mês de janeiro de 2011. . . . .	42
5.5	Exemplo das componentes harmônicas da expansão em série de Fourier da QDC da estação de Cachoeira Paulista para o mês de janeiro de 2011.	43
5.6	Diagrama de blocos do modelo Sq-QDCM. . . . .	46
6.1	Série temporal das QDCs da componente horizontal do campo geomagnético em relação à magnitude do campo geomagnético obtida para a estação de Cachoeira Paulista entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	51
6.2	Ajuste linear da $H_{QDC}(00:00LT)$ da estação de Cachoeira Paulista entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	52
6.3	Ajuste linear da tendência do modelo Sq-QDCM obtida para as 14 estações magnéticas da Embrace MagNet entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	54
6.4	Taxa de variação anual da componente horizontal do campo geomagnético em relação à latitude geográfica de cada uma das estações magnéticas da Embrace MagNet. . . . .	57
6.5	Série temporal da $\Delta H_{QDC}$ da estação de Cachoeira Paulista entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	59
6.6	Série temporal da amplitude da $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$ da estação de Cachoeira Paulista e o respectivo valor do $F_{10.7}$ mensal entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	61
6.7	Dispersão da $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$ da estação magnética de Cachoeira Paulista e o respectivo valor do $F_{10.7}$ mensal entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	61
6.8	Séries temporais da amplitude da $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$ da estação de Cachoeira Paulista (entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018, em cinza), valor médio da amplitude da $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$ (em vermelho) e a respectiva curva anual ajustada (em preto). . . . .	65
6.9	Sazonalidade da componente horizontal do campo geomagnético das estações magnéticas da Embrace MagNet entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	67

6.10	Séries temporais da amplitude da $\Delta H_{QDC}$ da estação de Cachoeira Paulista nos meses de janeiro (linha cinza), curva média da amplitude da $\Delta H_{QDC}$ (linha vermelha) e a respectiva curva ajustada para o mês de janeiro (linha preta). . . . .	70
6.11	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de Cachoeira Paulista. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	73
6.12	$\Delta H_{QDC}$ mensais da componente horizontal do campo geomagnético obtido a partir dos dados (painel superior) e a partir do modelo Sq-QDCM (painel inferior) para a estação magnética de Cachoeira Paulista entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	75
6.13	$\Delta H_{QDC}$ mensais da componente horizontal do campo geomagnético obtido a partir dos dados das estações magnéticas da Embrace MagNet entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	76
6.14	$\Delta H_{QDC}$ mensais da componente horizontal do campo geomagnético, obtido a partir do modelo Sq-QDCM, para as estações magnéticas da Embrace MagNet, para o período de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	77
6.15	Dispersão da correlação linear entre a $\Delta H_{QDC}$ calculada a partir dos dados das estações magnéticas da Embrace MagNet e a partir do modelo Sq-QDCM entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	80
6.16	Desvio padrão das QDCs mensais da componente horizontal do campo geomagnético, obtido a partir dos dados das estações magnéticas da Embrace MagNet entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	83
6.17	Espectro de amplitude das séries temporais de QDCs obtidas a partir dos dados das estações magnéticas da Embrace MagNet entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	86
6.18	Espectro de amplitude das séries temporais de QDCs obtidas a partir do modelo Sq-QDCM para as estações magnéticas da Embrace MagNet entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	87
6.19	QDCs obtidas a partir dos dados da estação magnética de Cachoeira Paulista e a partir do modelo Sq-QDCM para os meses de janeiro a março de 2019. . . . .	90
6.20	Extrapolação do parâmetro C do modelo Sq-QDCM para a estação magnética de Medianeira. . . . .	92
6.21	Extrapolação do parâmetro S do modelo Sq-QDCM para a estação magnética de Medianeira. . . . .	92

6.22	Extrapolação do parâmetro D do modelo Sq-QDCM para a estação magnética de Medianeira. . . . .	92
6.23	QDCs obtidas a partir do modelo Sq-QDCM para as estações magnéticas de Cuibá, Medianeira e São Martinho da Serra. . . . .	94
A.1	Série temporal das QDCs mensais da componente horizontal do campo geomagnético, em relação à magnitude do campo geomagnético, das estações magnéticas da Embrace MagNet entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	118
A.2	Série temporal das QDCs mensais da componente horizontal do campo geomagnético, em relação à variação diurna, das estações magnéticas da Embrace MagNet entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	119
A.3	Série temporal da amplitude da $\Delta H_{QDC}$ das estações magnéticas da Embrace MagNet e do $F_{10.7}$ , entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	120
A.4	Dispersão da correlação linear entre a amplitude da variação diurna da $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$ das estações magnéticas da Embrace MagNet (painéis A a N) e o fluxo de rádio solar mensal $F_{10.7}$ entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. . . . .	121
A.5	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de Manaus. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	122
A.6	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de São Luís. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	123
A.7	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de Alta Floresta. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	124
A.8	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de Araguatins. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	125

A.9	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de Eusébio. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	126
A.10	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de Cuibá. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	127
A.11	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de Jataí. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	128
A.12	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de Tucumán. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	129
A.13	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de Medianeira. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	130
A.14	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de São José dos Campos. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	131
A.15	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de Vassouras. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	132
A.16	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de São Martinho da Serra. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	133
A.17	$\Delta H_{QDC}$ mensal da estação magnética de Rio Grande. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier. . . . .	134

B.1 Fluxograma do modelo empírico Sq-QDCM utilizado para calcular a QDC da componente horizontal do campo geomagnético. . . . . 135

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Processos de produção e perda na ionosfera. . . . .	14
3.2 Reações químicas de produção e perda na região E ionosférica. . . . .	17
4.1 Localização geográfica das estações magnéticas da Embrace MagNet utilizadas, e suas correspondentes sigla, país, latitude, longitude, altitude, latitude <i>dip</i> e data de instalação. . . . .	27
4.2 Especificações básicas dos magnetômetros <i>fluxgate</i> da Embrace MagNet.	31
4.3 Lista dos cinco dias magneticamente mais calmos de cada mês do ano de 2011. . . . .	35
6.1 Coeficientes dos ajustes lineares da tendência dos valores da $H_{QDC}(00:00LT)$ das estações magnéticas da Embrace MagNet e estimativa da taxa de variação anual da magnitude da componente horizontal obtida pelo ajuste linear e pelo IGRF-12. . . . .	56
6.2 Coeficientes dos ajustes lineares entre a $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$ das estações magnéticas da Embrace MagNet e o $F_{10.7}$ mensal e o respectivo coeficiente de correlação. . . . .	63
6.3 Coeficientes de amplitudes e de ângulos de fase dos harmônicos da expansão em série de Fourier do parâmetro de sazonalidade da estação magnética de Cachoeira Paulista. . . . .	66
6.4 Coeficientes de amplitudes e de ângulos de fase dos harmônicos da expansão em série de Fourier do parâmetro de variação diurna da estação magnética de Cachoeira Paulista. . . . .	71
6.5 Coeficientes dos ajustes lineares e correlação entre as QDCs obtidas a partir dos dados e a partir do modelo Sq-QDCM para as estações magnéticas da Embrace MagNet. . . . .	82
6.6 Lista dos cinco dias magneticamente mais calmos de cada mês do ano de 2019. . . . .	89
6.7 Coeficientes dos ajustes lineares e correlações entre as QDCs obtidas a partir dos dados e a partir do modelo Sq-QDCM para a estação magnética de Cachoeira Paulista em 2019. . . . .	90
6.8 Coeficientes dos ajustes lineares e correlações entre as QDCs obtidas a partir dos dados e a partir da extrapolação espacial dos parâmetros do modelo Sq-QDCM para a estação magnética de Medianeira para os meses de setembro a dezembro de 2018. . . . .	95

A.1 Lista dos cinco dias magneticamente mais calmos entre os anos de 2010 e 2018. . . . . 137

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEJ	– Eletrojato Auroral (do inglês <i>Auroral Electrojet</i> )
ASCII	– Código Padrão Norte-Americano para Intercâmbio de Informações (do inglês <i>American Standard Code for Information Interchange</i> )
CPMN	– Rede de Magnetômetros Circum-pan Pacífico (do inglês <i>Circum-pan Pacific Magnetometer Network</i> )
Dd	– Dia Perturbado (do inglês <i>Disturbed day</i> )
DOY	– Dia do ano (do inglês <i>Day Of Year</i> )
DFT	– Transformada Discreta de Fourier (do inglês <i>Discrete Fourier Transform</i> )
EEJ	– Eletrojato Equatorial (do inglês <i>Equatorial Electrojet</i> )
Embrace	– Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial
EUV	– Ultravioleta Extremo (do inglês <i>Extreme Ultraviolet</i> )
FFT	– Transformada de Fourier Rápida (do inglês <i>Fast Fourier Transform</i> )
GFZ	– Centro Alemão de Pesquisas em Geociências (do alemão <i>Deutsches GeoForschungsZentrum</i> )
GG	– Coordenada geográfica (do inglês <i>Geographic Coordinate</i> )
GM	– Coordenada geomagnética (do inglês <i>Geomagnetic Coordinate</i> )
GPS	– Sistema de Posicionamento Global (do inglês <i>Global Positioning System</i> )
IAGA	– Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia (do inglês <i>International Association of Geomagnetism and Aeronomy</i> )
IGRF	– Campo Geomagnético de Referência Internacional (do inglês <i>International Geomagnetic Reference Field</i> )
JRO	– Rádio Observatório de Jicamarca (de <i>Jicamarca Radio Observatory</i> )
LISN	– Rede de Sensores Ionosféricos de Baixa Latitude (do inglês <i>Low-Latitude Ionospheric Sensor Network</i> )
LT	– Tempo Local (do inglês <i>Local Time</i> )
NG	– Norte geográfico
NM	– Norte geomagnético
PVC	– Policloreto de vinila (do inglês <i>Polyvinyl chloride</i> )
Qd	– Dia Calmo (do inglês <i>Quiet day</i> )
QDC	– Curva do Dia Calmo geomagneticamente (do inglês <i>Quiet Day Curve</i> )
SAMA	– Anomalia Magnética da América Sul (do inglês <i>South America Magnetic Anomaly</i> )
sfu	– Unidade de fluxo solar (do inglês <i>solar flux unit</i> )
Sq	– Variação solar calma (do inglês <i>Solar-quiet</i> )
Sq-QDCM	– Modelo da Curva do Dia Calmo do Sistema Sq (do inglês <i>Solar-quiet Quiet Day Curve Model</i> )
SSC	– Começo Súbito da Tempestade

- (do inglês *Storm Sudden Commencement*)
- UT – Tempo Universal (do inglês *Universal Time*)
- UV – Ultravioleta (do inglês *Ultraviolet*)
- WDC – Centro de Dados Mundiais (do inglês *World Data Center*)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$X$	– componente norte geográfica do campo geomagnético
$Y$	– componente leste geográfica do campo geomagnético
$Z$	– componente vertical do campo geomagnético
$H$	– componente horizontal do campo geomagnético
$D$	– ângulo da declinação geomagnética
$I$	– ângulo da inclinação geomagnética
$N_mE$	– densidade eletrônica máxima da região E
$f_0E$	– frequência crítica da região E
$H_{QDC}$	– curva do dia calmo da componente horizontal do campo geomagnético
$\Delta H_{QDC}$	– variação diurna calma da componente horizontal do campo geomagnético
$F_{10.7}$	– fluxo de rádio solar
$\chi$	– ângulo zenital solar
$\phi$	– ângulo de fase
$t$	– tempo
$Kp$	– índice geomagnético Kp



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Objetivo . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	1
<b>2 O CAMPO GEOMAGNÉTICO</b> . . . . .	<b>3</b>
2.1 Campo magnético interno . . . . .	7
2.2 Campo magnético externo . . . . .	9
2.3 As variações do campo geomagnético . . . . .	10
2.4 Observações e o monitoramento do campo geomagnético . . . . .	11
<b>3 A IONOSFERA TERRESTRE</b> . . . . .	<b>13</b>
3.1 A região E ionosférica . . . . .	16
3.2 Condutividade Ionosférica . . . . .	18
3.3 O dínamo da região E . . . . .	21
3.4 Eletrojato Equatorial . . . . .	22
3.5 Sistema de Correntes Sq . . . . .	23
<b>4 A REDE DE MAGNETÔMETROS EMBRACE MAGNET</b> . . . . .	<b>27</b>
4.1 O magnetômetro . . . . .	29
4.2 As medidas do campo geomagnético . . . . .	31
4.3 Seleção dos dados magnéticos . . . . .	33
<b>5 METODOLOGIA E MODELAGEM</b> . . . . .	<b>37</b>
5.1 Curva do dia calmo geomagneticamente (QDC) . . . . .	37
5.2 Transformada Discreta de Fourier (DFT) . . . . .	40
5.3 Solar-quiet Day Curve Model (Sq-QDCM) . . . . .	44
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>49</b>
6.1 Determinação dos Parâmetros do modelo Sq-QDCM . . . . .	49
6.1.1 Parâmetro T devido à variação secular . . . . .	49
6.1.2 Parâmetro C devido ao ciclo de atividade solar . . . . .	58
6.1.3 Parâmetro S devido à sazonalidade . . . . .	64
6.1.4 Parâmetro D devido às componentes de marés . . . . .	69

6.2	Validação entre as QDCs obtidas a partir dos dados de magnetômetros e do modelo Sq-QDCM . . . . .	74
6.2.1	Comparação direta da QDC e o Sq-QDCM . . . . .	74
6.2.2	Correlação entre a QDC e o Sq-QDCM . . . . .	79
6.2.3	Análise da variabilidade da QDC . . . . .	82
6.2.4	Análise espectral das séries temporais de QDCs . . . . .	84
6.3	Considerações finais sobre a validação do Sq-QDCM . . . . .	88
6.3.1	Análise da extrapolação temporal de QDCs para a estação magnética de Cachoeira Paulista . . . . .	89
6.3.2	Análise da extrapolação espacial de QDCs para a estação magnética de Medianeira . . . . .	91
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>97</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE A - GRÁFICOS DE RESULTADOS COMPLEMENTARES. . . . .</b>	<b>117</b>
	<b>APÊNDICE B - FLUXOGRAMA DO MODELO EMPÍRICO SQ-QDCM. . . . .</b>	<b>135</b>
	<b>ANEXO A - LISTA DOS CINCO DIAS GEOMAGNETICAMENTE MAIS CALMOS. . . . .</b>	<b>137</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O presente documento refere-se ao trabalho de Pesquisa para a Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, na área de concentração das Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE), apresentada por Sony Su Chen, com o título **Desenvolvimento de um modelo empírico para a obtenção da curva do dia calmo geomagneticamente (QDC)**.

## 1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho de pesquisa é desenvolver um modelo empírico que obtenha a curva média mensal que representa a variação diurna calma da componente horizontal do campo geomagnético, medida na superfície terrestre, para a região da América do Sul. O modelo será desenvolvido utilizando os dados da variação do campo geomagnético da rede de magnetômetros do Programa de Estudo e Monitoramento BRAsileiro de Clima Espacial (Embrace) do INPE. Neste contexto, serão utilizados os dados coletados de 14 estações magnéticas entre os anos de 2010 e 2018, representando a atividade solar baixa e alta do ciclo solar 24.

## 1.2 Motivação

A motivação para o desenvolvimento de um modelo empírico para obter a QDC vem da necessidade de se conhecer mais sobre as variações diurnas do campo geomagnético medidas na superfície sobre a América do Sul. Alguns dos fenômenos que ocorrem na magnetosfera e ionosfera são capazes de influenciar nessas variações do campo geomagnético. Pode-se citar como exemplos desses fenômenos magnetosféricos e ionosféricos as tempestades geomagnéticas e a corrente elétrica do eletrojato equatorial (EEJ), respectivamente. Desta forma, o ineditismo do desenvolvimento de um modelo empírico para calcular a curva média mensal da variação diurna calma do campo geomagnético deverá contribuir para o entendimento da dinâmica do campo geomagnético em períodos de baixa e alta atividade solar e, como consequência, o entendimento da variabilidade temporal e espacial das correntes elétricas que fluem na ionosfera na América do Sul.

Neste sentido, esta Dissertação de Mestrado encontra-se estruturada como descrito a seguir. Nos Capítulos 2 e 3 são apresentadas breves revisões teóricas, as quais tem as finalidades de contextualizar os conceitos necessários sobre as variações diurnas do campo geomagnético. No Capítulo 4 é apresentada uma breve descrição da rede de

magnetômetros do Programa Embrace/INPE, as estações magnéticas, o instrumento de medida das variações do campo geomagnético e o critério de seleção dos dados utilizados neste trabalho. No Capítulo 5 são apresentadas as metodologias utilizadas no cálculo da curva do dia calmo (QDC) e do desenvolvimento do modelo empírico. No Capítulo 6 são apresentados os resultados dos parâmetros do modelo empírico e um teste de validação deste modelo. Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões de trabalhos futuros que possam melhorar o modelo empírico.

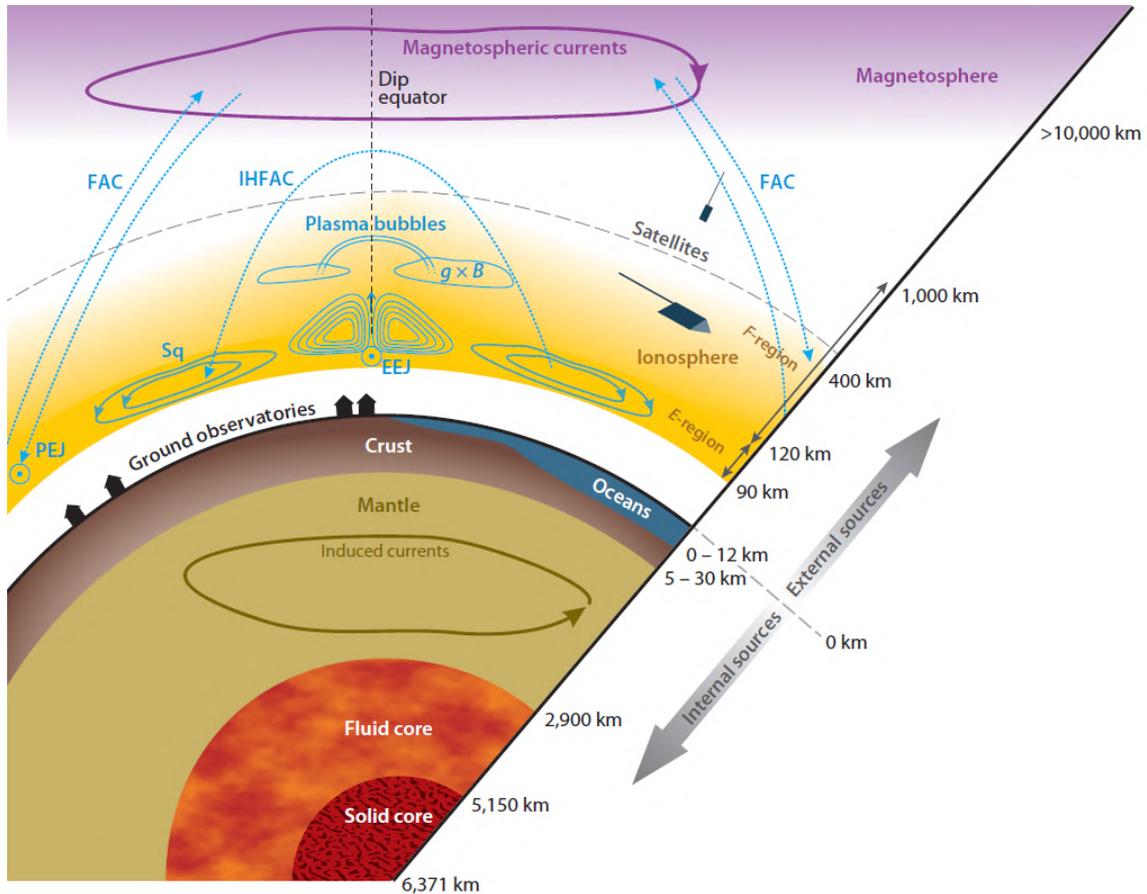
## 2 O CAMPO GEOMAGNÉTICO

O campo magnético terrestre, também chamado de campo geomagnético, é classificado em campo magnético interno e campo magnético externo. O campo magnético interno tem origem no interior da Terra, e subdivide-se em campo magnético principal (geodínamo), campo magnético crustal e campo magnético induzido. O campo magnético do geodínamo representa aproximadamente 95% do campo geomagnético total. Já o campo magnético externo tem origem acima da superfície terrestre, e subdivide-se em campos magnéticos devido às correntes elétricas que fluem na magnetopausa, na magnetosfera e na ionosfera (OLSEN; STOLLE, 2012).

A magnitude média do campo geomagnético medido na superfície terrestre pode variar em várias ordens de grandeza dependendo da fonte deste campo magnético. No caso do campo do principal, a ordem de grandeza da magnitude deste campo varia em torno de algumas dezenas de milhares de nanoteslas, entre 20000 a 70000 nT (CAMPBELL, 2003; OLSEN; STOLLE, 2012), e o campo crustal varia na ordem de dezenas a poucas centenas de nanoteslas (LANGEL et al., 1982; JANKOWSKI; SUCKSDORFF, 1996). Já os campos magnéticos externos, àqueles produzidos pelas correntes elétricas da magnetosfera e na ionosfera, variam na ordem de dezenas até centenas de nanoteslas (OLSEN; STOLLE, 2012; YAMAZAKI; MAUTE, 2017). Ademais, 30% destas correntes ionosféricas são responsáveis pela produção destes campos induzidos na superfície terrestre. (MATSUSHITA; MAEDA, 1965; YAMAZAKI et al., 2017).

Uma representação gráfica da distribuição das fontes de campo magnético é apresentada na Figura 2.1. Na diagonal desta figura é indicado uma escala de comprimento que tem origem no centro da Terra até aproximadamente  $10^4$  km acima da superfície terrestre. Abaixo da superfície terrestre, encontram-se as fontes de campo magnético interno, e acima dela encontram-se as fontes de campo magnético externo. As linhas contínuas e tracejadas correspondem aos sistemas de correntes elétricas que contribuem na magnitude do campo geomagnético. Entre essas correntes elétricas, podemos citar: correntes elétricas induzidas, sistema de correntes Sq, eletrojato equatorial (EEJ, do inglês *Equatorial Electrojet*), eletrojato auroral (AEJ, do inglês *Auroral Electrojet*), correntes alinhadas ao campo (FAC, do inglês *Field Aligned Currents*), corrente interhemisférica alinhada ao campo e correntes da magnetosfera.

Figura 2.1 - Representação esquemática das fontes de campo magnético que contribuem para o campo magnético terrestre observada no plano meridional.



Fonte: Olsen e Stolle (2012).

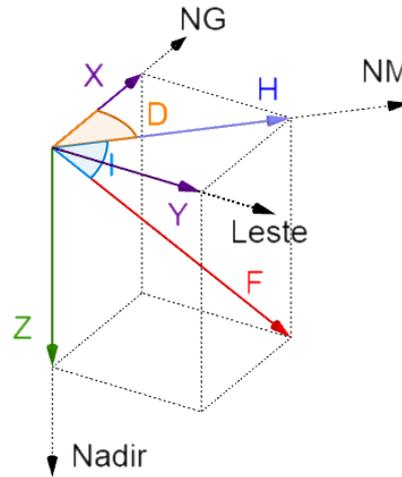
Conforme mencionado anteriormente, a soma dos campos magnéticos interno e externo corresponde ao campo geomagnético. Este campo geomagnético pode ser representado matematicamente a partir da soma dos seguintes campos: (1) campo produzido pelas correntes elétricas que circulam no interior da Terra (corresponde ao campo principal),  $\mathbf{B}_p(\mathbf{r}, t)$ ; (2) campo do material magnetizado da crosta (corresponde ao campo local),  $\mathbf{B}_c(\mathbf{r}, t)$ ; (3) campo produzido pelas correntes elétricas que circulam nas camadas ionizadas da alta atmosfera (ionosfera, magnetosfera e magnetopausa), externas ao núcleo terrestre,  $\mathbf{B}_e(\mathbf{r}, t)$ ; e (4) campo produzido pelas correntes induzidas na crosta terrestre (e oceanos),  $\mathbf{B}_i(\mathbf{r}, t)$ . De maneira geral, o campo geomagnético pode ser definido pela Equação 2.1:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_p(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}_c(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}_e(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}_i(\mathbf{r}, t). \quad (2.1)$$

A notação matemática utilizada para representar esses campos magnéticos é definida de acordo com as características espaciais ou temporais do campo magnético, sendo elas: variação espaço-temporal (em geral, o campo magnético varia no espaço e ao longo do tempo),  $\mathbf{B} = \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ ; campo estático ou estacionário (o campo magnético varia no espaço, porém, não varia ao longo do tempo),  $\mathbf{B} = \mathbf{B}(\mathbf{r})$ ; campo uniforme (o campo magnético não varia no espaço, porém, varia ao longo do tempo),  $\mathbf{B} = \mathbf{B}(t)$ ; e campo constante (o campo magnético não varia no espaço, nem ao longo do tempo, ou seja, este campo magnético é estático e uniforme),  $\mathbf{B} = cte = \mathbf{B}_0$  (DUTRA, 2017).

O campo magnético é uma grandeza física vetorial e, portanto, apresenta magnitude, direção e sentido. A magnitude do campo geomagnético  $\mathbf{B}$ , também referido por  $F = |\mathbf{B}|$ , é medida em nanotesla ( $1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$ ) no Sistema Internacional de unidades. A Figura 2.2 mostra as projeções do  $\mathbf{B}$  no sistema cartesiano invertido seguindo as direções norte, leste e para baixo. Os elementos da projeção do vetor campo geomagnético são divididos em elementos angulares ( $D$  e  $I$ ) e retangulares ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $H$  e  $F$ ). Eles podem ser representados de forma equivalente ao sistema de coordenadas cartesianas ( $XYZ$ ) ou ao sistema de coordenadas cilíndricas ( $HDZ$ ).

Figura 2.2 - Representação das componentes do vetor campo geomagnético. A componente total do campo ( $F$ ) e suas componentes angulares ( $D$  e  $I$ ) e retangulares ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $H$  e  $F$ ).



Fonte: Produção do autor.

De maneira geral, as componentes magnéticas identificadas na Figura 2.2 são:

- a componente norte ( $X$ ) representa a magnitude do campo que aponta para a direção do norte geográfico (NG);
- a componente leste ( $Y$ ) representa a magnitude do campo que aponta para a direção do leste geográfico;
- a componente vertical ( $Z$ ) representa a magnitude do campo que aponta para cima (zênite) no Hemisfério Sul, e para baixo (nadir) no Hemisfério Norte;
- a componente horizontal ( $H$ ) representa a magnitude do campo que aponta para a direção do norte geomagnético (NM);
- o ângulo da declinação ( $D$ ) representa o ângulo entre a  $X$  e a  $H$ , sendo positivo para a direção leste; e
- o ângulo da inclinação ( $I$ ) representa o ângulo entre a  $H$  e a  $F$ , sendo positivo para baixo.

A partir das projeções do vetor campo geomagnético, pode-se obter relações matemáticas para encontrar ou calcular a magnitude e a variação em uma determinada componente do campo geomagnético. O conjunto de Equações 2.2 mostram as principais relações matemáticas para se obter a magnitude de cada uma das componentes do campo geomagnético.

$$\begin{aligned}
 X &= H \cos D, \\
 Y &= H \sin D, \\
 Z &= F \sin I &= H \operatorname{tg} I, \\
 H &= F \cos I &= \sqrt{X^2 + Y^2}, \\
 F &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} &= \sqrt{H^2 + Z^2}, \\
 D &= \operatorname{arctg} \left( \frac{Y}{X} \right), \\
 I &= \operatorname{arctg} \left( \frac{Z}{H} \right).
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

## 2.1 Campo magnético interno

O campo magnético de origem interna é composto pelos campos principal, crustal e induzido. Estes campos magnéticos possuem ordens de grandeza distintas. Porém, ambos tem origem no interior da Terra. De certo modo, a magnitude do campo magnético crustal pode ser negligenciada se comparada à magnitude do campo magnético principal (LANGEL; ESTES, 1982; LANGEL et al., 1982).

O campo magnético principal,  $\mathbf{B}_p(\mathbf{r}, t)$ , pode ser expresso matematicamente em termos do potencial escalar magnético  $V$  representado pela Equação 2.3. Esta análise considera apenas a corrente do geodínamo, que fica no núcleo externo do planeta e que decorre da lei de Ampère-Maxwell (rotacional de  $\mathbf{B}$ ). Neste mesmo caso considera-se a atmosfera como um meio isolante, i.e., não magnético, e que a solução da equação de Laplace seja satisfeita por  $\nabla^2 V = 0$  (PARKINSON, 1983; OLSEN; STOLLE, 2012; THÉBAULT et al., 2015).

$$\mathbf{B} = -\nabla V. \quad (2.3)$$

Portanto, o potencial escalar magnético pode ser representado por uma expansão em séries, dada pela Equação 2.4.

$$V(r, \theta, \phi, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_n^m(t) \cos(m\phi) + h_n^m(t) \sin(m\phi)] P_n^m(\cos \theta), \quad (2.4)$$

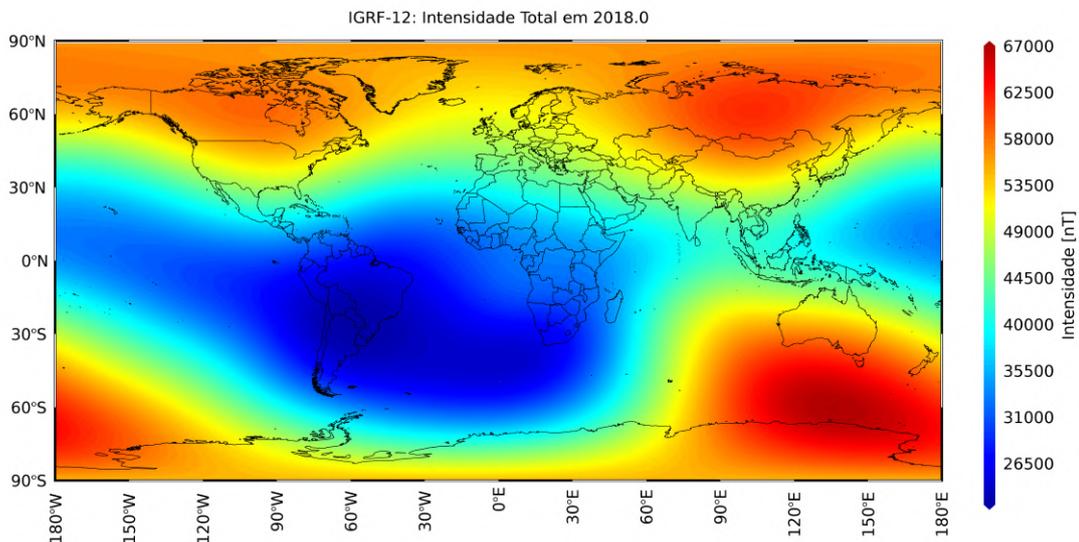
onde  $a = 6371,2$  km e corresponde ao raio médio da Terra,  $(r, \theta, \phi)$  correspondem às coordenadas geográficas esféricas, de modo que,  $r$  representa a distância radial a partir do centro da Terra,  $\theta$  representa a colatitude,  $\phi$  representa a longitude,  $t$  representa a época,  $P_n^m(\cos \theta)$  representam as funções associadas de Legendre de grau  $n$  e ordem  $m$ , e  $g_n^m, h_n^m$  são os coeficientes de Gauss, dados em nanotesla.

As componentes geocêntricas do campo geomagnético nas direções norte, leste, e vertical ( $X, Y$  e  $Z$ , respectivamente) são obtidas a partir da solução do gradiente de  $V$  em coordenadas esféricas, representadas pelas Equações 2.5.

$$\begin{aligned}
X &= \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta}, \\
Y &= -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi}, \\
Z &= \frac{\partial V}{\partial r}.
\end{aligned}
\tag{2.5}$$

A partir da solução deste conjunto de equações, é possível construir cartas isomagnéticas do campo principal. Estas cartas são representações gráficas da magnitude de uma componente do campo geomagnético e normalmente referem-se a uma época específica. Na Figura 2.3 pode-se observar, por exemplo, a distribuição global da magnitude da componente total do campo geomagnético sobre a superfície terrestre para o ano de 2018, obtida a partir do modelo de Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF, do inglês *International Geomagnetic Reference Field*), com a versão IGRF-12 desenvolvida por Thébault et al. (2015).

Figura 2.3 - Mapa da distribuição global da magnitude da componente total do campo geomagnético para o ano de 2018, obtida a partir do modelo IGRF-12.



Fonte: Produção do autor.

No mapa desta figura, identificam-se as presenças de três máximos (região vermelha) e um mínimo (região azul escuro) na magnitude da componente total do campo geomagnético. Os máximos da componente total são observados próximos às regiões

da América do Norte, da Ásia e da Oceania, enquanto que o mínimo é observado próximo à região da América do Sul.

A região de menor magnitude da componente total do campo geomagnético é modernamente conhecida como Anomalia Magnética da América do Sul (SAMA, do inglês *South America Magnetic Anomaly*) e é comumente atribuída à excentricidade do dipolo magnético (PINTO JR. et al., 1992; TRIVEDI et al., 2005; ANDERSON et al., 2018). A região da SAMA também é caracterizada pela maior aproximação do cinturão de radiação interno de Van Allen sobre a atmosfera terrestre. Neste caso, esta região de menor magnitude do campo geomagnético permite que as partículas do cinturão de radiação possam atingir altitudes mais baixas que nas demais regiões do globo (KURNOSOVA et al., 1962; ANDERSON et al., 2018).

## 2.2 Campo magnético externo

O campo magnético de origem externa é composto por campos magnéticos devido às correntes elétricas que circulam na magnetopausa, na magnetosfera e na ionosfera terrestre. A origem dessas correntes elétricas ocorre a partir da interação entre o Sol e a magnetosfera, ou entre o Sol e a ionosfera. Há também correntes elétricas devido à interação entre a magnetosfera e a ionosfera, porém não será abordado neste trabalho.

As correntes elétricas que circulam na magnetosfera terrestre são: as correntes da magnetopausa (também conhecidas como as correntes de Chapman-Ferraro) (CHAPMAN; FERRARO, 1931), a corrente da cauda (NESS, 1965; SPEISER; NESS, 1967), as correntes alinhadas ao campo (BIRKELAND, 1908; POTEIRA, 1988) e a corrente de anel simétrica (AKASOFU; CHAPMAN, 1961). Já as correntes elétricas que circulam na ionosfera são: o sistema de correntes Sq (CHAPMAN, 1919; CAMPBELL, 1989b; YAMAZAKI; MAUTE, 2017), a corrente elétrica do Eletrojato Equatorial (EEJ) (FORBES, 1981; REDDY, 1981; REDDY, 1989) e a corrente elétrica do Eletrojato Auroral (AEJ) (FEJER, 1963; ROSTOKER, 1980). Todas essas correntes elétricas são responsáveis por variações no campo geomagnéticos.

As correntes elétricas localizadas na magnetopausa e na magnetosfera sofrem influência direta da atividade solar, sendo relacionadas às tempestades geomagnéticas (GONZALEZ et al., 1994). Essas correntes elétricas podem intensificar ou diminuir a magnitude do campo geomagnético.

As correntes elétricas localizadas na ionosfera também sofrem influência da ativi-

dade solar. Neste caso, durante a alta atividade solar a fotoionização é maior, por consequência as condutividades também são intensificadas. Logo, as correntes elétricas são mais intensas. Isso não está associado com as tempestades magnéticas, que também intensificam as correntes elétricas, porém por razões diferentes. Durante as tempestades, os campos elétricos podem somar-se ao campo elétrico calmo da ionosfera, aumentando a magnitude da corrente elétrica ionosférica. Há também o aumento de partículas ionizadas, que aumenta a condutividade ionosférica. Em geral, estas correntes elétricas também sofrem a ação de outros mecanismos para a intensificação ou diminuição da magnitude do campo geomagnético.

### 2.3 As variações do campo geomagnético

Existe uma quantidade significativa de variações observadas nas medidas de campo geomagnético que podem ocorrer de maneira regular ou irregular. Estas variações são classificadas em diferentes tipos em relação às condições diárias calmas. Em geral, as periodicidades que excedem dezenas de anos podem ser atribuídas às mudanças no interior da Terra, conhecidas pelo termo variação secular (BLOXHAM et al., 1989). Já as periodicidades menores ou iguais a 22 anos estão relacionadas à fenômenos relacionados com o Sol, por meio da interação entre o vento solar com a magnetosfera terrestre (KANE, 1976).

A morfologia irregular dessas variações estão relacionadas às tempestades geomagnéticas, principalmente relacionada com os parâmetros do plasma interplanetário. Neste caso, as variações do campo geomagnético são discutidas em relação ao parâmetro de orientação do campo magnético interplanetário. Particularmente, a componente na direção sul ( $B_z$ ) tem um papel crucial. Vários outros fenômenos de tempestades, ocorridas nas regiões polares, aurorais, médias latitudes e equatoriais, são de extremo interesse do clima espacial (AKASOFU; CHAPMAN, 1961; GONZALEZ et al., 1994).

As periodicidades diurnas do campo geomagnético fazem parte das variações caracterizadas pela radiação solar diária. Essas variações, no que se refere principalmente às correntes elétricas que fluem na ionosfera, são oriundas do processo de fotoionização dos constituintes neutros da atmosfera pela radiação solar diurna (CHAPMAN; BARTELS, 1940a; CAMPBELL, 2003). No entanto, sabe-se que as variações diurnas também dependem da posição relativa da Terra, do Sol, da Lua, além dos fenômenos relacionados à fase do ciclo de atividade solar (CHAPMAN, 1919; CHAPMAN; BARTELS, 1940a; CHAPMAN; BARTELS, 1940b; MATSUSHITA, 1967; SHINBORI et al., 2017; YAMAZAKI; MAUTE, 2017). Neste trabalho serão estudadas especificamente as

variações diurnas causadas pelos sistemas de correntes elétricas Sq da ionosfera.

## 2.4 Observações e o monitoramento do campo geomagnético

As observações e o monitoramento do campo geomagnético são realizadas a partir das medidas da magnitude, direção e sentido do campo magnético. Devido ao longo histórico no estudo e observação do campo geomagnético, a Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia (IAGA, do inglês *International Association of Geomagnetism and Aeronomy*) estabeleceu dois documentos com as recomendações necessárias para a realização de medidas do campo geomagnético. No primeiro documento, as recomendações são para medidas de campo magnético realizadas em locais denominados de observatórios magnéticos (WIENERT, 1970; JANKOWSKI; SUCKSDORFF, 1996) e no segundo documento refere-se às medidas magnéticas realizadas em locais denominados de estações magnéticas de repetição (NEWITT et al., 1997). Em geral, as observações do campo geomagnético são realizadas com instrumentos de medida conhecidos como magnetômetros.

Os observatórios magnéticos são locais que possuem a função de monitorar continuamente as variações de curto e longos períodos do campo geomagnético. Este monitoramento é realizado a partir das componentes do vetor campo magnético (WIENERT, 1970). Já as estações magnéticas de repetição, são locais que possuem a função de ampliar a cobertura espacial no monitoramento do campo geomagnético. No entanto, as medidas realizadas em estações magnéticas não possuem a mesma acurácia que as informações obtidas a partir de observatórios magnéticos (NEWITT et al., 1997).

As observações e o monitoramento do campo geomagnético realizadas em observatórios e estações magnéticas são feitas a partir de três tipos de instrumentos, são eles: instrumento absoluto, instrumento relativo e instrumento semi-absoluto. O instrumento absoluto é capaz de entregar a magnitude do campo magnético ou sua componente em uma unidade física básica absoluta ou constantes físicas universal. O instrumento relativo é capaz de medir o desvio de um campo indeterminado. Para saber a magnitude do campo indeterminado é necessário realizar uma determinação absoluta. No caso de um variômetro, esta determinação absoluta é chamada de linha de base. Por fim, o instrumento semi-absoluto é um instrumento relativo que, a partir de várias comparações com instrumentos absolutos, entregam uma elevada precisão absoluta da medição em questão (JANKOWSKI; SUCKSDORFF, 1996).



### 3 A IONOSFERA TERRESTRE

A ionosfera terrestre é uma região da atmosfera localizada entre, aproximadamente, 60 e 2000 km de altitude. Esta região é formada devido à ionização dos gases neutros da atmosfera terrestre e é caracterizada por sua alta densidade de cargas livres de elétrons e íons, capaz de afetar a propagação de ondas de rádio (RISHBETH; GARRIOTT, 1969). Na atmosfera terrestre, os principais processos de ionização podem ocorrer através de duas formas: ionização primária e ionização secundária. A ionização primária ocorre quando os fótons com energia  $E > 12$  eV são capazes de ionizar os constituintes atmosféricos (KIRCHHOFF, 1991). Já a ionização secundária ocorre quando há colisão entre as partículas energéticas e as partículas neutras da atmosfera (SINNHUBER et al., 2012).

A ionização primária é o principal processo de ionização da atmosfera terrestre e é conhecida como fotoionização solar. Neste processo de ionização, os constituintes neutros absorvem a radiação solar nas faixas de comprimentos de onda ( $\lambda$ ) do ultravioleta extremo (EUV, do inglês *Extreme ultraviolet*), ultravioleta (UV, do inglês *Ultraviolet*) e Raios-X (BANKS; KOCKARTS, 1973a; BANKS; KOCKARTS, 1973b; RISHBETH; GARRIOTT, 1969; KELLEY, 1989; KIVELSON; RUSSELL, 1995).

A ionização secundária é processo de ionização tipicamente localizado nas regiões de altas latitudes devido à precipitação de partículas de altas energias na atmosfera terrestre (USOSKIN et al., 2009; SINNHUBER et al., 2012). No entanto, esta ionização ocorre também na região da Anomalia Magnética da América do Sul (BATISTA, 1975; ABDU; BATISTA, 1977; ABDU et al., 2005).

Devido ao processo de fotoionização, a densidade eletrônica da ionosfera é maior no período diurno, instante em que a radiação solar é mais intensa. Já no período noturno, dominam os processos de perda por meio da recombinação que diminuem a densidade eletrônica (BANKS; KOCKARTS, 1973a; BANKS; KOCKARTS, 1973b; RISHBETH, 1988).

A ionosfera é formada principalmente pela ionização do nitrogênio molecular ( $N_2$ ), oxigênio molecular ( $O_2$ ) e oxigênio atômico (O) abundantes na atmosfera (BANKS; KOCKARTS, 1973a; BANKS; KOCKARTS, 1973b; KELLEY, 1989; KIVELSON; RUSSELL, 1995). No entanto, o íon molecular de óxido nitroso (NO) é mais importante nas regiões ionosféricas mais baixas, produzido pela radiação solar Lyman- $\alpha$ . Os principais processos de produção e perda de ionização na ionosfera são apresentados, sumarizados, na Tabela 3.1.

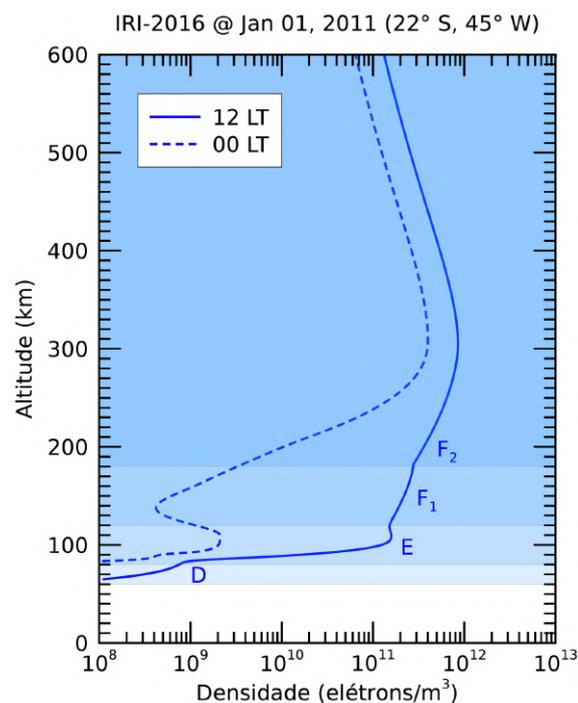
Tabela 3.1 - Processos de produção e perda na ionosfera.

	<b>Região D</b> (50 – 90 km)	<b>Região E</b> (90 – 150 km)	<b>Região F</b> (150 – 600 km)
<b>Produção</b>			
<b>Fotoionização solar</b>	Lyman- $\alpha$ ( $\lambda = 121,6$ nm) NO raios X ( $0,1 \leq \lambda \leq 1,0$ nm)	EUV ( $91,1 \leq \lambda \leq 102,7$ nm) Lyman- $\beta$ ( $\lambda = 102,6$ nm) O <sub>3</sub> ( $\lambda < 102,7$ nm) raios X ( $1,0 \leq \lambda \leq 17,0$ nm)	EUV ( $17,0 \leq \lambda \leq 91,1$ nm) HeII (30,4 nm), HeI (58,4 nm) O ( $\lambda < 91,1$ nm) N <sub>2</sub> ( $\lambda < 79,6$ nm)
<b>Ionização corpuscular</b>	Elétrons $> 30$ keV Prótons $> 1$ MeV Raios cósmicos	Elétrons 1 – 30 keV [causa alguma ionização noturna e esporádica-E]	Elétrons $\leq 1$ keV [baixa probabilidade; pode ser significante durante a noite]
<b>Perda</b>			
<b>Recombinação íon-íon</b>	Importante	Baixa quando há íons negativos	Muito baixa quando há íons negativos
<b>Recombinação elétron-íon</b>			
Recombinação de três corpos	Importante	Densidade dos gases muito baixa	Densidade dos gases muito baixa
Recombinação radiativa	Insignificante	Não importante	Não importante
Recombinação dissociativa	Importante	Principal mecanismo de perda	Principal mecanismo de perda
<b>Troca de carga íon-átomo</b>	Não importante	Importante	Importante
<b>Attachmanet</b>		Podem manter a ionização durante a noite	
<b>Collisional Detachment</b>	Importante, especialmente durante a noite	Pouco importante	Insignificante
<b>Fotodecaimento pela radiação solar e UV longo</b>	Principal causa da mudança dia/noite	Efetiva durante o dia	

Fonte: Adaptada de Rishbeth e Garriott (1969).

Na ionosfera, o parâmetro mais importante do ponto de vista da propagação de ondas de rádio é a densidade eletrônica (RISHBETH, 1988). Tipicamente, o perfil vertical diurno (linha contínua) e noturno (linha tracejada) da densidade eletrônica, durante as condições de baixa atividade solar (i.e., sem perturbações causadas pela atividade solar), é representado na Figura 3.1. Desta figura, o eixo vertical e horizontal indicam a altitude e a densidade eletrônica, respectivamente. A linha contínua representa o perfil vertical diurno da densidade eletrônica na atmosfera e as letras D, E, F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub> indicam as regiões ou camadas formadas na ionosfera durante às 12h LT. A linha tracejada representa o perfil vertical noturno da densidade eletrônica na atmosfera durante às 00h LT.

Figura 3.1 - Exemplo do perfil vertical diurno (linha contínua, 12h LT) e noturno (linha tracejada, 00h LT) de densidade eletrônica para a região de Cachoeira Paulista no dia 01 de janeiro de 2011, obtido a partir do modelo IRI-2016.



Fonte: Produção do autor.

A concentração de gases na atmosfera decai exponencialmente com a altura e a intensidade da radiação solar aumenta devido à sua origem externa à Terra e a redução da sua absorção pela atmosfera. Assim, em certa altura essa radiação é totalmente absorvida. Portanto, a produção de elétrons e íons passa por um máximo em uma determinada altura da atmosfera, formando as três regiões ionosféricas.

Os processos de transporte, que representam a dinâmica da ionosfera, são aqueles capazes de deslocar massas gasosas em grande escala. O parâmetro característico deste movimento será uma velocidade. Entre os agentes capazes de transportar ou movimentar íons e elétrons destacam-se os campos elétricos, os ventos neutros e a difusão, cada um deles com características próprias e bem definidas. Quando as velocidades de íons e elétrons são iguais, o plasma se move como um todo, causando uma deriva. Já em caso contrário desenvolvem-se as correntes elétricas (KIRCHHOFF, 1991).

Esse processo de deriva de plasma ocorre na ionosfera superior enquanto que na baixa ionosfera ocorre à formação de correntes elétricas. Na baixa ionosfera, os ventos neutros são do tipo marés atmosféricas, criando as correntes elétricas da região E por meio do efeito do dínamo atmosférico. As marés são forçantes geradas pelo efeito do aquecimento da atmosfera pela radiação solar e moduladas devido à atração gravitacional do Sol e da Lua. As marés térmicas solares são originadas pela absorção do EUV e dos Raios-X na termosfera, a absorção do UV na camada de ozônio e pelo aquecimento da superfície terrestre e baixa atmosfera pela radiação do infravermelho e visível. Este aquecimento configura os modos de marés, na qual  $n = 1$  equivale ao modo diurno (24 horas),  $n = 2$  para o modo semidiurno (12 horas) e assim por diante. Esses sistemas de ventos são responsáveis por produzir as variações geomagnéticas a partir do efeito de dínamo (RISHBETH, 1988). Na alta atmosfera predominam os ventos termosféricos, também capazes de imprimir velocidade a íons e elétrons. A difusão, por sua vez, movimentará o plasma ao longo da linha de campo magnético por meio da difusão bipolar (KIRCHHOFF, 1991).

### 3.1 A região E ionosférica

A região E ionosférica encontra-se localizada entre, aproximadamente, 80 e 150 km de altitude, entre às regiões D e F. Esta região possui o comportamento próximo ao de uma camada  $\alpha$ -Chapman, de modo que em média a frequência crítica do plasma da região E ( $f_0E$ ) varia com o ângulo zenital solar ( $\chi$ ), expressa pela Equação 3.1:

$$f_0E = 9 \times 10^3 \left( \frac{q_0}{\alpha} \cos \chi \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (3.1)$$

onde  $q_0$  representa a taxa de produção e  $\alpha$  representa o coeficiente de recombinação. De modo que a densidade eletrônica máxima da região E ( $N_mE$ ) varia com  $(\cos \chi)^{\frac{1}{2}}$  (RISHBETH; GARRIOTT, 1969).

Algumas das principais reações químicas de produção e perda que ocorrem na região E são apresentadas na Tabela 3.2. Destas reações, na produção de ionização considera-se apenas a fotoionização solar e na perda de ionização considera-se a recombinação eletrônica dissociativa e a troca de cargas.

Tabela 3.2 - Reações químicas de produção e perda na região E ionosférica.

Processos	Reação química
Produção	$O + h\nu \longrightarrow O^+ + e$
	$O_2 + h\nu \longrightarrow O_2^+ + e$
	$N_2 + h\nu \longrightarrow N_2^+ + e$
	$NO + h\nu \longrightarrow NO^+ + e$
Perda	$O^+ + O_2 \longrightarrow O_2^+ + O$
	$O^+ + N_2 \longrightarrow NO^+ + N$
	$N_2^+ + O \longrightarrow NO^+ + N$
	$N_2^+ + O_2 \longrightarrow O_2^+ + N_2$
	$O_2^+ + NO \longrightarrow NO^+ + O_2$
	$NO^+ + e \longrightarrow N + O$
	$O_2^+ + e \longrightarrow O + O$

Fonte: Adaptada de [Chen e Harris \(1971\)](#).

As principais espécies neutras abundantes da região E são: nitrogênio molecular ( $N_2$ ), oxigênio molecular ( $O_2$ ) e o oxigênio atômico (O). Os íons moleculares majoritários encontrados nesta região são  $NO^+$ ,  $O_2^+$  e  $N_2^+$ . As principais radiações eletromagnéticas, responsáveis pela ionização da região E ionosférica são apresentados na Tabela 3.1 ([RISHBETH; GARRIOTT, 1969](#); [BANKS; KOCKARTS, 1973a](#); [HARGREAVES, 1995](#); [SCHUNK; NAGY, 2000](#)).

A densidade de ondas da radiação solar não varia igualmente nas diferentes faixas de comprimento de onda. Por exemplo, as faixas de comprimento de onda da radiação solar no UV não variam na mesma amplitude durante um ciclo solar completo. Na região E, as faixas do comprimento de onda entre 91,1 e 102,8 nm, envolvendo o Lyman- $\beta$  e o C(III) que são responsáveis pela ionização do  $O_2$ , variam num fator igual a 2 de uma condição completamente calma até uma alta atividade solar. Já na faixa de comprimentos de ondas dos Raios-X, a variação entre uma condição completamente calma e uma alta atividade solar é um fator de 6, chegando a um fator de 10 em condições extremas ([BANKS; KOCKARTS, 1973a](#)).

### 3.2 Condutividade Ionosférica

A condutividade ionosférica depende diretamente da densidade eletrônica e das magnitudes relativas entre a frequência de colisão e a frequência de giro das partículas carregadas (íons e elétrons) em torno do campo magnético. Devido à presença do campo magnético terrestre, a ionosfera torna-se um meio anisotrópico. Por conta disso, a condutividade elétrica na ionosfera pode ser obtida em função de três componentes devido à presença de campos magnéticos e elétricos simultâneos (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; AKASOFU; CHAPMAN, 1972; HARGREAVES, 1995), mostradas nas Equações 3.2, 3.3 e 3.4.

A Equação 3.2 representa a condutividade longitudinal ou paralela ( $\sigma_0$ ). Essa componente da condutividade é paralela ao vetor campo geomagnético.

$$\sigma_0 = Ne^2 \left( \frac{1}{m_e \nu_e} + \frac{1}{m_i \nu_i} \right). \quad (3.2)$$

A Equação 3.3 representa a condutividade Pedersen ou transversal ( $\sigma_1$ ). Essa componente da condutividade é perpendicular à direção do vetor campo geomagnético e paralela à direção do vetor campo elétrico.

$$\sigma_1 = Ne^2 \left[ \frac{\nu_e}{m_e (\nu_e^2 + \Omega_e^2)} + \frac{\nu_i}{m_i (\nu_i^2 + \Omega_i^2)} \right]. \quad (3.3)$$

A Equação 3.4 representa a condutividade Hall ( $\sigma_2$ ). Essa componente da condutividade é ortogonal às direções do vetor campo geomagnético e a direção do vetor campo elétrico.

$$\sigma_2 = Ne^2 \left[ \frac{\Omega_e}{m_e (\nu_e^2 + \Omega_e^2)} - \frac{\Omega_i}{m_i (\nu_i^2 + \Omega_i^2)} \right]. \quad (3.4)$$

Nas equações acima,  $N$  é a densidade eletrônica do meio,  $e$  é a carga elétrica de cada partícula,  $m$  é a massa da partícula,  $\nu$  é a frequência de colisão entre a partícula carregada e a partícula neutra, e  $\Omega$  é a frequência de giro da partícula. Os subíndices  $e$  e  $i$  indicam elétrons e íons, respectivamente.

A forma tensorial da condutividade é expressa na forma matricial, representada pela Equação 3.5:

$$\tilde{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_0 \cos^2 I + \sigma_1 \sin^2 I & \sigma_2 \sin I & -(\sigma_0 - \sigma_1) \sin I \cos I \\ -\sigma_2 \sin I & \sigma_1 & -\sigma_2 \cos I \\ -(\sigma_0 - \sigma_1) \sin I \cos I & \sigma_2 \cos I & \sigma_1 \cos^2 I + \sigma_0 \sin^2 I \end{pmatrix}, \quad (3.5)$$

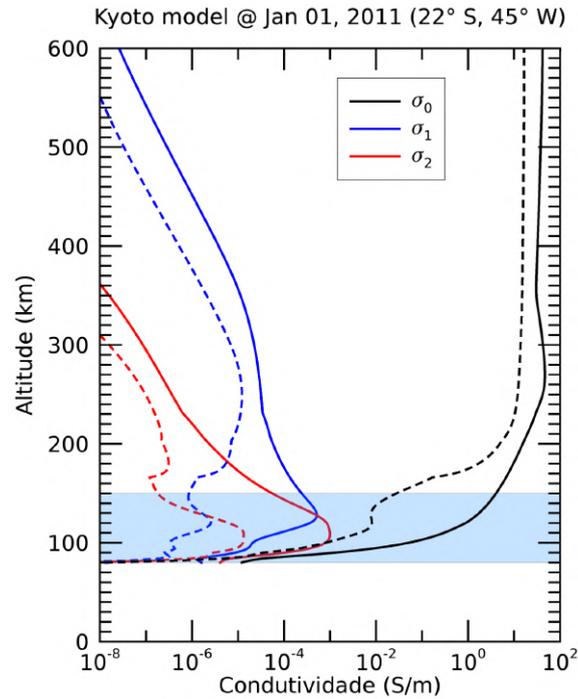
onde  $\tilde{\sigma}$  representa o tensor condutividade e  $I$  representa o ângulo da inclinação do campo geomagnético  $\mathbf{B}$  (positivo no Hemisfério norte).

Uma quarta condutividade pode ser obtida a partir da Equação 3.6. Esta representa a condutividade Cowling ( $\sigma_3$ ) e é a combinação entre as condutividades Pedersen e Hall (COWLING, 1932; RISHBETH; GARRIOTT, 1969).

$$\sigma_3 = \sigma_1 \left( 1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} \right). \quad (3.6)$$

Essas condutividades apresentam variações com a altitude e, portanto, seguem um comportamento característico representado na Figura 3.2. Esta figura representa um exemplo do perfil vertical diurno (linhas contínuas, 12 h LT) e noturno (linhas tracejadas, 00h LT) das condutividades ionosféricas, onde o eixo vertical indica a altitude e o eixo horizontal indica a magnitude da condutividade. As linhas preta, azul e vermelha indicam respectivamente as condutividades longitudinal ( $\sigma_0$ ), Pedersen ( $\sigma_1$ ) e Hall ( $\sigma_2$ ). Este perfil de condutividade foi obtido a partir de um modelo de condutividade ionosférica e pode ser encontrado na página *online* do Centro Mundial de Dados (WDC, do inglês *World Data Center*) de Kyoto, localizado no Japão (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ionocond/sigcal/index.html>).

Figura 3.2 - Exemplo do perfil vertical diurno (linhas contínuas) e noturno (linhas tracejadas) das condutividades longitudinal ( $\sigma_0$ ), Pedersen ( $\sigma_1$ ) e Hall ( $\sigma_2$ ) para a região de Cachoeira Paulista no dia 01 de janeiro de 2011, obtido a partir do modelo de condutividades de Kyoto.



Fonte: Produção do autor.

Neste perfil vertical diurno das condutividades é possível observar valores máximos nas condutividades Pedersen e Hall, localizados na região E ionosférica (representado pela região azul desta figura). A condutividade ionosférica é máxima em torno de 110 km. Nesta região, os ventos neutros predominantes transmitem movimento às camadas condutoras por colisões e na presença do campo geomagnético, originam as correntes elétricas. O processo é semelhante ao que ocorre no gerador convencional de corrente elétrica, o dínamo. Por isso, esta região da atmosfera também é chamada de região do dínamo.

Em um meio anisotrópico, a relação entre a corrente elétrica e campo elétrico é dada pela Equação de Ohm:

$$\mathbf{J} = \tilde{\sigma} \cdot \mathbf{E}, \quad (3.7)$$

onde  $\mathbf{J}$  representa o vetor densidade de corrente,  $\tilde{\sigma}$  corresponde ao tensor condutividade e  $\mathbf{E}$  representa o campo elétrico ionosférico.

No caso particular de um plasma, onde cargas positivas e negativas contribuem para o fluxo de corrente na presença de um campo magnético, duas modificações básicas são introduzidas. A condutividade será a soma ponderada pelas taxas de colisão e ciclotrônica das condutividades das cargas positivas e negativas. Adicionalmente, a presença do campo magnético impõe uma força adicional ao movimento das cargas gerando o efeito Hall, transformando o meio em anisotrópico.

### 3.3 O dínamo da região E

O dínamo da região E, comumente conhecido como dínamo ionosférico, é responsável pelo mecanismo de geração do sistema de correntes elétricas Sq. Os campos elétricos e as correntes elétricas são descritos em termos do movimento das partículas pelos ventos neutros da atmosfera. Embora o movimento dos ventos neutros não cause nenhum campo eletromagnético, estes ventos causam um efeito eletromagnético por meio das colisões entre as partículas neutras e o plasma ionosférico. O dínamo ionosférico usualmente refere-se aos processos do dínamo na altura da região E.

A Lei de Ohm generalizada relaciona o campo elétrico ionosférico com a corrente elétrica através da condutividade do meio. Estas correntes, por sua vez, produzem variações no campo geomagnético.

$$\mathbf{J} = \tilde{\sigma} \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}), \quad (3.8)$$

onde  $\mathbf{J}$  é o vetor densidade de corrente,  $\mathbf{E}$  é o campo elétrico,  $\mathbf{U}$  é a velocidade do vento neutro e  $\mathbf{B}$  é o campo geomagnético.

Na ionosfera, o tensor condutividade é altamente anisotrópico. A condutividade na direção do campo geomagnético pode ser várias ordens de grandeza maior que as condutividades perpendiculares ao campo geomagnético. Os campos elétricos e as correntes elétricas ionosféricas são organizadas pelo campo geomagnético. A equação que relaciona os ventos, os campos elétricos e as correntes elétricas é expressa pela Lei de Ohm, na forma da Equação 3.9:

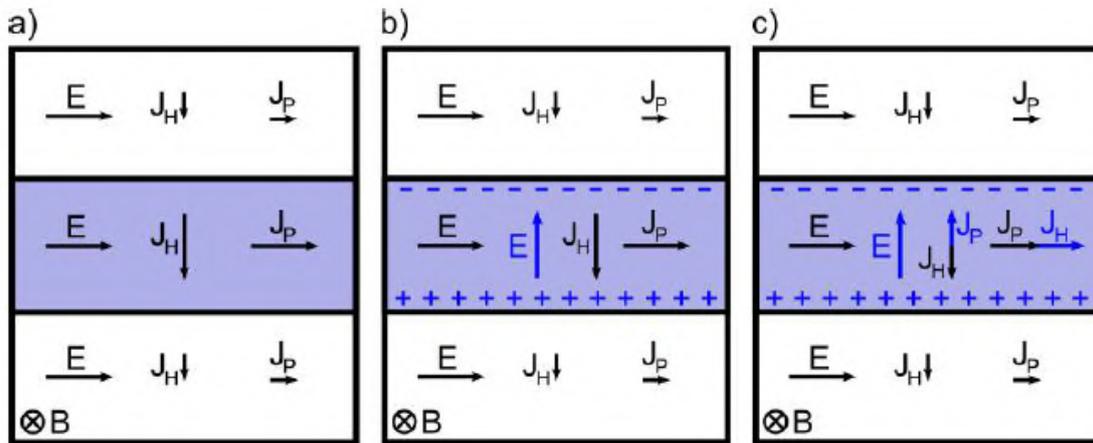
$$\mathbf{J} = \sigma_0 \mathbf{E}_{\parallel} + \sigma_1 (\mathbf{E}_{\perp} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}) + \sigma_2 \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|} \times (\mathbf{E}_{\perp} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}), \quad (3.9)$$

onde  $\mathbf{E}_{\parallel}$  e  $\mathbf{E}_{\perp}$  são os campos elétricos paralelo e perpendicular ao vetor campo geomagnético.

### 3.4 Eletrojato Equatorial

Devido às configurações das condutividades na região E ionosférica (Figura 3.2), a ação do dínamo é mais efetiva em torno do equador magnético. Nesta região, surge uma corrente que flui do terminadouro do amanhecer para o terminadouro do anoitecer. Assim, haverá uma corrente elétrica que fluirá para leste durante o dia e para oeste durante a noite denominada Eletrojato Equatorial (EEJ) (DENARDINI, 1999). A configuração da corrente do EEJ pelo campo elétrico do dínamo é exemplificada na Figura 3.3. Desta figura, são apresentados três quadros (a, b e c) que exemplificam a formação da corrente do EEJ. Note que a direção do eixo horizontal é positiva para leste e a direção do eixo vertical (que corresponde à altura) é positiva para cima. A região E ionosférica é considerada uma camada condutora fina com um fluxo de corrente confinado. Nesse caso, as correntes verticais são desprezíveis.

Figura 3.3 - Representação esquemática da formação da corrente elétrica do eletrojato equatorial.



Fonte: Resende (2014).

Na região equatorial, considerando o plano perpendicular ao campo magnético (quadros da Figura 3.3) e utilizando a relação  $\mathbf{J} = \tilde{\sigma} \cdot \mathbf{E}$ , tem-se:

$$\begin{aligned} J_y &= \sigma_1 E_y - \sigma_2 E_z, \\ J_z &= \sigma_2 E_y + \sigma_1 E_z, \end{aligned} \tag{3.10}$$

onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  correspondem às condutividades Pedersen e Hall, respectivamente, e  $E_y$  é o campo elétrico na direção leste enquanto  $E_z$  é o campo elétrico na direção vertical. Na Figura 3.3a, o campo elétrico devido a polarização dos terminadouros que flui na direção leste, forçará uma corrente Pedersen na sua direção e uma corrente Hall na direção perpendicular a ele e a componente do campo magnético. Assim, como a condutividade acima e abaixo dessa camada fina é reduzida, há um acúmulo de cargas nas bordas que gera um campo elétrico vertical (Figura 3.3b). Associadas à presença deste campo surgem correntes Pedersen e Hall. Finalmente, observa-se na Figura 3.3c que a corrente Pedersen reduz o efeito da corrente Hall do campo elétrico primário. Já a corrente Hall se somará à corrente Pedersen deste mesmo campo. Esta intensificação da corrente para leste é conhecida como corrente do EEJ. Durante a noite, quando a densidade eletrônica da região E decai, o cenário apresentado anteriormente se reverte, ou seja, a corrente fluirá com magnitude bem reduzida na direção oeste (DENARDINI, 1999). Ainda, a anulação nas correntes verticais significa que  $J_z = 0$  na Equação 3.10. Assim, esta equação pode ser reescrita como:

$$J_y = \left( \sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1} \right) E_y = \sigma_3 E_y. \tag{3.11}$$

Desta Equação 3.11, a densidade de corrente elétrica na direção leste no equador magnético corresponde à corrente elétrica do eletrojato equatorial.

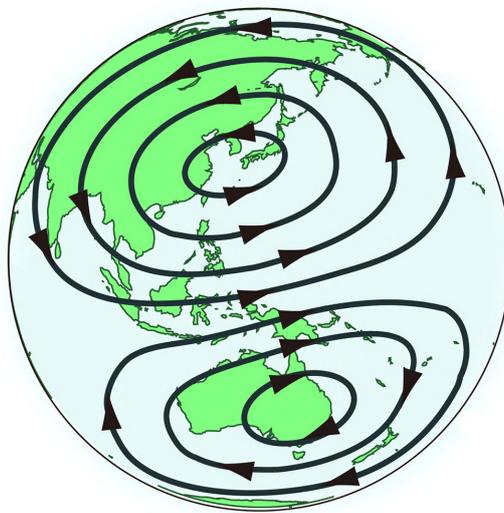
### 3.5 Sistema de Correntes Sq

A variação diurna do campo geomagnético foi descoberta por George Graham (GRAHAM, 1724a; GRAHAM, 1724b). No entanto, foi Stewart (1882) quem propôs a hipótese de que essa variação era causada por correntes elétricas que circulavam em uma região condutora da alta atmosfera, ionizada pela radiação solar. Os trabalhos de Stewart (1882), Schuster (1889) e Schuster (1908) contribuíram para a compreensão da variação diurna. Atualmente, sabe-se que essa variação é causada por um sistema de correntes elétricas localizada na ionosfera terrestre devido à ação do dínamo ionosférico e pela alta condutividade ionosférica (CHAPMAN; BARTELS, 1940a; CHAPMAN, 1956; MAEDA; KATO, 1966; MATSUSHITA, 1968; CHAPMAN; LINDZEN, 1970; CAMPBELL, 1989a).

O movimento do ar da atmosfera neutra causado pelas marés atmosféricas proporciona o deslocamento de íons e elétrons em volta das linhas do campo geomagnético e um campo elétrico induzido irá produzir o fluxo de corrente. Com o avanço das investigações da ionosfera feita por [Appleton e Barnett \(1925\)](#), [Tuve e Breit \(1925\)](#) e, principalmente por [Chapman e Bartels \(1940a\)](#), desenvolveu-se a teoria do dínamo. Nesta, se afirma que o movimento das partículas neutras ocorre em função dos ventos neutros e que os ventos de marés proporcionam o movimento das partículas carregadas ([WHITTEN; POPOFF, 1971](#)). Sob condições calmas, esses ventos e suas correntes associadas podem ser separadas em duas componentes, uma relacionada à influência solar (Sq, do inglês *Solar quiet*) e a outra à influência Lunar (L).

Esse sistema de correntes elétricas é representado na ilustração da Figura 3.4. Desta figura, observam-se dois circuitos de correntes elétricas correspondentes ao lado iluminado pelo Sol. Nestas condições, o sentido das correntes elétricas é anti-horário no Hemisfério Norte e o sentido das correntes elétricas é horário no Hemisfério Sul.

Figura 3.4 - Representação esquemática padrão diurno dos sistemas de correntes Sq.

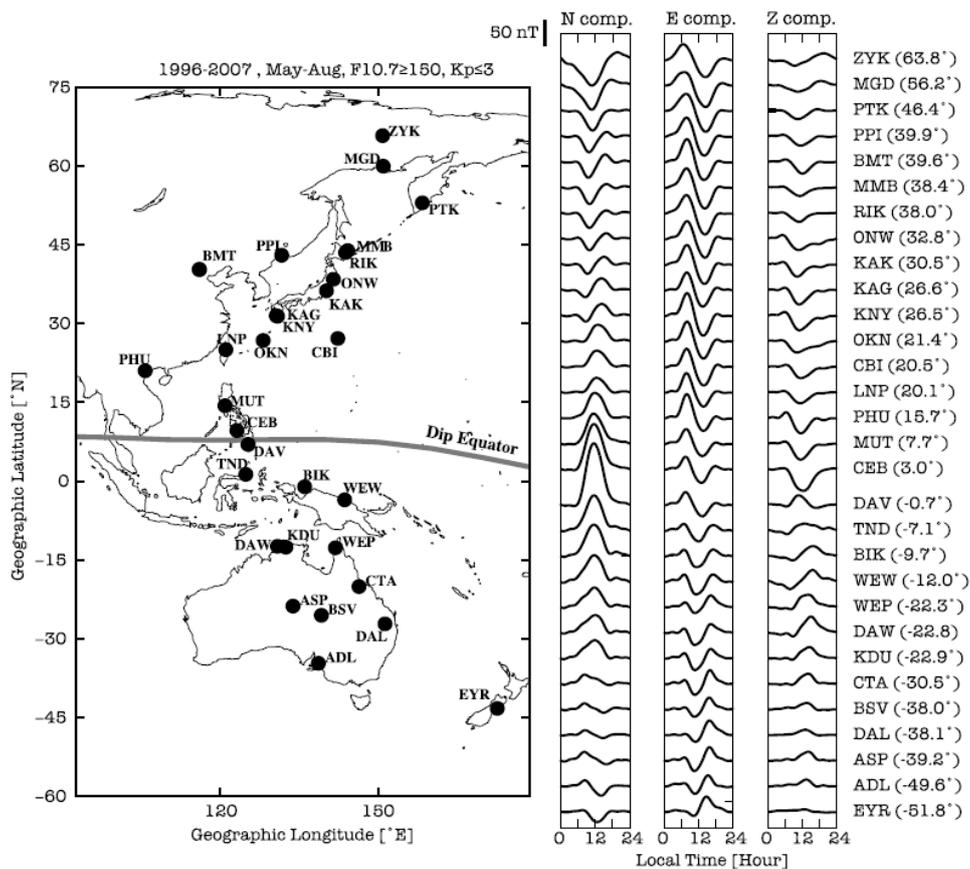


Fonte: Adaptada de [Yamazaki et al. \(2017\)](#).

Sabe-se que essas variações diurnas causadas pelos sistemas de correntes Sq são regulares e são primordialmente compostas pelas componentes espectrais de 24, 12, 8 e 6 horas, devido às marés atmosféricas ([CAMPBELL, 1989a](#); [YAMAZAKI; MAUTE, 2017](#)).

Na Figura 3.5 é apresentada uma representação da variação diurna observadas nas componentes do campo geomagnético pelas estações magnéticas da *Circum-pan Pacific Magnetometer Network* (CPMN). Nesta figura, as estações magnéticas estão representadas no mapa à esquerda e as variações observadas nas componentes do campo geomagnético são apresentadas à direita. É possível observar as variações (nas componentes  $N$ ,  $E$  e  $Z$ , respectivamente) causadas pelos sistemas de correntes Sq nos hemisférios Norte e Sul do globo. As componentes  $N$  e  $E$  representadas nesta figura correspondem às componentes do campo geomagnético na direção norte magnético e leste magnético, respectivamente. Nota-se que no equador magnético (onde o ângulo da inclinação magnética é igual a zero,  $I = 0^\circ$ ) há uma intensificação da magnitude da componente horizontal do campo magnético terrestre atribuída à corrente elétrica do EEJ.

Figura 3.5 - Variação diurna média das componentes campo geomagnético das estações magnéticas da *Circum-pan Pacific Magnetometer Network* (CPMN), durante o período entre Maio e Agosto dos anos 1996 a 2007.



Fonte: Yamazaki e Maute (2017).

Há modelos que determinam a variação diurna do campo geomagnético em escala global (CAMPBELL et al., 1989) tanto para as regiões de alta latitude (JANZHURA; TROSHICHEV, 2008; STAUNING, 2011) quanto ao longo do meridiano 210° (YAMAZAKI et al., 2011), para o setor indiano (UNNIKRIISHNAN, 2014) e para o setor africano (SUTCLIFFE, 1999). No entanto, para o setor Sul-Americano não há trabalhos recentes de modelos que possibilitam obter a variação diurna do campo geomagnético, típicas de períodos magneticamente calmos, exceto os modelos globais.

## 4 A REDE DE MAGNETÔMETROS EMBRACE MAGNET

A rede de magnetômetros do Programa Embrace/INPE, também chamada de Embrace MagNet, foi criada com a finalidade de monitorar as variações do campo geomagnético na América do Sul. O monitoramento dessas variações é realizado em estações magnéticas, 24 horas por dia, 7 dias da semana, com o uso de magnetômetros do tipo variômetro (comumente conhecido como *fluxgate* ou de núcleo saturado). As estações magnéticas da Embrace MagNet estão distribuídas geograficamente entre os meridianos 30° W e 90° W e entre as faixas latitudinais 15° N e 75° S. Neste presente trabalho foram utilizados dados das 14 estações magnéticas que estavam em funcionamento entre os anos de 2010 e 2018. As informações sobre a localização das estações magnéticas, bem como a sigla de identificação, país<sup>1</sup>, latitudes e longitudes geográficas (GG) e geomagnéticas (GM)<sup>2</sup>, altitude, latitude *dip* ( $\lambda_{dip}$ )<sup>3</sup> e data de instalação estão sumarizadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Localização geográfica das estações magnéticas da Embrace MagNet utilizadas, e suas correspondentes sigla, país, latitude, longitude, altitude, latitude *dip* e data de instalação.

Localização (cidade e estado/província)	Sigla	País	GG		GM		Alt. (m)	$\lambda_{dip}$ (°)	Instalação (data)
			Lat.	Lon.	Lat.	Lon.			
Manaus, AM	MAN	BR	-2,89°	-59,97°	3,55°	13,72°	102	3,44	2016-06-10
Alta Floresta, MT	ALF	BR	-9,87°	-56,10°	-4,44°	15,43°	284	-4,72	2011-07-18
São Luís, MA	SLZ	BR	-2,59°	-44,21°	-4,54°	28,01°	32	-5,20	2011-12-05
Araguatins, TO	ARA	BR	-5,60°	-48,10°	-5,00°	23,61°	103	-5,58	2017-06-24
Eusébio, CE	EUS	BR	-3,88°	-38,42°	-8,69°	32,86°	43	-9,99	2011-11-28
Cuiabá, MT	CBA	BR	-15,55°	-56,07°	-9,34°	14,11°	233	-9,66	2011-05-01
Jataí, GO	JAT	BR	-17,93°	-51,72°	-13,38°	17,16°	679	-14,05	2013-11-22
Tucumán, TU	TCM	AR	-26,82°	-65,19°	-16,13°	5,31°	431	-15,00	2016-10-23
Medianeira, PR	MED	BR	-25,30°	-54,11°	-18,38°	13,87°	406	-18,37	2018-04-05
São José dos Campos, SP	SJC	BR	-23,21°	-45,96°	-20,32°	20,75°	583	-21,57	2013-05-15
Cachoeira Paulista, SP	CXP	BR	-22,70°	-45,01°	-20,38°	21,65°	601	-21,80	2010-09-28
Vassouras, RJ	VSS	BR	-22,40°	-43,65°	-20,80°	22,87°	443	-22,45	2015-05-28
São Martinho da Serra, RS	SMS	BR	-29,44°	-53,82°	-21,91°	13,57°	462	-21,35	2013-06-13
Rio Grande, TF	RGA	AR	-53,79°	-67,76°	-40,46°	5,24°	10	-31,01	2012-11-14

Fonte: Produção do autor.

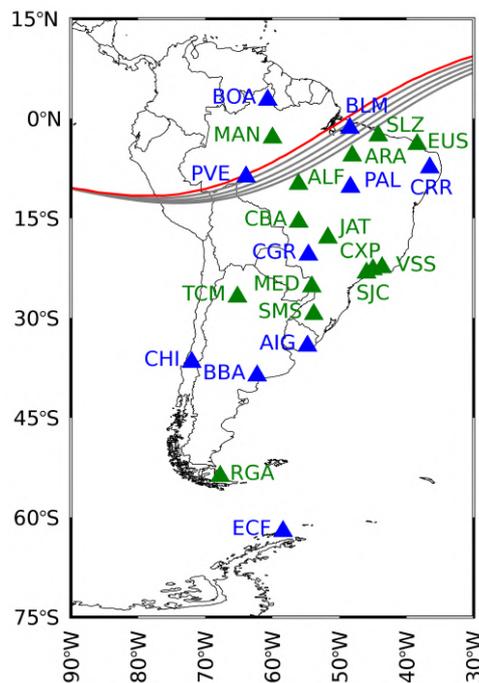
<sup>1</sup>BR: Brasil e AR: Argentina.

<sup>2</sup>As coordenadas geomagnéticas foram obtidas a partir do sistema de coordenadas Quase-Dipolo de Emmert et al. (2010), para a data de 01/01/2019 ([https://geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/models\\_compass/coord\\_calc.html](https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/coord_calc.html)).

<sup>3</sup>A latitude *dip* foi obtida a partir a seguinte equação:  $\lambda_{dip} = \arctg\left(\frac{1}{2} \operatorname{tg} I\right)$ . Vale ressaltar que o ângulo da inclinação magnética utilizado neste cálculo foi obtido a partir do modelo IGRF-12 para a data de 01/01/2019.

A representação gráfica da distribuição das estações magnéticas sobre o território da América do Sul é apresentada na Figura 4.1. As linhas cinzas (os anos de 2000 e 2015, de baixo para cima, em intervalos de 5 anos) e vermelha (ano de 2020) correspondem às localizações do equador magnético obtidas a partir do modelo IGRF-12. Os triângulos correspondem às estações magnéticas que estão em funcionamento em verde, utilizadas neste trabalho, e planejadas para funcionar em azul.

Figura 4.1 - Distribuição geográfica das estações magnéticas da Embrace MagNet (e candidatas) na América do Sul.



Fonte: Adaptada de Denardini et al. (2018a).

Essas estações magnéticas estão localizadas em regiões de interesse de pesquisa para a comunidade científica, principalmente para o Brasil. A infraestrutura das estações magnéticas é fundamental para que se possa realizar medidas do campo geomagnético. Conforme mencionado no Capítulo 2, as observações e o monitoramento do campo geomagnético podem ocorrer a partir de duas formas: (1) observatórios magnéticos e (2) estações magnéticas. A Embrace MagNet é caracterizada por realizar as observações e o monitoramento do campo geomagnético a partir de estações magnéticas, portanto o equipamento que encontra-se nestas localidades possuem algumas limitações nos valores absolutos do campo geomagnético. No que diz respeito à loca-

lização das estações magnéticas da Embrace MagNet, o Programa Embrace atende às recomendações descritas pela IAGA para medir as variações do campo geomagnético. Entre as recomendações adotadas, pode-se citar: escolha da localidade da estação magnética, escolha do local de instalação do sensor, instalação de uma fonte de alimentação ininterrupta entre outras descritas por [Newitt et al. \(1997\)](#).

A respeito da escolha da localização da estação magnética e do sensor, deve-se atender aos seguintes itens: (1) o sensor deve ser colocado em uma área livre de interferências magnéticas artificiais, dutos metálicos, livre de tráfego de pessoas e a uma distância mínima de 100 m do tráfego de veículos, (2) a distância mínima de 25 m entre o sensor e a unidade de controle, (3) a sala da unidade de controle deve possuir uma fonte de tensão 120 ou 220V/60Hz e um ponto de internet, (4) dentro desta sala a temperatura interna deve estar entre 10 e 30°C e a umidade relativa do ar deve estar entre 10 e 80%.

As estações magnéticas, tais como as estações da Embrace MagNet, têm seus magnetômetros variômetros orientados na direção do norte geomagnético ([NEWITT et al., 1997](#)). Mais detalhes e informações sobre as estações magnéticas, os procedimentos de instalação, calibração e aferição dos magnetômetros da rede Embrace MagNet podem ser encontrados nas publicações de [Denardini et al. \(2015a\)](#), [Denardini et al. \(2016\)](#) e [Denardini et al. \(2018a\)](#).

#### 4.1 O magnetômetro

Os magnetômetros da Embrace MagNet são instrumentos suscetíveis às variações do campo geomagnético sobre a superfície terrestre. Estes instrumentos são conhecidos como magnetômetro variômetro, núcleo saturado ou, ainda, *fluxgate*. Eles são instrumentos mais simples e práticos para a realização de medida do campo geomagnético ([PRIMDAHL, 1979](#); [CARVALHO, 1989](#)).

Adicionalmente, esses instrumentos possuem uma pequena dimensão e são do tipo vetorial, ou seja, alinhado à direção de um campo magnético fornece sua magnitude ou variação. As suas principais características são: resistência, grande estabilidade, baixo custo de manutenção e facilidade de transporte ([CARVALHO, 1989](#); [RIPKA, 1992](#)).

O princípio físico das medidas obtidas por estes equipamentos baseia-se na saturação da magnetização do núcleo magnético. Este núcleo magnético é composto por um material de alta permeabilidade magnética e é utilizado para obter o sinal do campo

magnético existente no ambiente (CARVALHO, 1989). Em geral, esses magnetômetros são constituídos por duas bobinas. A primeira, chamada de primária, provoca uma variação da permeabilidade magnética do núcleo, saturando-o periodicamente. A segunda, chamada de secundária, faz a detecção do campo magnético externo que se deseja medir. O sinal que aparece na bobina secundária é proporcional à magnitude do campo magnético externo na direção da bobina (RIPKA, 1992; RIPKA, 2001).

Os magnetômetros adquiridos pela Embrace MagNet foram desenvolvidos no Rádio Observatório de Jicamarca (JRO, do inglês *Jicamarca Radio Observatory*) e as principais informações sobre a construção e funcionamento destes equipamentos podem ser encontradas em Veliz Castillo (2010a). As principais partes físicas que compõem este equipamento são: um sensor magnético, uma unidade de controle e aquisição de dados e um microcomputador. A Figura 4.2 (a) mostra uma foto do sensor magnético e a 4.2 (b) mostra a unidade de controle e aquisição de dados.

Figura 4.2 - Fotos do (a) sensor magnético e da (b) unidade de controle e aquisição de dados de um dos magnetômetros da rede Embrace MagNet.



Fonte: Produção do autor.

O sensor magnético deste magnetômetro é envolvido por uma estrutura de polímero de vinila (PVC) que o protege das intempéries climáticas. Essa estrutura é primordialmente um tubo (104 cm de altura e 18 cm de diâmetro) e nela acompanha uma bolha de nivelamento, o sensor *fluxgate* e uma interface de comunicação com a unidade de controle e aquisição de dados (VELIZ CASTILLO, 2010b). Especificamente, o sensor *fluxgate* é uma versão antiga do sensor *Mag-03 Three-Axis Magnetic Field Sensors* fabricado pela Bartington Instruments (BARTINGTON INSTRUMENTS, 2019a; BARTINGTON INSTRUMENTS, 2019b). A resposta medida pelo sensor *fluxgate*

cobre uma faixa de  $\pm 75000$  nT a uma resolução de 0,1 nT. Contudo, o *software* de aquisição desse sensor só permite três alcances:  $\pm 250$ ,  $\pm 1000$  e  $\pm 2500$  nT. Essas faixas são suficientes para a amplitude medida da variação diurna das componentes do campo geomagnético (VELIZ CASTILLO, 2010a; DENARDINI et al., 2018a).

A hora de registro dos dados pode ser controlada pelo computador, assegurando a hora real da coleta do dado ou pelo receptor do sinal do Sistema de Posicionamento Global (GPS, do inglês *Global Positioning System*) ligado a uma antena externa. Para o caso em que se utiliza o computador associado ao sistema, a hora é corrigida por servidores de tempo internacional disponíveis na *internet* (e.g., *time.nist.gov*) a cada hora (DENARDINI et al., 2018a). Resumidamente, as principais especificações técnicas dos magnetômetros da Embrace MagNet e seus respectivos valores de operação são representados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Especificações básicas dos magnetômetros *fluxgate* da Embrace MagNet.

Descrição	Alcance/Valores
Faixa total das medidas	$\pm 75000$ nT
Faixa dinâmica, três seleções	$\pm 250$ , $\pm 1000$ e $\pm 2500$ nT
Resolução máxima	0,1 nT
Precisão	0,25%
Ortogonalidade	$< 0,5^\circ$
<i>Offset</i> a 25°C, 1 atm	$< 1$ nT
<i>Drift</i> zero	$< 0,1$ nT/°C
Temperatura de funcionamento	-20 a +75°C

Fonte: Adaptada de Denardini et al. (2018a).

## 4.2 As medidas do campo geomagnético

Os arquivos de dados dos magnetômetros da Embrace MagNet são disponibilizados no formato diferente do padrão IAGA-2002. Esses arquivos possuem três diferentes estruturas de dados. A primeira estrutura de dados consiste nas medidas em intervalos de um segundo, em arquivos digitais no formato *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII). A segunda e a terceira estruturas de dados consistem nas medidas magnéticas em intervalos de um minuto, contendo o valor médio das medidas a cada 60 segundos (i.e., média dos valores entre 00:00:00 e 00:00:59), centrada no intervalo de 30 segundos em termos de grandeza física. A segunda estrutura de dados refere-se aos valores de tensão elétrica medidos em milivolts pelas

bobinas sensoras. Já a terceira estrutura refere-se aos valores medidos da variação do campo geomagnético (VELIZ CASTILLO, 2010a).

O arquivo de dados que corresponde às medidas do campo geomagnético é referente a um dia de medidas coletadas pelos canais ( $H$ ,  $D$  e  $Z$ ). Com relação às medidas do campo geomagnético, a Figura 4.3 mostra um exemplo de dados convertidos em medidas magnéticas com a resolução temporal de um minuto. As componentes  $I$  e  $F$  do campo geomagnético são obtidas a partir das relações matemáticas entre as componentes do vetor (Equação 2.2). Esse arquivo de dados é fornecido automaticamente pelo *software* do magnetômetro e enviado em tempo real para os servidores de dados do Programa Embrace/INPE. Os dados do campo geomagnético coletados pelos magnetômetros da Embrace MagNet podem ser obtidos na página de *download* de dados do Programa Embrace/INPE (<http://www.inpe.br/climaespacial/>), mediante a um cadastro de usuário.

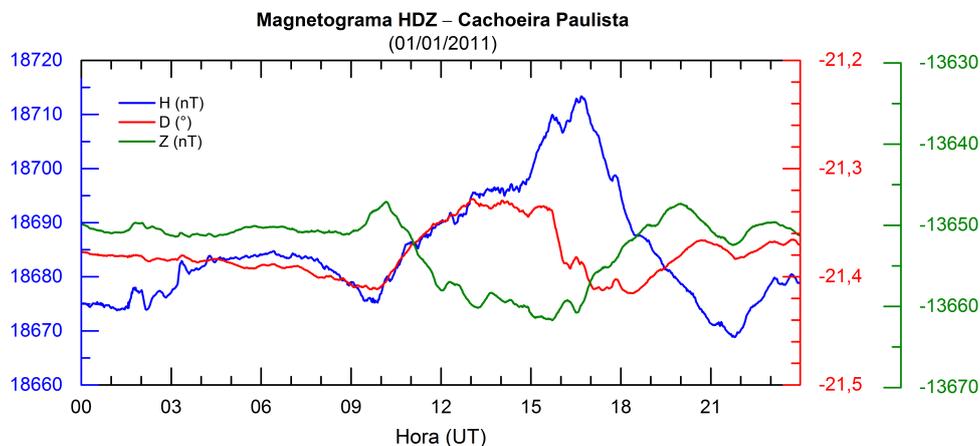
Figura 4.3 - Exemplo da estrutura dos dados de campo magnético na resolução de um minuto.

CACHOEIRA PAULISTA EMBRACE-01 <001> 1 Min. Reported data									
DD	MM	YYYY	HH	MM	D(Deg)	H(nT)	Z(nT)	I(Deg)	F(nT)
01	01	2011	00	00	-21.3768	18675.0	-13649.9	-36.1637	23131.7
01	01	2011	00	01	-21.3770	18675.0	-13649.9	-36.1637	23131.7
01	01	2011	00	02	-21.3771	18675.1	-13649.8	-36.1635	23131.7
01	01	2011	00	03	-21.3773	18675.0	-13649.9	-36.1636	23131.7
01	01	2011	00	04	-21.3773	18675.1	-13649.9	-36.1637	23131.8

Fonte: Produção do autor.

Por fim, um exemplo das medidas do campo geomagnético da Embrace MagNet é apresentado no magnetograma da Figura 4.4. O eixo vertical à esquerda, em azul, representa a componente horizontal. O eixo vertical à direita, em vermelho, representa o ângulo da declinação magnética. O eixo vertical à direita, em verde, representa a componente vertical. O eixo horizontal representa a hora no tempo universal (UT, do inglês *Universal Time*).

Figura 4.4 - Exemplo de magnetograma das componentes  $H$ ,  $D$  e  $Z$  do campo geomagnético medido em Cachoeira Paulista no dia 1 de janeiro de 2011.



Fonte: Produção do autor.

Nesta figura, pode-se observar a magnitude e a variação nas componentes  $H$  (em azul),  $D$  (em vermelho) e  $Z$  (em verde) do campo geomagnético medidas na estação magnética de Cachoeira Paulista no dia 1 de janeiro de 2011.

Nos magnetômetros variômetros da Embrace Magnet, a magnitude destas componentes do campo geomagnético (i.e., a parte do campo geomagnético atribuída ao campo principal) são representadas artificialmente com base no modelo IGRF e corresponde àquilo que chamamos de linha de base. Esta linha de base corresponde ao valor da componente do campo do geodínamo, a qual foi obtida a partir do modelo IGRF para a localização e data de instalação do magnetômetro. A variação nestas componentes do campo geomagnético são àquelas medidas pelos sensores *fluxgate* do magnetômetro.

### 4.3 Seleção dos dados magnéticos

Os dados utilizados neste trabalho são referentes à componente horizontal do campo geomagnético das 14 estações magnéticas da Embrace MagNet. O período analisado foi entre os meses de setembro de 2010 e dezembro de 2018, com uma resolução temporal de um minuto. A partir dos dados de magnetômetros foi calculada a variação diurna do campo geomagnético durante os períodos de baixa atividade geomagnética.

A primeira etapa da seleção dos dados do campo geomagnético baseia-se na lista internacional de dias magneticamente mais calmos e mais perturbados. O Centro Alemão de Pesquisas em Geociências (GFZ, do alemão *Deutsches GeoForschungs-Zentrum*), localizado em Potsdam, é responsável por fornecer a lista internacional dos 10 dias magneticamente mais calmos e os 5 dias mais perturbados todo mês. Esta lista pode ser obtida na página *online* do WDC de Kyoto, localizado no Japão (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html>). Vale mencionar que os critérios de seleção e ordenação dos dias magneticamente mais calmos e mais perturbados foram descritos no trabalho de Johnston (1943). Esses critérios são baseados no índice de atividade geomagnética  $Kp$ . A ordenação desta lista de dias é baseada no resultado de três critérios: (1) soma dos 8 valores diários do  $Kp$ , (2) somatório dos 8 valores quadráticos do  $Kp$  e (3) maior valor do  $Kp$ . De acordo com cada um desses critérios, um número de ordem relativa é atribuído a cada dia do mês, os três números de ordem relativa são calculados e os dias com menor e maior número de ordem relativa são selecionados como os dez mais silenciosos e cinco dias mais perturbados.

Neste estudo foram selecionados apenas os 5 primeiros dias da lista internacional de dias magneticamente mais calmos para cada um dos meses do período analisado. Na Tabela A.1 do Anexo estão sumarizados os dias utilizados na análise deste estudo. Com base nesta tabela, será calculada a variação diurna do campo geomagnético, caracterizada por uma representação da variação diurna de cada mês do ano, chamada de curva do dia calmo geomagneticamente (QDC). A descrição e o cálculo desta variação do campo geomagnético serão apresentados no capítulo a seguir.

Um exemplo de lista dos 5 dias magneticamente mais calmos é apresentado na Tabela 4.3. Esta tabela mostra a sequência dos 5 dias magneticamente mais calmos para cada um dos meses do ano de 2011. A sigla Qd indica o dia calmo, do inglês *Quiet day*, e o número que o acompanha indica ordenação desta lista. Isto é, Qd1 indica o dia magneticamente mais calmo do mês, Qd2 indica o segundo dia magneticamente mais calmo e assim por diante.

Tabela 4.3 - Lista dos cinco dias magneticamente mais calmos de cada mês do ano de 2011.

Ano	Mês	Dias calmos				
		Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5
2011	1	30	23	5	27	21
	2	3	9	27	13	28
	3	15	26	16	27	18
	4	27	26	10	28	16
	5	20	8	12	25	9
	6	29	3	28	19	27
	7	27	28	16	24	17
	8	31	18	19	3	21
	9	23	19	1	16	8
	10	28	29	22	14	23
	11	19	14	9	20	13
	12	27	16	26	17	6

Fonte: Adaptada de [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto \(2019\)](#).



## 5 METODOLOGIA E MODELAGEM

Neste capítulo são apresentadas as técnicas utilizadas para atingir os objetivos deste trabalho de pesquisa da dissertação de mestrado. Primeiramente, na Seção 5.1 é apresentada a metodologia do cálculo da QDC utilizando os dados da componente horizontal do campo geomagnético da Embrace MagNet. Na Seção 5.2 é apresentada uma técnica para a análise espectral da variação do campo geomagnético utilizando a transformada discreta de Fourier. Na Seção 5.3 é apresentada a metodologia para o desenvolvimento do modelo empírico.

### 5.1 Curva do dia calmo geomagneticamente (QDC)

A curva do dia calmo geomagneticamente (QDC, do inglês *Quiet Day Curve*) representa uma curva mensal da variação diurna do campo geomagnético característico de períodos geomagneticamente calmos, i.e., sem ocorrência de tempestades e subtempestades magnéticas. Esta QDC é baseada no método utilizado por Chapman e Bartels (1940a) para obter a variação diurna do campo geomagnético caracterizada pela ação da maré solar (Sq, do inglês *quiet-day solar daily variation*). De maneira semelhante ao utilizado por Chapman e Bartels (1940a), a QDC é calculada com base nos 5 dias magneticamente calmos de cada mês. Neste caso, a QDC mensal é definida como o resultado da média suavizada desses dias calmos.

Especificamente, as QDCs deste trabalho são calculadas com base no método apresentado por Denardini et al. (2018a). Neste método, é calculada a média suavizada dos dados do campo geomagnético dos 5 dias magneticamente mais calmos de cada mês para cada estação magnética da Embrace MagNet. Neste trabalho foi realizado o cálculo da QDC somente para a componente horizontal do campo geomagnético. A Equação 5.1 representa o cálculo para obter a QDC da componente horizontal do campo geomagnético.

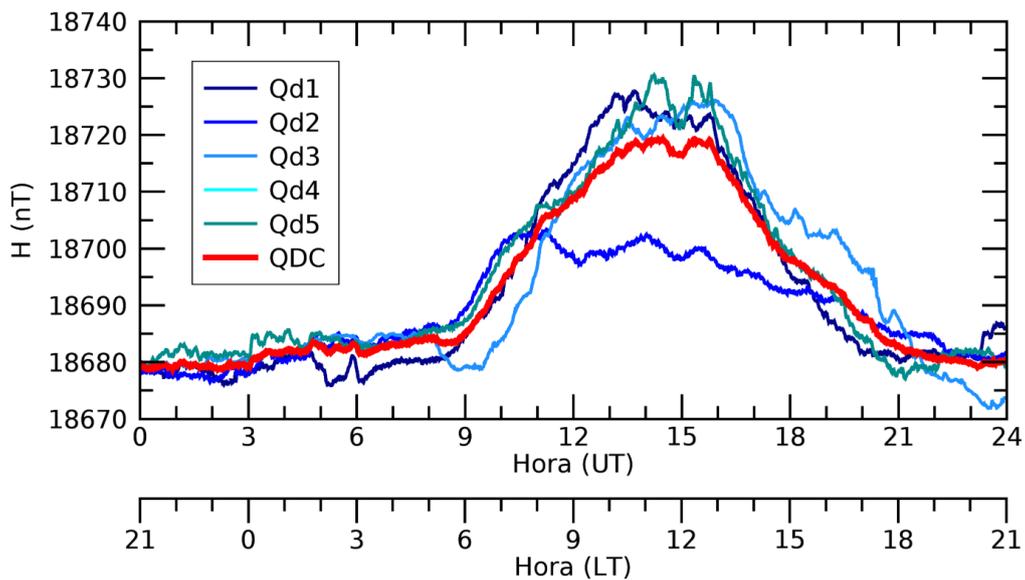
$$H_{QDC}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^5 H_{Qd_i}(t). \quad (5.1)$$

Nesta equação,  $t$  representa a hora no tempo universal em intervalos de 1 minuto (a partir das 00:00UT até às 23:59UT),  $H_{QDC}$  representa o valor médio da variação da componente horizontal do campo geomagnético (ou curva do dia calmo geomagneticamente, QDC),  $N$  representa o número de dias utilizados para calcular a média e  $H_{Qd_i}$  representa a variação diária da componente horizontal do campo geomag-

nético. O subíndice  $Qd_i$  corresponde ao dia geomagneticamente calmo indexado de 1 a 5. Em geral, o número de dias utilizados para calcular a QDC é  $N = 5$ . No entanto, esse valor pode ser menor, dependendo do mês nem todos os cinco dias calmos podem estar disponíveis para o cálculo da QDC.

A Figura 5.1 exemplifica o procedimento do cálculo da QDC da variação diária dos dias magneticamente mais calmos do mês de janeiro de 2011 da estação magnética de Cachoeira Paulista. Nesta figura, pode-se observar quatro linhas em tonalidades de azul que representam a variação diária da componente horizontal do campo geomagnético (veja os dias calmos na Tabela 4.3). A linha em vermelho representa a média horária das curvas azuis, que representa a QDC. Vale ressaltar que a variação diária do dia geomagneticamente calmo Qd4 não estava disponível para o cálculo desta QDC.

Figura 5.1 - Exemplo de variações no valor da componente horizontal do campo geomagnético em Cachoeira Paulista em janeiro de 2011 e sua correspondente QDC (ou média).

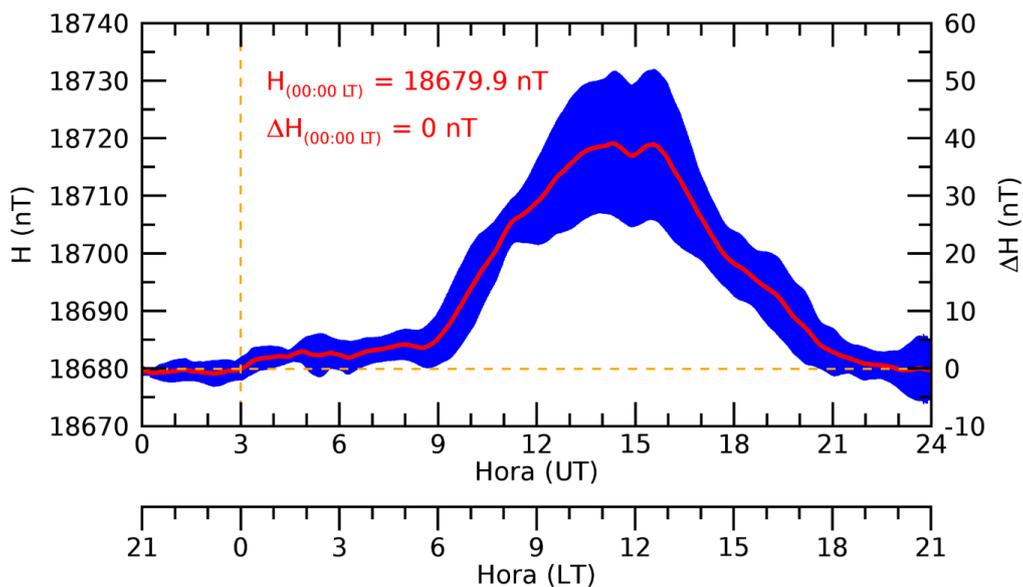


Fonte: Produção do autor.

Na etapa seguinte é aplicada uma suavização na curva da QDC (linha vermelha da Figura 5.1). A suavização aplicada nessa curva é uma média móvel baseada no método de Savitzky e Golay (1964), com uma janela de tempo de 30 minutos.

No que diz respeito às bordas inicial e final desta suavização, é realizado apenas um simples ajuste linear entre os 30 valores que sucedem o início da QDC e os 30 valores que antecedem o final da QDC. A Figura 5.2 mostra o resultado final da QDC da componente horizontal em Cachoeira Paulista para o mês de janeiro de 2011. A curva em vermelho representa a QDC suavizada e em azul está representado o desvio padrão desta QDC. O valor da componente  $H$  durante o horário da meia-noite local é de 18679,9 nT. Enquanto que o valor da  $\Delta H_{QDC}$ , desta mesma figura, durante o horário da meia-noite local é de zero nT (linha tracejada horizontal amarela). Conforme mencionado anteriormente, a linha tracejada vertical amarela indica o instante de tempo da meia-noite local.

Figura 5.2 - Exemplo da QDC, com a suavização a partir da média móvel, da componente horizontal do campo geomagnético em Cachoeira Paulista em janeiro de 2011.



Fonte: Produção do autor.

As QDCs da componente horizontal do campo geomagnético representam os valores relativos à magnitude do campo magnético principal da Terra e a sua variação diurna. A variação diurna do campo geomagnético, conforme mencionado no Capítulo 3, ocorre devido ao sistema de correntes elétricas que fluem na região E da ionosfera. A região E ionosférica é pouco aparente durante o horário noturno, uma vez que a sua principal fonte de ionização é interrompida (RISHBETH; GARRIOTT,

1969; KELLEY, 1989). Com a diminuição da densidade eletrônica, as condutividades desta região diminuem significativamente, de modo que a densidade de corrente elétrica torna-se mínima na ionosfera durante este período. Desta forma, entende-se que o valor de referência do campo magnético principal da Terra seja aproximadamente o valor do campo geomagnético observado durante o período da noite, especificamente durante o horário próximo da meia-noite no tempo local (LT, do inglês *Local Time*).

No entanto, é possível obter um valor aproximado para a amplitude da variação diurna do campo geomagnético. Neste caso, para obter esta amplitude, foi utilizada a Equação 5.2, a qual é representada pelo cálculo da QDC subtraída do valor da meia-noite local desta mesma QDC.

$$\Delta H_{QDC}(t) = H_{QDC}(t) - H_{QDC}(00:00LT). \quad (5.2)$$

Na Equação 5.2,  $t$  representa a hora no tempo universal em intervalos de 1 minuto,  $\Delta H_{QDC}$  representa a variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético,  $H_{QDC}$  corresponde à QDC, e  $H_{QDC}(00:00LT)$  corresponde ao valor da QDC durante o horário da meia-noite local (00:00LT). O resultado do gráfico da variação diurna é semelhante ao da Figura 5.2, com a escala indicada à direita. Enquanto que o valor da  $\Delta H$ , da Figura 5.2, durante o horário da meia-noite local é de zero nT (linha tracejada horizontal amarela). A linha tracejada vertical amarela indica o instante de tempo da meia-noite local.

## 5.2 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

A Transformada Discreta de Fourier (do inglês *Discrete Fourier Transform*, DFT) é uma técnica utilizada para a análise espectral de sinais no domínio da frequência. Neste trabalho utiliza-se um algoritmo que calcula eficientemente a DFT, conhecido como transformada rápida de Fourier (do inglês *Fast Fourier Transform*, FFT).

Em geral, a DFT de uma série temporal de tempo discreto ( $x_k$ ), de um número de elementos ( $N$ ), é definida pela Equação 5.3:

$$X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp \left[ -j \frac{2\pi nk}{N} \right], \quad (k = 0, 1, \dots, N-1), \quad (5.3)$$

enquanto que, a transformada inversa da DFT é definida pela Equação 5.4:

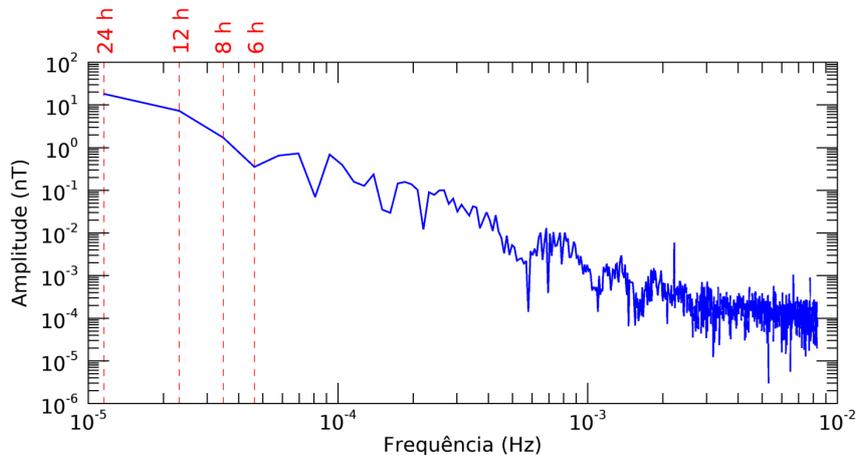
$$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp \left[ j \frac{2\pi nk}{N} \right], \quad (k = 0, 1, \dots, N - 1). \quad (5.4)$$

Os termos das Equações 5.3 e 5.4 indicam os seguintes parâmetros:  $X_n$  representa a DFT,  $n$  representa a ordem do harmônico,  $x_k$  representa a série temporal de tempo discreto e  $k$  representa o instante discreto.

A DFT permite obter as amplitudes, as frequências e os ângulos de fase que compõem a série temporal analisada. Com base nesta técnica, utilizou-se um algoritmo de FFT para calcular estes três parâmetros, a fim de determinar uma série temporal da sazonalidade e uma série temporal da variação diurna, ambas observadas nas amplitudes da variação diurna ( $\Delta H_{QDC}$ ) dos magnetômetros da Embrace MagNet.

A seguir, é apresentado um exemplo da aplicação da DFT para a obtenção dos parâmetros de amplitude, frequência e ângulo de fase da variação diurna da QDC do mês de janeiro de 2011 para a estação magnética de Cachoeira Paulista. Na Figura 5.3 é mostrado o espectro de amplitude desta QDC obtido a partir da DFT. Note que o espectro apresentado é discreto, com pontos ligados por segmentos de reta. O eixo vertical indica a amplitude do sinal e o eixo horizontal indica a frequência, dada em Hertz. As frequências ( $1,15 \times 10^{-5}$ ,  $2,31 \times 10^{-5}$ ,  $3,47 \times 10^{-5}$  e  $4,63 \times 10^{-5}$  Hz) são representadas pelas linhas verticais vermelhas. Estas frequências correspondem, respectivamente, aos seguintes períodos ( $T = 1/f$ ): 24-, 12-, 8- e 6-horas.

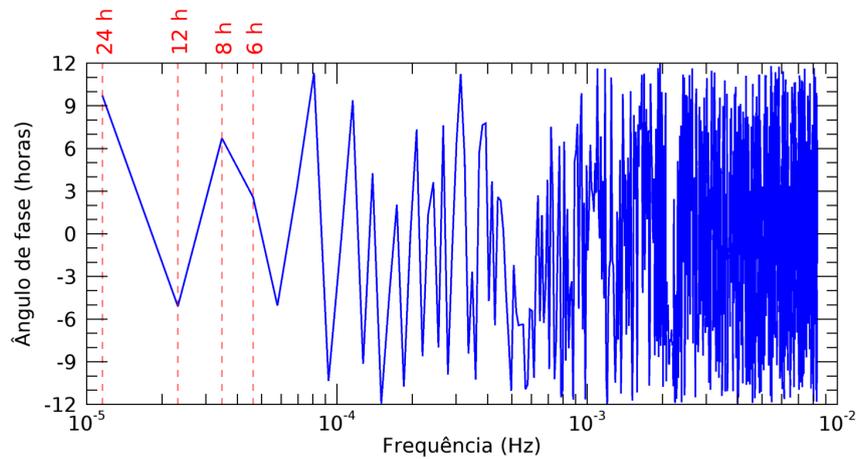
Figura 5.3 - Exemplo do espectro de amplitude da QDC da estação de Cachoeira Paulista no mês de janeiro de 2011.



Fonte: Produção do autor.

Além das amplitudes obtidas a partir da DFT, também foi possível obter os ângulos de fase do sinal deste espectro de fase (Figura 5.4). Note também que este espectro é discreto, com pontos ligados por segmentos de reta. O eixo vertical indica o ângulo de fase do sinal e o eixo horizontal indica a frequência. A linha azul representa os ângulos de fase desta QDC. As linhas verticais em vermelho, de maneira semelhante ao exemplo do espectro de amplitudes, representam as frequências de interesse desta QDC.

Figura 5.4 - Exemplo do espectro de fase da QDC da estação de Cachoeira Paulista no mês de janeiro de 2011.



Fonte: Produção do autor.

Com base no resultado obtido destes parâmetros de amplitudes, frequências e os ângulos de fase do sinal analisado, é possível reconstruir este sinal. Assim, utiliza-se da expansão série de Fourier para obter o sinal no domínio do tempo. Esta expansão em série de Fourier pode ser representada pelas Equações 5.5 ou 5.6:

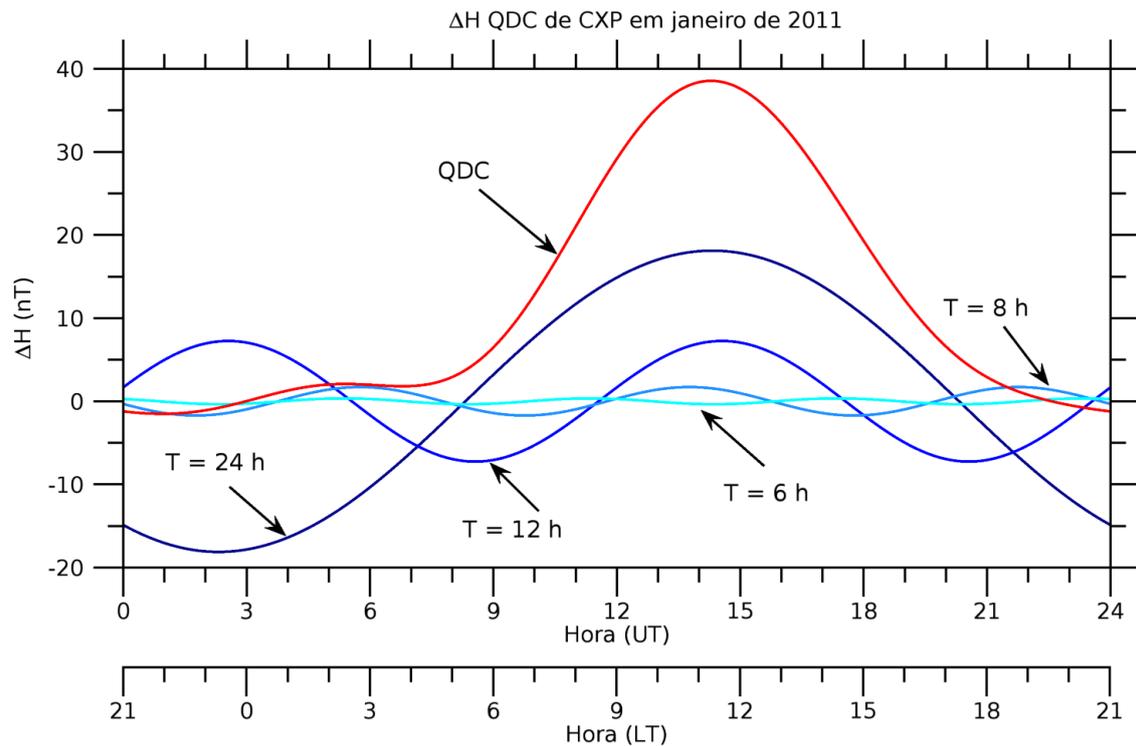
$$x_k = A_0 + \sum_{n=1}^N [A_n \cos(2\pi nk) + B_n \text{sen}(2\pi nk)], \quad (5.5)$$

$$x_k = A_0 + \sum_{n=1}^N R_n \cos(2\pi nk + \phi_n), \quad (5.6)$$

onde  $x_k$  representa a série temporal reconstruída,  $k$  representa o instante de tempo discreto,  $A_n$ ,  $B_n$  e  $R_n$  representam as amplitudes, em que  $R_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ ,  $n$  representa a ordem do harmônico de cada parâmetro e  $N$  representa o número máximo de harmônicos utilizado para a reconstrução da série temporal.

Para o mesmo mês (janeiro de 2011) em Cachoeira Paulista é apresentado um exemplo da expansão em série de Fourier na reconstrução do sinal analisado, i.e., da variação diurna da QDC (Figura 5.5). Nesta figura, é mostrada a série de Fourier dos quatro primeiros harmônicos desta série temporal. O eixo vertical e horizontal correspondem à magnitude da variação diurna da componente horizontal ( $\Delta H$ ) e à hora do dia. As quatro linhas em tonalidades de azul correspondem às componentes harmônicas da QDC, ao longo das 24 horas do dia. A linha vermelha corresponde ao sinal reconstruído da QDC de janeiro de 2011 da estação magnética utilizada.

Figura 5.5 - Exemplo das componentes harmônicas da expansão em série de Fourier da QDC da estação de Cachoeira Paulista para o mês de janeiro de 2011.



Fonte: Produção do autor.

Esta análise de Fourier foi utilizada por [Campbell \(2003\)](#) para obter a variação diurna do campo geomagnético. Esta técnica é utilizada para determinar a sazonalidade e a variação diurna das QDCs observadas nas estações magnéticas da Embrace MagNet. Esses parâmetros de sazonalidade e de variação diurna são utilizados no desenvolvimento do modelo empírico deste trabalho, a ser discutido nas seções do próximo capítulo.

### 5.3 Solar-quiet Day Curve Model (Sq-QDCM)

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do modelo empírico da curva mensal da variação diurna calma do campo geomagnético, causada pelas correntes elétricas que fluem na ionosfera. Este modelo empírico será chamado de Modelo da Curva do Dia Calmo do Sistema Sq (Sq-QDCM, do inglês *Solar-quiet Day Curve Model*). Ele é baseado nas variações geomagnéticas observadas nos dados de magnetômetros da Embrace MagNet, apenas para o território Sul-Americano. Para o modelo Sq-QDCM, as QDCs mensais são organizadas em uma longa série temporal. O modelo empírico foi desenvolvido com base em modelos obtidos a partir da análise de séries temporais e de modelos de previsão, tais como: [Box e Jenkins \(1976\)](#), [Box et al. \(1994\)](#), [Brockwell e Davis \(2002\)](#), [Morettin e Toloï \(2006\)](#), [Cryer e Chan \(2008\)](#).

A análise de séries temporais foi escolhida para o desenvolvimento deste modelo porque esta técnica permite: (a) investigar o mecanismo gerador da série temporal, (b) realizar previsões de valores futuros da série (a curto prazo, ou a longo prazo), (c) descrever o comportamento da série (i.e., verificar a existência de tendências, ciclos e variações sazonais) e (d) procurar periodicidades relevantes nos dados ([MORETTIN; TOLOI, 2006](#)).

As variações do campo geomagnético registradas por magnetômetros são exemplos de séries temporais, as quais podem ser classificadas em discretas ou contínuas. A série temporal discreta é obtida a partir da amostragem de uma série temporal contínua em intervalos de tempos iguais,  $\Delta t$ . Assim, para analisar esta série, será necessário converter a série contínua no intervalo  $[0, T]$  em uma série discreta com  $N$  pontos, onde  $N = \frac{T}{\Delta t}$ . Neste caso, pode-se representar a QDC como um único dia do mês (24 horas) amostrado-a a cada um minuto. Em outras palavras, em um intervalo  $[0, 24]$  horas com uma amostra a cada 1 minuto tem-se  $N = 24 \times 60 = 1440$  minutos e, portanto  $\Delta t = \frac{24}{1440} = 0,01667$  hora. Ao mesmo tempo, a QDC representa um mês do ano, ou seja, em um intervalo  $[0, 1]$  ano com uma amostra a cada 1 mês, tem-se  $N = 12 \times 1 = 12$  meses e  $\Delta t = \frac{1}{12} = 0,08333$  ano.

Em ambos os casos, estas séries temporais apresentam características notáveis. Entre estas características destacam-se: (1) casos em que os dados apresentam um crescimento ou declínio constante ao longo do tempo, (2) casos em que os dados podem apresentar oscilações para cima e para baixo em um período de tempo muito longo, (3) casos em que esses dados podem apresentar oscilações para cima e para baixo em um período curto a intermediário e (4) casos em que os dados podem apresentar valores inconstantes. Em qualquer uma destas situações, a série temporal pode apresentar uma ou mais destas características simultaneamente.

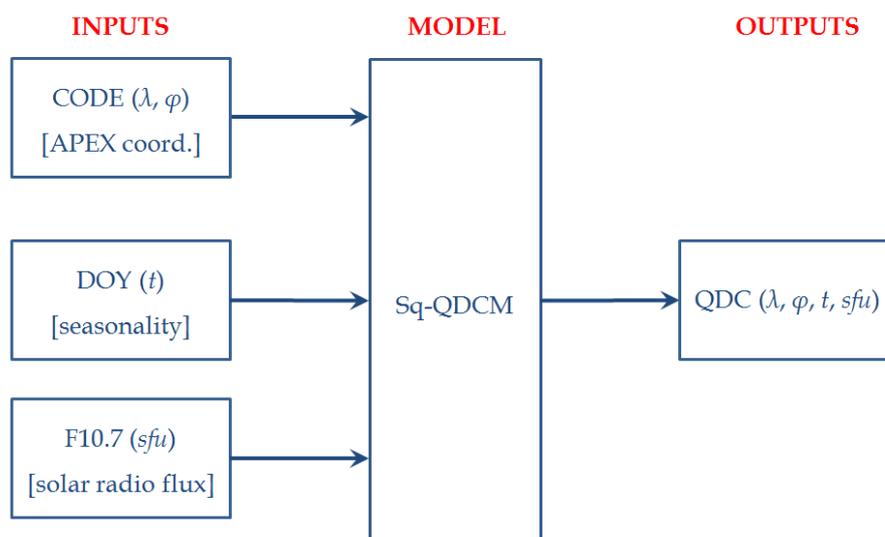
Portanto, utilizando a técnica descrita acima e nas seções anteriores, este modelo foi desenvolvido utilizando quatro parâmetros fundamentais. São eles: tendência (T), ciclo (C), sazonalidade (S) e variação diurna (D). Assim, o modelo Sq-QDCM é composto por estes quatro parâmetros, representado Equação 5.7.

$$Z_i = T_i + C_i S_i D_i, \quad (5.7)$$

onde  $Z$  representa a QDC,  $T$  representa a tendência da série,  $C$  representa a componente cíclica (i.e., fase do ciclo de atividade solar),  $S$  representa a sazonalidade e  $D$  representa a variação diurna. O subíndice  $i$  indica a identificação da estação magnética (i.e., latitude da coordenada geomagnética da estação magnética). Note que esta equação corresponde a uma função não linear, onde os termos  $Z_i$ ,  $T_i$  e  $C_i$  são dados em nanotesla e os termos  $S_i$  e  $D_i$  são adimensionais. Esses termos adimensionais do modelo são obtidos a partir de uma normalização de seus parâmetros. Em cada parâmetro normalizado, obtém-se valores relativos ou proporcionais ao campo geomagnético. O parâmetro S no modelo é ajustado pela razão do menor valor da sua série temporal. Já o parâmetro D é ajustado pela razão do maior valor da sua série temporal.

O modelo Sq-QDCM é representado pelo diagrama de blocos da Figura 5.6. Deste diagrama, as entradas do modelo são: sigla da estação magnética, a data ( $t$ ) e o fluxo de rádio solar,  $F_{10.7}$  (sfu). O bloco central deste diagrama indica o cálculo dos parâmetros para a obtenção da QDC. Por fim, no bloco de saída, o modelo deve fornecer a QDC em função dos parâmetros de entrada. O fluxograma do modelo Sq-QDCM é apresentado na Figura B.1 do Apêndice B.

Figura 5.6 - Diagrama de blocos do modelo Sq-QDCM.



Fonte: Produção do autor.

Para as coordenadas geomagnéticas, foram utilizadas as coordenadas obtidas a partir do sistema de coordenadas magnéticas de quase-dipolo (QD). Este sistema de coordenadas é muito parecido com o sistema de coordenadas Apex modificado, desenvolvido por Richmond (1995). Este sistema de coordenadas magnéticas é adotado no modelo Sq-QDCM porque é o que melhor representa a interação entre o campo geomagnético e a ionosfera terrestre. Richmond (1995) demonstra que os modelos de campo geomagnético dipolar podem causar distorções significativas nos parâmetros utilizados em modelos da eletrodinâmica da ionosfera.

O fluxo de rádio solar observado ( $F_{10.7}$ ) médio mensal é utilizado para determinar a influência da radiação solar na variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético (TAPPING; CHARROIS, 1994; TAPPING, 2013). Cada unidade de fluxo de rádio solar (sfu, do inglês *solar flux unit*) é equivalente a  $10^{-22}\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$  (ou seja,  $1\text{ sfu} = 10^{-22}\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ). Os dados de fluxo solar foram obtidos na página online do *Natural Resources Canada* (NRC) (<http://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-en.php>).

De maneira simplificada, o modelo Sq-QDCM leva em consideração duas variações da componente horizontal do campo geomagnético. A primeira corresponde à variação da magnitude do campo principal e a segunda corresponde à variação diurna causada pelas correntes elétricas ionosféricas.

Este modelo permite obter a QDC a partir da combinação destas duas variações do campo geomagnético, representada pela Equação 5.8.

$$H_{QDC,i}(t, F_{10.7}, DOY, UT) = T_i(t) + C_i(F_{10.7})S_i(DOY)D_k(UT). \quad (5.8)$$

A variação diurna causada por essas correntes elétricas (indicada pelo segundo termo da equação anterior), é representada pela Equação 5.9.

$$\Delta H_{QDC,i}(F_{10.7}, DOY, UT) = C_i(F_{10.7})S_i(DOY)D_i(UT). \quad (5.9)$$

Os termos das Equações 5.8 e 5.9 correspondem aos parâmetros de tendência ( $T$ ), ciclo de atividade solar ( $C$ ), sazonalidade ( $S$ ) e variação diurna ( $D$ ). Ainda, estes parâmetros variam conforme a estação magnética ( $i$ ), a data ( $t$ ), o fluxo de rádio solar ( $F_{10.7}$ ), o dia do ano ( $DOY$ ) e a hora do dia no tempo universal ( $UT$ ).



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões deste trabalho de pesquisa de dissertação de mestrado. Estes resultados foram divididos em três seções, da seguinte forma: (6.1) obtenção dos parâmetros do modelo, (6.2) validação do modelo e (6.3) considerações finais sobre a validação do modelo. Na Seção 6.1 são apresentadas as análises e os resultados dos parâmetros obtidos para o modelo. Estas análises foram divididas em subseções e são apresentadas em cada um dos parâmetros. Já na Seção 6.2 são apresentadas as análises para validação do modelo Sq-QDCM, subdivididas nos seguintes itens: (1) comparação direta entre os dados e o modelo, (2) análise da correlação entre os dados e o modelo, (3) variabilidade das QDCs e (4) análise espectral dos dados e do modelo. Por fim, na Seção 6.3 são apresentadas as considerações finais sobre o modelo Sq-QDCM. Estas considerações são baseadas em duas análises de extrapolação de QDCs para o modelo.

Conforme já mencionado no Capítulo 4, foram utilizados os dados da componente horizontal do campo geomagnético obtidos a partir de 14 estações magnéticas distribuídas sobre o território Sul-Americano para o período entre setembro de 2010 e dezembro de 2018. Vale ressaltar que a quantidade de dados disponíveis durante este período varia conforme cada estação magnética. As eventuais ausências de dados magnéticos ocorreram devido ao fato das diferentes datas de início de funcionamento de cada estação magnética e a manutenção destes instrumentos.

### 6.1 Determinação dos Parâmetros do modelo Sq-QDCM

#### 6.1.1 Parâmetro T devido à variação secular

Nesta subseção são apresentados os resultados da metodologia utilizada para obter o parâmetro T do modelo. Este parâmetro do modelo refere-se à magnitude do campo geomagnético devido ao campo principal. A variação secular é quantificada mediante as observações anuais da magnitude do campo principal da Terra. Portanto, este parâmetro é utilizado no modelo para determinar a magnitude do campo geomagnético baseada na taxa de variação anual observada a partir dos dados das estações magnéticas.

Para obter este parâmetro observou-se a resposta dos magnetômetros variômetros a partir da data de instalação destes equipamentos. As observações das variações do campo geomagnético mostram claramente uma tendência de diminuição da magnitude do campo geomagnético ao longo do tempo. No entanto, vale ressaltar que

a utilização de dados de observatórios magnéticos é a mais ideal para determinar com mais exatidão as variações do campo magnético principal da Terra. Contudo, a escassez de observatórios magnéticos na América do Sul, região de estudo, dificulta esta determinação da variação do campo geomagnético decorrente da variação secular. Entretanto, a abundância de estações magnéticas existentes também permite estimar a variação secular, a partir das medidas dos magnetômetros variômetros. Assim, apesar dos magnetômetros da Embrace MagNet não possuírem medidas absolutas do campo geomagnético, ainda é possível obter a taxa de decréscimo de magnitude do campo geomagnético.

Neste trabalho, as QDCs foram selecionadas para a obtenção da tendência de diminuição da magnitude do campo geomagnético, uma vez que elas representam a variação característica de períodos geomagneticamente calmos. Esta tendência é obtida a partir do ajuste linear dos valores do campo geomagnético observados durante o horário da meia-noite local de cada uma das QDCs mensais, i.e.,  $H_{QDC}(00:00LT)$ . Este ajuste linear baseia-se no método de regressão linear de Press et al. (1992). Assim, o parâmetro  $T$  é definido pela Equação 6.1:

$$T(t) = T_0 + T_1 t, \quad (6.1)$$

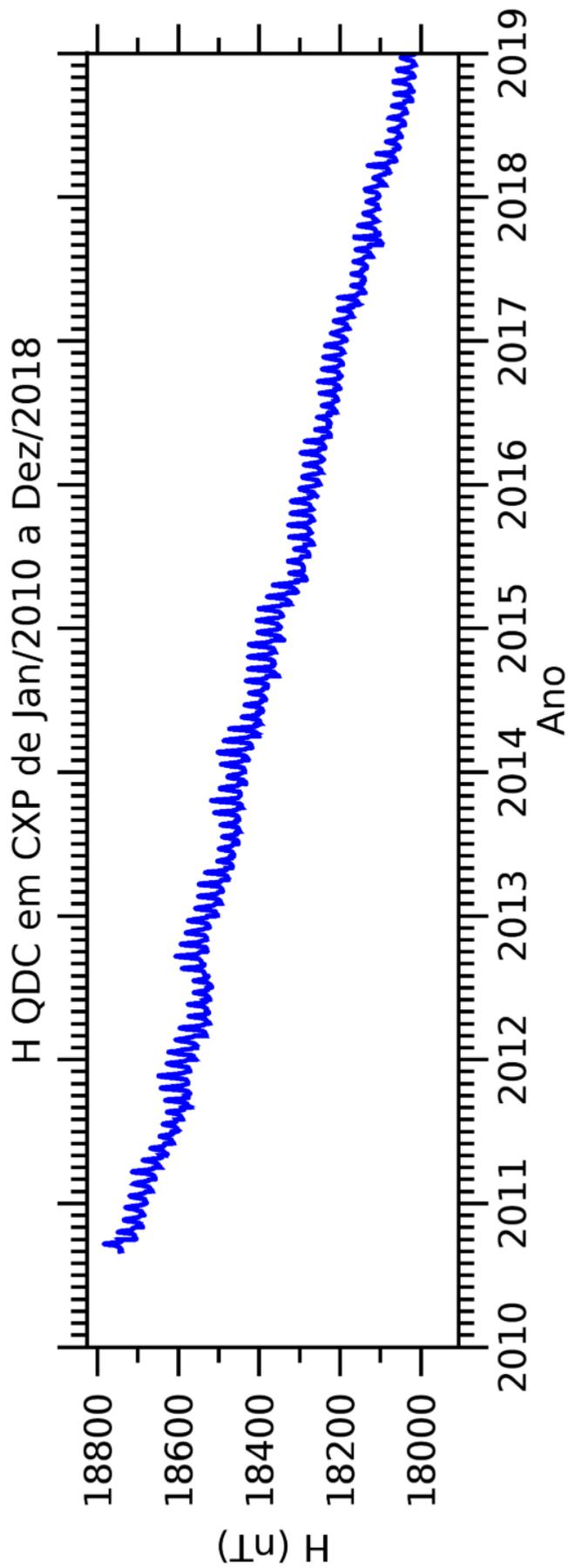
onde  $T$  representa o valor da magnitude da componente horizontal do campo geomagnético,  $T_0$  representa o coeficiente linear do ajuste,  $T_1$  representa o coeficiente angular do ajuste e  $t$  representa a data em dia juliano<sup>1</sup>.

Para exemplificar a metodologia empregada para obter o parâmetro  $T$ , foi selecionada a série temporal de QDCs (como exemplo, veja a Figura 6.1). Nesta figura é apresentada a série temporal das QDCs que foram calculadas para a estação magnética de Cachoeira Paulista. O eixo vertical indica a magnitude da componente horizontal do campo geomagnético, em nanoteslas. O eixo horizontal indica o ano e seus respectivos meses. A linha em azul representa a QDC de cada mês do ano. É possível observar o comportamento de longo prazo da magnitude do campo geomagnético. Nota-se uma tendência de diminuição contínua da magnitude da componente horizontal do campo geomagnético.

---

<sup>1</sup>O dia juliano é obtido a partir do algoritmo `julday.pro`, da linguagem de programação IDL, que é baseado algoritmo descrito Press et al. (1992), onde  $t = (365, 25 * \text{ano}) + (30, 6001 * \text{mês}) + (\text{dia}) + 1720995$ .

Figura 6.1 - Série temporal das QDCs da componente horizontal do campo geomagnético em relação à magnitude do campo geomagnético obtida para a estação de Cachoeira Paulista entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018.

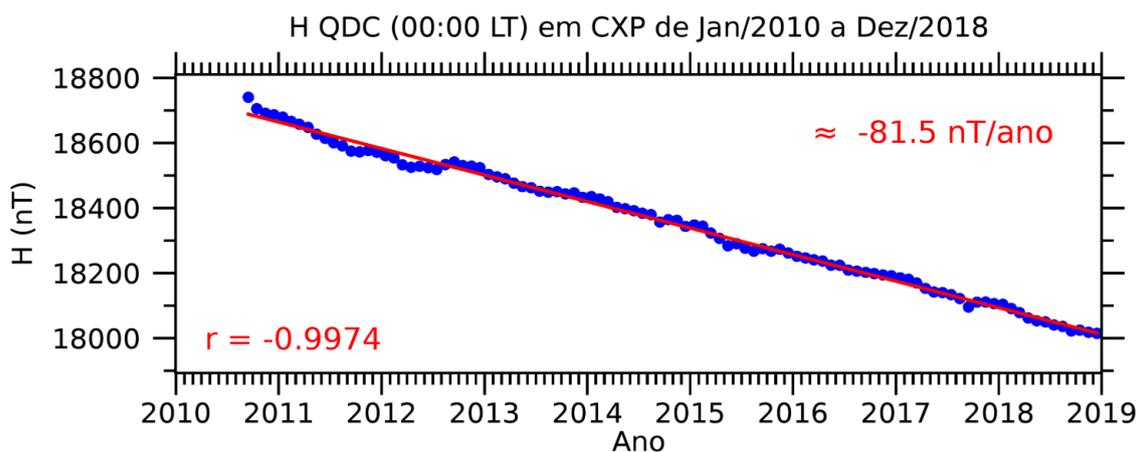


Fonte: Produção do autor.

O gráfico da Figura 6.1 foi construído para cada uma das 14 estações magnéticas magnéticas consideradas neste estudo. No Apêndice (Figura A.1) foram reunidos estes gráficos das séries temporais de QDCs em relação à magnitude da componente horizontal do campo geomagnético ( $H_{QDC}$ ). Cada painel desta figura corresponde à série temporal de QDCs da magnitude da componente horizontal do campo geomagnético. As estações magnéticas estão identificadas pelos gráficos de A a N. Em todas as estações magnéticas nota-se uma tendência de diminuição da magnitude da componente horizontal do campo geomagnético, conforme foi mostrado no exemplo para Cachoeira Paulista. Esta tendência de diminuição da magnitude da componente horizontal do campo geomagnético segue um comportamento aparentemente linear nas 14 estações magnéticas, exceto para a estação magnética de Tucumán, região norte da Argentina. Este fato pode ser creditado à erros no valor de referência do campo geomagnético nas medidas realizadas pelo magnetômetro desta estação.

Na Figura 6.2 é apresentado um exemplo do ajuste linear para a obtenção do parâmetro T em Cachoeira Paulista para os meses entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018. Conforme a figura anterior, o eixo horizontal indica o ano e seus respectivos meses. Os pontos azuis indicam os valores da magnitude do campo geomagnético durante a meia-noite, no horário local, para cada uma das QDCs mensais, i.e.,  $H_{QDC}(00:00LT)$ . A linha vermelha representa a reta ajustada da regressão linear.

Figura 6.2 - Ajuste linear da  $H_{QDC}(00:00LT)$  da estação de Cachoeira Paulista entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018.

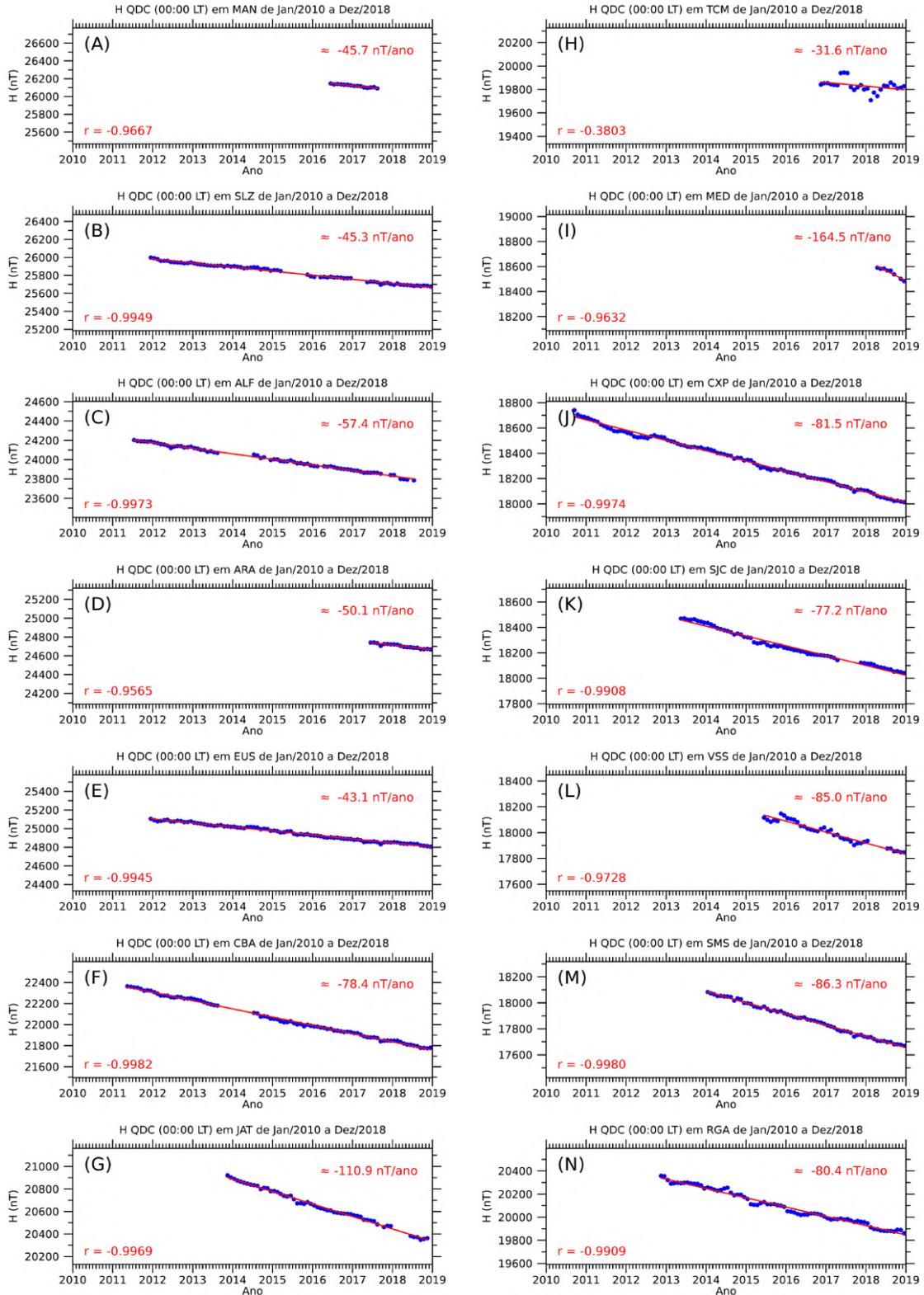


Fonte: Produção do autor.

Na análise da Figura 6.2, é possível quantificar a taxa de variação anual da magnitude da componente horizontal do campo geomagnético. Pode-se observar que o coeficiente de correlação foi muito significativo ( $r = -0,9974$ ). Este valor mostra que o ajuste realizado apresenta uma correlação muito boa. O valor negativo desta correlação indica que a magnitude da componente horizontal do campo geomagnético tem diminuído ao longo do tempo. Deste ajuste linear, a taxa de variação anual obtida para a componente horizontal do campo geomagnético foi de aproximadamente  $-81,5$  nT/ano.

Assim, com o objetivo de determinar a magnitude do campo geomagnético das estações magnética da Embrace MagNet, foi realizado o ajuste linear do valor da magnitude do campo geomagnético observado durante o horário da meia-noite local de cada uma de suas QDCs, i.e.,  $H_{QDC}(00:00LT)$  para todas as 14 estações magnéticas (Figura 6.3). As estações magnéticas estão identificadas pelos gráficos de A a N. Do mesmo modo que na Figura 6.2, os pontos azuis indicam os valores da magnitude da componente horizontal,  $H_{QDC}(00:00LT)$ , a linha vermelha indica a reta ajustada a partir dos valores de  $H_{QDC}(00:00LT)$ . Ainda, no canto inferior esquerdo encontra-se o coeficiente de correlação ( $r$ ). Já no canto superior direito destes painéis é apresentado o valor aproximado da taxa de variação anual da magnitude do campo geomagnético da referente estação magnética.

Figura 6.3 - Ajuste linear da tendência do modelo Sq-QDCM obtida para as 14 estações magnéticas da Embrace MagNet entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

Como mencionado, os resultados destes ajustes lineares mostram que os coeficientes de correlação ( $r$ ) são negativos, e indicam que a magnitude da componente horizontal do campo geomagnético,  $H_{QDC}(00:00LT)$ , decresce para todas as estações semelhante à Cachoeira Paulista. Ainda, os coeficientes  $r$  dos painéis A a N (exceto o painel H) mostram que a regressão linear apresenta uma correlação muito forte ( $r < -0,9$ ).

No caso do painel H, que corresponde a regressão linear para a estação magnética de Tucumám, os coeficientes  $r$  mostram que a correlação é fraca ( $-0,3 < r < -0,5$ ). De fato, esta correlação mostra que a magnitude da componente horizontal do campo geomagnético,  $H_{QDC}(00:00LT)$ , flutuou aproximadamente 200 nT em um período de um ano. Portanto, esta flutuação no valor da magnitude do campo geomagnético não corresponde à variação secular e deve ser corrigida. Este comportamento mostra que há a necessidade de utilizar magnetômetros absolutos para determinar o valor exato do campo geomagnético nesta estação magnética.

Os parâmetros obtidos dos ajustes lineares foram sumarizados e apresentados na Tabela 6.1. Nesta tabela foram reunidos os coeficientes do ajuste linear realizado em cada uma das estações magnéticas. A tabela é composta pela identificação da estação magnética ( $i$ ), sigla da estação magnética, os coeficientes do ajuste linear (coeficiente linear  $T_0$  e angular  $T_1$ ), coeficiente de correlação  $r$  e a taxa de variação anual da magnitude da componente horizontal do campo geomagnético ( $dH/dt$ ). Essa taxa de variação anual corresponde a diferença, ao longo de um ano, da magnitude da componente horizontal do campo geomagnético foram obtidos a partir do ajuste linear da  $H_{QDC}$  e pelo IGRF-12.

Adicionalmente, para determinar o parâmetro T do modelo, foi necessário realizar uma correção dos valores da magnitude do campo geomagnético. Esta correção baseia-se nos valores da magnitude do campo geomagnético obtidos a partir de modelos de referência do campo geomagnético. Por isso, na Tabela 6.1 são apresentados os valores da taxa de variação anual da magnitude da componente horizontal do campo geomagnético, observada no modelo IGRF-12. É possível observar que há uma diferença entre os valores observados a partir do ajuste linear e do modelo IGRF-12. Essa diferença é mais significativa nas estações B, G, H, I, K e N. No entanto, para as estações magnéticas A, C, D, E, F, J e M há uma boa concordância entre a tendência dos dados e do modelo IGRF-12.

Tabela 6.1 - Coeficientes dos ajustes lineares da tendência dos valores da  $H_{QDC}(00:00LT)$  das estações magnéticas da Embrace MagNet e estimativa da taxa de variação anual da magnitude da componente horizontal obtida pelo ajuste linear e pelo IGRF-12.

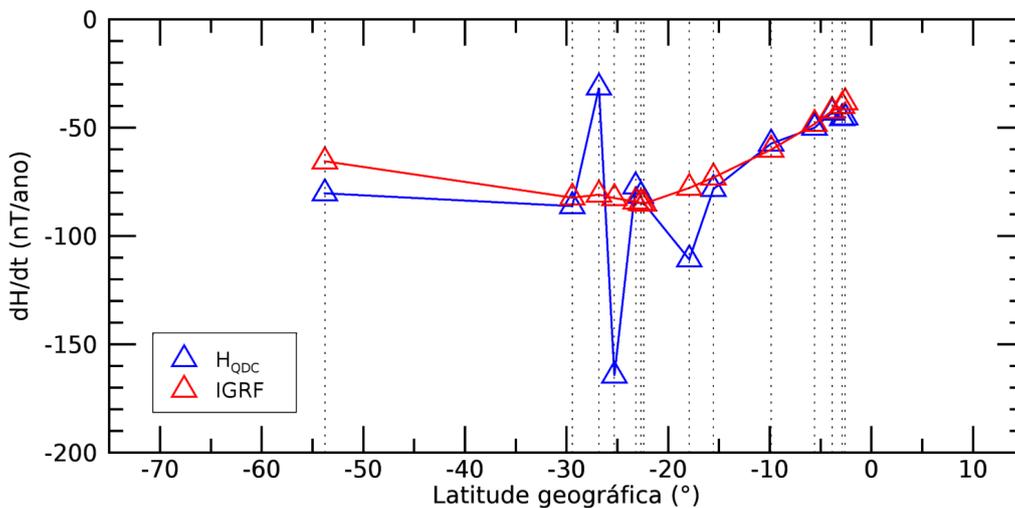
$i$	Sigla	$T_0$ (nT)	$T_1$ (nT/dia)	$r$	$dH/dt$ (nT/ano)	
					QDC	IGRF-12
A	MAN	333602,75	-0,1251	-0,9667	-45,7	-40,1
B	SLZ	331117,33	-0,1242	-0,9949	-45,3	-38,4
C	ALF	410143,02	-0,1572	-0,9973	-57,4	-60,2
D	ARA	362082,24	-0,1372	-0,9565	-50,1	-48,4
E	EUS	314979,00	-0,1180	-0,9945	-43,1	-42,4
F	CBA	549953,60	-0,2148	-0,9982	-78,4	-73,1
G	JAT	767155,28	-0,3038	-0,9969	-110,9	-77,9
H	TCM	232749,89	-0,0866	-0,3803	-31,6	-81,0
I	MED	1126548,22	-0,4507	-0,9632	-164,5	-82,6
J	CXP	566771,07	-0,2232	-0,9974	-81,5	-84,9
K	SJC	538153,29	-0,2116	-0,9908	-77,2	-84,2
L	VSS	228572,15	-0,2330	-0,9728	-85,0	-85,2
M	SMS	598808,17	-0,2364	-0,9980	-86,3	-82,4
N	RGA	561297,93	-0,2202	-0,9909	-80,4	-65,6

Fonte: Produção do autor.

É possível observar que houve uma boa concordância entre estes parâmetros para quase todas as estações magnéticas. Contudo, para as estações magnéticas G, H e I há uma discrepância significativa entre as tendências obtidas a partir das QDCs e do IGRF-12. Para as estações magnéticas H e I, referentes a Tucumán e Medianeira, este fato pode estar relacionado com os dados magnéticos. As discrepâncias observadas na estação magnética de Tucumán podem ter sido causadas pela baixa quantidade de dados magnéticos, ou alguma interferência externa próxima do local de instalação do sensor magnético, ou por algum problema no instrumento de medida. Já em Medianeira a quantidade de dados não foi tão significativa e pode, por sua vez, gerar erros no parâmetro da tendência. Não há uma explicação consolidada para a discrepância observada na estação magnética de Jataí, pois de fato houve dados suficientes para esta estação magnética. Acredita-se que a localização deste magnetômetro sofra algum tipo de influência externa, como por exemplo alguma anomalia magnética crustal ou também problemas no próprio instrumento de medida do campo geomagnético. Desse modo, para estes casos, esses dados não seriam ideais para a análise. No entanto, ainda assim, estas localidades foram consideradas nesta análise.

Para averiguar com maior visibilidade esta análise, a Figura 6.4 apresenta um gráfico da taxa de variação anual da magnitude da componente horizontal do campo geomagnético em função da latitude geográfica das estações magnéticas da Embrace MagNet. Nesta figura, o eixo vertical e horizontal indicam a taxa de variação anual da componente horizontal do campo geomagnético e a latitude geográfica, respectivamente. Os triângulos azuis correspondem aos valores das taxas de variação anual da magnitude da componente horizontal obtidos a partir dos dados da  $H_{QDC}$  em cada uma das estações magnética da Embrace MagNet. Já os triângulos vermelhos correspondem aos valores das taxas de variação anual obtida a partir do modelo IGRF-12 para a localização das mesmas estações magnéticas. Esse resultado mostra que as discrepâncias nos dados de QDC podem ser corrigidas pelo modelo IGRF. Assim, as medidas das estações magnéticas podem ser constantemente revisadas a partir do IGRF.

Figura 6.4 - Taxa de variação anual da componente horizontal do campo geomagnético em relação à latitude geográfica de cada uma das estações magnéticas da Embrace MagNet.



Fonte: Produção do autor.

O parâmetro T, portanto, é representado pela equação da reta da regressão linear dos valores da  $H_{QDC}(00:00LT)$  após a correção da taxa de variação anual a partir do modelo IGRF. Desta equação da reta, os coeficientes lineares ( $T_0$ ) e angulares ( $T_1$ ) são os parâmetros T incluídos no modelo Sq-QDCM.

### 6.1.2 Parâmetro C devido ao ciclo de atividade solar

Conforme mencionado no Capítulo 3, a densidade eletrônica da região E ionosférica é afetada pela radiação ionizante do Sol. Visto que a  $\Delta H$  é proporcional à densidade de corrente elétrica, de modo que esta densidade de corrente elétrica é proporcional à condutividade ionosférica, sendo esta proporcional à densidade eletrônica. As variações da densidade eletrônica devido ao fluxo de rádio solar tornam-se importantes para modelagem da variação diurna. Durante o ciclo de atividade solar, sabe-se que há um período de máximo e mínimo do número de manchas solares (SOLANKI, 2003). No máximo de atividade solar, o fluxo de rádio solar é maior e, conseqüentemente, a radiação ionizante que chega à Terra é maior. Este aumento da radiação ionizante na ionosfera faz com que ocorra um aumento na densidade eletrônica. Portanto, o parâmetro C é um fator importante para ser considerado no modelo.

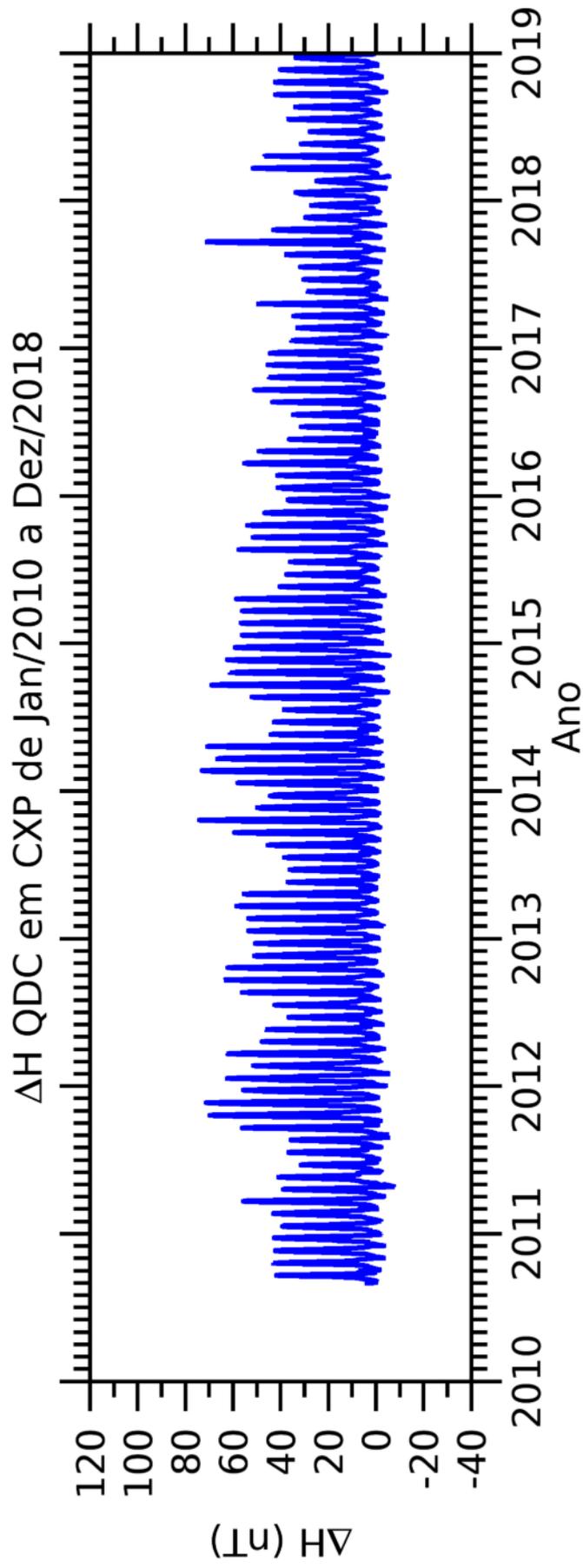
Este parâmetro C é obtido a partir do ajuste linear entre a amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético durante o horário do meio-dia local, i.e.,  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  e o respectivo valor do  $F_{10.7}$  mensal. Este ajuste linear também baseia-se no método de regressão linear de Press et al. (1992). O parâmetro C é definido a partir da Equação 6.2:

$$C(F_{10.7}) = C_0 + C_1 F_{10.7}, \quad (6.2)$$

onde  $C$  representa o valor da amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético,  $C_0$  representa o coeficiente linear do ajuste,  $C_1$  representa o coeficiente angular do ajuste e  $F_{10.7}$  representa o valor do fluxo de rádio solar mensal.

Para exemplificar a metodologia empregada para obter o parâmetro C, foi selecionado um exemplo gráfico da série temporal da variação diurna das QDCs, apresentada na Figura 6.5. Nesta figura é apresentada a série temporal da variação diurna das QDCs calculadas para a estação magnética de Cachoeira Paulista ( $\Delta H_{QDC}$ ). O eixo vertical indica a amplitude da componente horizontal do campo geomagnético. O eixo horizontal indica o ano e seus respectivos meses. A linha azul representa a série temporal de QDCs mensais.

Figura 6.5 - Série temporal da  $\Delta H_{QDC}$  da estação de Cachoeira Paulista entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

Neste exemplo, pode-se observar o comportamento de longo prazo da amplitude máxima da variação diurna do campo geomagnético. De fato, é possível observar que os valores máximos de cada QDC da componente horizontal do campo geomagnético ( $\Delta H_{QDC}$ ) oscila entre valores de, aproximadamente, 40 a 70 nT ao longo dos anos. Estas oscilações na amplitude máxima da variação diurna estão relacionadas com o ciclo de atividade solar, uma vez que a densidade eletrônica da ionosfera está diretamente associada com a radiação ionizante proveniente do Sol.

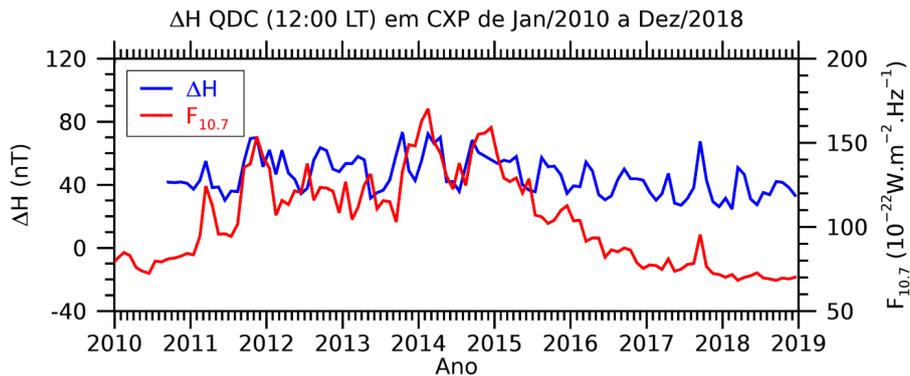
O gráfico da Figura 6.5 foi desenvolvido para cada uma das 14 estações magnéticas de maneira semelhante ao que foi apresentado na Figura 6.1 para o parâmetro T. Na Figura A.2 do Apêndice estão reunidos os gráficos das séries temporais da amplitude da variação diurna das QDCs da componente horizontal do campo geomagnético ( $\Delta H_{QDC}$ ). Cada painel desta figura corresponde à série temporal da  $\Delta H_{QDC}$  de uma das estações magnéticas da Embrace MagNet. Desta figura, pode-se observar que a amplitude máxima da  $\Delta H_{QDC}(12:00\text{LT})$  de todas as estações magnéticas oscila de modo semelhante aos resultados observados em Cachoeira Paulista. O valor máximo das oscilações da  $\Delta H_{QDC}$  está relacionado com o ciclo de atividade solar. No entanto, os valores dessas amplitudes são diferentes em cada estação magnética devido à distribuição geográfica de cada uma delas.

Na Figura 6.6 é apresentado um exemplo das séries temporais da  $\Delta H_{QDC}(12:00\text{LT})$  da estação de Cachoeira Paulista e o  $F_{10.7}$  mensal. Os valores da  $\Delta H_{QDC}(12:00\text{LT})$  são indicados pela linha azul e os valores do  $F_{10.7}$  mensal são indicados pela linha vermelha. Nesta figura, o eixo vertical à esquerda indica a amplitude da variação diurna ( $\Delta H_{QDC}$ ). Já o eixo vertical à direita indica o fluxo de rádio solar ( $F_{10.7}$ ). Por fim, o eixo horizontal indica o ano e seus respectivos meses.

Nesta figura, em geral, observa-se uma boa concordância entre estes parâmetros. De fato, as variações nas correntes Sq que alteram a curva do dia calmo da componente  $H$  do campo geomagnético são geralmente devidas aos ventos neutros, densidade do plasma, a condutividade ionosférica e a atividade solar (YAMAZAKI; KOSCH, 2014). Especificamente, é bem conhecido que o aumento na variação das correntes Sq está relacionado com a atividade solar (CHAPMAN; BARTELS, 1940a). Takeda (1999) afirma que a magnitude da variação diurna dos sistemas de correntes Sq durante o máximo de atividade solar é duas vezes maior que durante o mínimo de atividade solar. Este fato é claramente observado na  $\Delta H_{QDC}$  de Cachoeira Paulista e nas outras estações magnéticas (vide Figura A.3 do Apêndice). A dependência da variação da componente  $H$ , i.e.  $\Delta H_{QDC}$ , com a atividade solar, vista pelo parâmetro

$F_{10.7}$ , é devida ao aumento de condutividade ionosférica durante o seu máximo, o que resulta no aumento das correntes ionosféricas (TAKEDA et al., 2003).

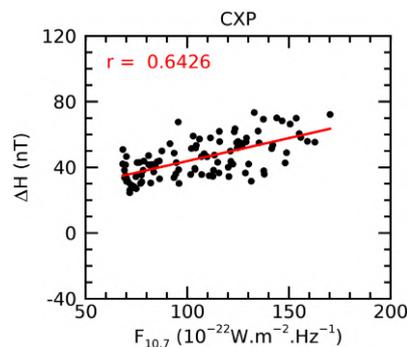
Figura 6.6 - Série temporal da amplitude da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  da estação de Cachoeira Paulista e o respectivo valor do  $F_{10.7}$  mensal entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

Para averiguar melhor essa relação foi realizada uma correlação linear, a partir do método de regressão linear (Figura 6.7). Esta figura representa o gráfico de dispersão dos valores da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  e do  $F_{10.7}$  mensal e o respectivo ajuste linear (linha vermelha). O eixo vertical indica a amplitude da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  e o eixo horizontal indica o  $F_{10.7}$ . No canto superior esquerdo desta figura, está indicado o coeficiente de correlação ( $r$ ).

Figura 6.7 - Dispersão da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  da estação magnética de Cachoeira Paulista e o respectivo valor do  $F_{10.7}$  mensal entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

Pode-se observar que esta correlação linear apresentou um coeficiente de correlação equivalente a  $r = 0,6426$ . Este valor de coeficiente indica que a correlação entre o  $\Delta H_{QDC}(12:00\text{LT})$  e o  $F_{10.7}$  é satisfatório, embora não seja possível determinar que exista uma relação linear entre estas variáveis. No entanto, o comportamento entre estas duas variáveis mostrou uma relação, ainda que não seja linear. Por isso, este parâmetro foi considerado no modelo.

Conforme já foi mencionado, este mesmo comportamento de relação entre estas variáveis foi observado para as outras estações magnéticas que estão sendo trabalhadas neste estudo (Figura A.3 do Apêndice ). Os gráficos de correlação também foram analisados e são apresentados na Figura A.4 do Apêndice . Em todas as estações, as correlações não apresentaram uma correlação linear muito satisfatória. Isso significa que a amplitude da variação diurna não está linearmente correlacionada com o fluxo de rádio solar, conforme observado nos trabalhos de Yamazaki et al. (2011) e Shinbori et al. (2014). Portanto, somente o comportamento da variação diurna da  $\Delta H_{QDC}$  está relacionada com a variação do ciclo de atividade solar, conforme descrito por Yamazaki e Kosch (2014).

Nesta análise do parâmetro C, as correlações entre a  $\Delta H_{QDC}(12:00\text{LT})$  com o  $F_{10.7}$  para as estações magnéticas de Manaus, Araguatins, Tucumán e Medianeira, foram realizadas para períodos inferiores a três anos de dados. Assim, como a amostra de dados destas estações magnéticas é muito pequena, as suas correlações foram restritas apenas ao período de mínimo no ciclo de atividade solar do ciclo solar 24.

Nos painéis A a M (exceto o painel I), da Figura A.4 do Apêndice , as regressões lineares apresentam coeficientes de correlação positivos, i.e.,  $r > 0$ . Este fato significa que na medida que o fluxo de rádio solar aumenta, a amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético observada durante o horário do meio-dia local também aumenta. Já nos painéis I e N, que correspondem aos gráficos das regressões lineares das estações magnéticas de Medianeira e Rio Grande, as correlações lineares foram negativas ( $r < 0$ ). Portanto, quando o fluxo de rádio solar aumenta, a amplitude da variação diurna diminui. A variação diurna negativa não é esperada para a estação magnética de Medianeira, uma vez que esta estação magnética encontra-se acima do centro do vórtice sul do sistema de correntes elétricas Sq do Hemisfério Sul. Já para a estação magnética de Rio Grande esse comportamento é esperado, uma vez que esta estação magnética encontra-se mais ao sul do centro do vórtice. Esse comportamento anômalo em Medianeira foi atribuído à incoerência da correlação linear entre a  $\Delta H_{QDC}(12:00\text{LT})$  e o  $F_{10.7}$  devido à baixa amostragem

de dados. Nesta estação magnética, só foram utilizados 9 meses de dados. Portanto, esta correlação pode ser melhorada na medida em que a amostragem de dados for maior, uma vez que se sabe que a atividade solar varia com uma periodicidade de aproximadamente 11 anos.

Os resultados dos ajustes lineares da Figura A.4 do Apêndice foram sumarizados e apresentados na Tabela 6.2. Nesta tabela foram reunidos os coeficientes do ajuste linear realizado em cada uma das 14 estações magnéticas da Embrace MagNet. A tabela é composta pela identificação da estação magnética ( $i$ ), a sigla da estação magnética, os coeficientes do ajuste linear (coeficiente linear  $C_0$  e angular  $C_1$ ) e o coeficiente de correlação ( $r$ ).

Os coeficientes  $C_0$  e  $C_1$  referem-se aos coeficientes lineares e angulares da Equação 6.2 e serão incluídos como os parâmetros da variação do ciclo de atividade solar para o modelo Sq-QDCM. Neste parâmetro C do modelo Sq-QDCM, os coeficientes  $C_0$  e  $C_1$  indicam os valores residuais da variação diurna e a taxa de variação da magnitude da variação diurna da componente horizontal por unidade de fluxo de rádio solar.

Tabela 6.2 - Coeficientes dos ajustes lineares entre a  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  das estações magnéticas da Embrace MagNet e o  $F_{10.7}$  mensal e o respectivo coeficiente de correlação.

$i$	Sigla	$C_0$ (nT)	$C_1$ (nT/sfu)	$r$
A	MAN	-7,17	0,8032	0,5279
B	SLZ	23,85	0,2719	0,6760
C	ALF	21,21	0,4119	0,5873
D	ARA	-6,27	0,7425	0,4558
E	EUS	33,77	0,1941	0,5181
F	CBA	27,04	0,3191	0,6400
G	JAT	16,51	0,3574	0,7085
H	TCM	-20,81	0,7121	0,5248
I	MED	175,01	-2,0516	-0,4652
J	CXP	15,83	0,2799	0,6426
K	SJC	14,07	0,2301	0,6007
L	VSS	14,25	0,2669	0,4206
M	SMS	6,96	0,2589	0,7105
N	RGA	-5,35	-0,0880	-0,2961

Fonte: Produção do autor.

Acredita-se que o comportamento similar entre estas variáveis é uma boa justificativa para a inclusão deste parâmetro no modelo. Além disso, o fator prejudicial neste estudo foi a quantidade de dados inferior a 11 anos para a maioria das estações magnéticas (vide Figura A.3 do Apêndice ). Este fato é comprovado pela correlação ser mais significativa em Cachoeira Paulista. Portanto, considerando que esta metodologia é bem aceita e visto que em Cachoeira Paulista houve uma correlação satisfatória, este parâmetro é considerado confiável para ser incluído no modelo.

### 6.1.3 Parâmetro S devido à sazonalidade

Nesta subseção são apresentados os resultados da metodologia utilizada para obter o parâmetro S do modelo. O parâmetro S do modelo Sq-QDCM refere-se à sazonalidade observada na amplitude da variação diurna da QDC, que está relacionado à maré atmosférica anual e seus harmônicos. Ele é obtido a partir da análise espectral da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético em relação aos meses do ano. Para obter este parâmetro, foram analisadas as amplitudes da variação diurna das QDCs, mês a mês, durante o meio-dia local, i.e.,  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$ .

Primeiramente, foi construída uma série temporal de um ano com a superposição de todos os valores de amplitudes da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  em relação à cada mês do ano. Em seguida, foi calculada a média simples de todos os valores de  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  de seus respectivos meses do ano. Por fim, foi aplicada a DFT nesta série temporal média, a fim de obter os parâmetros de amplitudes, frequências e os ângulos de fase para a modelagem do parâmetro da sazonalidade. Neste caso, foram selecionados todos os harmônicos desta série. O parâmetro S é definido por uma expansão em série de Fourier descrita a partir da Equação 6.3:

$$S(DOY) = S_0 + \sum_{n=1}^6 S_n \cos\left(\frac{2\pi n}{365} DOY + \phi_n\right), \quad (6.3)$$

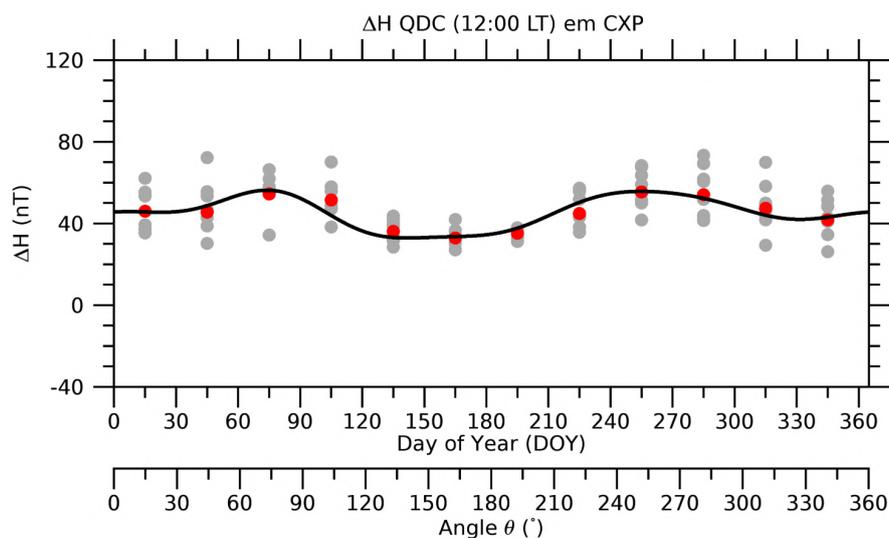
onde  $S$  representa o valor da amplitude da variação da componente horizontal do campo geomagnético observado durante o horário do meio-dia local, i.e.,  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$ ,  $DOY$  representa o dia do ano,  $S_n$  representam as amplitudes da sazonalidade,  $\phi_n$  representam os ângulos de fase e  $n$  representa a ordem dos harmônicos de cada parâmetro da série.

Para exemplificar a metodologia utilizada para obter o parâmetro S, foi selecionado um exemplo gráfico para a estação magnética de Cachoeira Paulista. Este exemplo é representado na Figura 6.8. Neste gráfico foi realizada a superposição dos valores

de  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  para cada uma das QDCs entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018 representados pelos pontos cinzas. Estes valores foram superpostos em uma série temporal equivalente a um ano. Em seguida, foi calculado um valor médio da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  para cada mês desta série temporal, identificado pelos pontos vermelhos. Por fim, foi aplicada a DFT nesta série temporal, com um intervalo de amostra  $\Delta t = 0,0833$  ano (equivalente a 1 mês por ano). O eixo vertical indica a amplitude da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  e o eixo horizontal indica o dia do ano. A linha preta indica a curva da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  ajustada a partir da expansão em série de Fourier. Os coeficientes de cada harmônico desta expansão em série de Fourier são sumarizados na Tabela 6.3.

Desta figura, pode-se observar que a curva ajustada da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  apresenta valores maiores durante os dias 75 e 255 e valores menores entre os dias 135 e 195. É possível notar que existe uma variação ao longo de uma série anual, a qual é atribuída à sazonalidade. No entanto, a variação da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  ao longo período entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018 também está relacionada ao ciclo de atividade solar 24. A relação com o ciclo de atividade solar corresponde à dispersão dos pontos cinzas, indicando portanto a influência da atividade solar na sazonalidade observada na variação diurna do campo geomagnético.

Figura 6.8 - Séries temporais da amplitude da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  da estação de Cachoeira Paulista (entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018, em cinza), valor médio da amplitude da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  (em vermelho) e a respectiva curva anual ajustada (em preto).



Fonte: Produção do autor.

Tabela 6.3 - Coeficientes de amplitudes e de ângulos de fase dos harmônicos da expansão em série de Fourier do parâmetro de sazonalidade da estação magnética de Cachoeira Paulista.

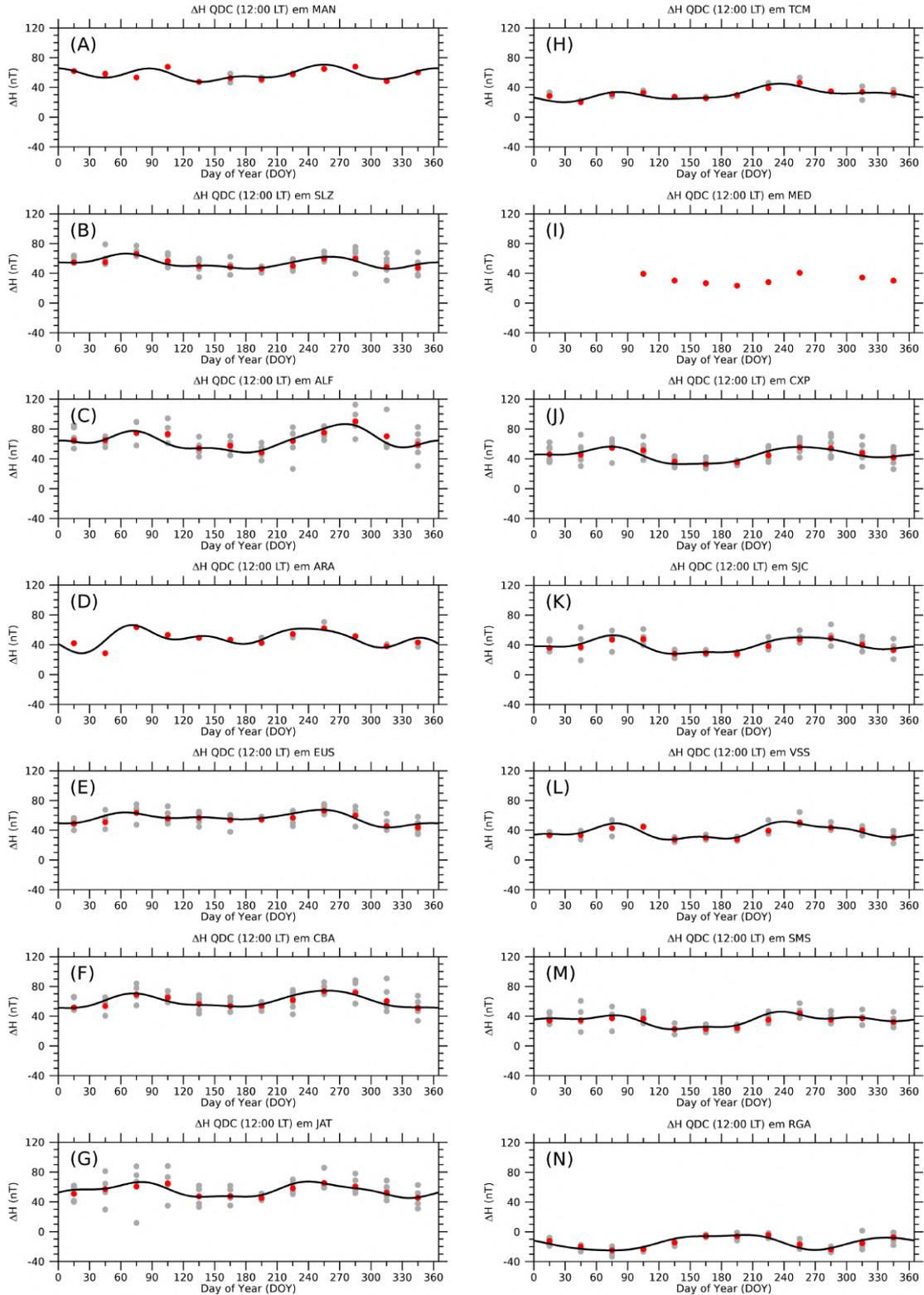
	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$
$S_n$ (nT)	64,20	4,97	8,84	0,95	1,97	1,43	0,47
$\phi_n$ (rad)	-	0,6197	-2,3852	1,4840	0,8880	-0,4710	0

Fonte: Produção do autor.

A Figura 6.9 apresenta a curva da amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético observada durante o horário do meio-dia local,  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$ , ao longo dos 365 dias do ano para as estações magnéticas de A a N. Como na Figura 6.8, os pontos cinzas indicam as amplitudes registradas em cada um dos meses, os pontos vermelhos indicam os valores médios mensais da amplitude da variação diurna e a linha preta indica a curva da variação diurna  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  ajustada a partir da expansão em série de Fourier.

Para todas as estações magnéticas, foi possível obter a curva da sazonalidade das variações diurnas da componente horizontal do campo geomagnético,  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$ , ao longo dos dias do ano, exceto para a estação magnética de Medianeira. Este fato foi devido a série temporal de dados ser inferior a 1 ano, de modo que não é possível estimar uma curva de sazonalidade nesta localidade. Nos demais painéis, a curva ajustada da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  apresenta valores maiores de amplitude próximos dos dias 75 e 255 e valores menores de amplitude entre os dias 135 e 195.

Figura 6.9 - Sazonalidade da componente horizontal do campo geomagnético das estações magnéticas da Embrace MagNet entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

Neste caso, os maiores valores de amplitude foram observados durante o período dos equinócios de março e de setembro. Enquanto os menores valores de amplitude foram observados durante o período de solstício de inverno do Hemisfério Sul. No painel N, que corresponde ao gráfico da sazonalidade da estação magnética de Rio Grande, a curva da sazonalidade é invertida em relação às demais curvas de sazonalidade. Essa inversão corresponde ao fato de que esta estação magnética encontra-se localizada abaixo do centro do vórtice do sistema de correntes Sq do Hemisfério Sul, conforme discutido anteriormente no ajuste do parâmetro C desta estação magnética.

Kane (1976) mostra que a variação diurna, a qual é referida neste trabalho como  $\Delta H_{QDC}$ , tem uma variação semianual com valores máximos nos equinócios. Recentemente, Yamazaki et al. (2017) mostraram que a região próxima do equador magnético possui uma variação semianual bem definida, devido a alta condutividade nesta região. Campbell (1989b) mostra que além da alta condutividade, os ventos de maré na região E ionosférica possuem um papel importante no dínamo ionosférico. De fato, em nossos resultados, as estações magnéticas de São Luís (B) e Alta Floresta (C), as mais próximas do equador magnético, mostraram uma variação semianual bem definida. Acredita-se que, estas estações magnéticas possam sofrer influência da corrente elétrica do EEJ, uma vez que estão mais próximas do equador magnético. Portanto, devido à configuração do sistema de correntes Sq e a alta condutividade nesta região (i.e., a presença da condutividade Cowling,  $\sigma_3$ ), este comportamento pode ser intensificado. Contudo, em baixas latitudes também há um pico nas condutividades Pedersen e Hall (Figura 3.2 do Capítulo 3), o qual justifica esse comportamento semianual observado para as estações magnéticas de baixas latitudes.

As componentes de marés também tem um papel importante na variação sazonal, uma vez que são as principais responsáveis no dínamo da região E ionosférica (BANKS; KOCKARTS, 1973a). Resende et al. (2017) analisaram a influência das componentes de marés na formação de camadas de adensamentos localizadas na região E ionosférica, camadas Es, para as regiões de baixas latitudes. Os resultados destes autores mostraram que tanto a maré diurna quanto a maré semidiurna possuem valores maiores de amplitude durante os equinócios. Batista et al. (2004) mostraram que durante os equinócios, estas componentes de marés diurna e semidiurna para Cachoeira Paulista possuem uma variabilidade bem definida caracterizada por máximos de amplitudes nos equinócios. Assim, diante da boa concordância destes resultados com trabalhos anteriores, a sazonalidade da amplitude da variação diurna da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  pode ser considerada no modelo Sq-QDCM.

O parâmetro S do modelo Sq-QDCM é normalizado a partir da razão entre a série de Fourier ajustada (Equação 6.3) e o seu menor valor. Esta normalização resulta em um valor percentual da  $\Delta H_{QDC}(12 : 00LT)$ . Assim, o parâmetro  $S$  foi incluído no modelo Sq-QDCM a fim de avaliar a sazonalidade.

#### 6.1.4 Parâmetro D devido às componentes de marés

O parâmetro D do modelo Sq-QDCM refere-se à variação diurna do campo geomagnético,  $\Delta H_{QDC}$ , em relação à maré atmosférica diurna e seus harmônicos. O parâmetro D determina a amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético em relação às marés atmosféricas diurna, semidiurna, terdiurna e quarterdiurna (cujos períodos são: 24-, 12-, 8- e 6-horas, respectivamente).

Este parâmetro D é obtido a partir da análise espectral da variação diurna da  $\Delta H_{QDC}$  de cada estação magnética da Embrace MagNet. Para obter este parâmetro foi analisada a variação diurna das QDCs ( $\Delta H_{QDC}$ ), mês a mês, ao longo de uma série anual de um ano. Primeiramente, foi construída uma curva média com todas as amplitudes da  $\Delta H_{QDC}$  para cada mês do ano, numa série temporal de 1 dia, a partir da superposição da variação diurna de todas as QDCs ( $\Delta H_{QDC}$ ) referentes aos meses de janeiro, fevereiro, março e assim por diante. Em seguida, foi calculada a média simples de todos os valores de  $\Delta H_{QDC}$  para os respectivos meses. Por fim, a partir da DFT apresentada na Seção 5.2, foram analisadas as amplitudes, as frequências e os ângulos de fase da variação diurna. Neste caso, foram selecionadas apenas os harmônicos de 1 dia, i.e., diurna, semidiurna, terdiurna e quarterdiurna. O parâmetro D é definido a partir da Equação 6.4:

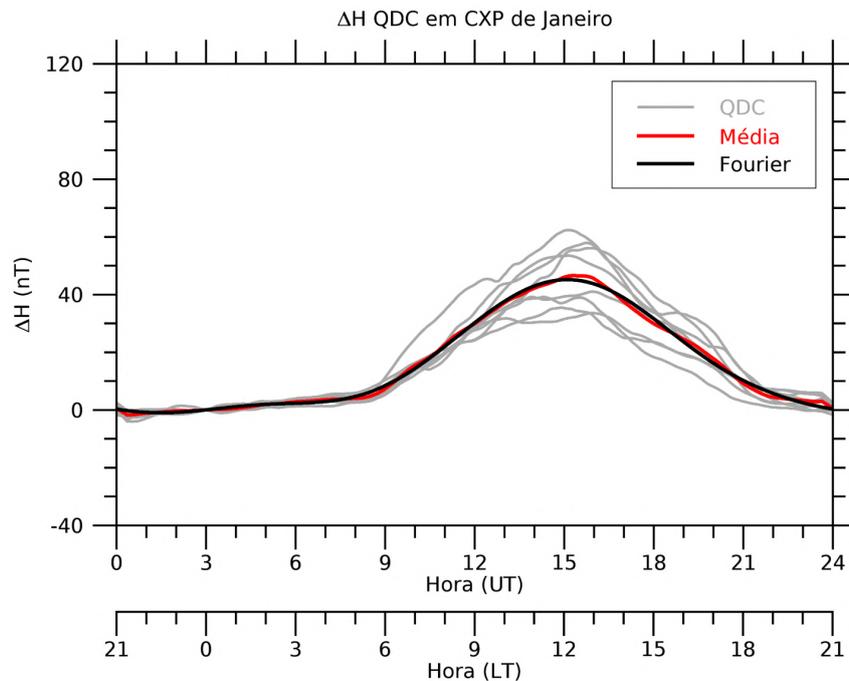
$$D(m, UT) = D_{m,0} + \sum_{n=1}^4 D_{m,n} \cos(2\pi f_n UT + \phi_{m,n}), \quad (m = 1, 2, \dots, 12) \quad (6.4)$$

onde  $D$  representa o valor da amplitude da variação da componente horizontal do campo geomagnético, i.e.,  $\Delta H_{QDC}$ ,  $UT$  representa a hora do dia no tempo universal (em hora decimal),  $m$  corresponde ao mês do ano,  $n$  representa a ordem dos harmônicos fundamentais,  $D_{m,n}$  representam as amplitudes da variação diurna,  $f_n$  representam as frequências fundamentais de cada harmônico da variação diurna (i.e.,  $1, 15 \times 10^{-5}$ ,  $2, 31 \times 10^{-5}$ ,  $3, 47 \times 10^{-5}$  e  $4, 63 \times 10^{-5}$  Hz) e  $\phi_{m,n}$  representam os ângulos de fase.

Para exemplificar a metodologia utilizada para obter o parâmetro D, foi selecionado um exemplo gráfico para o mês de janeiro da estação magnética de Cachoeira Paulista (Figura 6.10). Neste gráfico foi realizada a superposição de todas as QDCs dos meses de janeiro, i.e.,  $\Delta H_{QDC}$ . Estas QDCs foram superpostas em uma série temporal equivalente a um dia de dados. Em seguida, foi calculada uma curva média da  $\Delta H_{QDC}$  para este mês de janeiro. Por fim, foi aplicada a DFT nesta série temporal, com um intervalo de amostra  $\Delta t = 0,01667$  hora (equivalente a 1 minuto por dia) e obtida a QDC ajustada para o mês de janeiro. As linhas cinzas indicam os valores mensais da  $\Delta H_{QDC}$ , a linha vermelha indicam os valores médios dos  $\Delta H_{QDC}$  e a linha preta indica a curva da  $\Delta H_{QDC}$  ajustada a partir da expansão em série de Fourier.

Todos os coeficientes da expansão em série de Fourier (de janeiro a dezembro) da estação magnética de Cachoeira Paulista são sumarizados na Tabela 6.4. Note que, os coeficientes de cada harmônico da Figura 6.10 correspondem à primeira linha desta tabela ( $m = 1$ ).

Figura 6.10 - Séries temporais da amplitude da  $\Delta H_{QDC}$  da estação de Cachoeira Paulista nos meses de janeiro (linha cinza), curva média da amplitude da  $\Delta H_{QDC}$  (linha vermelha) e a respectiva curva ajustada para o mês de janeiro (linha preta).



Fonte: Produção do autor.

Tabela 6.4 - Coeficientes de amplitudes e de ângulos de fase dos harmônicos da expansão em série de Fourier do parâmetro de variação diurna da estação magnética de Cachoeira Paulista.

$m$	$D_{m,n}$ (nT)					$\phi_{m,n}$ (rad)			
	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
1	22,62	21,75	6,69	0,99	0,28	2,3421	-1,6970	1,3943	1,2812
2	20,36	21,01	7,88	1,98	0,64	2,3332	-1,8382	0,6425	2,5634
3	22,14	23,04	11,08	4,56	1,06	2,3054	-1,7379	0,6308	2,6628
4	18,68	19,94	10,38	5,22	1,51	2,5461	-1,3680	0,9665	2,8878
5	14,75	14,37	7,06	4,30	1,13	2,5539	-1,0234	1,3644	3,0756
6	13,34	13,57	6,29	3,41	0,98	2,5678	-1,1167	1,3461	2,9225
7	15,95	14,62	5,87	3,54	0,73	2,4299	-1,2052	1,3264	2,8274
8	17,16	17,72	8,84	4,64	1,43	2,4462	-1,4041	0,9864	2,6975
9	20,78	22,15	11,30	5,94	2,13	2,4771	-1,4197	0,9169	2,6410
10	22,74	23,85	10,04	3,96	1,09	2,3354	-1,5725	1,0535	2,8959
11	22,12	22,67	8,17	1,69	0,48	2,3882	-1,5752	1,0637	1,4834
12	20,91	20,42	6,67	1,01	0,79	2,3634	-1,7361	0,8328	0,9534

Fonte: Produção do autor.

Desta figura, pode-se observar que as linhas cinzas representam as variações da  $\Delta H_{QDC}$  dos meses de janeiro dos anos de 2010 a 2018. A curva vermelha representa a curva média da  $\Delta H_{QDC}$  para o mês de janeiro. É possível notar que existe uma variação ao longo de uma série diária do mês de janeiro, a qual é atribuída à variação diurna. No entanto, é possível notar que a variação da  $\Delta H_{QDC}$  dos meses de janeiro de 2010 a 2018 também está relacionada à fase do ciclo de atividade solar 24. A relação com o ciclo de atividade solar corresponde à dispersão das curvas cinzas, semelhante àquilo que foi observado na sazonalidade. A dispersão destas curvas mostra que a amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético também aparenta variar com a fase do ciclo de atividade solar.

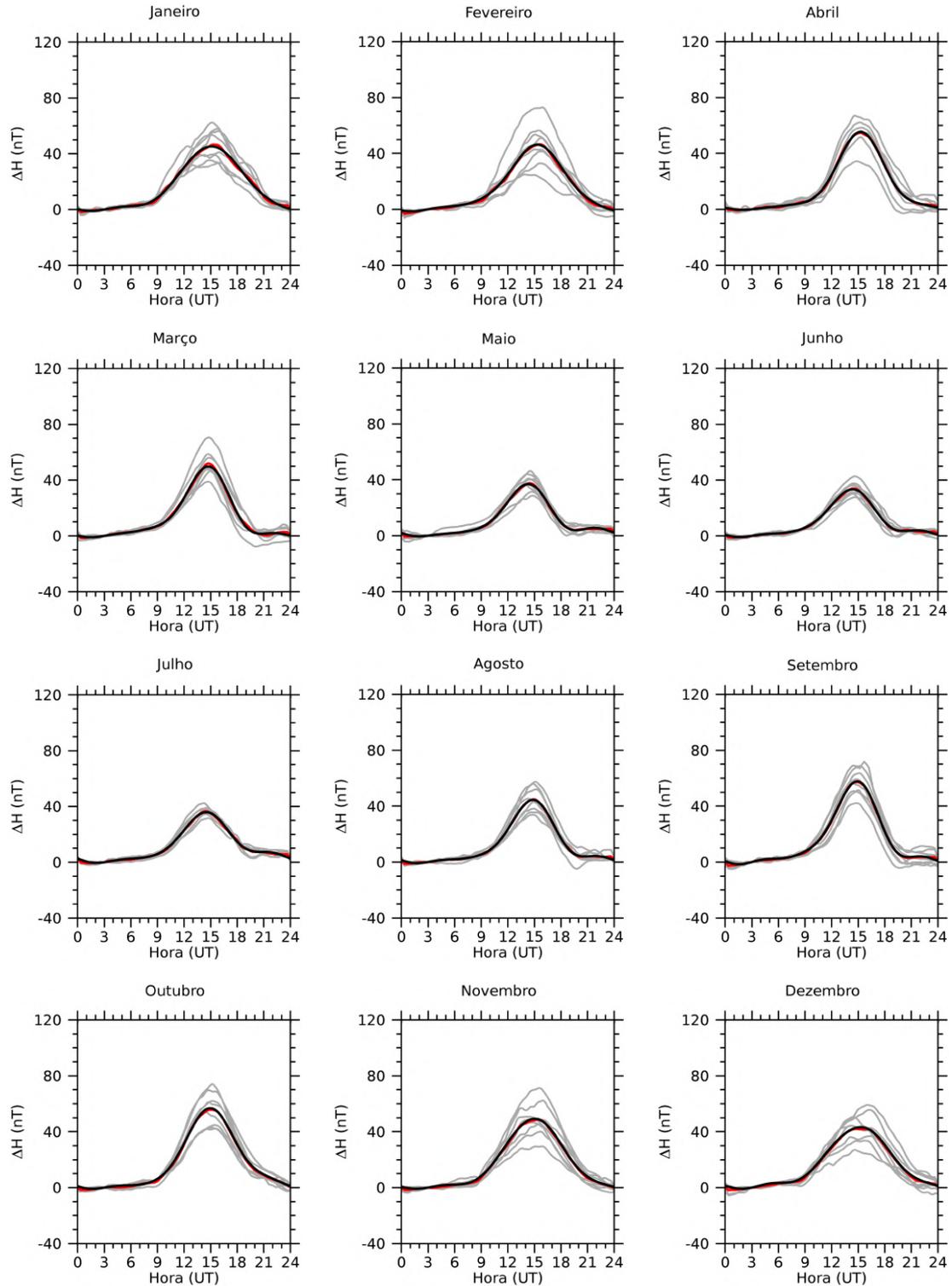
Para cada estação magnética, obteve-se 12 (doze) séries temporais diárias dos valores da amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético. Estas séries temporais diárias representam uma curva média mensal de todas as QDCs obtidas em cada mês do ano (i.e., janeiro, fevereiro, ... , dezembro). Ou seja, a metodologia mostrada anteriormente para o mês de janeiro em Cachoeira Paulista foi usada para cada estação magnética da Embrace MagNet. Portanto, a curva foi obtida a partir da Equação 6.4, apresentada anteriormente.

Os resultados das 12 séries temporais que representam as curvas da amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético,  $\Delta H_{QDC}$ , ao longo das 24 horas do dia é mostrado na Figura 6.11, utilizando os coeficientes da Tabela 6.4. A amplitude do parâmetro  $\Delta H$  no solstício de inverno no Hemisfério Sul (maio, junho e julho) é menor do que a amplitude observada durante os meses dos equinócios e solstício de verão.

A variação diurna do campo geomagnético ( $\Delta H$ ) está relacionada com a condutividade ionosférica. Durante o solstício de verão nos períodos geomagneticamente calmos a incidência solar é maior, e isto aumenta a condutividade ionosférica na região E (VAN DE KAMP, 2013). Pela Lei de Ohm, representada pela Equação 3.8, tem-se que a densidade de corrente elétrica é proporcional à condutividade elétrica e o campo elétrico ionosférico. Assim, acredita-se que a amplitude maior no solstício de verão ocorre devido ao aumento da condutividade nesta época do ano. Consequentemente, a magnitude do campo elétrico é maior durante o solstício de verão e menor durante o solstício de inverno no Hemisfério Sul (MORO, 2015; MORO et al., 2016).

Portanto, este parâmetro da condutividade e do campo elétrico é responsável por intensificar a curva da  $\Delta H$  nos meses do verão. Neste caso, o parâmetro  $D$  do modelo Sq-QDCM é normalizado a partir da razão entre a série de Fourier ajustada (Equação 6.4) e o seu maior valor. Esta normalização resulta em um valor percentual da  $\Delta H_{QDC}$ . Assim, o parâmetro  $D$  foi incluído no modelo Sq-QDCM a fim de avaliar a variação diurna.

Figura 6.11 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de Cachoeira Paulista. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



Fonte: Produção do autor.

## 6.2 Validação entre as QDCs obtidas a partir dos dados de magnetômetros e do modelo Sq-QDCM

Tendo em vista que foi possível obter os parâmetros do modelo Sq-QDCM a partir dos dados de magnetômetros das estações magnéticas, obteve-se as QDCs calculadas pelo modelo empírico. Portanto, nesta seção são apresentadas as análises para a validação do modelo Sq-QDCM. Estas análises foram divididas em: (1) comparação entre as QDCs, (2) correlação entre as QDCs, (3) análise da variabilidade das QDCs e (4) análise espectral das séries temporais de QDCs.

### 6.2.1 Comparação direta da QDC e o Sq-QDCM

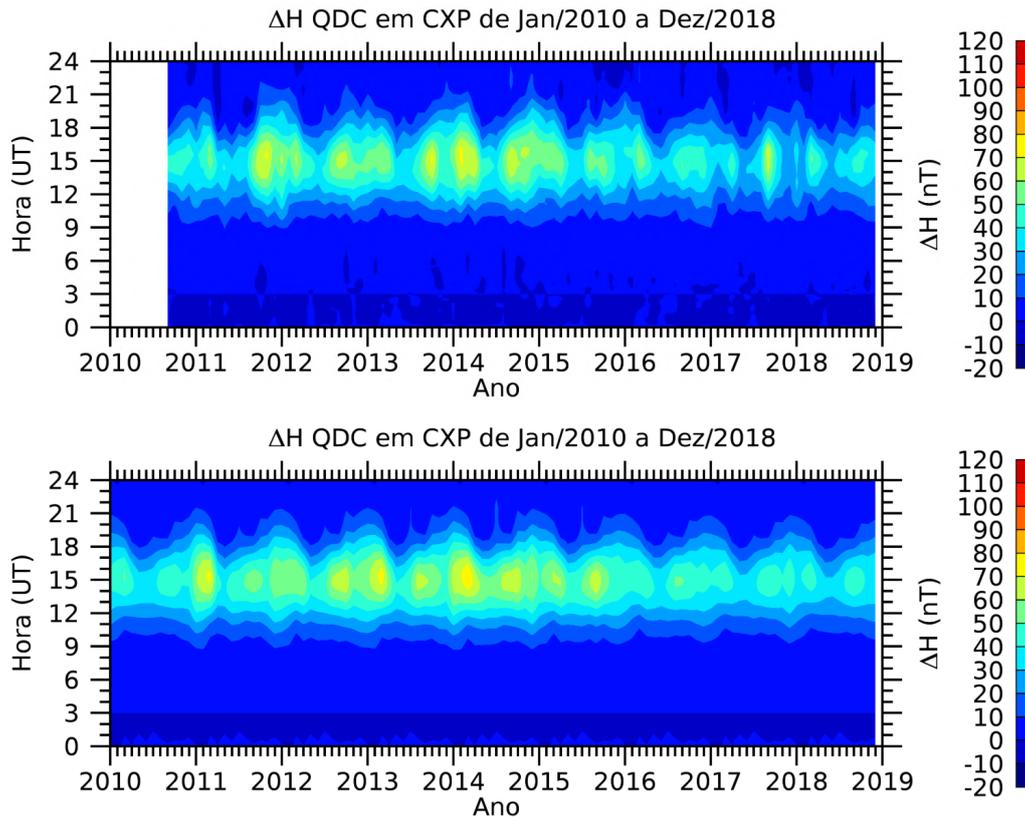
Na Figura 6.12 são apresentados os gráficos de contorno das amplitudes da variação diurna das QDCs calculadas a partir dos dados (painel superior) e a partir do modelo Sq-QDCM (painel inferior) para a estação magnética de Cachoeira Paulista entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018. A variação diurna apresentada no painel superior foi obtida a partir da Equação 5.2. Já a variação diurna apresentada no painel inferior foi obtida a partir da Equação 5.9, utilizando os dados do fluxo de rádio solar mensal ( $F_{10.7}$ ) para a respectiva data de entrada no modelo. O eixo vertical e horizontal indicam as horas do dia no tempo universal e os anos, respectivamente. A barra de cores à direita de cada painel corresponde à magnitude da variação diurna  $\Delta H$ . Os espaços em branco indicam que houve ausência de dados.

No painel superior da Figura 6.12 é possível observar a magnitude máxima das QDCs ocorre próximo ao horário do meio-dia local (i.e., 12:00 LT ou 15:00 UT) e é cíclica ao longo de todo o período analisado. Na qual, as variações mais significativas da variação diurna ocorrem entre os horários das 09:00 UT e 21:00 UT. No entanto, em alguns meses dos anos (solstício de inverno: junho, julho e agosto) essas oscilações são mais significativas entre 12:00 UT e 18:00 UT. Essa variação observada na variação diurna está relacionada à sazonalidade e ocorre devido à quantidade de horas com a incidência de radiação solar na atmosfera. Além disso, a magnitude máxima durante o horário do meio-dia local tem diminuído ao longo dos anos. Essa diminuição na magnitude é atribuída à fase do ciclo de atividade solar.

Já no painel inferior desta mesma figura, pode-se observar que os resultados simulados mostram que a magnitude máxima dessas variações também ocorre próximo ao horário do meio-dia local (i.e., 12:00 LT ou 15:00 UT), repetindo ao longo de todo o período analisado. Observa-se que as variações mais significativas da variação diurna ocorrem entre os horários das 09:00 UT e 21:00 UT. Essas variações são as mesmas

observadas nos dados das estações magnética da Embrace MagNet, mostrando que o modelo está apresentando uma boa concordância.

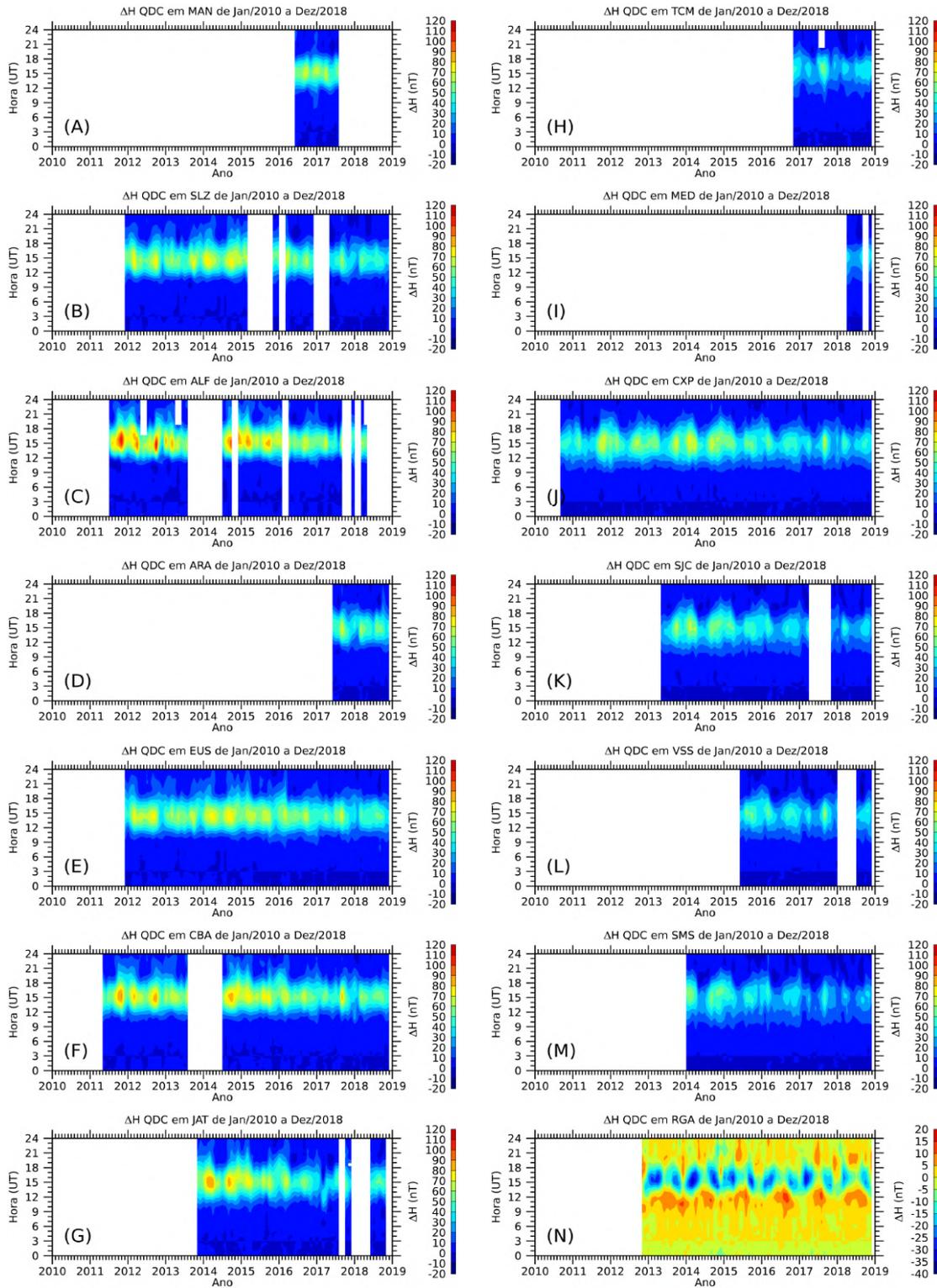
Figura 6.12 -  $\Delta H_{QDC}$  mensais da componente horizontal do campo geomagnético obtido a partir dos dados (painel superior) e a partir do modelo Sq-QDCM (painel inferior) para a estação magnética de Cachoeira Paulista entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

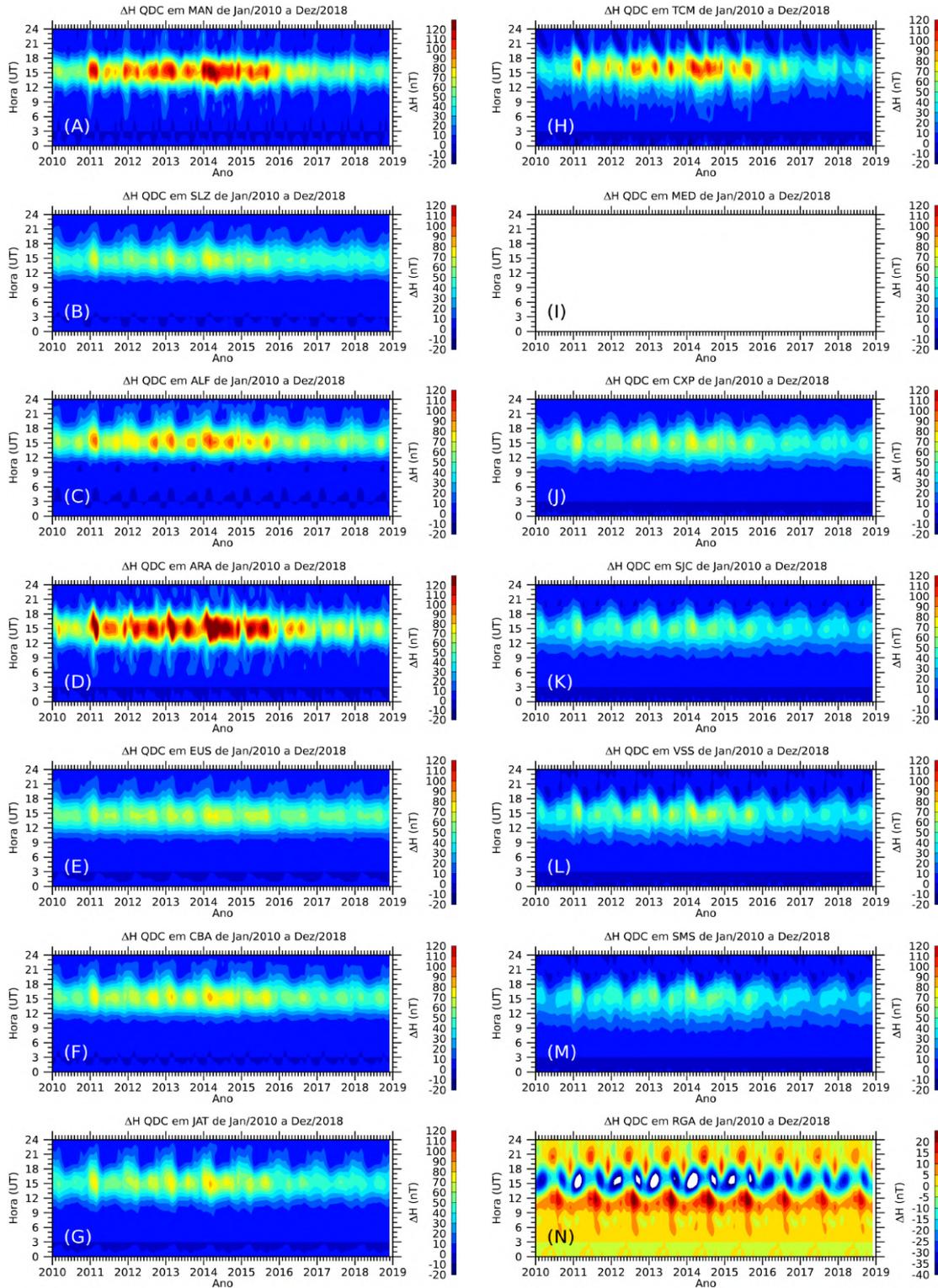
A seguir, são apresentados na Figura 6.13 os gráficos da variação diurna calculada a partir dos dados das 14 estações magnéticas. Nesta figura, cada painel corresponde ao gráfico de contorno da amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético de uma estação magnética da Embrace MagNet ( $\Delta H_{QDC}$ ). As estações magnéticas são identificadas pelos gráficos de A a N. Note que, os padrões observados na estação magnética de Cachoeira Paulista também são notados para as demais estações magnéticas da Embrace MagNet.

Figura 6.13 -  $\Delta H_{QDC}$  mensais da componente horizontal do campo geomagnético obtido a partir dos dados das estações magnéticas da Embrace MagNet entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.14 -  $\Delta H_{QDC}$  mensais da componente horizontal do campo geomagnético, obtido a partir do modelo Sq-QDCM, para as estações magnéticas da Embrace MagNet, para o período de janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 6.14 são apresentados os gráficos da variação diurna obtida a partir do modelo Sq-QDCM para cada estação magnética (A a N) analisada neste trabalho. Conforme já discutido anteriormente, as variações diurnas da componente horizontal do campo geomagnético foram obtidas com base na Equação 5.9 entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. As variações diurnas foram calculadas utilizando os dados do fluxo de rádio solar mensal ( $F_{10.7}$ ) para a respectiva data de entrada no modelo.

Conforme mencionado anteriormente para os resultados simulados da estação magnética de Cachoeira Paulista, as demais estações magnéticas da Embrace MagNet também mostram que a magnitude máxima dessas variações ocorre próximo ao horário do meio-dia local (i.e., 12:00 LT ou 15:00 UT), repetindo ao longo de todo o período analisado. Além disso, observa-se que as variações mais significativas da variação diurna ocorrem entre os horários das 09:00 UT e 21:00 UT. Essas variações são as mesmas observadas nos dados das estações magnéticas da Embrace MagNet, mostrando que o modelo está apresentando uma boa concordância com o dado observacional.

Algumas discrepâncias na magnitude das variações diurnas de algumas das estações magnéticas não correspondem àquelas observadas nos dados do campo geomagnético. Nos gráficos dos painéis A, D, H e N, que referem-se às estações magnéticas de Manaus, Araguatins, Tucumán e Rio Grande, as variações diurnas obtidas pelo modelo Sq-QDCM superestimam as variações diurnas observadas nos dados do campo geomagnético. Os valores superestimados pelo modelo Sq-QDCM ocorrem devido aos erros identificados na análise dos parâmetros do ciclo de atividade solar e sazonalidade.

Já nos gráficos dos painéis B, C, E, F, G, J, K, L e M, que referem-se às estações magnéticas de São Luís, Alta Floresta, Eusébio, Cuiabá, Jataí, Cachoeira Paulista, São José dos Campos, Vassouras e São Martinho da Serra, as variações diurnas do modelo Sq-QDCM são semelhantes às variações diurnas dos dados observacionais. Pode-se observar que os maiores valores da  $\Delta H_{QDC}$  ocorrem entre os anos de 2011 e 2016, época em que o ciclo de atividade solar encontrava-se próximo do máximo, tanto para os dados observacionais quanto para os resultados modelados. A relação entre a alta atividade solar e os sistemas de correntes Sq ocorre devido ao aumento da condutividade ionosférica na região E, já explicada na Seção 6.1.2.

Ainda comparando os resultados do modelo Sq-QDCM com os dados observacionais, nota-se que a estação magnética de Cachoeira Paulista é a que apresenta me-

lhor concordância. Para esta localidade, os máximos e mínimos estão praticamente coincidentes. Este fato é atribuído a maior quantidade de dados disponíveis para a análise em Cachoeira Paulista. As estações magnéticas mais próximas do equador magnético, como por exemplo São Luís e Alta Floresta, apesar de apresentarem boa concordância, ainda foram observadas algumas discrepâncias em seus máximos. Acredita-se que estas localidades possam ter alguma influência da corrente do EEJ. Assim, o modelo Sq-QDCM subestima seus valores máximos porque a condutividade Cowling da corrente do EEJ não está diretamente incluída no modelo Sq-QDCM.

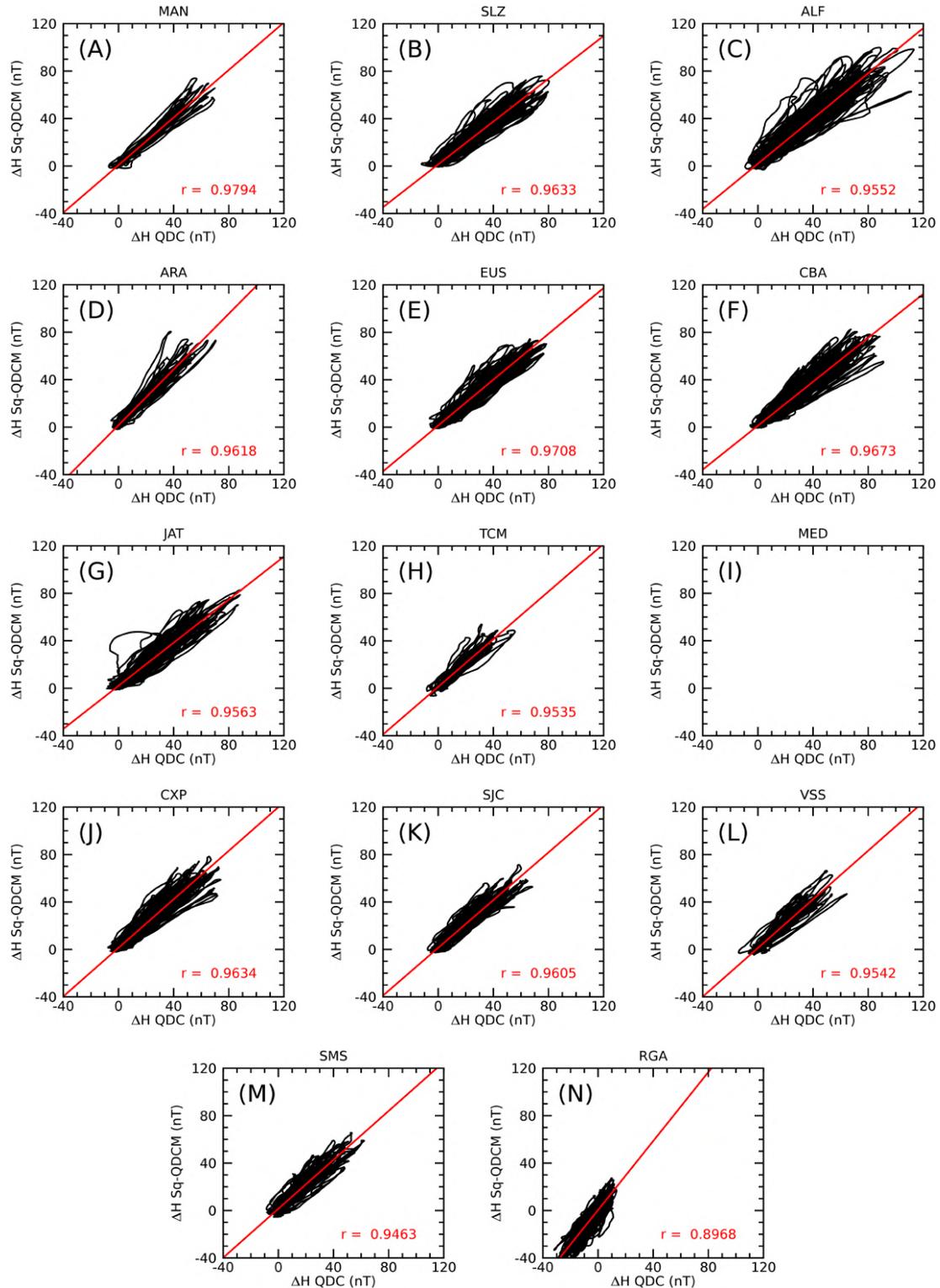
Finalmente, não foi possível obter as variações diurnas para a estação magnética de Medianeira utilizando o modelo Sq-QDCM. O modelo baseia-se nos parâmetros de tendência, ciclo de atividade solar, sazonalidade e variação diurna, que neste caso, os dados não foram suficientes para se obter o padrão de sazonalidade e a variação diurna.

### 6.2.2 Correlação entre a QDC e o Sq-QDCM

A fim de realizar uma comparação entre as QDCs obtidas a partir dos dados das estações magnéticas e os resultados do modelo Sq-QDCM, foi realizada uma correlação linear. Para esta análise foi utilizado o método de regressão linear de Press et al. (1992). A Figura 6.15 apresenta os resultados da correlação linear entre o  $\Delta H_{QDC}$  obtido a partir dos dados das estações magnéticas da Embrace MagNet e a partir do modelo Sq-QDCM. O eixo vertical e horizontal indicam a amplitude da variação diurna das QDCs obtidas a partir do modelo Sq-QDCM e a partir dos dados da estação magnética, respectivamente. Os pontos pretos indicam o conjunto de dados de  $\Delta H_{QDC}$ . A linha vermelha representa a equação da reta obtida a partir do método de regressão linear. No canto inferior direito destes painéis é apresentado o coeficiente de correlação ( $r$ ).

Pode-se observar na Figura 6.15 que as correlações obtidas para as estações magnéticas indicadas pelos painéis A a M foram bem satisfatórias, i.e.,  $r \geq 0,9$ . Isso significa que a amplitude da variação diurna observada nas QDCs obtidas a partir dos dados das estações magnéticas e do modelo estão linearmente correlacionadas. Conforme já discutido, não foi possível obter a correlação para a estação magnética de Medianeira (indicada pelo painel I), devido à falta do parâmetro de sazonalidade. Com relação à estação magnética de Rio Grande (indicada pelo painel N), obteve-se uma boa correlação, mas o modelo Sq-QDCM superestima (subestima) os valores de máximo (mínimo) da  $\Delta H_{QDC}$  para esta localidade.

Figura 6.15 - Dispersão da correlação linear entre a  $\Delta H_{QDC}$  calculada a partir dos dados das estações magnéticas da Embrace MagNet e a partir do modelo Sq-QDCM entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

Novamente, vale mencionar que o gráfico do painel J, que refere-se à estação magnética de Cachoeira Paulista, corresponde à maior série temporal de dados do campo geomagnético deste trabalho. Neste contexto, conforme apresentado nas análises dos resultados dos parâmetros do modelo Sq-QDCM, esta série temporal apresenta maior significância em relação às demais estações magnéticas. Assim, para esta variação diurna, as análises das influências do fluxo de rádio solar, da sazonalidade e das marés atmosféricas estão mais completas e consistentes. Ao contrário de outras estações magnéticas, que possuem uma menor série temporal de dados, impedindo melhores resultados do modelo.

Esse fato pode ser comprovado durante o mínimo solar para as estações magnéticas de Manaus, Araguatins, Tucumán e Rio Grande (representada nos painéis A, D, H e N da Figura 6.14), no qual o modelo Sq-QDCM mostra que quando a quantidade de dados é suficiente, o modelo representa em boa concordância o comportamento observacional da componente  $\Delta H$  da QDC.

O resultado de cada uma das regressões lineares foi sumarizado e apresentado na Tabela 6.5. Nesta tabela foram reunidos os coeficientes do ajuste linear realizado em cada uma das 14 estações magnéticas da Embrace MagNet. A tabela é composta pela identificação da estação magnética ( $i$ ), a sigla da estação magnética, os coeficientes do ajuste linear (coeficiente linear  $a$  e angular  $b$ ) e coeficiente de correlação ( $r$ ).

Os coeficientes lineares obtidos em todas as estações magnéticas mostram que as QDCs obtidas a partir do modelo Sq-QDCM não estão "defasadas" em relação às QDCs obtidas a partir dos dados das estações magnéticas (ou seja,  $a \ll \Delta H_{m\acute{a}x}$ ).

Além disso, desta correlação linear os coeficientes angulares são utilizados como valores indicativos de que o modelo Sq-QDCM está superestimando ( $b > 1, 0$ ) ou subestimando ( $b < 1, 0$ ) a variação diurna do campo geomagnético ( $\Delta H_{QDC}$ ). Neste caso, a variação diurna das estações magnéticas que foram mais superestimadas são Araguatins e Rio Grande (que correspondem aos painéis indicados pelas letras D e N, respectivamente). A variação diurna mais subestimada foi observada nas estações magnéticas de São Luís, Cuiabá e Jataí. Em geral, a magnitude média da variação diurna obtida a partir do modelo Sq-QDCM foi de aproximadamente +3% da variação diurna observada nas QDCs obtidas a partir dos dados das estações magnéticas.

Tabela 6.5 - Coeficientes dos ajustes lineares e correlação entre as QDCs obtidas a partir dos dados e a partir do modelo Sq-QDCM para as estações magnéticas da Embrace MagNet.

$i$	Sigla	$a$ (nT)	$b$	$r$
A	MAN	0,79	1,0017	0,9794
B	SLZ	1,46	0,9027	0,9633
C	ALF	1,93	0,9528	0,9552
D	ARA	1,69	1,1736	0,9618
E	EUS	1,41	0,9666	0,9708
F	CBA	1,30	0,9259	0,9673
G	JAT	2,04	0,9074	0,9563
H	TCM	1,27	1,0042	0,9535
I	MED	-	-	-
J	CXP	1,33	1,0230	0,9634
K	SJC	1,35	1,0055	0,9605
L	VSS	1,23	1,0258	0,9542
M	SMS	1,50	1,0311	0,9463
N	RGA	0,42	1,4540	0,8968
Média		1,36	1,0288	0,9561

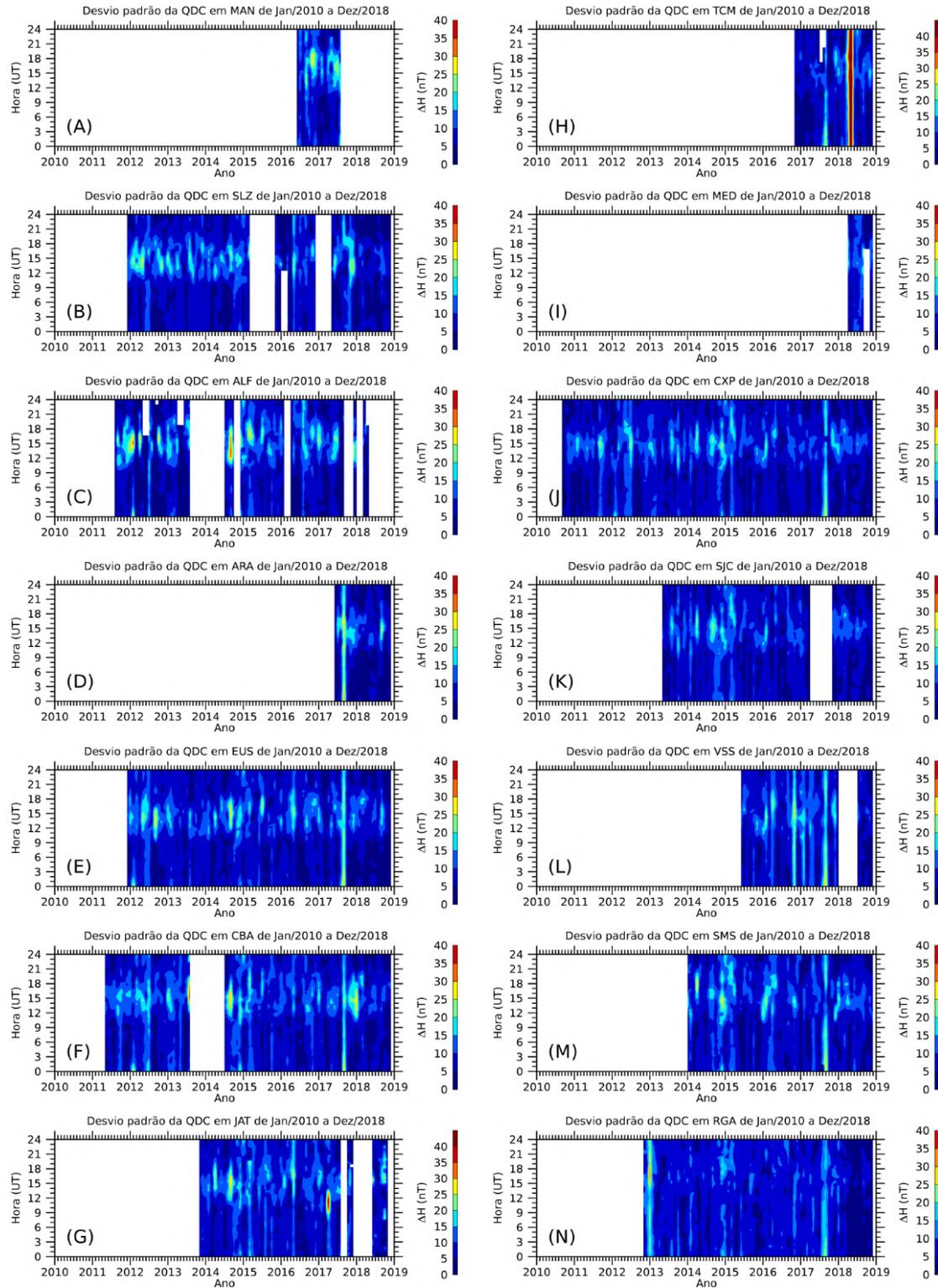
Fonte: Produção do autor.

### 6.2.3 Análise da variabilidade da QDC

Uma outra abordagem para validar o modelo foi a análise da variabilidade das QDCs a partir do desvio padrão da variação diurna. Esta análise foi realizada com o objetivo de determinar os erros e as variações atípicas durante os períodos geomagneticamente calmos. Desta análise, são apresentados os gráficos de contorno dos desvios padrão das QDCs anteriores (obtida a partir dos dados das estações magnéticas), representado pela Figura 6.16. As faixas de contorno coloridas correspondem aos valores de amplitudes dos desvios padrão da média horária das QDCs ( $\Delta H_{QDC}$ ). A barra de cores à direita de cada painel corresponde à magnitude do desvio padrão,  $\Delta H$ . Os espaços em branco indicam que houve ausência de dados.

São identificados na Figura 6.16 os possíveis erros causados pelas médias dos dias magneticamente mais calmos de cada mês. É possível observar também os instantes de tempo (i.e., os horários do dia) em que o desvio padrão é maior. Neste caso, os maiores valores de desvio padrão são observados durante os horários entre 09:00 UT e 21:00 UT, onde o valor máximo do desvio padrão encontra-se próximo do meio-dia local (12:00 LT ou 15:00 UT).

Figura 6.16 - Desvio padrão das QDCs mensais da componente horizontal do campo geomagnético, obtido a partir dos dados das estações magnéticas da Embrace MagNet entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

Durante este horário, a incidência de radiação solar é máxima sobre a atmosfera terrestre, conseqüentemente, a fotoionização é máxima. Portanto, considera-se que as variações diurnas entre um dia e outro podem ser grandes e, conseqüentemente, o desvio padrão será maior neste intervalo de tempo. Nota-se também um aumento no valor do desvio padrão em horários noturnos (i.e., quando não há fotoionização). Nestes casos, atribui-se o aumento destes valores à possíveis erros instrumentais ou ao cálculo da QDC com dias incompletos (i.e., arquivos de dados com menos de 24 horas de dados). Além disso, pode-se atribuir estes erros aos períodos considerados que, apesar de serem os mais calmos do mês, podem não ser totalmente calmos no sentido físico.

Adicionalmente, para o mês de setembro de 2017, o desvio padrão atinge valores acima de 20 nT ao longo das 24 horas do dia, nas estações magnéticas que estavam funcionando neste período (D, E, F, H, J, L, M e N). O aumento deste desvio padrão está relacionado a um aumento irregular do fluxo de rádio solar durante a fase descendente do ciclo de atividade solar 24.

Por fim, no painel H, que refere-se à estação magnética de Tucumán, pode-se observar que a o desvio padrão do mês de maio de 2018 apresenta valores maiores que 40 nT. Neste caso, acredita-se que tenha ocorrido um erro no valor de referência da magnitude do campo geomagnético observado pelo magnetômetro desta estação.

#### **6.2.4 Análise espectral das séries temporais de QDCs**

Nesta subseção são apresentados os resultados da metodologia utilizada para a análise espectral das QDCs obtidas a partir dos dados e do modelo Sq-QDCM. Conforme foi mencionado na Seção 5.2, a análise espectral baseia-se no espectro de amplitude da série temporal das QDCs entre o período de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. Esta análise foi realizada com o objetivo de determinar qual componente harmônica da amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético é a mais significativa ao longo de toda a série de temporal de QDCs.

As Figuras 6.17 e 6.18 correspondem aos gráficos dos espectros de amplitude obtidos para a série temporal de QDCs calculadas a partir dos dados e do modelo Sq-QDCM, respectivamente. Estes espectros de amplitude foram obtidos para cada uma das estações magnéticas (A a N). O eixo vertical e horizontal indicam a amplitude e frequência do espectro de amplitude, respectivamente. As linhas verticais pontilhadas correspondem às periodicidades anual, semi-anual, 27 dias, 24 horas, 12 horas, 8 horas, 6 horas, 3 horas, e 1 horas, respectivamente. Na Figura 6.17 a

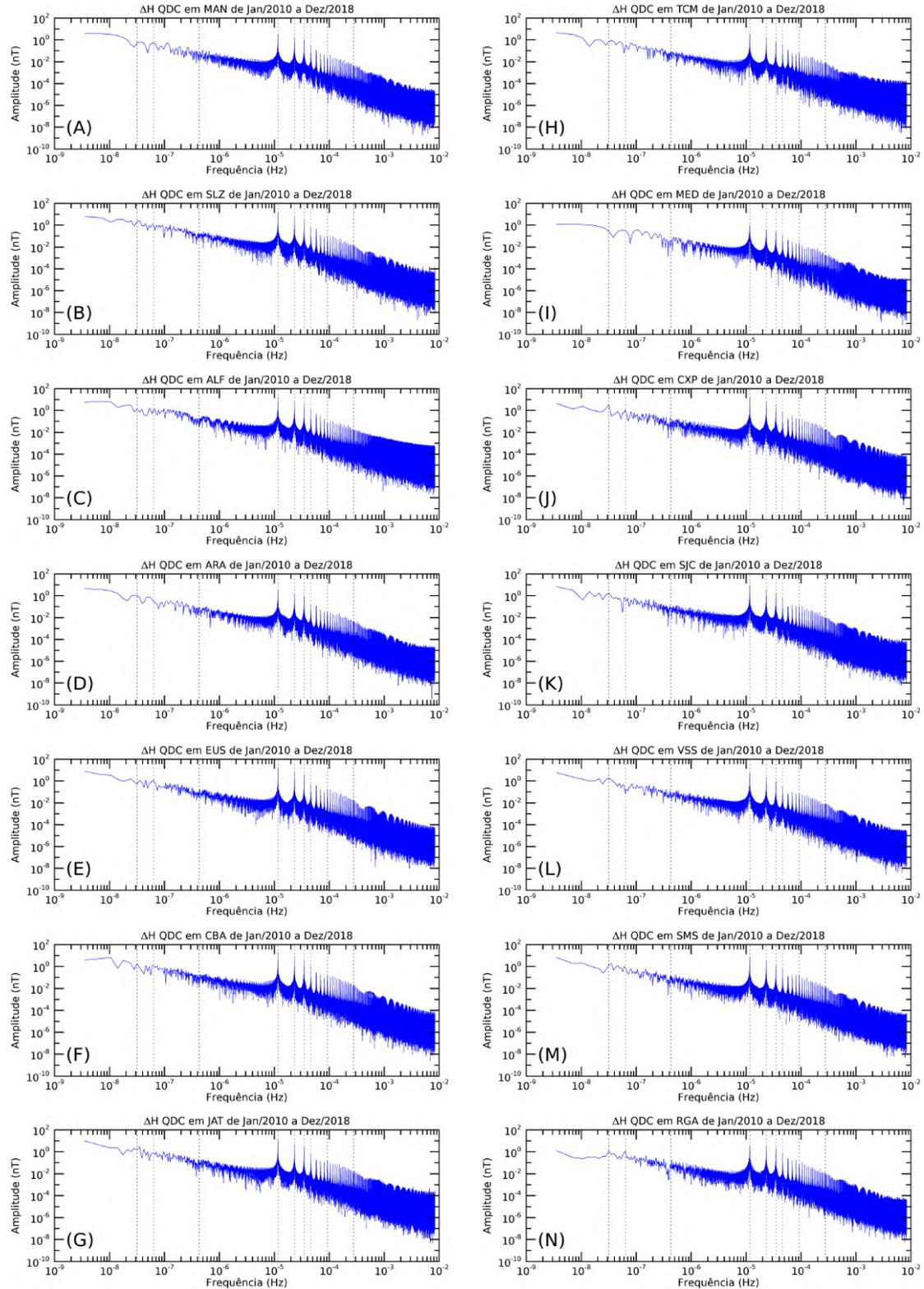
linha azul indica o espectro de amplitude das QDCs calculadas a partir dos dados de magnetômetro e na Figura 6.18 a linha vermelha indica o espectro de amplitude das QDCs calculadas a partir do modelo Sq-QDCM.

Em geral, nas Figuras 6.17 e 6.18 pode-se observar que os espectros obtidos a partir dos dados das estações magnéticas e do modelo são muito semelhantes. No entanto, nota-se que este comportamento ocorre até a faixa de frequência equivalente ao período de 6 horas. Acima da frequência correspondente ao período de 6 horas, as amplitudes do espectro obtido para as QDCs do modelo Sq-QDCM não correspondem às amplitudes do espectro observado na série temporal de QDCs calculadas a partir dos dados. No gráfico do painel I, que refere-se à estação magnética de Medianeira, há apenas o gráfico do espectro de amplitude da série temporal de QDCs obtidas a partir dos dados desta estação magnética. Não foi possível obter o espectro de amplitudes do modelo Sq-QDCM, pelo fato do parâmetro de sazonalidade desta estação magnética estar comprometida pela pouca quantidade de dados, conforme já mencionado.

No gráfico do painel N, que refere-se à estação magnética de Rio Grande, pode-se observar que as amplitudes do espectro da série temporal do modelo Sq-QDCM é maior do que as amplitudes da série temporal dos dados. Essa diferença nas amplitudes do espectro corresponde ao fato de que o modelo Sq-QDCM está superestimando os valores da variação diurna do campo geomagnético desta estação magnética.

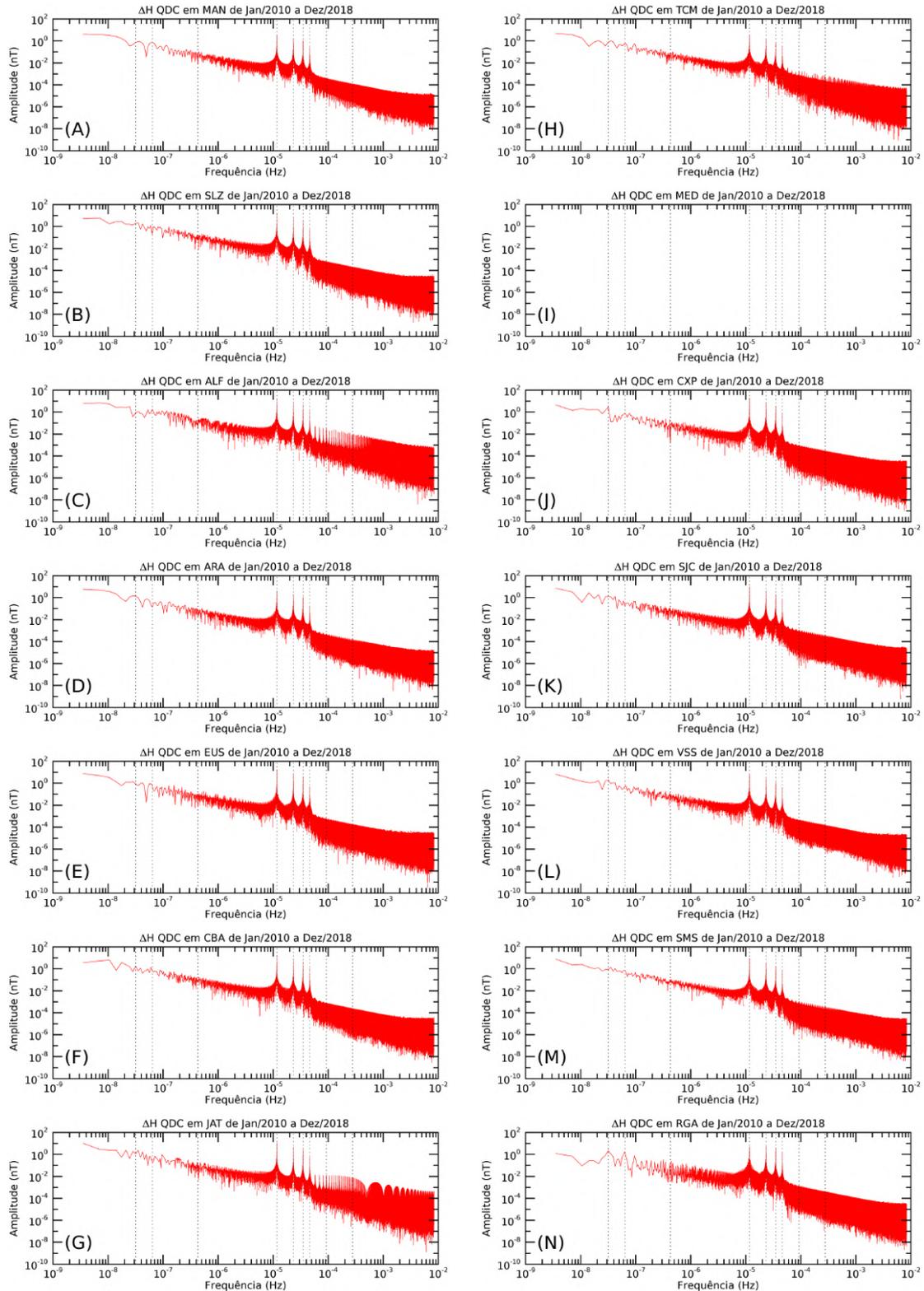
É bem conhecido que as marés atmosféricas são as principais responsáveis pela dinâmica da região E ionosférica (ANDRIOLI et al., 2009; RESENDE et al., 2017). Elas são geradas principalmente devido à absorção da insolação solar incidente sobre várias bandas do espectro eletromagnético pelas espécies atmosféricas, por exemplo vapor de água, oxigênio atômico e molecular (CHAPMAN; LINDZEN, 1970). Conforme já mencionado, os períodos são sub-harmônicos do dia 24 h (diurna), 12 h (semi-diurna), 8 h (terdiurna) e 6 h (quarterdiurna). Nesta análise espectral, tanto para os dados observacionais quanto para os dados do modelo, é possível observar esses 4 sub-harmônicos bem definidos. A importância da maré diurna e semidiurna na região E ionosférica equatorial e de baixas latitudes já foi discutida em Resende et al. (2017) e Resende et al. (2018). Nestes estudos, os autores afirmam que a eletrodinâmica da região E ionosférica está principalmente relacionada com estas duas componentes.

Figura 6.17 - Espectro de amplitude das séries temporais de QDCs obtidas a partir dos dados das estações magnéticas da Embrace MagNet entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.18 - Espectro de amplitude das séries temporais de QDCs obtidas a partir do modelo Sq-QDCM para as estações magnéticas da Embrace MagNet entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



Fonte: Produção do autor.

A maré terdiurna foi estudada por Tokumoto et al. (2007) para a estação de Cachoeira Paulista. Eles utilizaram cinco anos de dados de um radar meteorológico para investigar essa componente da maré atmosférica. A existência da maré terdiurna foi atribuída principalmente a interação não linear entre as marés diurna e semidiurna nesta localidade. Além disso, eles observaram que essa componente de maré tem características semianuais predominantemente nos equinócios, como nas marés diurna e semidiurna. Este fato pode ser a razão pela qual os dados da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético ( $\Delta H_{QDC}$ ) apresentarem as mesmas características. Já a maré quarterdiurna foi estudada por Guharay et al. (2018) em Cachoeira Paulista e Santa Maria (29, 7° S, -53, 7° O, região próxima da estação magnética de São Martinho da Serra). De acordo com estes autores, a maré quarterdiurna é a componente que tem a mais fraca manifestação. Contudo, ela pode ter uma influência significativa na região E ionosférica, principalmente durante o solstício de inverno.

Finalmente, pela Lei de Ohm (Equação 3.8) observa-se que os ventos também tem um papel importante na modificação no sistema de correntes Sq. No caso da região E ionosférica, região de estudo, os ventos dominantes são as de marés atmosféricas. Conforme mostrado na Figura 6.17, o modelo Sq-QDCM representa significativamente as principais componentes de marés atmosféricas que influenciam o sistema de correntes Sq. Portanto, as poucas discrepâncias observadas no modelo referem-se (a) quantidade de dados insuficiente para obtenção da curva do dia calmo ou (b) condutividade ionosférica perto da região do equador magnético.

### 6.3 Considerações finais sobre a validação do Sq-QDCM

Em geral, conforme mostrado anteriormente, houve uma boa concordância entre os dados observacionais e o modelo Sq-QDCM. Portanto, acredita-se que pela primeira vez na América do Sul há um modelo capaz de calcular a variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético.

Contudo, a fim de validar melhor esse modelo foi realizada uma análise da extrapolação temporal da  $\Delta H_{QDC}$  do modelo Sq-QDCM para a estação magnética de Cachoeira Paulista, na qual os parâmetros do modelo não incluem os dados da época analisada. Ou seja, os parâmetros C, S e D foram obtidos a partir das séries temporais de QDCs entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018, e a QDC calculada foi para os meses de janeiro a março de 2019. Além disso, para averiguar o comportamento do modelo quando há ausência de dados, foi feita uma extrapolação espacial de QDCs para a estação magnética de Medianeira.

### 6.3.1 Análise da extrapolação temporal de QDCs para a estação magnética de Cachoeira Paulista

Nesta subseção são apresentados os resultados das análises de correlação da  $\Delta H_{QDC}$  do modelo Sq-QDCM para datas futuras. Os parâmetros C, S e D, já calculados anteriormente, são utilizados para estimar a variação diurna para datas futuras em Cachoeira Paulista.

Portanto, esta análise consiste na avaliação da  $\Delta H_{QDC}$  da estação magnética de Cachoeira Paulista obtida a partir do modelo Sq-QDCM para os meses de janeiro a março do ano de 2019. A lista dos dias magneticamente mais calmos utilizadas para calcular a  $\Delta H_{QDC}$  deste período é apresentada na Tabela 6.6. Assim será possível comparar a  $\Delta H_{QDC}$  observada para os meses de 2019 com os dados simulados.

Tabela 6.6 - Lista dos cinco dias magneticamente mais calmos de cada mês do ano de 2019.

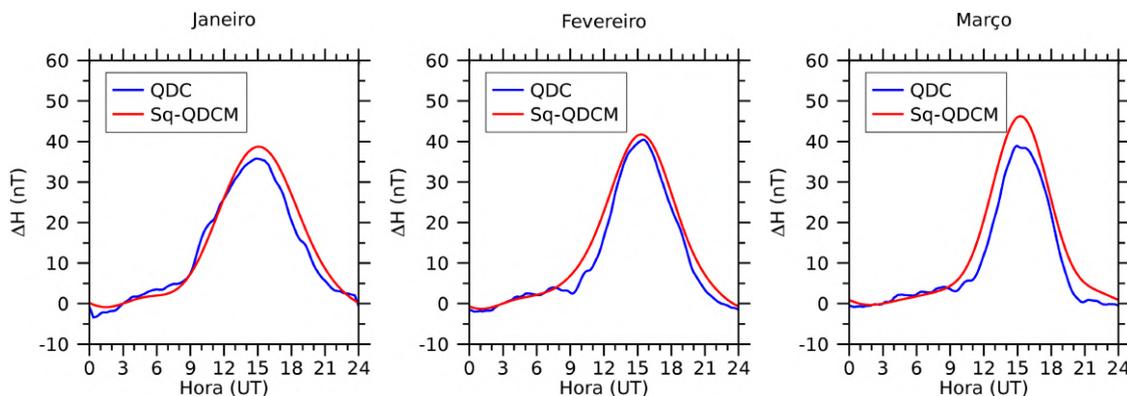
Ano	Mês	Dias calmos				
		Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5
2019	1	2	28	3	30	12
	2	25	24	23	26	19
	3	22	23	21	18	11

Fonte: Adaptada de World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (2019).

Na Figura 6.19 são apresentados os gráficos das  $\Delta H_{QDC}$  dos dados (em azul) da estação magnética em 2019 e os dados do modelo Sq-QDCM (em vermelho) baseado em dados anteriores. Os eixos verticais e horizontais correspondem às amplitudes da variação diurna e as horas do dia, respectivamente. Observa-se que há uma boa concordância entre a QDC obtida a partir da extrapolação temporal do modelo e a QDC obtida a partir do dado observacional para o respectivo período analisado.

Para uma melhor avaliação foi realizada uma correlação linear entre os dados de 2019 e modelo Sq-QDCM. Os resultados destas correlações lineares são sumarizados na Tabela 6.7. Nesta tabela são apresentados os meses de janeiro a março de 2019 e os seus respectivos coeficientes do ajuste linear (coeficiente linear  $a$  e angular  $b$ ) e coeficiente de correlação ( $r$ ).

Figura 6.19 - QDCs obtidas a partir dos dados da estação magnética de Cachoeira Paulista e a partir do modelo Sq-QDCM para os meses de janeiro a março de 2019.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 6.7 - Coeficientes dos ajustes lineares e correlações entre as QDCs obtidas a partir dos dados e a partir do modelo Sq-QDCM para a estação magnética de Cachoeira Paulista em 2019.

Ano	Mês	$a$ (nT)	$b$	$r$
2019	1	0,24	1,0814	0,9852
	2	1,81	1,0467	0,9906
	3	1,61	1,1774	0,9870
Média		1,22	1,1018	0,9876

Fonte: Produção do autor.

Pode-se observar que a  $\Delta H_{QDC}$  obtida a partir do modelo Sq-QDCM apresenta uma correlação muito forte ( $r > 0,9$ ) com a  $\Delta H_{QDC}$  obtida a partir dos dados desta estação magnética. No entanto, o modelo Sq-QDCM está superestimando a magnitude da variação do campo geomagnético. Estes valores superestimados são descritos pelo coeficiente angular ( $b$ ) deste ajuste linear. Em média, a  $\Delta H_{QDC}$  desta análise do modelo apresenta aproximadamente 10,18% a mais do que a  $\Delta H_{QDC}$  observada nos dados desta estação magnética. Contudo, essa diferença na magnitude da variação diurna calma do campo geomagnético não parece ser significativa. Uma análise mais detalhada será realizada em estudos futuros. Porém, de forma geral, o modelo Sq-QDCM parece ter um bom potencial para investigar os dados futuros. Este fato é de grande interesse científico, uma vez que a possível análise de previsões auxiliaria o estudo do clima espacial.

### 6.3.2 Análise da extrapolação espacial de QDCs para a estação magnética de Medianeira

Nesta subseção são apresentados os resultados das extrapolações de QDCs para a estação magnética de Medianeira, uma vez que esta não possui dados suficientes. Assim, a fim de averiguar o comportamento desta estação, o modelo Sq-QDCM pode ser utilizado para extrapolar espacialmente as variações diurnas a partir das variações diurnas de estações magnéticas próximas e, que tenham uma quantidade de dados suficiente para este tipo de análise. Portanto, os parâmetros C, S e D de regiões próximas a esta estação magnética são utilizados para estimar a variação diurna para locais que não possuam dados da variação diurna do campo geomagnético.

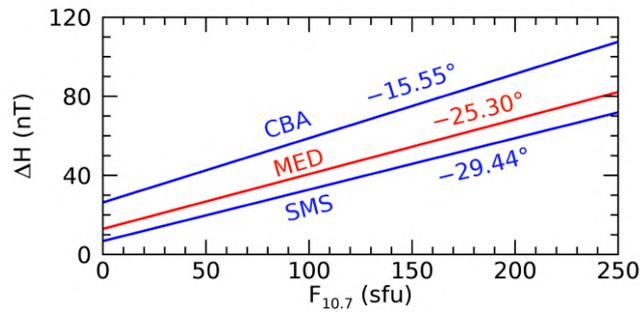
Especificamente, conforme já mencionado anteriormente, não foi possível calcular todos os parâmetros (T, C, S e D) da estação magnética de Medianeira devido à baixa quantidade de dados do campo geomagnético. No entanto, uma alternativa deste modelo consiste em obter a variação diurna calma do campo geomagnético a partir da extrapolação dos parâmetros já existentes no modelo. Para isso, foram realizadas extrapolações dos parâmetros C, S e D. Estas extrapolações são baseadas nas latitudes geográficas das estações magnéticas próximas da Embrace MagNet.

As estações magnéticas mais próximas de Medianeira são Cuiabá e São Martinho da Serra. Estas duas estações magnéticas possuem os parâmetros C, S e D, utilizados para determinar a  $\Delta H_{QDC}$  do modelo Sq-QDCM. Esta extrapolação do parâmetro C é apresentada pelo gráfico da Figura 6.20. As linhas azuis correspondem às curvas dos parâmetros da estação magnética de Cuiabá e São Martinho da Serra. Em vermelho está representado a curva do parâmetro C ajustada para a estação magnética de Medianeira.

Em seguida, foi calculado o parâmetro S para a latitude da estação magnética de Medianeira. Esta extrapolação é apresentada pelo gráfico da Figura 6.21. As linhas azuis correspondem às curvas dos parâmetros da estação magnética de Cuiabá e São Martinho da Serra. Em vermelho está representado a curva do parâmetro S ajustada para a estação magnética de Medianeira.

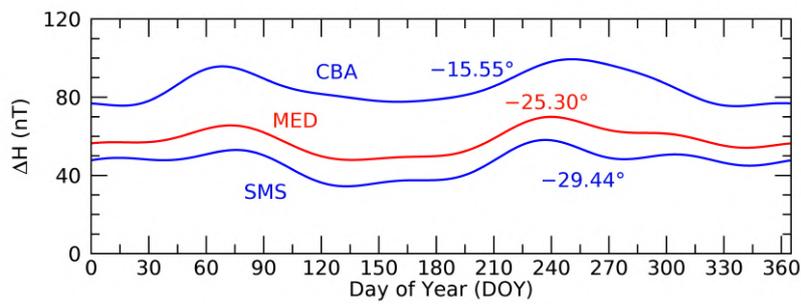
Por fim, foi calculado o parâmetro D para a latitude da estação magnética de Medianeira. Esta extrapolação é apresentada pelo gráfico da Figura 6.22. As linhas azuis e vermelha correspondem às curvas dos parâmetros D em Cuiabá e São Martinho da Serra, e Medianeira, respectivamente.

Figura 6.20 - Extrapolação do parâmetro C do modelo Sq-QDCM para a estação magnética de Medianeira.



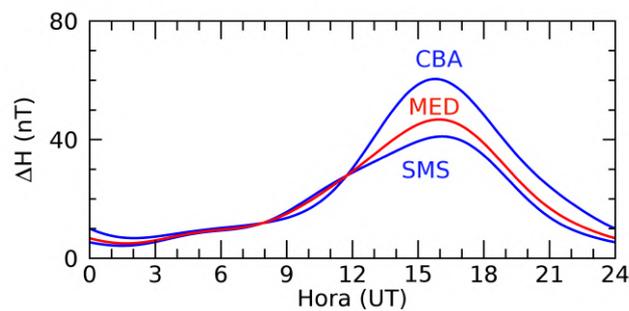
Fonte: Produção do autor.

Figura 6.21 - Extrapolação do parâmetro S do modelo Sq-QDCM para a estação magnética de Medianeira.



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.22 - Extrapolação do parâmetro D do modelo Sq-QDCM para a estação magnética de Medianeira.

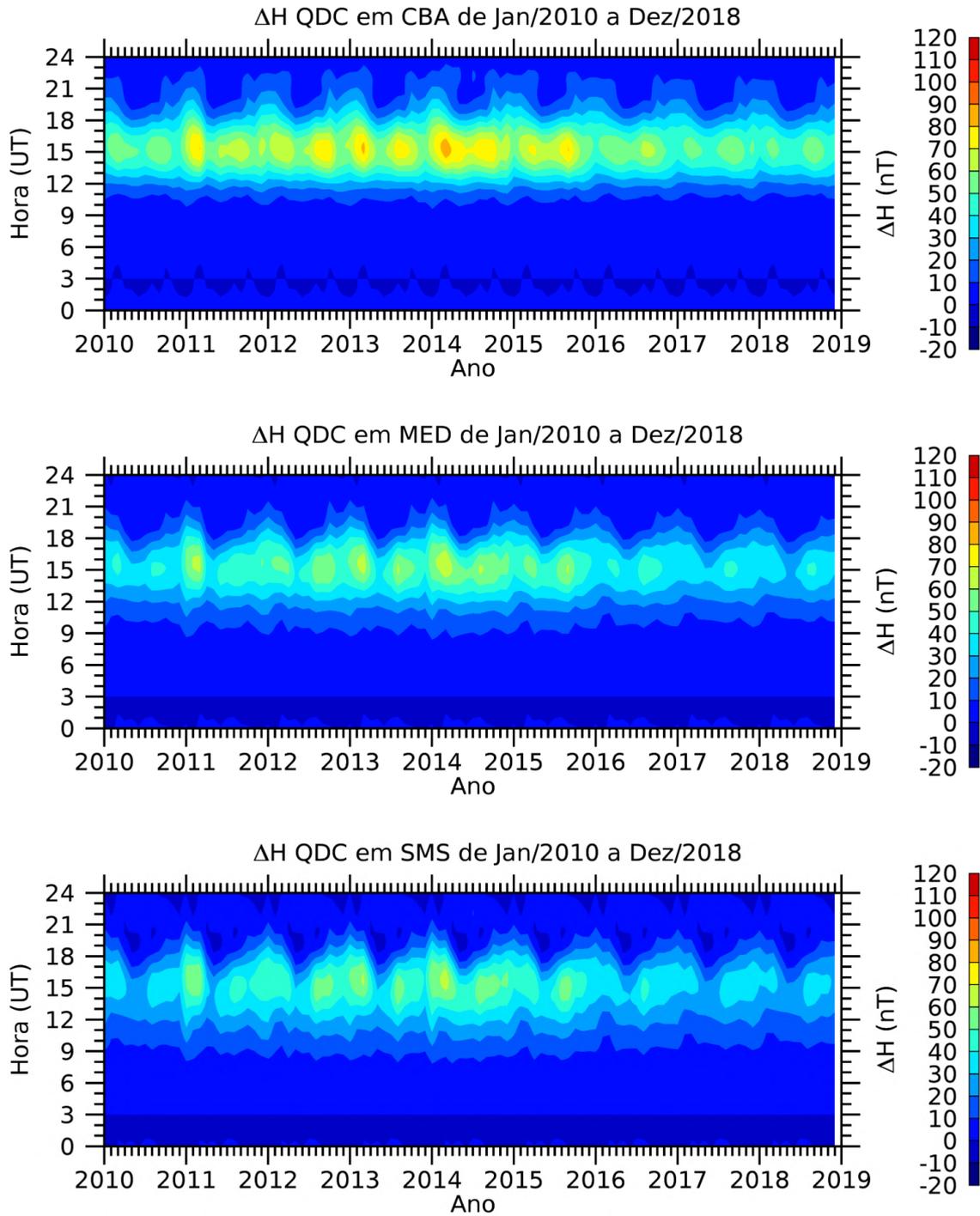


Fonte: Produção do autor.

Estes parâmetros obtidos para a estação magnética de Medianeira foram incluídos no modelo Sq-QDCM. Na Figura 6.23 são apresentados os gráficos de contorno das QDCs obtidos a partir do modelo Sq-QDCM para as estações magnéticas de Cuiabá, Medianeira e São Martinho da Serra para o período entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018. Observa-se que o gráfico de contorno de Medianeira apresenta o comportamento semelhante ao observado no gráfico de contorno da estação magnética de São Martinho da Serra. No entanto, o valor máximo da variação diurna da componente horizontal ( $\Delta H_{QDC}$ ) em Medianeira é maior do que aquele observado em São Martinho da Serra. Essa diferença observada na magnitude da  $\Delta H_{QDC}$  em Medianeira deve-se à influência da estação magnética de Cuiabá. Neste caso, em Cuiabá a magnitude da variação diurna é maior do que a observada em São Martinho da Serra.

Com relação ao comportamento geral, a estação magnética de Medianeira parece ser a média das estações utilizadas para esta análise. Algumas discrepâncias foram observadas, mas o comportamento está bem correlacionado com o esperado em baixas latitudes. Este resultado é um indicativo que o modelo Sq-QDCM pode ser utilizado para regiões que possuam uma significativa ausência de dados. Um estudo mais detalhado sobre essa extrapolação será realizado futuramente.

Figura 6.23 - QDCs obtidas a partir do modelo Sq-QDCM para as estações magnéticas de Cuiabá, Medianeira e São Martinho da Serra.



Fonte: Produção do autor.

Para avaliar melhor esta extrapolação dos parâmetros do modelo para a estação magnética de Medianeira, foi realizada uma correlação linear entre algumas das QDCs obtidas a partir dos dados observacionais do ano de 2018 e as respectivas QDCs do modelo Sq-QDCM. Os resultados destas correlações lineares são sumarizados na Tabela 6.8. Nesta tabela são apresentados os meses de setembro a dezembro do ano de 2018 e os seus respectivos coeficientes do ajuste linear (coeficiente linear  $a$  e angular  $b$ ) e coeficiente de correlação ( $r$ ).

Tabela 6.8 - Coeficientes dos ajustes lineares e correlações entre as QDCs obtidas a partir dos dados e a partir da extrapolação espacial dos parâmetros do modelo Sq-QDCM para a estação magnética de Medianeira para os meses de setembro a dezembro de 2018.

Ano	Mês	$a$ (nT)	$b$	$r$
2018	9	0,79	1,0390	0,9828
	10	-	-	-
	11	1,81	0,9071	0,9901
	12	0,61	1,0745	0,9792
Média		1,07	1,0069	0,9840

Fonte: Produção do autor.

Pode-se observar que a  $\Delta H_{QDC}$  obtida a partir da extrapolação dos parâmetros do modelo Sq-QDCM apresentou uma correlação muito forte ( $r > 0,9$ ) com a  $\Delta H_{QDC}$  obtida a partir dos dados desta estação magnética. Também possível observar que o modelo Sq-QDCM superestima e subestima a magnitude da variação do campo geomagnético se observarmos cada ajuste linear, individualmente. Os valores superestimados e subestimados são descritos pelo coeficiente angular ( $b$ ) deste ajuste linear.

De forma geral, a média dos coeficientes destes ajustes para os três meses de QDCs correlacionadas apresenta uma  $\Delta H_{QDC}$  simulada com aproximadamente 0,7% a mais do que a  $\Delta H_{QDC}$  observada nos dados desta estação magnética. Essa diferença na magnitude da variação diurna calma do campo geomagnético não é significativa e demonstra que o modelo Sq-QDCM também pode ser utilizado para estimar a variação diurna do campo geomagnético em localidades que não possuem medidas magnéticas. Este fato, mostra que este tipo de análise pode auxiliar e melhorar as previsões no estudo do clima espacial.



## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de um modelo empírico para obter a curva do dia calmo (QDC) é necessário para se entender melhor as variações diárias do campo geomagnético medidas na superfície sobre a América do Sul, bem como a ocorrência de fenômenos magnetosféricos e ionosféricos que podem estar atrelados à essas variações. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo empírico da curva média mensal que representa a variação diária calma da componente horizontal do campo geomagnético na região da América do Sul.

Para tanto, foram utilizados dados da variação do campo geomagnético da rede de magnetômetros do Programa Embrace/INPE. Especificamente, foram utilizados os dados coletados de 14 estações magnéticas entre os anos de 2010 e 2018, representando a atividade solar baixa e alta do ciclo solar 24.

Primeiramente, este estudo utilizou a técnica do cálculo da QDC da componente horizontal do campo geomagnético da Embrace MagNet. Esta técnica consiste em obter a curva mensal da variação do campo geomagnético baseada nos 5 dias magneticamente mais calmos. De fato, as QDCs da componente horizontal do campo geomagnético representam os valores relativos às magnitudes do campo magnético principal da Terra e a sua variação diurna. A curva da QDC apresenta um comportamento típico de amplitude, caracterizado por máximos durante o meio-dia local.

Assim, o modelo empírico desenvolvido neste estudo, Sq-QDCM, foi baseado nas variações geomagnéticas observadas nos dados de magnetômetros. Ele foi obtido a partir das análises de séries temporais e de modelos de previsão, utilizando quatro parâmetros, a saber: tendência (T), ciclo (C), sazonalidade (S) e variação diurna (D).

O parâmetro T do modelo refere-se à magnitude do campo geomagnético devido ao campo principal. Ele foi obtido a partir de um ajuste linear dos valores do campo geomagnético observados durante o horário da meia-noite local de cada uma das QDCs mensais. Notou-se através desta análise, que o parâmetro T possui uma diminuição contínua da magnitude da componente horizontal do campo geomagnético.

Para determinar o parâmetro T do modelo foi necessário realizar uma correção dos valores de magnitude do campo geomagnético. Esta correção baseia-se na taxa de variação anual da magnitude do campo geomagnético obtido pelo modelo IGRF. Os resultados mostraram discrepâncias nesta taxa de variação anual em apenas

três regiões (Tucumán, Medianeira e Jataí). Em Tucumán e Medianeira houveram baixas amostragens que comprometeram os resultados. Em Jataí, essa discrepância foi creditada à algum tipo de influência externa. Contudo, apesar dos dados não serem ideais para esta estação magnética, eles foram considerados nesta análise.

O segundo parâmetro de entrada do modelo Sq-QDCM refere-se ao ciclo de atividade solar (C). Este parâmetro é obtido a partir do ajuste linear entre a amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético durante o horário do meio-dia local e o respectivo valor do  $F_{10.7}$  mensal. Em geral, para as 14 estações magnéticas houve uma boa relação entre o comportamento destes dois parâmetros. Contudo, a correlação em termos de valores só foi satisfatória em Cachoeira Paulista pela grande quantidade de dados nesta região. Mas, em geral, o comportamento seguiu um padrão característico em ambos parâmetros. Portanto, durante a atividade solar máxima, a magnitude da  $\Delta H_{QDC}$  é praticamente duas vezes maior do que a observada durante a baixa atividade solar em todas as estações magnéticas. Isso ocorre porque durante a alta atividade solar há um aumento na condutividade ionosférica, resultando em uma intensificação na magnitude das correntes elétricas na ionosfera.

Na análise do parâmetro de sazonalidade (S), foram analisadas as amplitudes da variação diurna das QDCs, mês a mês, durante ao meio-dia local para cada uma das estações magnéticas. Os resultados mostraram claramente que a curva da sazonalidade é mais intensa nos equinócios de março e de setembro para quase todas as estações magnéticas. Vale ressaltar aqui que a estação magnética de Medianeira não houve dados suficientes para esta análise. Os valores máximos nos equinócios foram atribuídos aos altos valores de amplitude que ocorreram nas componentes diurnas e semidiurnas dos ventos de marés, uma vez que estes ventos são os principais responsáveis pela ação do dínamo da região E ionosférica.

Ainda, no parâmetro S, os resultados mostraram um comportamento semianual em todas as estações magnéticas em que haviam uma série de dados maior ou igual a um ano. Este comportamento é claramente observado em São Luís e Alta Floresta, regiões localizadas perto do equador magnético. Portanto, a variação semianual pode ser creditada à alta condutividade na região E que é intensificada em regiões equatoriais. Além disso, em regiões de baixa latitude, há também uma condutividade ionosférica significativa nas alturas da região E e, por isso, esse comportamento semianual também é observado.

O parâmetro D determina a amplitude da variação diurna da componente horizon-

tal do campo geomagnético em relação às marés atmosféricas diurna, semidiurna, terdiurna e quarterdiurna (cujos períodos são: 24, 12, 8 e 6 horas, respectivamente). A análise deste parâmetro mostra que a amplitude da  $\Delta H_{QDC}$  é menor no solstício de inverno e maior no solstício de verão do Hemisfério Sul. Neste caso, acredita-se que durante o solstício de verão nos períodos geomagneticamente calmos a incidência solar é maior, e isto aumenta a condutividade ionosférica na região E. Pela Lei de Ohm generalizada, tem-se que a densidade de corrente elétrica é proporcional à condutividade elétrica e o campo elétrico ionosférico. Assim, acredita-se que a amplitude maior no solstício de verão ocorre devido ao aumento da condutividade nesta época do ano. Conseqüentemente, a magnitude do campo elétrico é maior durante o solstício de verão e menor durante o solstício de inverno no Hemisfério Sul.

Portanto, os resultados obtidos do modelo Sq-QDCM incluindo os quatro parâmetros, tendência, ciclo de atividade solar, sazonalidade e variação diurna, foram satisfatórios quando comparados com os dados observacionais. Os resultados simulados mostraram que o máximo da magnitude das variações da QDC ocorre ao meio-dia local, concordando com as curvas de QDC obtidas pelos magnetômetros.

Algumas discrepâncias foram observadas na magnitude das variações diurnas de algumas das estações magnéticas simuladas. Os valores do modelo Sq-QDCM superestimam as variações diurnas observadas nos dados do campo geomagnético em algumas das estações magnéticas. Este fato pode ocorrer devido aos erros identificados na análise dos parâmetros do ciclo de atividade solar e sazonalidade.

Ainda, os resultados simulados mostram que os maiores valores da  $\Delta H_{QDC}$  ocorrem entre os anos de 2011 e 2016, próximo à alta atividade solar. Conforme já mencionado, a relação entre a alta atividade solar e os sistemas de correntes Sq ocorre devido ao aumento da condutividade ionosférica na região E. O mesmo comportamento foi observado na  $\Delta H_{QDC}$  dos dados da Embrace MagNet.

Adicionalmente, ainda comparando os resultados do modelo Sq-QDCM com os dados observacionais, nota-se que a estação magnética de Cachoeira Paulista é a que apresenta melhor concordância. Para esta localidade, os máximos e mínimos estão praticamente coincidentes. Este fato é atribuído a maior quantidade de dados disponíveis para a análise em Cachoeira Paulista. As estações magnéticas mais próximas do equador magnético, como por exemplo São Luís e Alta Floresta, apesar de apresentarem boa concordância, ainda foram observadas algumas discrepâncias em seus máximos. Acredita-se que estas localidades possam ter alguma influência da corrente do EEJ. Assim, o modelo Sq-QDCM subestima seus valores máximos porque a con-

utividade Cowling da corrente do EEJ não está diretamente incluída no modelo Sq-QDCM.

Em geral, as correlação entre as  $\Delta H_{QDC}$  obtida a partir dos dados de cada estação magnética e os resultados o modelo Sq-QDCM foram satisfatórias. A região com maior correlação foi Cachoeira Paulista devido à maior amostragem de dados. Assim, para esta variação diurna, as análises das influências do fluxo de rádio solar, da sazonalidade e das marés atmosféricas estão mais completas e consistentes. Ao contrário de outras estações magnéticas, que possuem uma menor série temporal de dados, impedindo melhores resultados do modelo.

Além disso, foi utilizada uma análise espectral, tanto das curvas das QDCs observadas e simuladas, a fim de determinar qual componente harmônica da amplitude da variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético é a mais significativa ao longo da série temporal de QDCs. Em geral, os espectros obtidos a partir dos dados das estações magnéticas e do modelo Sq-QDCM são muito semelhantes. No entanto, nota-se que este comportamento ocorre até a faixa de frequência equivalente ao período de 6 horas. Pela Lei de Ohm generalizada, observa-se que os ventos também tem um papel importante na modificação no sistema de correntes Sq. No caso da região E ionosférica, região de estudo, os ventos dominantes são as de marés atmosféricas. O modelo Sq-QDCM representa significativamente as principais componentes de marés atmosféricas que influenciam o sistema de correntes Sq.

Finalmente, toda a análise acima mostra que o modelo Sq-QDCM simula satisfatoriamente os dados observacionais. Assim, pela primeira vez na América do Sul, há um modelo capaz de calcular a variação diurna da componente horizontal do campo geomagnético. As poucas discrepâncias observadas no modelo referem-se (a) quantidade de dados insuficiente para obtenção da curva do dia calmo ou (b) condutividade ionosférica perto da região do equador magnético.

A fim de melhor analisar o modelo foram realizados mais dois estudo: (a) correlação da  $\Delta H_{QDC}$  do modelo Sq-QDCM para datas futuras, na qual os parâmetros do modelo não incluem os dados da época analisada e (b) comportamento do modelo para a estação magnética de Medianeira que não possui dados suficientes.

Em relação ao item (a), os parâmetros de entrada do modelo Sq-QDCM foram obtidos a partir da série de dados entre janeiro de 2010 e dezembro de 2018 para a estação magnética de Cachoeira Paulista. Estes dados foram correlacionados com os meses de janeiro a março de 2019. Em geral, observou-se uma boa concordância

nessa correlação.

Já o item (b), foi utilizada uma extrapolação dos parâmetros do modelo para as regiões próximas à estação magnética de Medianeira. Os resultados também foram, em geral, satisfatórios.

Portanto, o modelo Sq-QDCM apresentou um grande potencial para ser incluído nos portfólios do Programa Embrace/INPE. Contudo, alguns pontos importantes precisam ser modificados, principalmente nestas duas últimas análises apresentadas. Nestes termos, listamos alguns dos pontos considerados promissores para serem explorados em trabalhos futuros. São eles:

- incluir as condutividades ionosféricas explicitamente no modelo Sq-QDCM;
- ampliar para outras estações magnéticas a análise de dados futuros, a fim de validar melhor o modelo;
- estender o estudo para as outras componentes do campo geomagnético, com o intuito de avaliar o comportamento do campo geomagnético de forma mais completa;
- estender o alcance do modelo empírico para outras localidades, com o intuito de verificar as variações diurnas do campo geomagnético em outras regiões, que não possuem medidas do campo geomagnético. Uma forma de estender este alcance do modelo é aplicar a expansão em harmônicos esféricos;
- analisar com mais detalhes os métodos de extrapolação para solucionar o estudo das regiões em que não há quantidade suficiente de dados; e
- implementar o modelo empírico para o cálculo das QDCs do Programa Embrace/INPE.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S. Sporadic E-layer phenomena in the Brazilian geomagnetic anomaly: evidence for a regular particle ionization source. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 39, n. 6, p. 723–731, 1977. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(77\)90059-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(77)90059-9)>. 13

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; CARRASCO, A. J.; BRUM, C. G. M. South Atlantic magnetic anomaly ionization: a review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 67, n. 17, p. 1643–1657, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.014>>. 13

AKASOFU, S.; CHAPMAN, S. The ring current, geomagnetic disturbance, and the Van Allen radiation belts. **Journal of Geophysical Research**, v. 66, n. 5, p. 1321–1350, 1961. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/JZ066i005p01321>>. 9, 10

AKASOFU, S. I.; CHAPMAN, S. **Solar-terrestrial physics**. Oxford: Clarendon Press, 1972. 901 p. (International Series of Monographs on Physics). 18

ANDERSON, P. C.; RICH, F.; BORISOV, S. Mapping the South Atlantic Anomaly continuously over 27 years. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 177, p. 237–246, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.015>>. 9

ANDRIOLI, V. F.; CLEMESHA, B. R.; BATISTA, P. P.; SCHUCH, N. J. Atmospheric tides and mean winds in the meteor region over Santa Maria (29.7S; 53.8W). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 71, n. 17, p. 1864–1876, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.07.005>>. 85

APPLETON, E. V.; BARNETT, M. A. F. Local reflection of wireless waves from the upper atmosphere. **Nature**, v. 115, n. 2888, p. 333–334, 1925. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/115333a0>>. 24

BANKS, P. M.; KOCKARTS, G. **Aeronomy**: part A. New York: Academic Press, 1973a. 444 p. ISBN 978-0-12-077801-0. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/C2013-0-10328-5>>. 13, 17, 68

\_\_\_\_\_. **Aeronomy**: part B. New York: Academic Press, 1973b. 372 p. ISBN 978-0-12-077802-7. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/C2013-0-10329-7>>. 13

BARTINGTON INSTRUMENTS. **Brochure Mag-03 three-axis magnetic field sensors**: Mag-03 ds0013/27. Oxford: Bartington Instruments, 2019a. 10 p. Disponível em: <[https://www.bartington.com/wp-content/uploads/pdfs/datasheets/Mag-03\\_DS0013.pdf](https://www.bartington.com/wp-content/uploads/pdfs/datasheets/Mag-03_DS0013.pdf)>. Acesso em: 5 jun. 2019. 30

\_\_\_\_\_. **Operation manual Mag-03 three-axis magnetic field sensors**. Oxford: Bartington Instruments, 2019b. 16 p. Disponível em: <[https://www.bartington.com/wp-content/uploads/pdfs/operation\\_manuals/Mag-03\\_OM1004.pdf](https://www.bartington.com/wp-content/uploads/pdfs/operation_manuals/Mag-03_OM1004.pdf)>. Acesso em: 5 jun. 2019. 30

BATISTA, I. S. **Precipitação de partículas e efeitos ionosféricos associados na região da anomalia geomagnética brasileira**. 106 p. (INPE-800-TPT/020). Dissertação (Mestrado em Geofísica) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1975. Disponível em: <<http://marte3.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.25.21.03.26/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2019. 13

BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B. R.; TOKUMOTO, A. S.; LIMA, L. M. Structure of the mean winds and tides in the meteor region over Cachoeira Paulista, Brazil (22.7°S, 45°W) and its comparison with models. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, n. 6, p. 623–636, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.01.014>>. 68

BIRKELAND, K. **The Norwegian aurora polaris expedition 1902–1903**: on the cause of magnetic storms and the origin of terrestrial magnetism. Christiana: Aschehoug, 1908. 1st Sec. 9

BLOXHAM, J.; GUBBINS, D.; JACKSON, A. Geomagnetic secular variation. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 329, n. 1606, p. 415–502, 1989. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rsta.1989.0087>>. 10

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Time series analysis**: forecasting and control. 2. ed. California: Holden-Day, 1976. 575 p. ISBN 0-8162-1104-3. 44

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. **Time series analysis: forecasting and control**. 3. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994. 598 p. ISBN 0130607746. 44

BROCKWELL, P. J.; DAVIS, R. A. **Introduction to time series and forecasting**. 2. ed. New York: Springer, 2002. 437 p. (Springer Texts in Statistics). ISBN 978-0-387-95351-9. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/b97391>>. 44

CAMPBELL, W. H. An introduction to quiet daily geomagnetic fields. **Pure and Applied Geophysics**, v. 131, n. 3, p. 315–331, 1989. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00876831>>. 23, 24

\_\_\_\_\_. **Quiet daily geomagnetic fields**. Basel: Birkhäuser, 1989. 244 p. (Pageoph Topical Volumes). Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-0348-9280-3>>. 9, 68

\_\_\_\_\_. **Introduction to geomagnetic fields**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/CB09781139165136>>. 3, 10, 44

CAMPBELL, W. H.; SCHIFFMACHER, E. R.; KROEHL, H. W. Global quiet day field variation model WDCA/SQ1. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 70, n. 5, p. 66–74, 1989. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/89eo00039>>. 26

CARVALHO, L. C. de. **Estudos e construção de um magnetômetro de núcleo saturado**. 129 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) — Observatório Nacional (ON), São José dos Campos, 1989. Disponível em: <[http://www.on.br/conteudo/dppg\\_e\\_iniciacao/dppg/ferramenta\\_teses/teses/GEOFISICA/\[187\\_14-28\\_C\]luizbenyosefm.pdf](http://www.on.br/conteudo/dppg_e_iniciacao/dppg/ferramenta_teses/teses/GEOFISICA/[187_14-28_C]luizbenyosefm.pdf)>. Acesso em: 5 jun. 2019. 29, 30

CHAPMAN, S. I. The solar and lunar diurnal variations of terrestrial magnetism. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 218, n. 561–569, p. 1–118, 1919. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rsta.1919.0001>>. 9, 10

\_\_\_\_\_. The electrical conductivity of the ionosphere: a review. **Nuovo Cimento**, v. 4, n. Suppl. 4, p. 1385–1412, 1956. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF02746310>>. 23

CHAPMAN, S.; BARTELS, J. **Geomagnetism**: geomagnetic and related phenomena. London: Oxford University Press, 1940a. 542 p. (The International Series of Monograph on Physics, v. 1). 10, 23, 24, 37, 60

\_\_\_\_\_. **Geomagnetism**: analysis of the data and physical theories. London: Oxford University Press, 1940b. 507 p. (The International Series of Monograph on Physics, v. 2). 10

CHAPMAN, S.; FERRARO, V. C. A. A new theory of magnetic storms. **Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity**, v. 36, n. 2, p. 77–97, 1931. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/TE036i002p00077>>. 9

CHAPMAN, S.; LINDZEN, R. S. **Atmospheric tides: thermal and gravitational**. Dordrecht: Springer, 1970. 200 p. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-94-010-3399-2>>. 23, 85

CHEN, W. M.; HARRIS, R. D. An ionospheric E-region nighttime model. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 33, n. 8, p. 1193–1207, 1971. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(71\)90107-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(71)90107-3)>. 17

COWLING, T. G. The electrical conductivity of an ionised gas in the presence of a magnetic field. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 93, n. 1, p. 90–97, 1932. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/93.1.90>>. 19

CRYER, J. D.; CHAN, K.-S. **Time series analysis**: with applications in R. 2. ed. New York: Springer, 2008. 491 p. (Springer Texts in Statistics). ISBN 978-1-4419-2613-5. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-0-387-75959-3>>. 44

DENARDINI, C. M. **Desenvolvimento de um sistema de correção de fase para o radar ionosférico de São Luís do Maranhão**. 137 p. INPE-7174-TDI/676. Dissertação (Mestrado em Geofísica) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/6qtX3pFwXQZ4PKzA/ipRBi>>. Acesso em: 06 mai. 2019. 22, 23

DENARDINI, C. M.; CHEN, S. S.; RESENDE, L. C. A.; MORO, J.; BILIBIO, A. V.; FAGUNDES, P. R.; GENDE, M. A.; CABRERA, M. A.; BOLZAN, M. J. A.; PADILHA, A. L.; SCHUCH, N. J.; HORMAECHEA, J. L.; ALVES, L. R.; NETO, P. F. B.; NOGUEIRA, P. A. B.; PICANÇO, G. A. S.; BERTOLLOTTO,

T. O. The Embrace magnetometer network for South America: network description and its qualification. **Radio Science**, v. 53, n. 3, p. 288–302, feb. 2018a.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2017RS006477>>. 28, 29, 31, 37

DENARDINI, C. M.; DASSO, S.; GONZALEZ-ESPARZA, J. A. Review on space weather in Latin America. 2. the research networks ready for space weather.

**Advances in Space Research**, v. 58, n. 10, p. 1940–1959, 2016. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.03.013>>. 29

DENARDINI, C. M.; SILVA, M. R. D.; GENDE, M. A.; CHEN, S. S.; FAGUNDES, P. R.; SCHUCH, N. J.; PETRY, A.; RESENDE, L. C. A.; MORO, J.; PADILHA, A. L.; SANT'ANNA, N.; ALVES, L. The initial steps for developing the South American K index from the Embrace magnetometer network. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 33, n. 1, p. 79–88, 2015a. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v33i1.603>>. 29

DUTRA, S. L. G. **Noções de geomagnetismo**: curso de Física Solar-Terrestre. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 11–25 jul. 2017. Notas de aula. 5

EMMERT, J. T.; RICHMOND, A. D.; DROB, D. P. A computationally compact representation of Magnetic-Apex and Quasi-Dipole coordinates with smooth base vectors. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A8, p. 623–636, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2010JA015326>>. 27

FEJER, J. A. Theory of auroral electrojets. **Journal of Geophysical Research**, v. 68, n. 8, p. 2147–2157, 1963. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1029/JZ068i008p02147>>. 9

FORBES, J. M. The equatorial electrojet. **Reviews of Geophysics**, v. 19, n. 3, p. 469–504, 1981. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1029/RG019i003p00469>>. 9

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

<<https://doi.org/10.1029/93JA02867>>. 9, 10

GRAHAM, G. IV. An account of observations made of the variation of the horizontal needle at London, in the latter part of the year 1772, and beginning of

1723. **Philosophical Transactions**, v. 33, n. 383, p. 96–107, 1724a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rstl.1724.0020>>. 23

\_\_\_\_\_. III. Observation of the dipping needle. made at London, in the beginning of the Year 1723. **Philosophical Transactions**, v. 33, n. 389, p. 332–339, 1724b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rstl.1724.0062>>. 23

GUHARAY, A.; BATISTA, P. P.; BURITI, R. A.; SCHUCH, N. J. On the variability of the quarter-diurnal tide in the MLT over Brazilian low-latitude stations. **Earth, Planets and Space**, v. 70, n. 1, p. 1–14, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0910-9>>. 88

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**: an introduction to geospace - the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 436 p. 17, 18

JANKOWSKI, J.; SUCKSDORFF, C. **IAGA guide for magnetic measurements and observatory practice**. Warsaw: IAGA, 1996. 232 p. ISBN 0-9650686-2-5. Disponível em: <<http://www.iaga-aiga.org/data/uploads/pdf/guides/iaga-guide-observatories.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2019. 3, 11

JANZHURA, A. S.; TROSHICHEV, O. A. Determination of the running quiet daily geomagnetic variation. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 70, n. 7, p. 962–972, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.11.004>>. 26

JOHNSTON, H. F. Mean K-indices from twenty-one magnetic observatories and five quiet and five disturbed days for 1942. **Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity**, v. 48, n. 4, p. 219–227, 1943. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/TE048i004p00219>>. 34

KANE, R. P. Geomagnetic field variations. **Space Science Reviews**, v. 18, n. 4, p. 413–540, 1976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00217344>>. 10, 68

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere**: plasma physics and electrodynamics. London: Academic Press, 1989. 500 p. (International Geophysics Series, v. 43). 13, 40

KIRCHHOFF, V. H. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, 1991. 149 p. 13, 16

- KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. **Introduction to space physics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 586 p. 13
- KURNOSOVA, L. V.; KOLOBYANINA, T. N.; LOGACHEV, V. I.; RAZORENOV, L. A.; SIROTKIN, I. A.; FRADKIN, M. I. Discovery of radiation anomalies above the South Atlantic at heights of 310–340 km. **Planetary and Space Science**, v. 9, n. 8, p. 513–516, 1962. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(62\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(62)90057-0)>. 9
- LANGEL, R.; OUSLEY, G.; BERBERT, J.; MURPHY, J.; SETTLE, M. The MAGSAT mission. **Geophysical Research Letters**, v. 9, n. 4, p. 243–245, 1982. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/GL009i004p00243>>. 3, 7
- LANGEL, R. A.; ESTES, R. H. A geomagnetic field spectrum. **Geophysical Research Letters**, v. 9, n. 4, p. 250–253, 1982. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/GL009i004p00250>>. 7
- MAEDA, K.; KATO, S. Electrodynamics of the ionosphere. **Space Science Reviews**, v. 5, n. 1, p. 57–79, 1966. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00179215>>. 23
- MATSUSHITA, S. III-1 - Solar quiet and lunar daily variation fields. In: MATSUSHITA, S.; CAMPBELL, W. H. (Ed.). **Physics of Geomagnetic Phenomena**. New York: Academic Press, 1967, (International geophysics series, v. 11). p. 301–424. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-480301-5.50013-6>>. 10
- \_\_\_\_\_. Sq and L current systems in the ionosphere. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, v. 15, n. 1–2, p. 109–125, 1968. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1968.tb05751.x>>. 23
- MATSUSHITA, S.; MAEDA, H. On the geomagnetic solar quiet daily variation field during the IGY. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, n. 11, p. 2535–2558, 1965. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/JZ070i011p02535>>. 3
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. d. C. **Análise de séries temporais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 538 p. ISBN 85-212-0389-6. 44
- MORO, J. **Variações longitudinais dos campos elétricos do eletrojato equatorial no setor americano**. 141 p. Tese (Doutorado em Geofísica) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015.

Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3HRKKTS>>. Acesso em: 25 abr. 2019. 72

MORO, J.; DENARDINI, C. M.; RESENDE, L. C. A.; CHEN, S. S.; SCHUCH, N. J. Equatorial E region electric fields at the dip equator: 2. seasonal variabilities and effects over Brazil due to the secular variation of the magnetic equator.

**Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 10, p. 10,231–10,240, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2016JA022753>>. 72

NESS, N. F. The Earth's magnetic tail. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, n. 13, p. 2989–3005, 1965. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/JZ070i013p02989>>. 9

NEWITT, L. R.; BARTON, C. E.; BITTERLY, J. **IAGA guide for magnetic repeat station surveys**. Warsaw: IAGA, 1997. 120 p. ISBN 0-9650686-1-7. Disponível em: <<http://www.iaga-aiga.org/data/uploads/pdf/guides/iaga-guide-repeat-stations.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2019. 11, 29

OLSEN, N.; STOLLE, C. Satellite geomagnetism. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 40, n. 1, p. 441–465, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105540>>. 3, 4, 7

PARKINSON, W. D. **Introduction to geomagnetism**. Edinburgh: Scottish Academic Press, 1983. 433 p. 7

PINTO JR., O.; GONZALEZ, W. D.; PINTO, I. R. C. A.; GONZALEZ, A. L. C.; MENDES JR., O. The South Atlantic Magnetic Anomaly: three decades of research. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 54, n. 9, p. 1129–1134, 1992. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(92\)90137-A](https://doi.org/10.1016/0021-9169(92)90137-A)>. 9

POTEMRA, T. A. Birkeland currents in the Earth's magnetosphere. In: FÄLTHAMMAR, C.-G.; ARRHENIUS, G.; DE, B. R.; HERLOFSON, N.; MENDIS, D. A.; KOPAL, Z. (Ed.). **Plasma and the Universe**: dedicated to Professor Hannes Alfvén on the occasion of his 80th birthday, 30 May 1988. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988. p. 155–169. ISBN 978-94-009-3021-6. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-94-009-3021-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-94-009-3021-6_12)>. 9

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. (Ed.). **Numerical recipes in C: the art of scientific computing**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 1992. 994 p. ISBN 0-521-43108-5. 50, 58, 79

PRIMDAHL, F. The fluxgate magnetometer. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, v. 12, n. 4, p. 241–253, 1979. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0022-3735/12/4/001>>. 29

REDDY, C. A. The equatorial electrojet: a review of the ionospheric and geomagnetic aspects. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 43, n. 5, p. 557–571, 1981. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(81\)90118-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(81)90118-5)>. 9

\_\_\_\_\_. The equatorial electrojet. **Pure and Applied Geophysics**, v. 131, n. 3, p. 485–508, 1989. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00876841>>. 9

RESENDE, L. C. A. **Estudo sobre a formação e dominância das camadas E-esporádicas considerando a competição entre ventos e campos elétricos**. 184 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3H52UHS>>. Acesso em: 5 jun. 2019. 22

RESENDE, L. C. A.; BATISTA, I. S.; DENARDINI, C. M.; BATISTA, P. P.; CARRASCO, A. J.; ANDRIOLI, V. F.; MORO, J. Simulations of blanketing sporadic E-layer over the Brazilian sector driven by tidal winds. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 154, p. 104–114, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.12.012>>. 68, 85

\_\_\_\_\_. The influence of tidal winds in the formation of blanketing sporadic E-layer over equatorial Brazilian region. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 171, p. 64–71, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.009>>. 85

RICHMOND, A. D. Ionospheric electrodynamics using magnetic Apex coordinates. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 47, n. 2, p. 191–212, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.5636/jgg.47.191>>. 46

RIPKA, P. Review of fluxgate sensors. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 33, n. 3, p. 129–141, 1992. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0924-4247\(92\)80159-Z](https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)80159-Z)>. 29, 30

\_\_\_\_\_. **Magnetic sensors and magnetometers**. Boston: Artech House, 2001. 494 p. (Artech House Remote Sensing Library). 30

RISHBETH, H. Basic physics of the ionosphere: a tutorial review. **Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers**, v. 58, n. 6, p. S207–S223, 1988. Disponível em: <<https://doi.org/10.1049/jiere.1988.0060>>. 13, 15, 16

RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969. 331 p. 13, 14, 16, 17, 18, 19, 40

ROSTOKER, G. The Auroral electrojets. In: AKASOFU, S.-I. (Ed.). **Dynamics of the magnetosphere**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1980, (Astrophysics and Space Science Library, v. 78). p. 201–211. ISBN 978-94-009-9519-2. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-94-009-9519-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-009-9519-2_10)>. 9

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627–1639, 1964. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ac60214a047>>. 38

SCHUNK, R. W.; NAGY, A. F. **Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 554 p. 17

SCHUSTER, A. XV. The diurnal variation of terrestrial magnetism. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 180, p. 467–518, 1889. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rsta.1889.0015>>. 23

\_\_\_\_\_. IV. The diurnal variation of terrestrial magnetism. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A**, v. 208, n. 427-440, p. 163–204, 1908. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rsta.1908.0017>>. 23

SHINBORI, A.; KOYAMA, Y.; NOSE, M.; HORI, T.; OTSUKA, Y.; YATAGAI, A. Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the geomagnetic solar quiet daily variation. **Earth, Planets and Space**, v. 66, n. 155, p. 1–20, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40623-014-0155-1>>. 62

SHINBORI, A.; KOYAMA, Y.; NOSÉ, M.; HORI, T.; OTSUKA, Y. Characteristics of seasonal variation and solar activity dependence of the geomagnetic solar quiet daily variation. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 10, p. 10,796–10,810, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2017JA024342>>. 10

SINNHUBER, M.; NIEDER, H.; WIETERS, N. Energetic particle precipitation and the chemistry of the mesosphere/lower thermosphere. **Surveys in**

**Geophysics**, v. 33, n. 6, p. 1281–1334, 2012. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1007/s10712-012-9201-3>>. 13

SOLANKI, S. Sunspots: an overview. **The Astronomy and Astrophysics Review**, v. 11, n. 2–3, p. 153–286, Apr 2003. ISSN 1432-0754. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1007/s00159-003-0018-4>>. 58

SPEISER, T. W.; NESS, N. F. The neutral sheet in the geomagnetic tail: its motion, equivalent currents, and field line connection through it. **Journal of Geophysical Research**, v. 72, n. 1, p. 131–141, 1967. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1029/JZ072i001p00131>>. 9

STAUNING, P. Determination of the quiet daily geomagnetic variations for polar regions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, n. 16, p. 2314–2330, 2011. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.07.004>>. 26

STEWART, B. Hypothetical views regarding the connection between the state of the sun and terrestrial magnetism. In: BAYNES, T. S.; SMITH, W. R. (Ed.). **Encyclopedia britannica**. 9. ed. Edinburgh: Adam & Charles Black, 1882. v. 16, p. 181–184. 23

SUTCLIFFE, P. R. The development of a regional geomagnetic daily variation model using neural networks. **Annales Geophysicae**, v. 18, n. 1, p. 120–128, 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00585-000-0120-0>>. 26

TAKEDA, M. Time variation of global geomagnetic Sq field in 1964 and 1980. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 61, n. 10, p. 765–774, 1999. Disponível em:  
<[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(99\)00028-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(99)00028-0)>. 60

TAKEDA, M.; IYEMORI, T.; SAITO, A. Relationship between electric field and currents in the ionosphere and the geomagnetic Sq field. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 108, n. A5, p. 765–774, 2003. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1029/2002JA009659>>. 61

TAPPING, K. F. The 10.7 cm solar radio flux (F10.7). **Space Weather**, v. 11, n. 7, p. 394–406, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/swe.20064>>. 46

TAPPING, K. F.; CHARROIS, D. P. Limits to the accuracy of the 10.7 cm flux. **Solar Physics**, v. 150, n. 1, p. 305–315, 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00712892>>. 46

THÉBAULT, E.; FINLAY, C. C.; BEGGAN, C. D.; ALKEN, P.; AUBERT, J.; BARROIS, O.; BERTRAND, F.; BONDAR, T.; BONESS, A.; BROCCO, L.; CANET, E.; CHAMBODUT, A.; CHULLIAT, A.; COÏSSON, P.; CIVET, F.; DU, A.; FOURNIER, A.; FRATTE, I.; GILLET, N.; HAMILTON, B.; HAMOUDI, M.; HULOT, G.; JAGER, T.; KORTE, M.; KUANG, W.; LALANNE, X.; LANGLAIS, B.; LÉGER, J.-M.; LESUR, V.; LOWES, F. J.; MACMILLAN, S.; MANDEA, M.; MANOJ, C.; MAUS, S.; OLSEN, N.; PETROV, V.; RIDLEY, V.; ROTHER, M.; SABAKA, T. J.; SATURNINO, D.; SCHACHTSCHNEIDER, R.; SIROL, O.; TANGBORN, A.; THOMSON, A.; TØFFNER-CLAUSEN, L.; VIGNERON, P.; WARDINSKI, I.; ZVEREVA, T. International geomagnetic reference field: the 12th generation. **Earth, Planets and Space**, v. 67, n. 79, p. 1–19, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>>. 7, 8

TOKUMOTO, A. S.; BATISTA, P. P.; CLEMESCHA, B. R. Terdiurnal tides in the MLT region over Cachoeira Paulista (29.7° S; 45° W). **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 25, n. 6, p. 69–78, 2007. Disponível em: <<https://sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/1712>>. 88

TRIVEDI, N. B.; PATHAN, B.; SCHUCH, N. J.; BARRETO, M.; DUTRA, L. G. Geomagnetic phenomena in the South Atlantic anomaly region in Brazil. **Advances in Space Research**, v. 36, n. 10, p. 2021–2024, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.09.020>>. 9

TUVE, M. A.; BREIT, G. Note on a radio method of estimating the height of the conducting layer. **Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity**, v. 30, n. 1, p. 15–16, 1925. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/TE030i001p00015>>. 24

UNNIKRISHNAN, K. Prediction of horizontal component of Earth's magnetic field over Indian sector using neural network model. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 121, p. 206–220, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.06.014>>. 26

USOSKIN, I. G.; DESORGHER, L.; VELINOV, P.; STORINI, M.; FLÜCKIGER, E. O.; BÜTIKOFER, R.; KOVALTSOV, G. A. Ionization of the Earth's

atmosphere by solar and galactic cosmic rays. **Acta Geophysica**, v. 57, n. 1, p. 88–101, 2009. Disponível em:

<<https://doi.org/10.2478/s11600-008-0019-9>>. 13

VAN DE KAMP, M. Harmonic quiet-day curves as magnetometer baselines for ionospheric current analyses. **Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems**, v. 2, n. 2, p. 289–304, 2013. Disponível em:

<<https://doi.org/10.5194/gi-2-289-2013>>. 72

VELIZ CASTILLO, O. A. **Manual de operación JRO-ML-103 triaxial magnetometer**: version 1.2/06.2010. Lima: Jicamarca Radio Observatory, 2010a. 31 p. 30, 31, 32

\_\_\_\_\_. **Diseño y construcción de magnetómetros digitales triaxiales**.

Lima: Jicamarca Radio Observatory, 2010b. 8 p. 30

WHITTEN, R. C.; POPOFF, I. G. **Fundamentals of aeronomy**. New York: John Wiley and Sons, 1971. 407 p. 24

WIENERT, K. A. **Notes on geomagnetic observatory and survey practice**. Brussels: UNESCO, 1970. 217 p. 11

WORLD DATA CENTER FOR GEOMAGNETISM, KYOTO. **The international 5 and 10 quietest and 5 most disturbed days [1932 - ]**. 2019. Disponível em: <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html>>.

Acesso em: 5 jun. 2019. 35, 89, 140

YAMAZAKI, Y.; KOSCH, M. J. Geomagnetic lunar and solar daily variations during the last 100 years. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 119, n. 8, p. 6732–6744, 2014. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1002/2014JA020203>>. 60, 62

YAMAZAKI, Y.; LIU, H.; SUN, Y.; MIYOSHI, Y.; KOSCH, M. J.; MLYNCZAK, M. G. Quasi-biennial oscillation of the ionospheric wind dynamo. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 3, p. 3553–3569, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2016JA023684>>. 3, 24, 68

YAMAZAKI, Y.; MAUTE, A. Sq and EEJ—a review on the daily variation of the geomagnetic field caused by ionospheric dynamo currents. **Space Science Reviews**, v. 206, n. 1–4, p. 299–405, 2017. Disponível em:

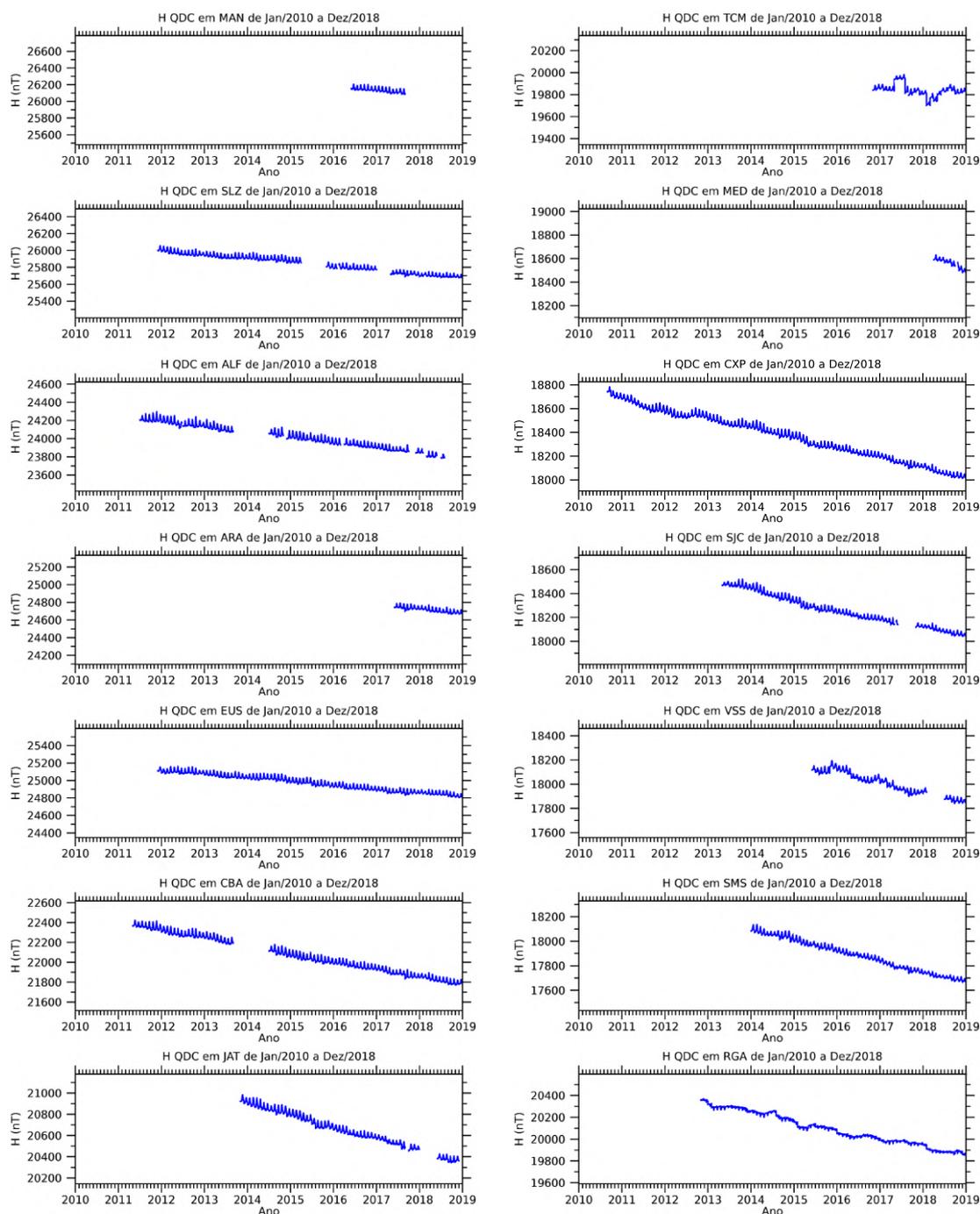
<<https://doi.org/10.1007/s11214-016-0282-z>>. 3, 9, 10, 24, 25

YAMAZAKI, Y.; YUMOTO, K.; CARDINAL, M. G.; FRASER, B. J.; HATTORI, P.; KAKINAMI, Y.; LIU, J. Y.; LYNN, K. J. W.; MARSHALL, R.; MCNAMARA, D.; NAGATSUMA, T.; NIKIFOROV, V. M.; OTADOY, R. E.; RUHIMAT, M.; SHEVTSOV, B. M.; SHIOKAWA, K.; ABE, S.; UOZUMI, T.; YOSHIKAWA, A.  
An empirical model of the quiet daily geomagnetic field variation. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 116, n. A10312, p. 1–21, 2011.  
Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2011JA016487>>. 26, 62



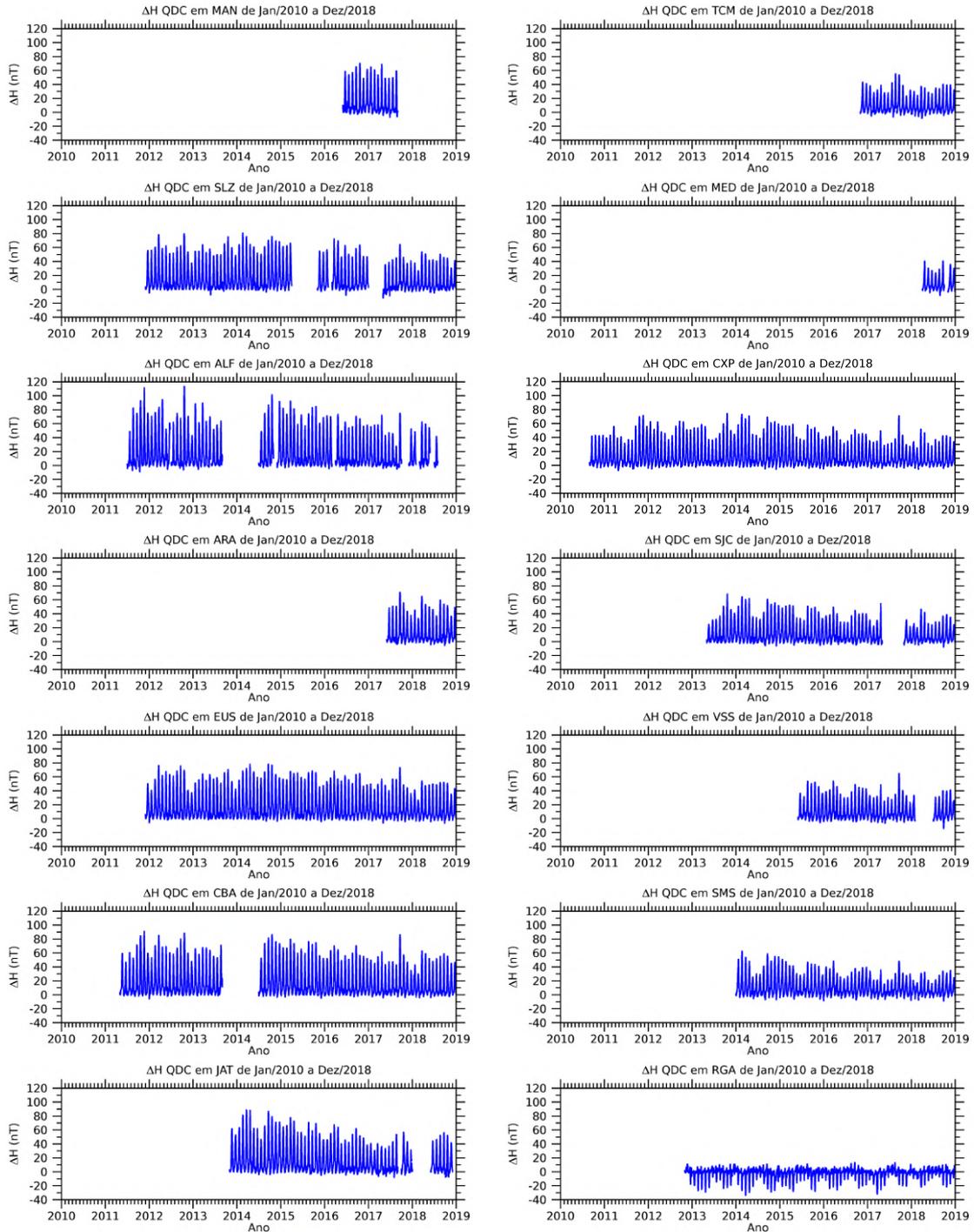
## APÊNDICE A - GRÁFICOS DE RESULTADOS COMPLEMENTARES

Figura A.1 - Série temporal das QDCs mensais da componente horizontal do campo geomagnético, em relação à magnitude do campo geomagnético, das estações magnéticas da Embrace MagNet entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



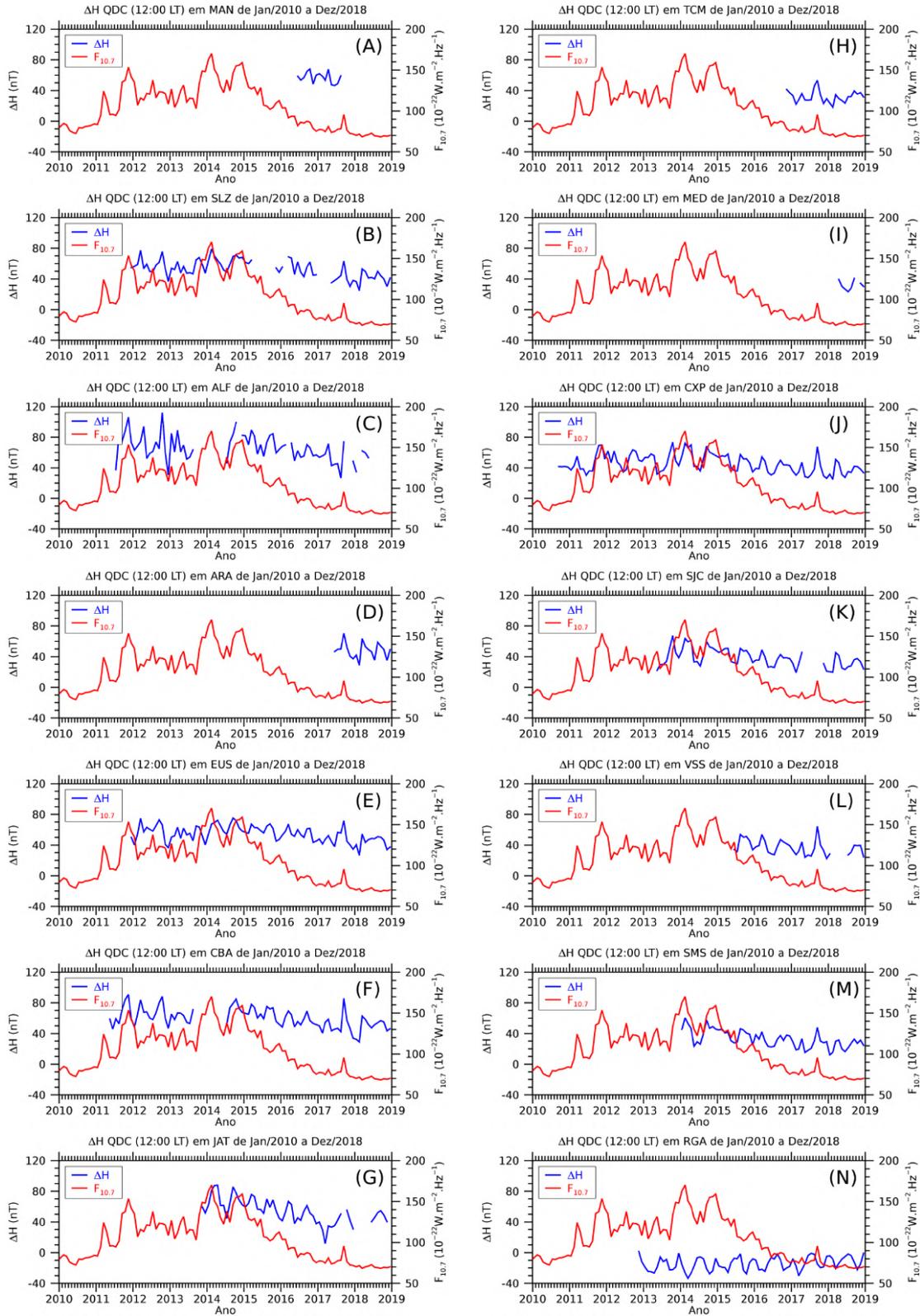
Fonte: Produção do autor.

Figura A.2 - Série temporal das QDCs mensais da componente horizontal do campo geomagnético, em relação à variação diurna, das estações magnéticas da Embrace MagNet entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



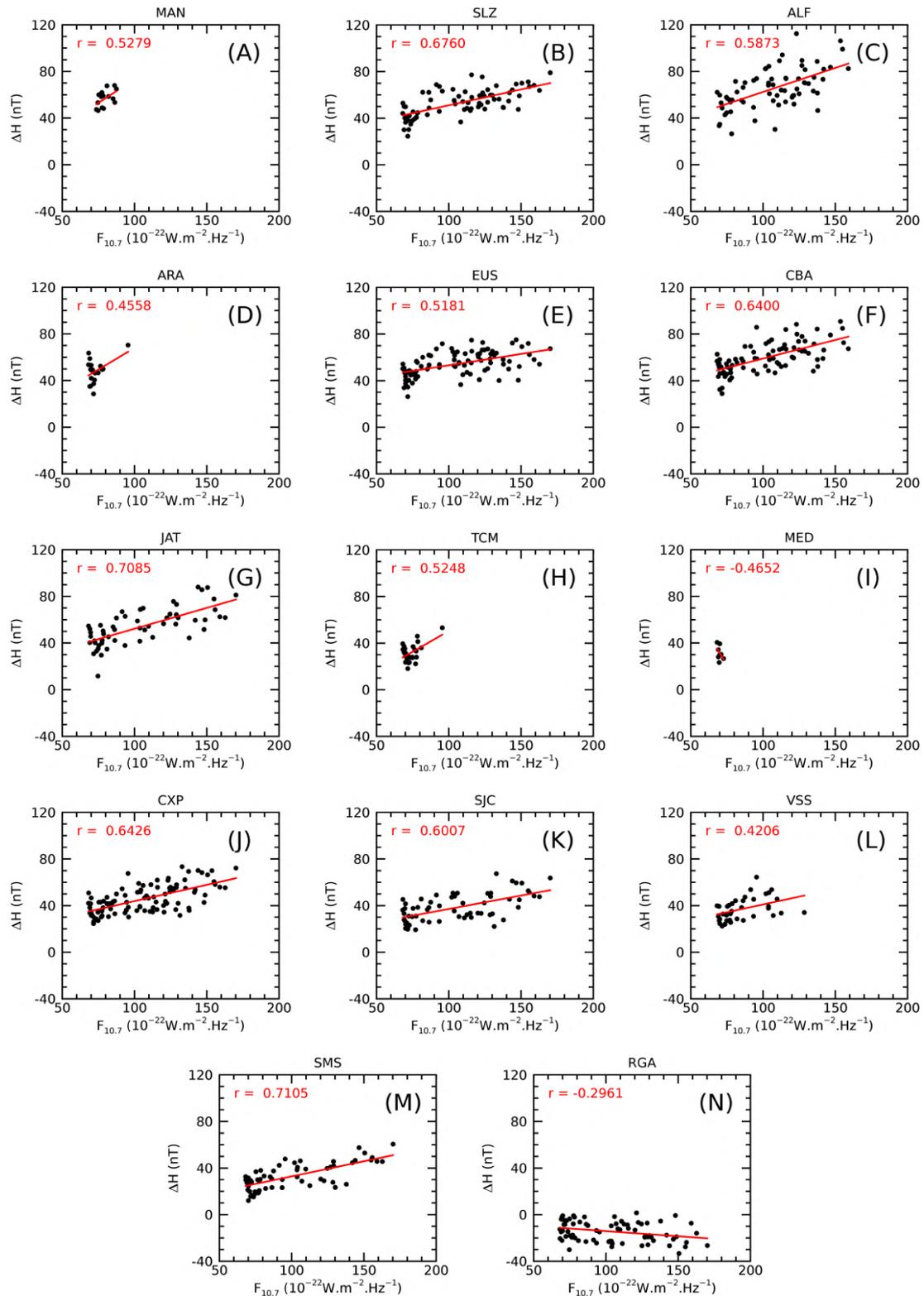
Fonte: Produção do autor.

Figura A.3 - Série temporal da amplitude da  $\Delta H_{QDC}$  das estações magnéticas da Embrace MagNet e do  $F_{10.7}$ , entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



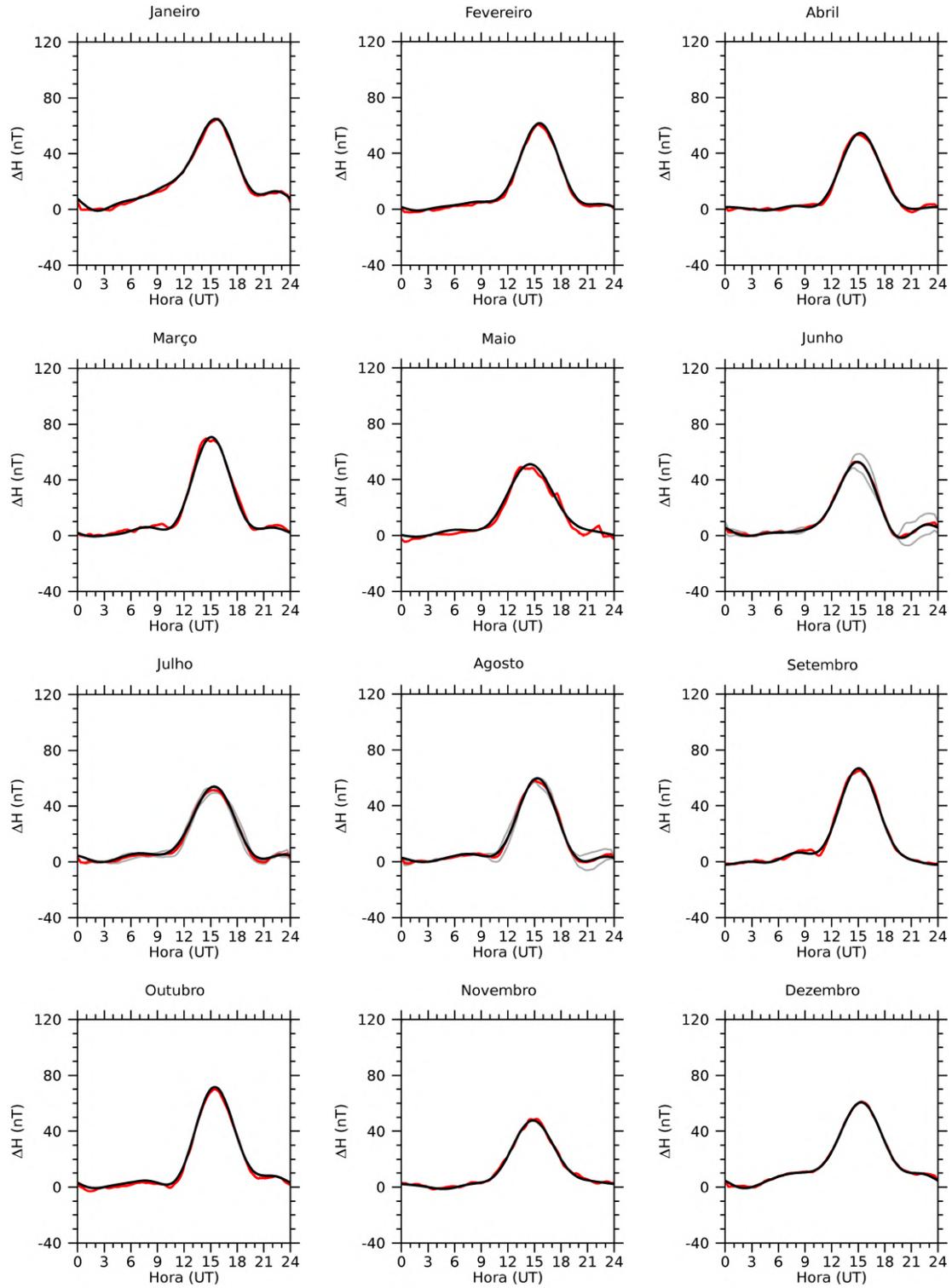
Fonte: Produção do autor.

Figura A.4 - Dispersão da correlação linear entre a amplitude da variação diurna da  $\Delta H_{QDC}(12:00LT)$  das estações magnéticas da Embrace MagNet (painéis A a N) e o fluxo de rádio solar mensal  $F_{10.7}$  entre os meses de janeiro de 2010 e dezembro de 2018.



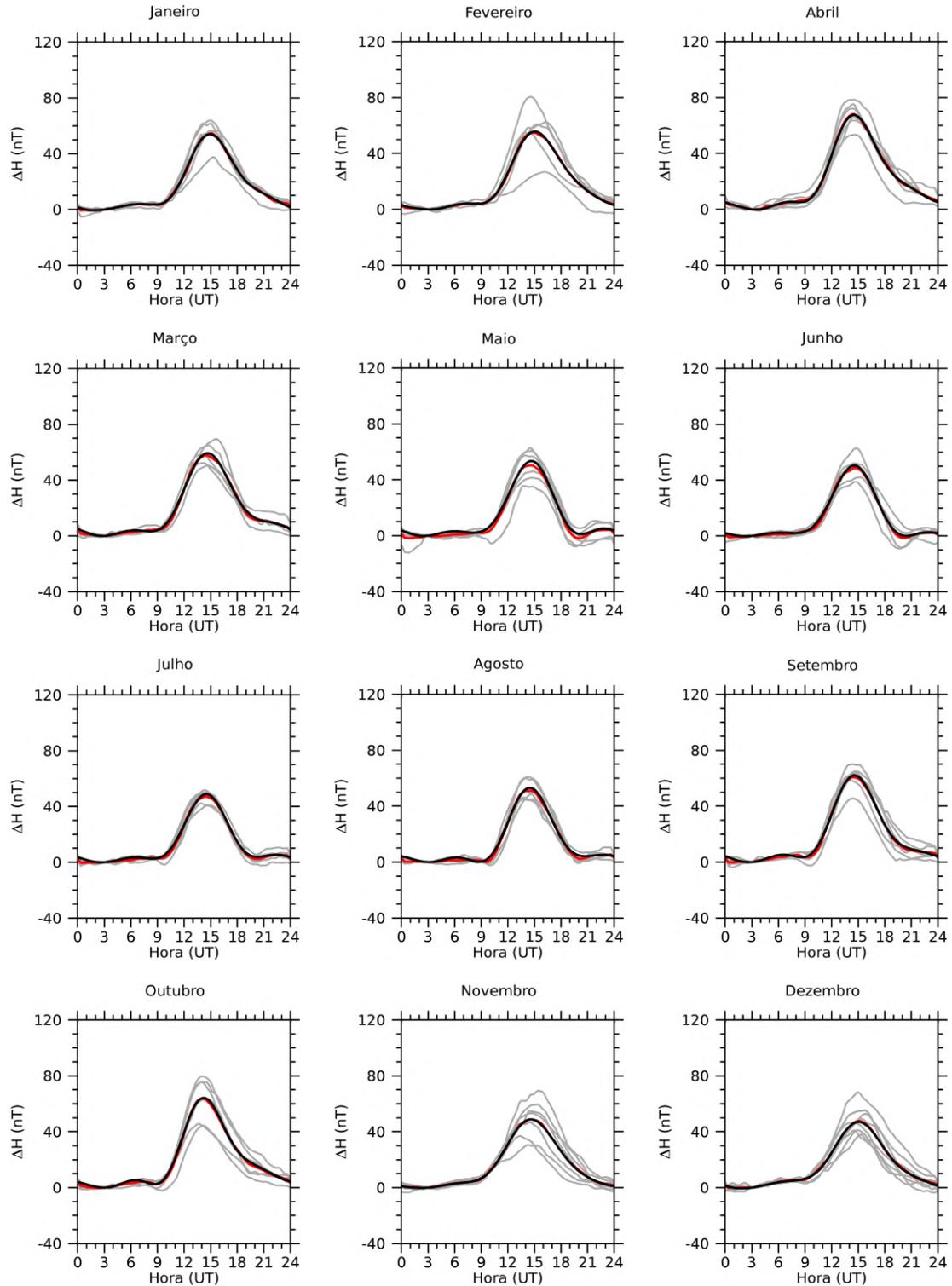
Fonte: Produção do autor.

Figura A.5 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de Manaus. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



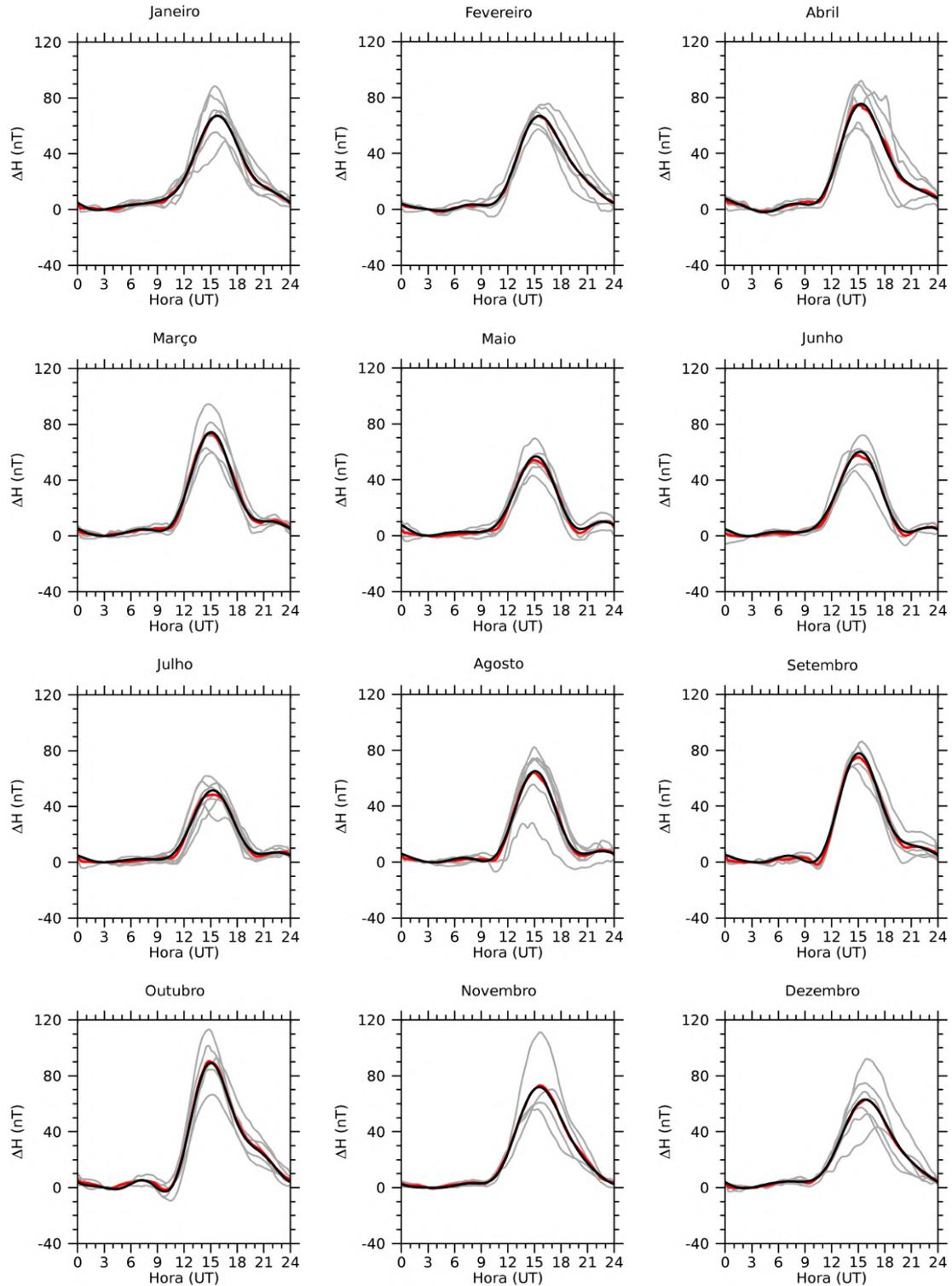
Fonte: Produção do autor.

Figura A.6 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de São Luís. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



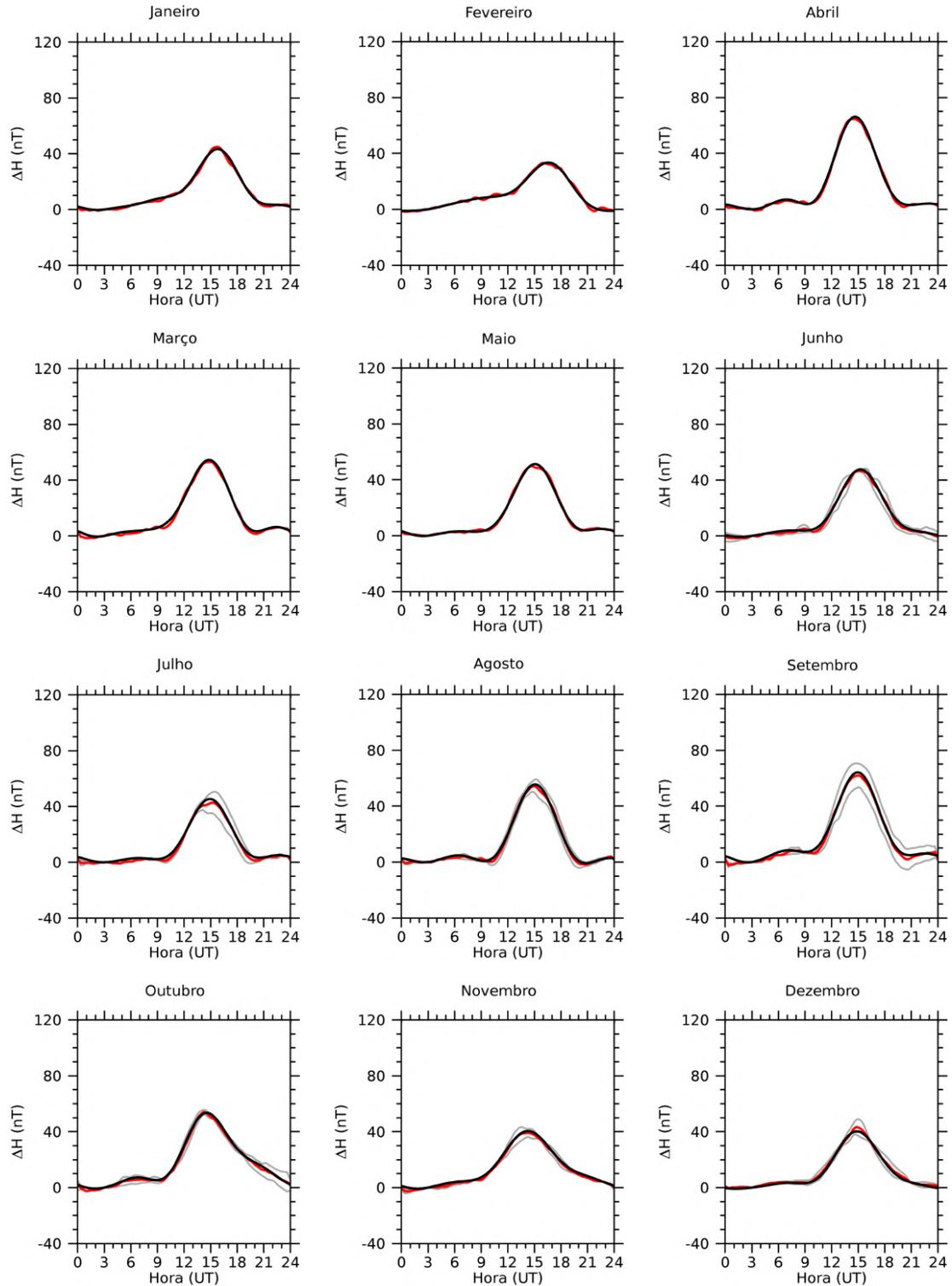
Fonte: Produção do autor.

Figura A.7 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de Alta Floresta. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



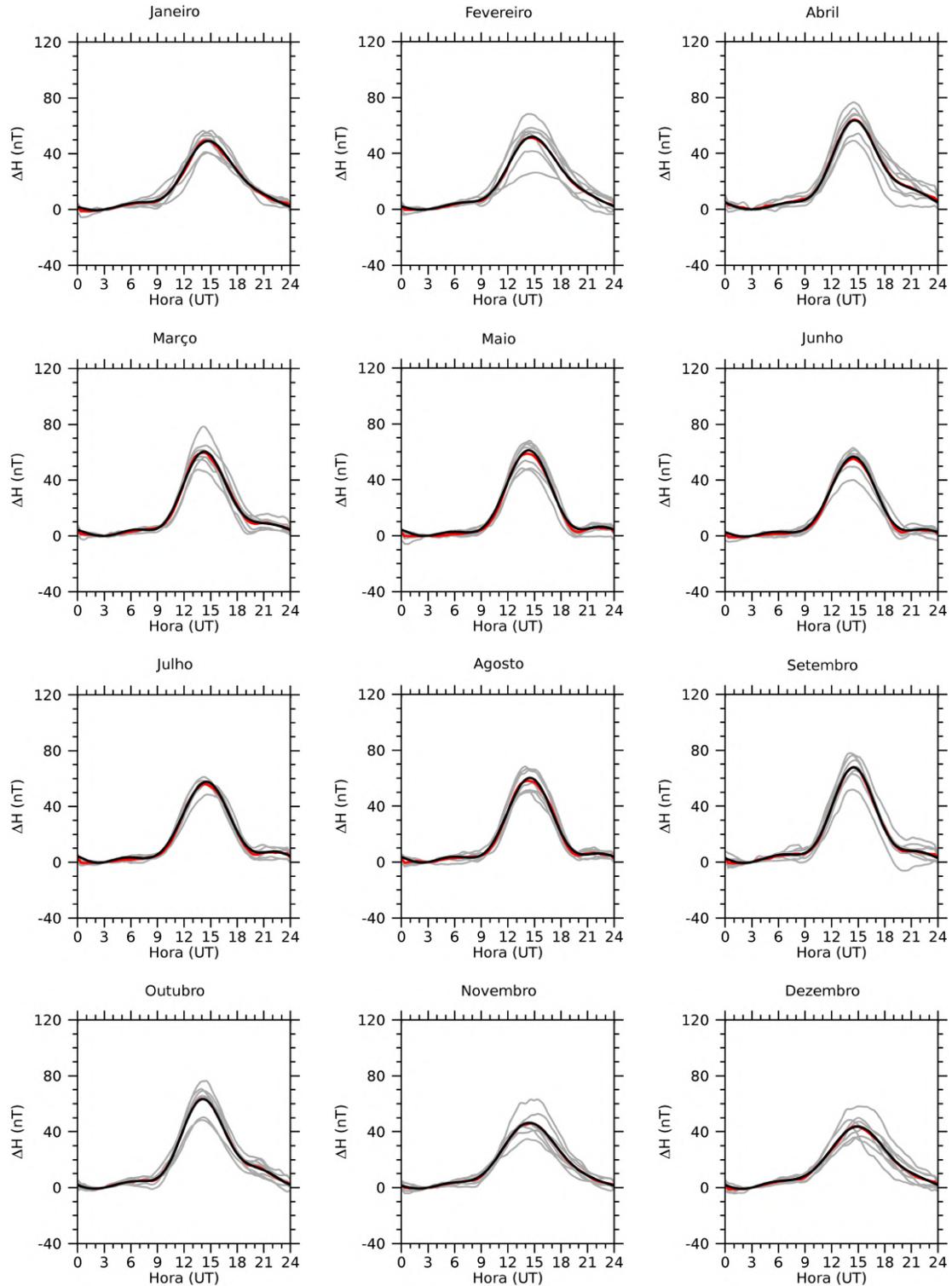
Fonte: Produção do autor.

Figura A.8 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de Araguatins. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



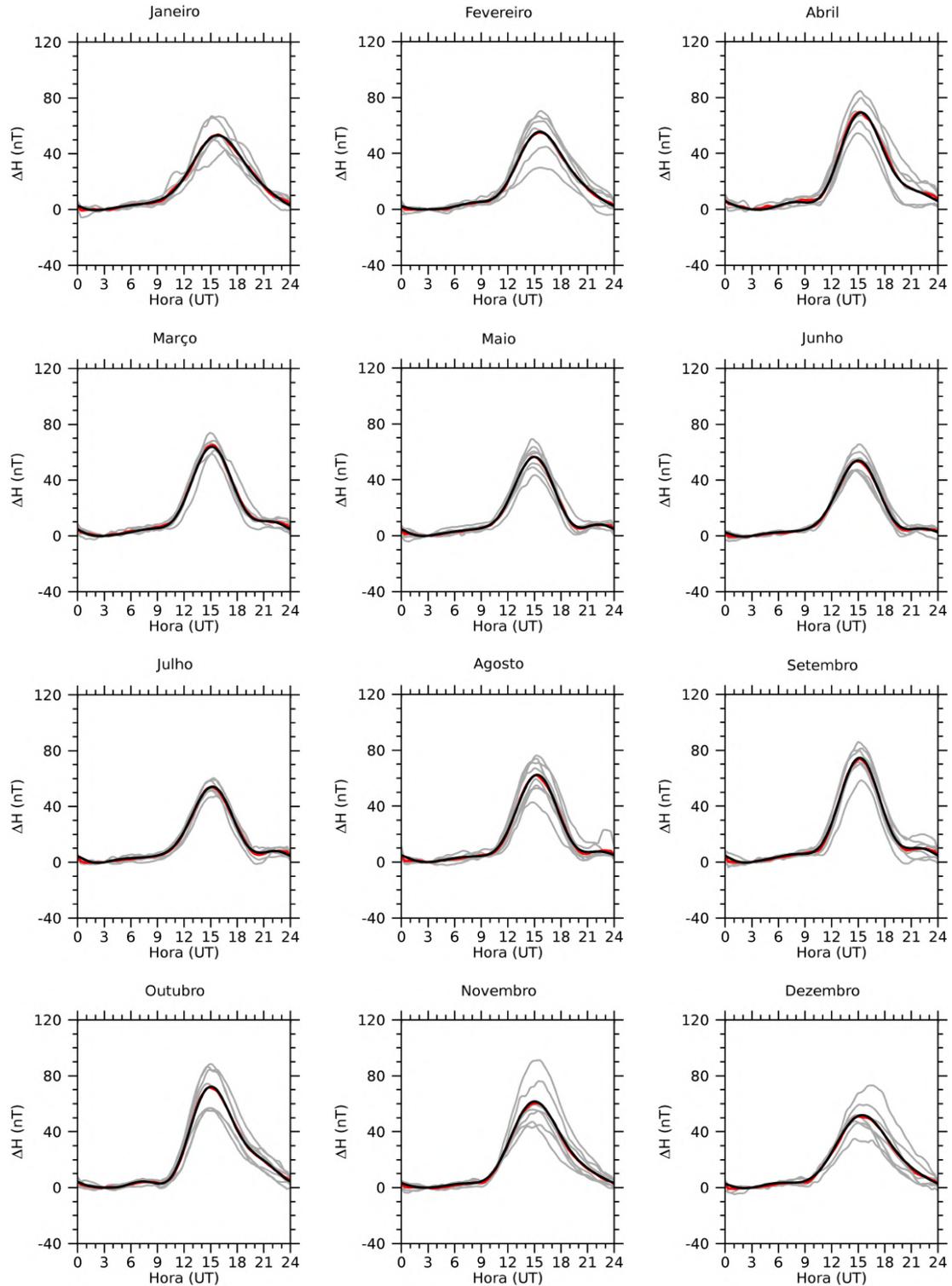
Fonte: Produção do autor.

Figura A.9 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de Eusébio. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



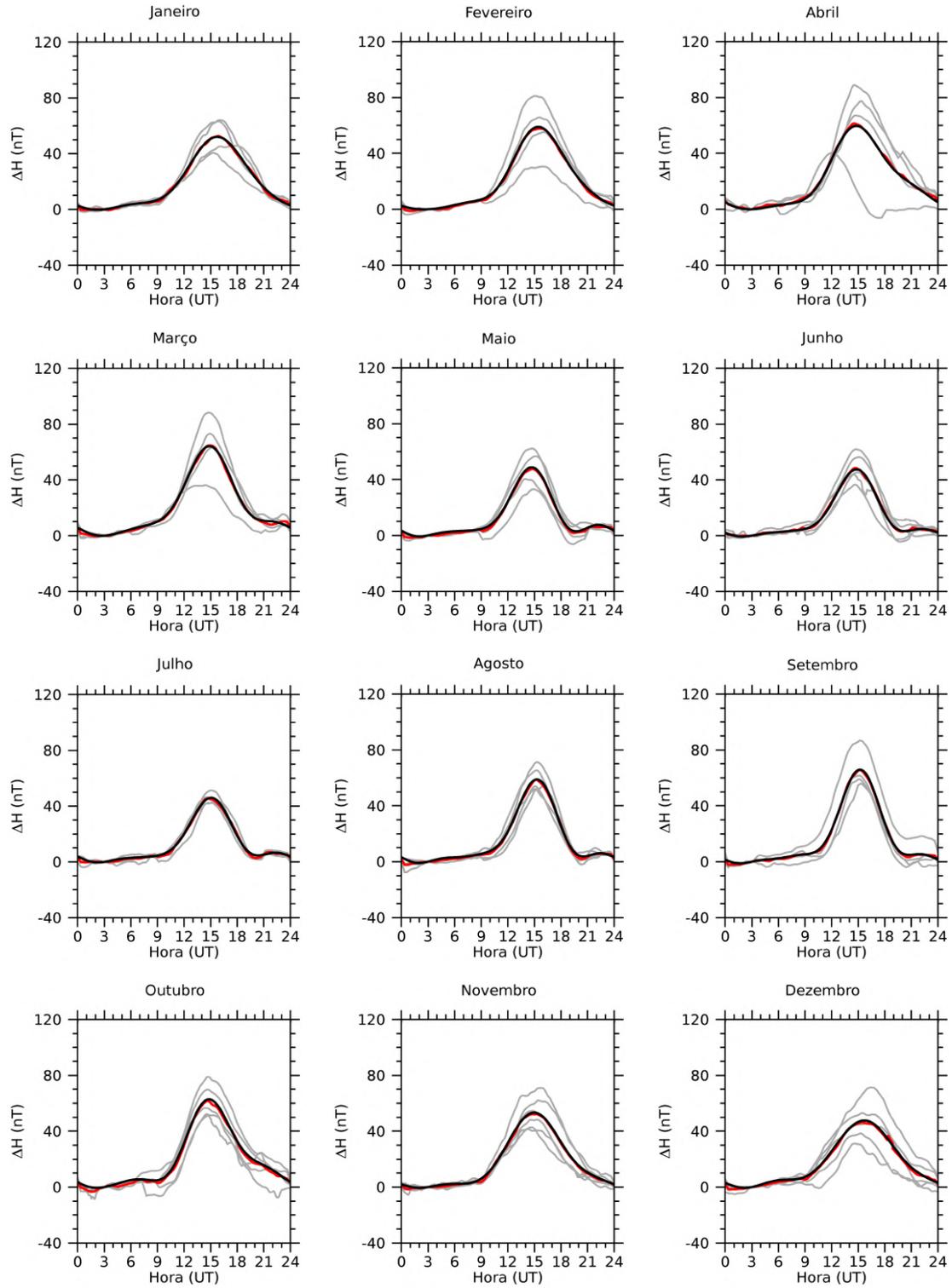
Fonte: Produção do autor.

Figura A.10 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de Cuibá. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



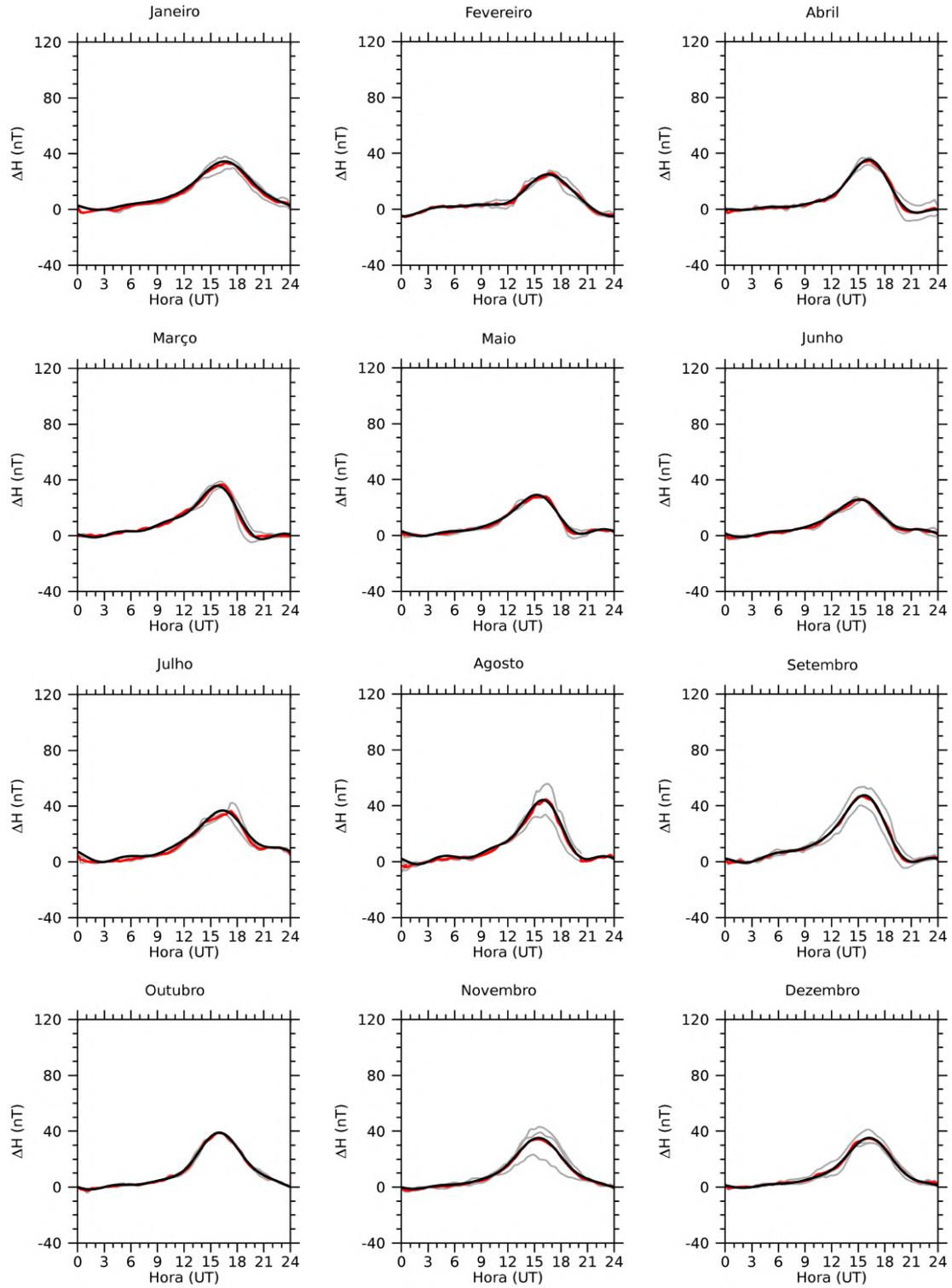
Fonte: Produção do autor.

Figura A.11 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de Jataí. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



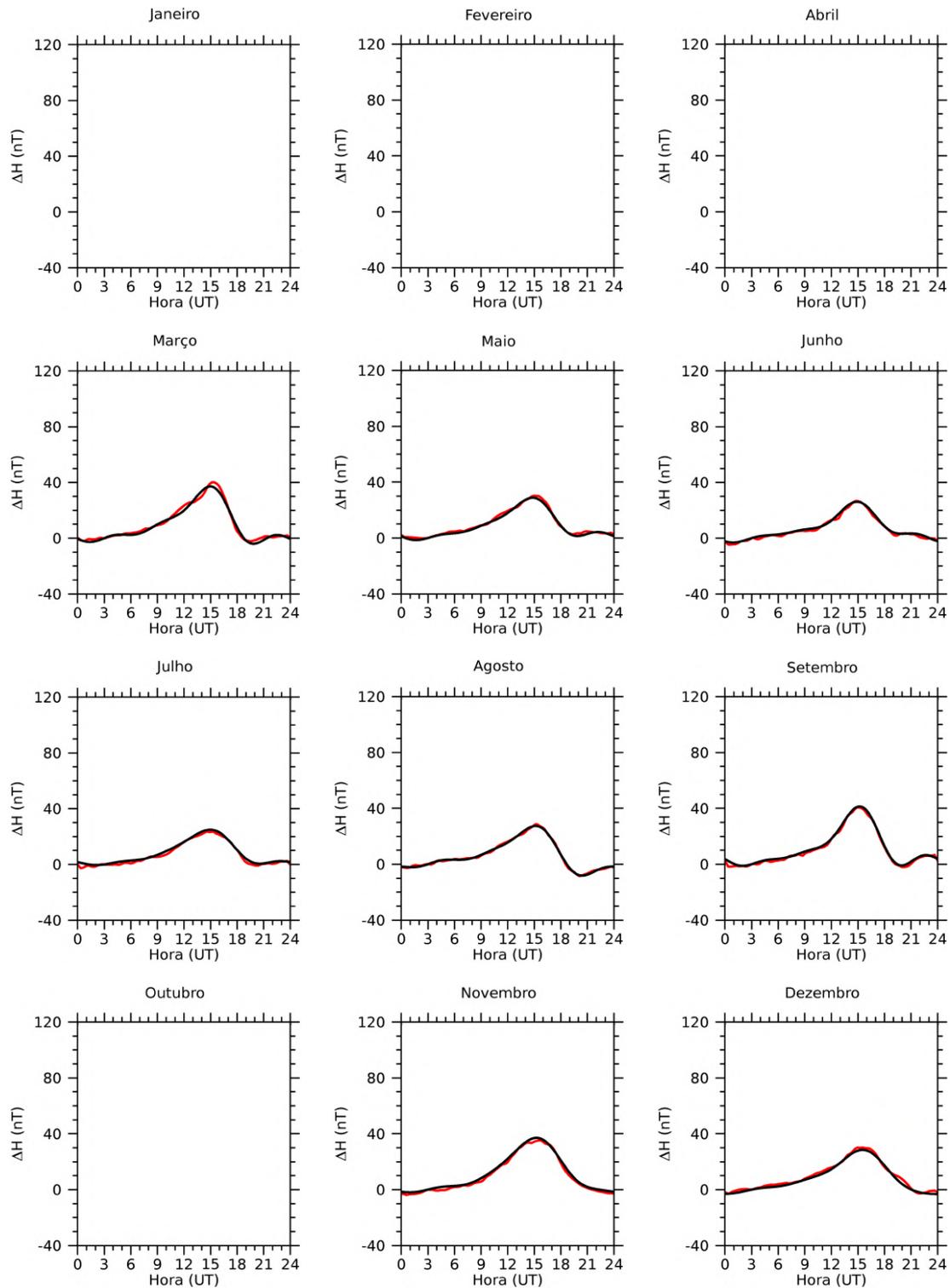
Fonte: Produção do autor.

Figura A.12 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de Tucumán. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



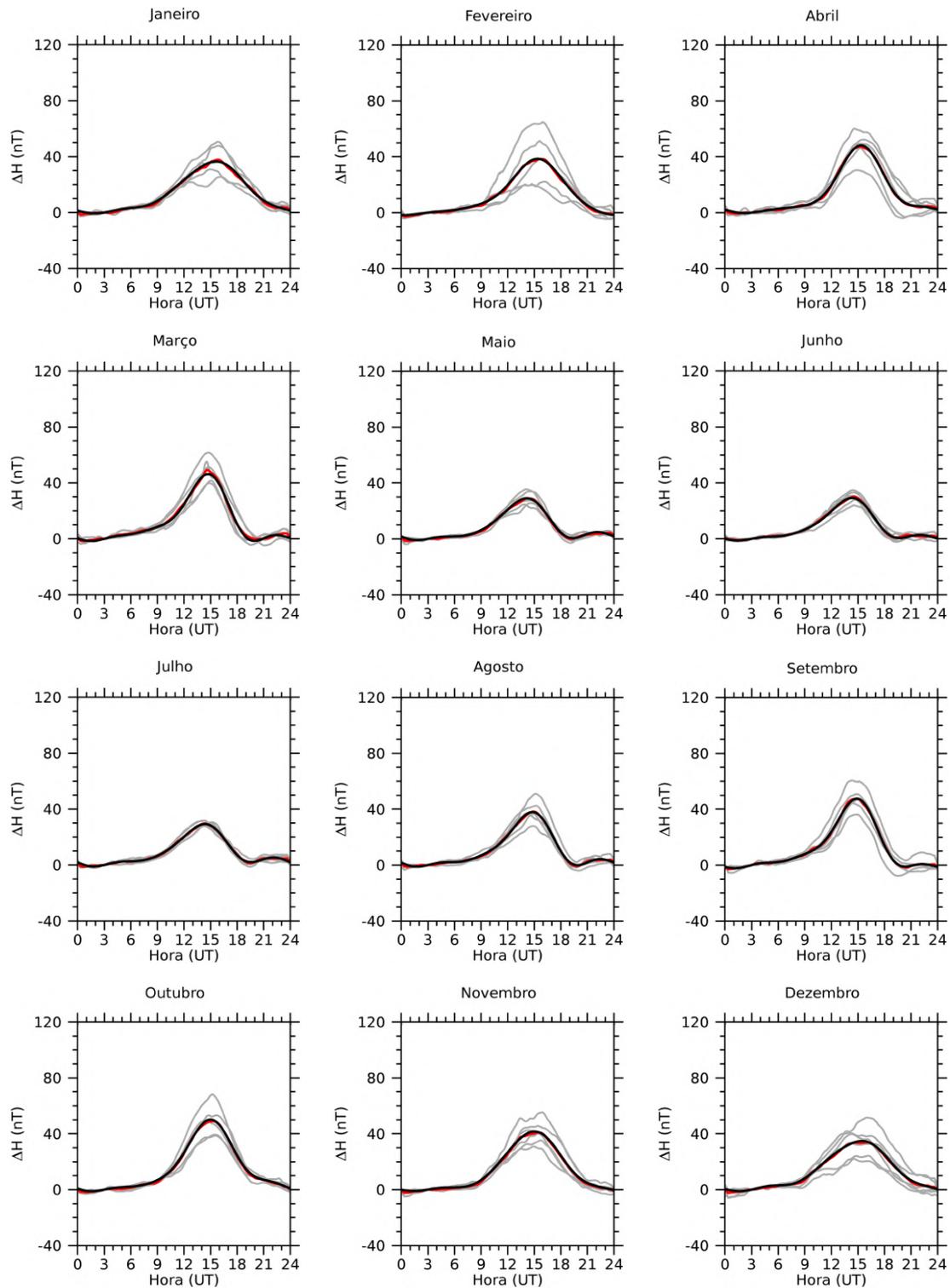
Fonte: Produção do autor.

Figura A.13 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de Medianeira. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



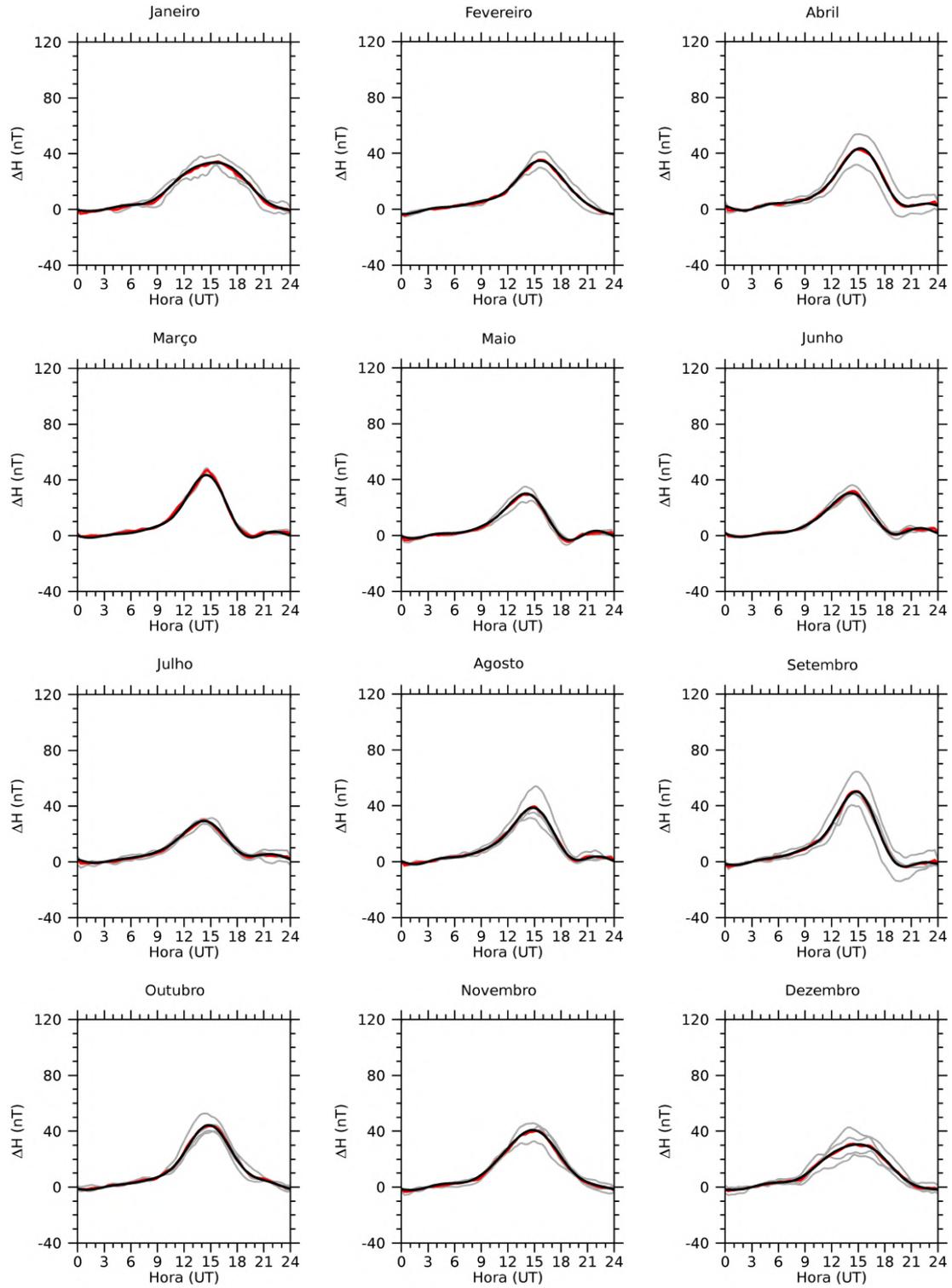
Fonte: Produção do autor.

Figura A.14 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de São José dos Campos. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



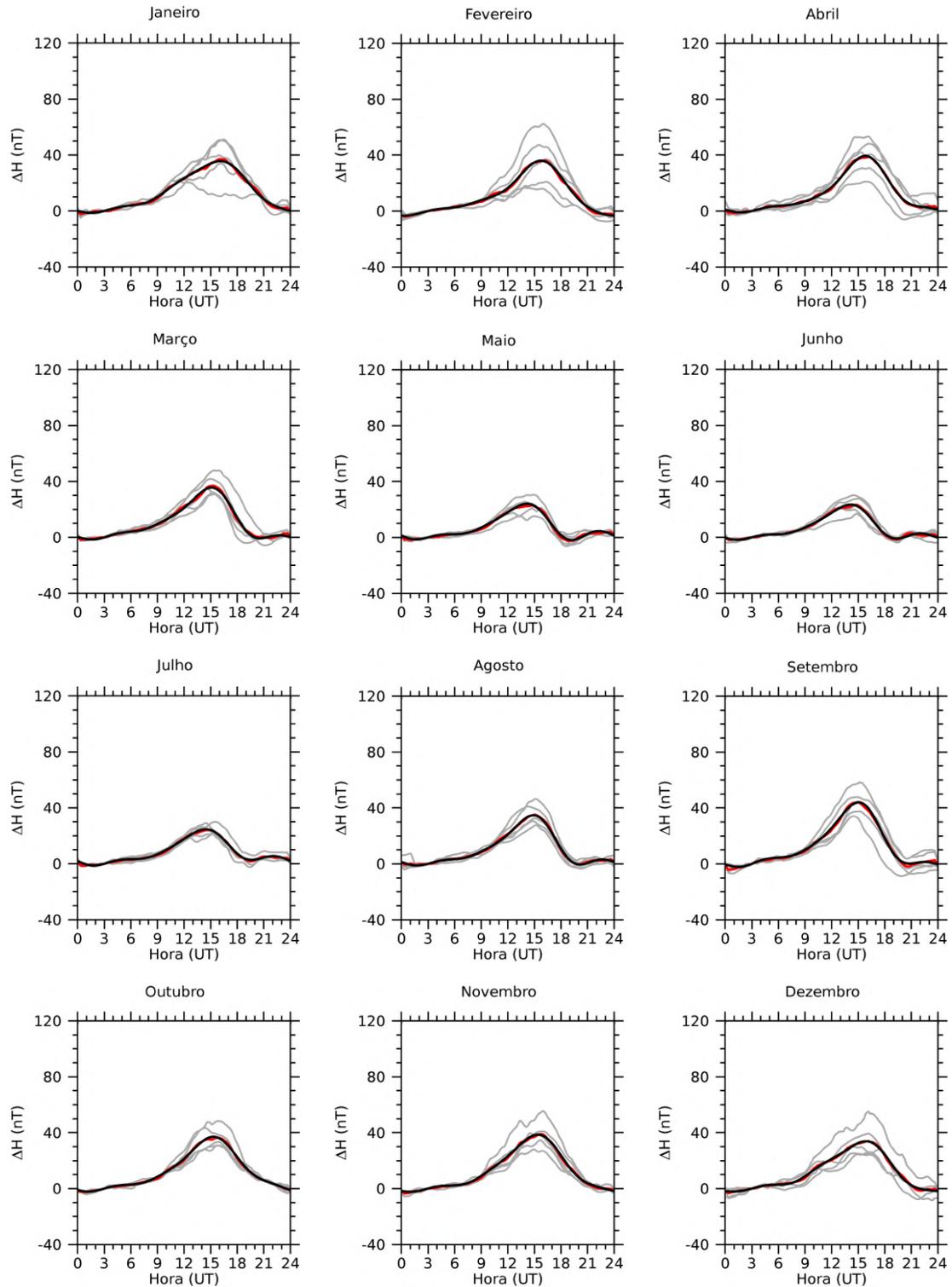
Fonte: Produção do autor.

Figura A.15 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de Vassouras. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



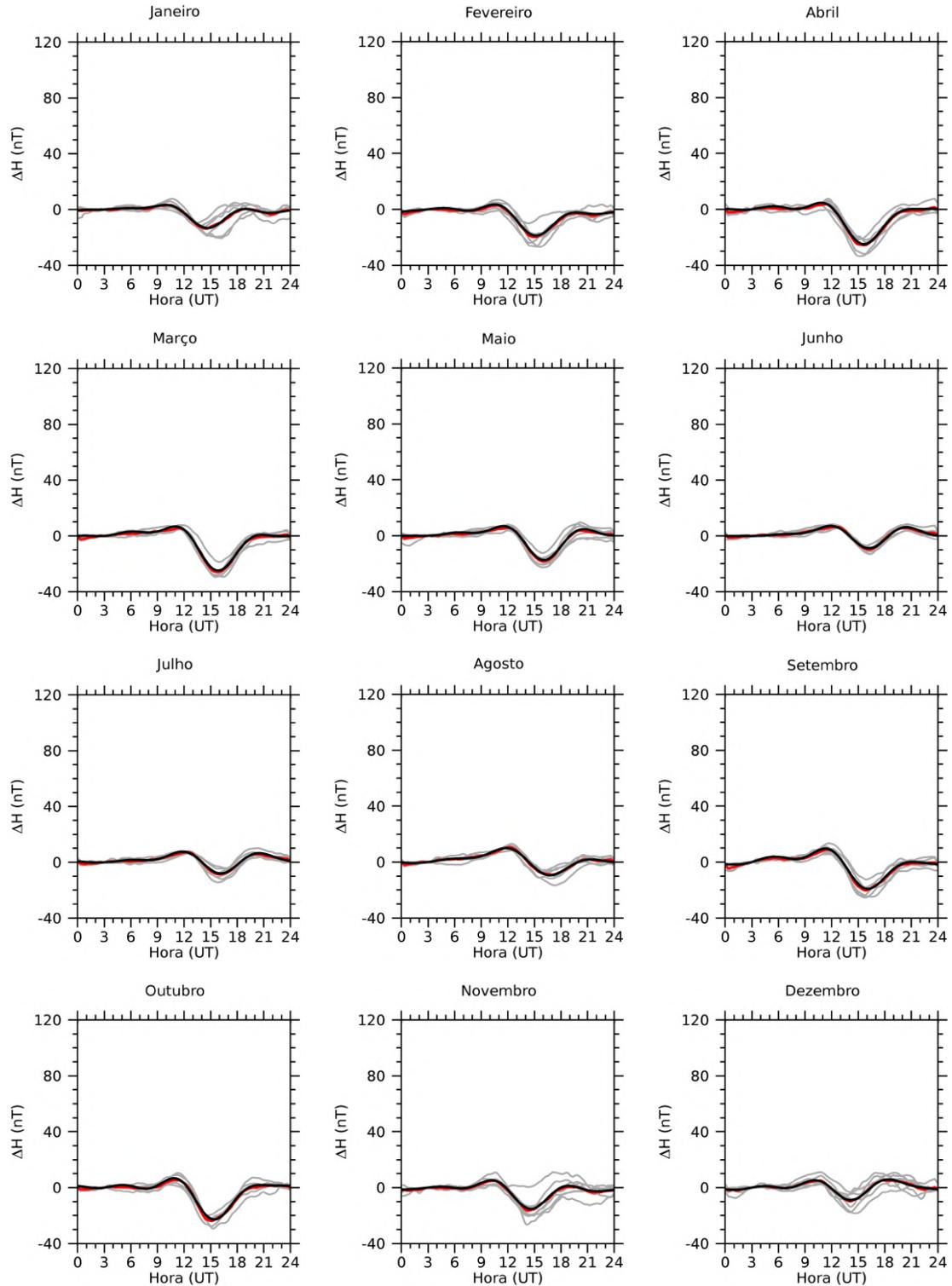
Fonte: Produção do autor.

Figura A.16 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de São Martinho da Serra. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



Fonte: Produção do autor.

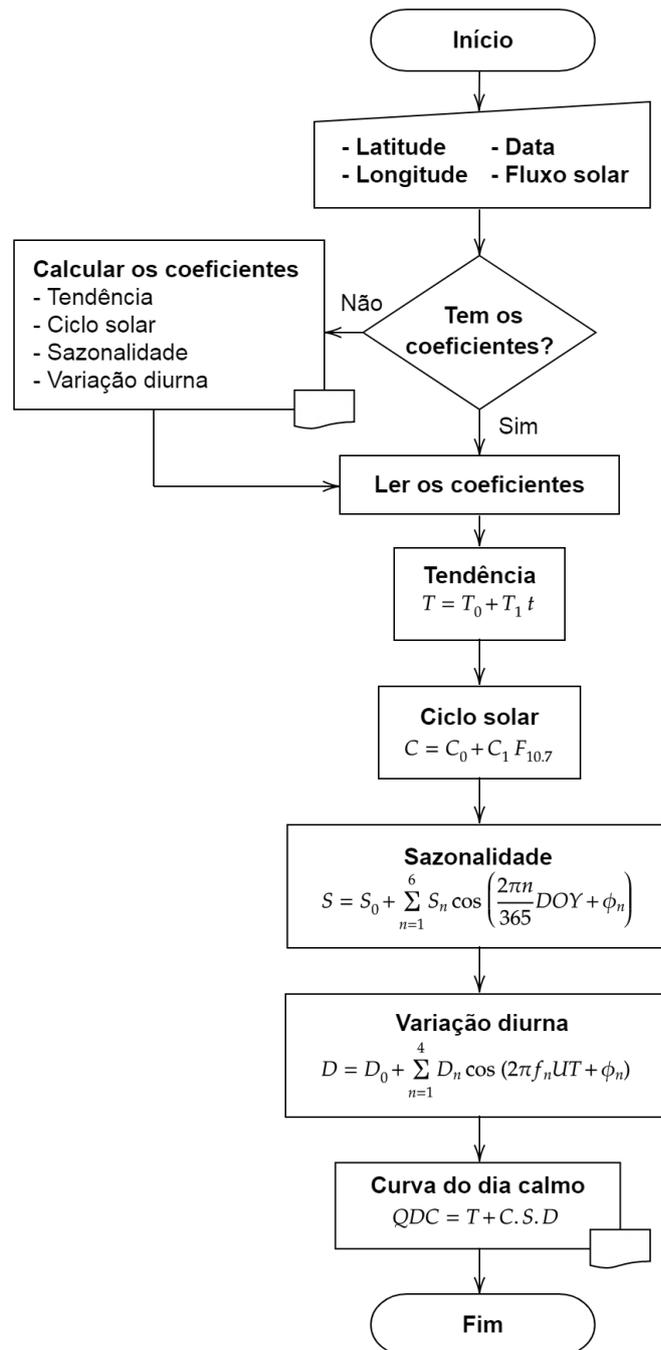
Figura A.17 -  $\Delta H_{QDC}$  mensal da estação magnética de Rio Grande. As linhas cinzas indicam as QDCs calculadas a partir dos dados. A linha vermelha indica a média das QDCs. A linha preta indica a QDC obtida a partir da expansão em séries de Fourier.



Fonte: Produção do autor.

## APÊNDICE B - FLUXOGRAMA DO MODELO EMPÍRICO SQ-QDCM

Figura B.1 - Fluxograma do modelo empírico Sq-QDCM utilizado para calcular a QDC da componente horizontal do campo geomagnético.





## ANEXO A - LISTA DOS CINCO DIAS GEOMAGNETICAMENTE MAIS CALMOS

Tabela A.1 - Lista dos cinco dias magneticamente mais calmos entre os anos de 2010 e 2018.

Ano	Mês	Dias calmos				
		Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5
2010	1	17	7	9	2	8
	2	20	21	27	5	28
	3	22	23	21	9	8
	4	26	10	18	25	30
	5	23	24	27	9	13
	6	12	20	8	19	9
	7	10	17	18	7	13
	8	30	22	21	29	14
	9	11	12	30	4	22
	10	2	14	1	3	4
	11	6	26	19	2	7
	12	10	22	11	3	23
2011	1	30	23	5	27	21
	2	3	9	27	13	28
	3	15	26	16	27	18
	4	27	26	10	28	16
	5	20	8	12	25	9
	6	29	3	28	19	27
	7	27	28	16	24	17
	8	31	18	19	3	21
	9	23	19	1	16	8
	10	28	29	22	14	23
	11	19	14	9	20	13
	12	27	16	26	17	6
2012	1	14	19	4	31	18
	2	17	23	12	2	16
	3	26	29	25	31	20
	4	30	6	9	8	16
	5	27	7	5	1	26
	6	19	15	21	14	20
	7	13	26	27	18	31
	8	31	10	30	28	29

(Continua)

Tabela A.1 - Continuação

Ano	Mês	Dias calmos				
		Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5
	9	23	28	11	25	24
	10	20	4	29	30	22
	11	9	30	28	4	11
	12	6	8	22	7	27
2013	1	22	1	5	30	24
	2	6	5	24	25	9
	3	8	7	26	25	13
	4	19	8	18	17	21
	5	29	30	11	12	9
	6	16	26	17	13	14
	7	2	3	17	8	21
	8	29	2	7	8	20
	9	28	26	27	15	29
	10	5	28	4	19	21
	11	25	24	21	27	28
	12	2	12	22	26	27
2014	1	19	31	18	20	16
	2	13	26	14	25	2
	3	16	9	17	7	8
	4	10	6	27	2	22
	5	21	6	31	17	26
	6	1	12	27	15	22
	7	19	18	20	1	29
	8	16	25	24	9	26
	9	14	15	8	17	20
	10	12	3	30	4	5
	11	29	26	13	28	3
	12	11	18	17	16	27
2015	1	20	18	19	25	15
	2	13	27	14	26	12
	3	10	30	5	14	9
	4	25	26	12	8	29
	5	25	21	22	23	24
	6	20	5	2	4	3
	7	19	2	3	18	20

(Continua)

Tabela A.1 - Continuação

Ano	Mês	Dias calmos				
		Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5
	8	14	30	31	5	21
	9	30	27	28	26	1
	10	26	28	27	19	29
	11	24	25	23	22	26
	12	30	3	4	28	18
2016	1	25	30	29	16	17
	2	22	28	27	21	29
	3	26	13	5	4	25
	4	19	9	29	1	20
	5	25	26	12	23	4
	6	3	2	21	4	20
	7	5	18	27	31	26
	8	28	1	15	14	22
	9	16	11	23	17	10
	10	21	11	20	9	22
	11	19	5	8	20	30
	12	4	16	3	15	30
2017	1	16	24	17	14	13
	2	14	26	15	12	8
	3	20	19	18	13	17
	4	16	17	3	13	10
	5	26	25	3	24	31
	6	4	20	10	8	30
	7	5	14	8	31	15
	8	28	15	26	9	2
	9	26	9	25	23	22
	10	30	9	29	31	10
	11	6	5	26	1	4
	12	3	22	21	10	15
2018	1	18	17	7	11	6
	2	11	13	14	8	7
	3	28	12	13	8	29
	4	19	16	17	29	28
	5	1	21	19	20	26
	6	16	10	21	15	11

(Continua)

Tabela A.1 - Continuação

Ano	Mês	Dias calmos				
		Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5
	7	1	9	2	18	15
	8	6	14	10	13	23
	9	20	3	19	1	8
	10	18	20	29	19	23
	11	17	15	16	26	22
	12	15	23	14	16	13

Fonte: Adaptada de [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto](#) (2019).