

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA



MAURÍCIO DE MORAES MACHADO

**RECUPERAÇÃO, PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DA  
DECLINAÇÃO MAGNÉTICA DO OBSERVATÓRIO DE TATUOCA**

MONOGRAFIA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**Niterói, RJ  
2022**

MAURÍCIO DE MORAES MACHADO

**RECUPERAÇÃO, PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DA  
DECLINAÇÃO MAGNÉTICA DO OBSERVATÓRIO DE TATUOCA**

Monografia apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Curso de Graduação em Geofísica para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

**Orientadores**

Gabriel Brando Soares

Kátia J. dos Reis Pinheiro

Rodrigo Bijani Santos

**Niterói, RJ**

**2022**

MAURÍCIO DE MORAES MACHADO

**RECUPERAÇÃO, PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DA DECLINAÇÃO  
MAGNÉTICA DO OBSERVATÓRIO DE TATUOCA**

Monografia apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Curso de Graduação em Geofísica para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Aprovado em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_ pela banca examinadora abaixo:

---

**MSc. Gabriel Brando Soares**  
ON / MCTIC

---

**Dra. Kátia Jasbinscheck dos Reis Pinheiro**  
ON / MCTIC

---

**Dr. Rodrigo Bijani Santos**  
GGO / UFF

**Niterói, RJ**  
**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, obrigatoriamente, agradeço à meu pai, Walter Rogério Dias Machado, cujo espírito paterno, com suas peculiaridades, permeou toda a trajetória até a realização deste trabalho, e que sacrificou um pedaço de sua vida para dar toda a base que me permitiu chegar até aqui e conquistar as minhas metas com minhas próprias pernas. Agradeço ao meu irmão, Murilo de Moraes Machado, e a família Plozzer, ambos sempre estiveram presente na minha caminhada em vida, sempre me apoiando.

Em segundo lugar, ao MSc. Gabriel Brando Soares e a Dra. Kátia J. dos Reis Pinheiro que fazem parte da equipe MOSAIC (Magnetic Observatories, Stations And Integrated Research, com grande experiência em processamento de dados e modelagem do campo magnético. São pessoas muito queridas, que possuo grande admiração e que me ajudaram muito nessa fase da minha vida. Espero ainda trabalhar por muitos anos com esta equipe que tanto admiro.

Agradeço também a meu orientador Rodrigo Bijani Santos, que foi um dos meus professores na UFF, um grande profissional em sua área de trabalho, a qual possuo muito respeito e admiração, e por ter apoiado e estimulado a realização deste trabalho.

Não poderia deixar de registrar minha profunda gratidão a Ana Paula Serrano, secretária de graduação da Geofísica, e ao ex-coordenador do curso e professor Arthur Ayres Neto por resolver questões burocráticas durante o meu processo de formação.

Também gostaria de agradecer a toda Equipe MOSAIC, por fornecer os dados usados neste trabalho e claro, agradecer também a própria UFF por toda a estrutura e suporte que fornece aos estudantes.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os meus amigos que fazem parte da minha vida e do meu ser e que, de uma forma ou de outra, tem uma enorme influência neste trabalho, obrigado Jambogueiros e Q26.

A todos esses citados deixo meus mais afetuosos e sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Observatórios magnético são construídos com o intuito de fornecer registros magnéticos contínuos e de alta qualidade. Dados de observatórios possuem diversas aplicações, incluindo pesquisa científica em diversas áreas do conhecimento, desenvolvimento de modelos do campo magnético e utilização na indústria (mineração, óleo e gás e satélites). O observatório magnético de Tatuoca (TTB) é operado pelo Observatório Nacional (ON) desde 1957 na Ilha de Tatuoca, Foz do Rio Amazonas, Belém (PA, Brasil). TTB se localiza próximo à Anomalia Magnética do Atlântico Sul e na região de maior intensidade da variação secular da inclinação do campo magnético, o que causa um rápido movimento do equador magnético (linha ao redor do globo em que o campo magnético é horizontal) para norte (cerca de 22km por ano). Os dados de TTB podem ser encontrados em diversos formatos e fontes. Atualmente não existe um conjunto de dados definitivo e completo de TTB. Este projeto propõe a recuperação, o processamento e a disponibilização completa dos dados de Declinação (D) de TTB. Para isso, é necessário agrupar dados de diferentes fontes e processá-los. A recuperação e processamento dos dados das componentes horizontal (H) e vertical (Z) já se encontram em estágio avançado devido ao desenvolvimento de outros projetos do grupo de geomagnetismo do ON. Este projeto focará na recuperação dos dados de D, baseado na experiência prévia com as componentes H e Z. A consequente disponibilidade de um longo conjunto de dados de cerca de 60 anos da componente D de TTB permitirá investigações inéditas tanto da variação secular do campo magnético principal quanto de variações associadas ao campo magnético externo (variação diurna e tempestades magnéticas).

**Palavras-chave:** Observatório magnético de Tatuoca, Declinação Magnética, Processamento de dados magnéticos, Variação Secular

## ABSTRACT

Geomagnetic observatories provides continuous and high quality magnetic records. Data from observatories have several applications, including scientific research in different areas of knowledge, development of geomagnetic field models and use in industry (mining, oil and gas and satellites). The Tatuoca Geomagnetic Observatory (TTB) has been operated by the National Observatory (ON) since 1957 on Tatuoca Island, Foz do Rio Amazonas, Belém (PA, Brazil). TTB is located close to the South Atlantic Magnetic Anomaly and in the region of greatest intensity of secular variation of the great extension of the geomagnetic field, which causes a rapid movement of the magnetic equator (line around the globe in which the geomagnetic field is horizontal) to north (about 22km per year). TTB data can be found in a variety of formats and sources. There is currently no definitive and complete TTB dataset. This project proposes the retrieval, processing and complete availability of TTB Declination (D) data. For this, it is necessary to group data from different sources and process them. The recovery and processing of data from the horizontal (H) and vertical (Z) components is already at an advanced stage due to the development of other projects from the ON's geomagnetism group. This project will focus on the recovery of declination (D) data, based on the advisors' previous experience with the H and Z components. The consequent availability of a long (about 60 years) dataset of the D component of TTB will allow unprecedented investigations the secular variation of the main geomagnetic field and the association associated with the external geomagnetic field (diurnal variation and magnetic storms).

**Keywords:** Tatuoca Magnetic Observatory, Magnetic Declination, Magnetic data processing, Secular Variation

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Esquema do interior terrestre com o subsistema do geodínamo. Fonte: Modificado de Para entender a Terra - 4ª edição, pag.37 - Press, Groetzinger, Jordan, Siever (2006). \_\_\_\_\_ 10
- Figura 2: Componentes do campo magnético. Fonte: Modificado de Soares (2018).\_\_ 12
- Figura 3: Exemplo para a observação de longo prazo da variação secular do campo magnético: Média mensal da declinação D no observatório magnético francês Chambon la Fôret e no observatório japonês Kakioka (códigos IAGA CLF e KAK, painel superior) e derivada  $dD/dt$  da declinação. Fonte: Matzka et al. (2010).\_\_\_\_\_ 14
- Figura 4: Montagem de magnetograma para observatórios magnéticos do hemisfério norte e sul em períodos magneticamente silenciosos. Preto: dias 1 e 2 de dezembro de 2008; Cinza: dias 11 e 12 de junho de 2009. Todas as tramas retratam o componente leste geográfico. A seta indica a escala de 50 nT, válida para todos os plots. Fonte: Matzka et al. (2010).\_\_\_\_\_ 15
- Figura 5: Componente X (em nT) do campo magnético durante a tempestade magnética em março 1989 em sete observatórios magnético com várias distâncias para o pólo magnético. O evento de sudden storm commencement (ssc), que representa o início súbito de uma tempestade, é indicado por setas. Código IAGA, e a latitude magnética são fornecidos para cada painel. Fonte: Matzka et al. (2010). \_\_\_\_\_ 17
- Figura 6: Magnetômetro dIdD suspenso de campo total. \_\_\_\_\_ 18
- Figura 7: Mapa dos observatórios que fazem parte da rede INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network), onde os pontos vermelhos no mapa são os observatórios magnéticos de Tatuoca (1) e Vassouras (2). Fonte: Modificado de <https://observatoriosmagneticos.com>. \_\_\_\_\_ 19
- Figura 8: Mapa em ênfase na América do Sul (Pontos vermelhos são VSS e TTB), mostrando os observatórios que fazem parte da rede INTERMAGNET. Fonte: <https://observatoriosmagneticos.com>. \_\_\_\_\_ 21

Figura 9: Ilha de Tatuoca, no Pará, local onde fica um dos dois observatórios magnéticos em funcionamento no Brasil. Fonte: <a href="http://www.observatoriosmagneticos.com">www.observatoriosmagneticos.com</a> .	22
Figura 10: Fluxograma dos processos realizados para a obtenção e análise dos dados finais de declinação do observatório de TTB.	23
Figura 11: Série temporal de TTB com dados brutos (em azul) da declinação magnética, mostrando a presença de spikes e saltos nos valores de amplitude durante o período de 1992 à 2002.	26
Figura 12: Trecho de script realizado para a correção de spikes presentes na série temporal da declinação magnética do observatório de Tatuoca.	27
Figura 13: Trecho de script realizado para a correção de spikes presentes na série temporal da declinação magnética do observatório de Tatuoca.	28
Figura 14: Zoom durante o período de janeiro de 1994 a janeiro de 1996, indicando os saltos na tendência dos valores de amplitude dos dados brutos da declinação magnética (em azul).	29
Figura 15: Trecho do script realizado para a correção dos saltos de tendência presentes na série temporal da declinação magnética do observatório de Tatuoca.	30
Figura 16: Trecho do script realizado para a correção temporal presentes na série temporal da declinação magnética do observatório de Tatuoca.	31
Figura 17: Dados registrados da declinação magnética no mês de março do ano de 1963. Fonte: Observatório de Tatuoca (TTB).	34
Figura 18: Dados organizados e calculados da declinação magnética no mês de março de 1963, com médias diárias pelo período de 1 mês.	34
Figura 19: Correções temporais e de amplitude na série temporal de TTB.	35

Figura 20: Série temporal de TTB no período de 1957 à 2018 com parte dos dados processados, não finalizados. _____	36
Figura 21: Zoom da série temporal de TTB no período de 1957 à 1967, permitindo a comparação entre dado bruto e corrigido. _____	37
Figura 22: Zoom da série temporal de TTB no período de 1975 à 1985, permitindo a comparação entre dado bruto e corrigido. _____	38
Figura 23: Zoom da série temporal de TTB no período de 1982 à 1991, permitindo a comparação entre dado bruto e corrigido. _____	39
Figura 24: Zoom da série temporal de TTB no período de 1989 à 1998, permitindo a comparação entre dado bruto e corrigido. _____	40
Figura 25: Zoom da série temporal de TTB no período de 2002 à 2018, permitindo a comparação entre dado bruto e corrigido. _____	41
Figura 26: Dados finais da declinação magnética corrigida (médias horárias) do Observatório Magnético de Tatuoca de 1957 à 2018. _____	42
Figura 27: Dados do comportamento da Variação Secular presentes na série temporal de Tatuoca de 1957 a 2018. _____	43
Figura 28: Dados de declinação do comportamento da Variação Diurna de acordo com o número de manchas solares presentes na série temporal de Tatuoca de 1957 à 2018. _____	44
Figura 29: Índices magnético DST em A), B) e C) com registro de Tempestades magnéticas no mês de Outubro, Novembro e Dezembro do ano de 2003. Fonte: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. _____	45
Figura 30: Tempestade magnéticas registradas no ano de 2003 da declinação magnética na série temporal de TTB. _____	45

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.2 COMPONENTES DO CAMPO MAGNÉTICO	12
1.2.1 VARIAÇÃO TEMPORAL DO CAMPO MAGNÉTICO	13
1.2.2 VARIAÇÃO SECULAR	13
1.2.3 VARIAÇÃO DIURNA	14
1.2.4 TEMPESTADES MAGNÉTICAS	16
<b>2 MEDIÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO</b>	<b>17</b>
2.2 OBSERVATÓRIOS MAGNÉTICOS	18
2.2.1 OBSERVATÓRIO MAGNÉTICO DE TATUOCA	21
2.3 DADOS DE 60 ANOS DE TATUOCA DA DECLINAÇÃO MAGNÉTICA	22
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>23</b>
4.1 RECUPERAÇÃO DOS DADOS	24
4.1.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS	25
4.2 VARIAÇÃO SECULAR	31
4.2.1 VARIAÇÃO DIURNA	32
4.2.2 TEMPESTADES MAGNÉTICAS	32
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>33</b>
5.1 RECUPERAÇÃO E PROCESSAMENTO DA SERIE TEMPORAL DE TTB	33
5.2 VARIAÇÃO SECULAR	42
5.2.1 VARIAÇÃO DIURNA	43
5.2.2 TEMPESTADES MAGNÉTICAS	44
<b>6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS</b>	<b>46</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O campo magnético da Terra é gerado a partir de distintas fontes que possuem variações espaciais e temporais diferentes. Tais fontes, podem ser classificadas como fontes internas, geradas no interior do planeta, ou como fontes externas, geradas pela interação das fontes internas com fatores externos associados a atmosfera terrestre ou a dinâmica solar.

A contribuição mais importante para o campo magnético terrestre observado advém do chamado campo principal, o qual corresponde a cerca de 90% da intensidade do campo magnético total (em geral variando entre amplitudes de 20000 a 90000 nT). O campo principal é gerado no núcleo externo terrestre, em profundidades de aproximadamente 2.900km até 5.100km. Correntes elétricas associadas à movimentação do material existente no núcleo externo (formado majoritariamente por ferro e níquel) são responsáveis por gerar o campo principal.

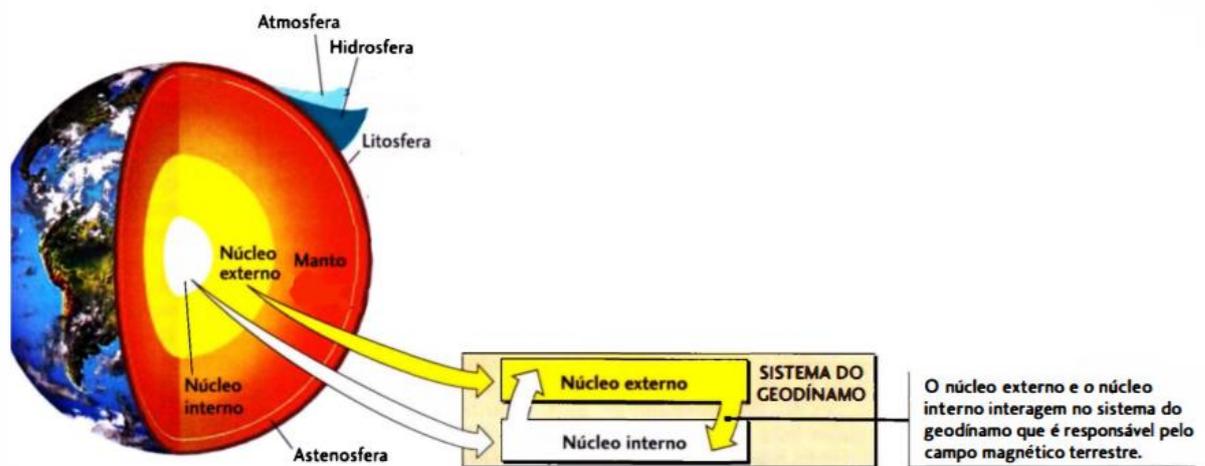


Figura 1: Esquema do interior terrestre com o subsistema do geodínamo. Fonte: Modificado de Para entender a Terra - 4ª edição, pag.37 - Press, Groetzinger, Jordan, Siever (2006).

Além do campo principal, existem outras fontes internas que compõem o campo magnético total observado, como o campo litosférico (Langlais et al 2009) e o campo oceânico (Manoj et al 2006). Já as fontes externas do campo magnético estão associadas à atmosfera terrestre e a atividade solar.

Ao redor do globo, diferentes sistemas de correntes ionosféricas se desenvolvem na atmosfera, podendo se destacar os sistemas solar quiet (Sq, em baixas a altas latitudes) e o sistema do eletro-jato equatorial (na região do equador magnético). Tais correntes ionosféricas induzem uma parcela do campo magnético observado e constituem uma parte importante do campo externo, sendo responsáveis por variações na faixa entre 0 e 200 nT em condições normais. Yamazaki & Maute (2017) apresenta uma revisão detalhada sobre esses sistemas de corrente e suas relações com a variação diurna magnética.

Eventualmente, o campo externo causa variações que podem atingir amplitudes acima de 200 nT, ou até de 1000 nT em casos extremos, as quais estão associadas a tempestades magnéticas. As tempestades magnéticas são causadas por algum tipo de distúrbio ocorrido no Sol, como por exemplo, ejeções de massa coronal. A ocorrência de tempestades magnéticas podem afetar a infraestrutura de algumas cidades, pois pode ocorrer *blackouts* durante eventos extremos como ocorrido na cidade de Quebec (Canadá) durante a tempestade de 13 Março de 1989 (Pirjola, 2000), e causando falhas em sistemas de comunicação baseados em satélite.

Todas essas fontes do campo magnético podem ser registradas por observações magnéticas realizadas através de magnetômetros em observatórios magnéticos ou missões de satélite. Geralmente, no caso observatórios magnético longas séries temporais são produzidas, a fim de fornecerem dados contínuos. Diante disso, atualmente encontram-se disponíveis séries temporais superiores a 50 anos. Tais séries temporais contém registros valiosos do campo magnético em uma localidade fixa na superfície terrestre, a partir dos quais diversos estudos podem ser desenvolvidos em relação a qualquer tipo de fonte do campo magnético.

Este trabalho visa a recuperação, processamento e interpretação da série temporal da componente de declinação do Observatório Magnético de Tatuoca (TTB,

Belém-PA, Brasil) referente ao período de 1957 até 2018. Portanto, pretende-se contribuir para diversas pesquisas na área de geomagnetismo após a disponibilização desse conjunto de dados.

## 1.1 COMPONENTES DO CAMPO MAGNÉTICO

O campo magnético da Terra é um vetor, ou seja, possui magnitude e direção. A unidade Tesla (T) é geralmente utilizada como medida de campo magnético. Como as intensidades do magnetismo associados a Terra são baixíssimas (i.e., da ordem de  $10^{-9}$  T), é comum utilizar o nano Tesla (nT).

O vetor magnético pode ser representado no sistema de coordenadas Cartesianas, ou mesmo em coordenadas esféricas (Lowrie, 2007). As componentes magnéticas são mostradas na Figura 2. A direção da componente magnética do campo total (F) é especificada por dois ângulos: a declinação (componente D), o ângulo entre o norte magnético (componente H) e o norte geográfico (componente X), e a inclinação (I), o ângulo em que o vetor magnético mergulha abaixo da horizontal. É possível obter as seguintes relações entre as componentes do campo magnético da Terra:

$H = F \cos(I)$	H = Componente magnética Horizontal
$X = H \cos(D)$	X = Componente magnética do Norte Geográfico
$Y = H \sin(D)$	Y = Componente magnética do Leste Geográfico
$Z = F \sin(I)$	Z = Componente magnética da Intensidade Vertical
$F^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$	F = Componente magnética da Intensidade Total
$H^2 = X^2 + Y^2$	D = Componente magnética do ângulo da Declinação
	I = Componente magnética do ângulo da Inclinação

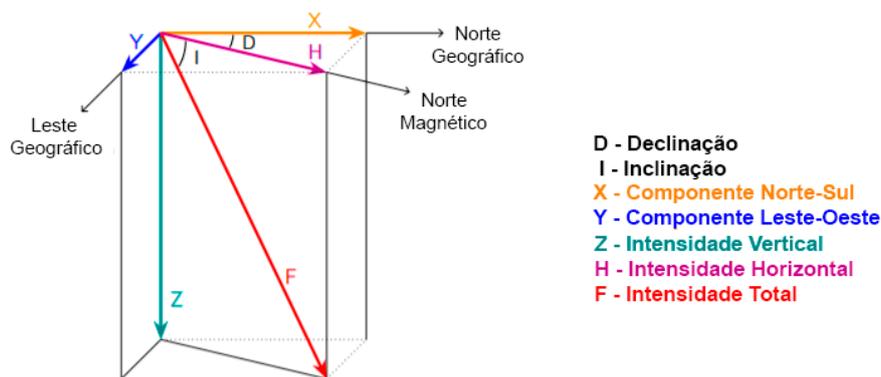


Figura 2: Componentes do campo magnético. Fonte: Modificado de Soares (2018).

## 1.2 VARIAÇÃO TEMPORAL DO CAMPO MAGNÉTICO

O campo magnético varia de acordo com o tempo em escalas de milissegundos até milhões de anos. Basicamente, é possível considerar dois tipos principais de variações: aquelas com origem associada ao campo interno (por exemplo, variações geradas no núcleo externo terrestre) e aquelas relacionadas ao campo externo (ionosfera e magnetosfera).

### 1.2.1 VARIAÇÃO SECULAR

Segundo Jackson & Finlay (2015), a dinâmica do núcleo externo terrestre explica a produção do campo principal. Este varia lentamente com o tempo, sendo perceptível apenas após décadas de observações, e esta variação é denominada como variação secular. Essas ocorrem ao longo de períodos de um ano ou mais, refletindo mudanças no núcleo da Terra. Fenômenos como deriva para oeste e reversões magnéticas são associadas a variação secular (Langel, 1987).

A Figura 3, mostra a variação secular de D a longo prazo, obtida a partir dos dados do observatório magnético francês Chambon la Fôret (CLF) e o observatório japonês Kakioka (KAK). A figura 3 (a) mostra as médias mensais calculadas para os dados de CLF e KAK. É possível observar uma variação suave ao longo dos anos, diretamente associada a variação secular. A curva de CLF indica um aumento gradual dos valores de D, enquanto a curva de KAK indica uma diminuição, o que ilustra a dependência espacial da variação secular. A figura 3 (b) mostra a primeira derivada calculada a partir dos valores de médias mensais. A utilização de derivadas para avaliar a variação secular facilita a identificação das tendências e mudanças de tendência no padrão de variação secular de cada observatório. É possível observar também a presença de variações abruptas da variação secular produzidas no núcleo terrestre nas observações de CLF ao redor do ano de 1970, chamadas de *Jerks* (Mandea, 2010).

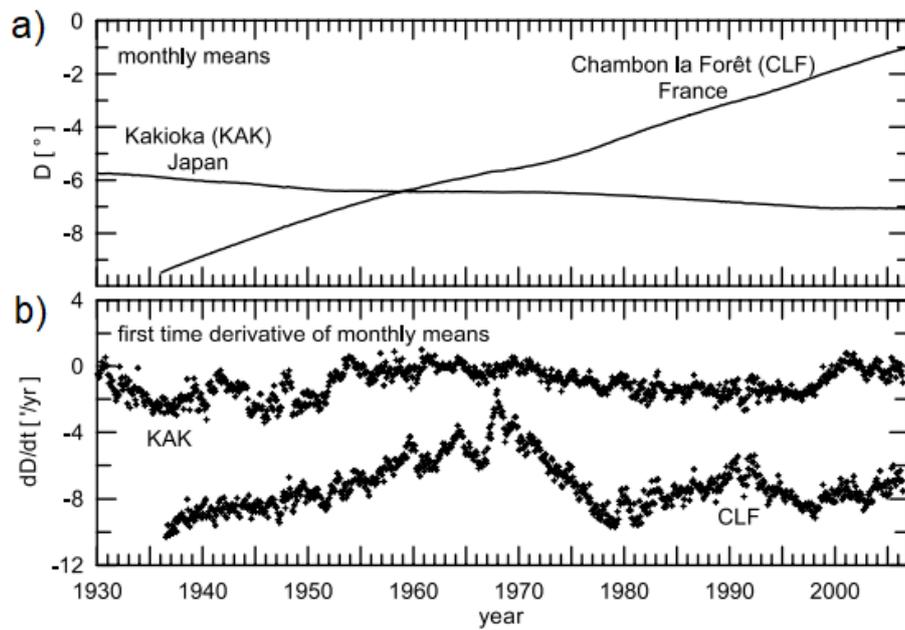


Figura 3: Exemplo para a observação de longo prazo da variação secular do campo magnético: Média mensal da declinação  $D$  no observatório magnético francês Chambon la Forêt e no observatório japonês Kakioka (códigos IAGA CLF e KAK, painel superior) e derivada  $dD/dt$  da declinação. Fonte: Matzka et al. (2010).

### 1.2.2 VARIAÇÃO DIURNA

As flutuações temporais associadas ao campo externo podem durar desde milissegundos até algumas décadas, constituindo variações relativamente rápidas quando comparadas a variação secular.

Durante o período diurno, a atmosfera terrestre é ionizada por meio dos fótons solares de forma que o seu material, anteriormente eletricamente neutro, torna-se ionizado (Kelley, 2009). Com isso, forma-se a chamada ionosfera terrestre em altitudes de cerca de 80 km a 600 km, caracterizada pela presença do plasma ionosférico constituído de íons e elétrons. Esse material é então submetido a toda dinâmica da atmosfera, incluindo ventos e marés atmosféricas (Yamazaki e Maute, 2017). Consequentemente, o fluxo do plasma ionosférico está associado a correntes elétricas que induzem um campo magnético possível de ser medido na superfície terrestre. Esse campo magnético possui uma periodicidade bem definida de 24h, dando origem a chamada variação diurna do campo magnético, que pode atingir amplitudes de cerca de 200 nT.

Na Figura 4 é possível observar a variação diurna durante os dias consecutivos de 1 e 2 de dezembro de 2008 (curva preta) e 11 e 12 de junho de 2009 (curva

cinza), durante períodos magneticamente calmos, para seis observatórios magnéticos distintos. A periodicidade de 24 horas da variação diurna pode ser percebida, bem como certa variação sazonal desta quando comparadas as variações de Junho e Dezembro. Além da variação sazonal inerente à própria variação diurna, a Figura 4 também indica como a variação diurna se comporta de forma diferente espacialmente para cada um dos seis observatórios destacados. Essa dependência espacial da variação diurna é função da geometria do campo magnético e das correntes ionosféricas predominantes em cada região do globo.

Além da dependência sazonal e espacial, a variação diurna também depende da atividade solar, apresentando forte correlação com o ciclo solar de onze anos (Soares et al., 2020).

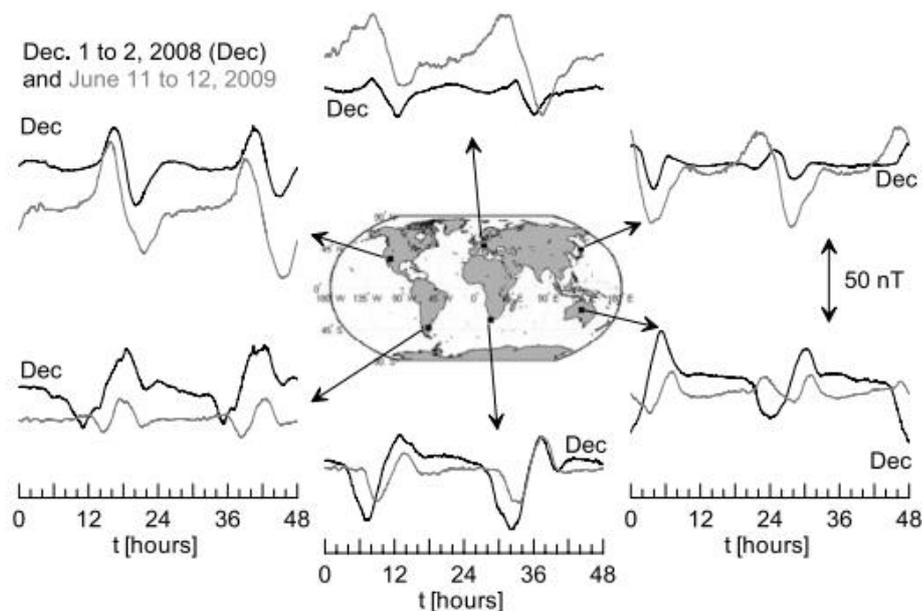


Figura 4: Montagem de magnetograma para observatórios magnéticos do hemisfério norte e sul em períodos magneticamente silenciosos. Preto: dias 1 e 2 de dezembro de 2008; Cinza: dias 11 e 12 de junho de 2009. Todas as tramas retratam o componente leste geográfico. A seta indica a escala de 50 nT, válida para todos os plots. Fonte: Matzka et al. (2010).

### 1.2.3 TEMPESTADES MAGNÉTICAS

Uma tempestade magnética é uma perturbação temporária da magnetosfera da Terra que é causada por uma onda de choque do vento solar que interage com o campo magnético da Terra. Tal interação causa um aumento na circulação de plasma através da magnetosfera. Conseqüentemente, um campo magnético adicional é gerado em função do período magnético perturbado que é estabelecido durante a tempestade.

A perturbação que causa uma tempestade magnética pode ser uma ejeção de massa coronal (EMC) ou uma corrente de alta velocidade provenientes do Sol (Gonzalez et. al., 1994). A frequência de tempestades magnéticas varia com o ciclo das manchas solares. As tempestades impulsionadas por EMCs são mais comuns durante o máximo do ciclo solar e tempestades conduzidas por correntes de alta velocidade são mais comuns durante o mínimo do ciclo solar. Perturbações ionosféricas e correntes induzidas magneticamente são dois dos fenômenos secundários causados por tempestades magnéticas. Isso pode causar a cintilação de rádio e radar, interrupção da navegação por bússolas e auroras em latitudes muito mais baixas do que o normal (Mishra e Dubey, 2015).

A Figura 5 mostra a variação da tempestade magnética ocorrida no mês de março de 1989 em 7 observatórios distintos, onde é possível perceber que o impacto destas tempestades registradas são mais fortes entre os dias 13 e 14 de março. Observe que as variações aqui são da ordem de 1000 nT, enquanto na Fig. 4 as variações foram da ordem de 50 nT.

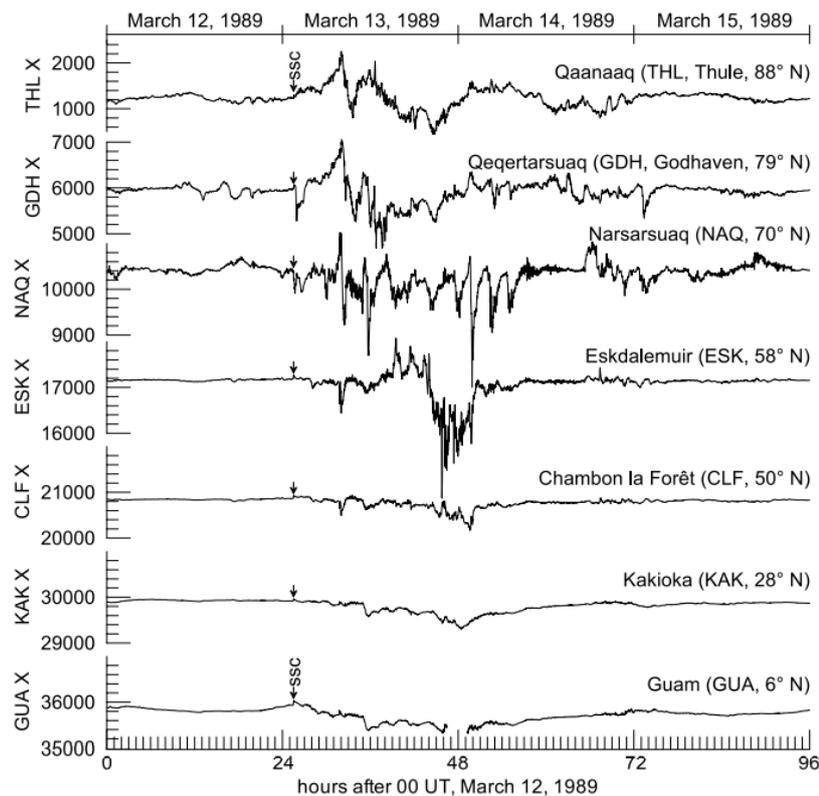


Figura 5: Componente X (em nT) do campo magnético durante a tempestade magnética em março 1989 em sete observatórios magnético com várias distâncias para o pólo magnético. O evento de sudden storm commencement (ssc), que representa o início súbito de uma tempestade, é indicado por setas. Código IAGA, e a latitude magnética são fornecidos para cada painel. Fonte: Matzka et al. (2010).

## 2 MEDIÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

Campos magnéticos são medidos por meio de um instrumento denominado magnetômetro. Existem dois tipos básicos de medição por magnetômetro: os magnetômetros vetoriais (por exemplo, os magnetômetros de Indução, Fluxgate, Fibra Óptica, e SQUID), que medem as componentes vetoriais, e os magnetômetros escalares (por exemplo, os magnetômetros de Próton e de Bombeamento Óptico) medem apenas a magnitude do campo magnético (Wiermann, 2003).

Os magnetômetros também podem ser classificados por sua situação ou uso pretendido. Os magnetômetros estacionários são instalados em uma posição fixa e as medições são feitas enquanto o magnetômetro está estacionário. Os magnetômetros portáteis ou móveis devem ser usados enquanto em movimento e podem ser carre-

gados manualmente ou transportados em um veículo em movimento. Os magnetômetros de laboratório são usados para medir o campo magnético de materiais colocados dentro deles e são normalmente estacionários.

A Figura 6 mostra o Magnetômetro dIdD suspenso de campo total, comumente utilizado em observatórios magnéticos, cujo propósito é medir as variações do campo magnético local.



**Aplicações ideais:**

- Observatórios Magnéticos

**Especificações Técnicas:**

- Sensibilidade: 0.180nT @ 1 Hz

- Resoluções: 0.01 nT

- Precisão Absoluta: 0.2 nT

- Faixa de Funcional: 20.000 a 120.000 nT

Figura 6: Magnetômetro dIdD suspenso de campo total.

Fonte: Adaptado de GEM Systems Advanced Magnetometers.

## 2.2 OBSERVATÓRIOS MAGNÉTICOS

Uma das formas de medir o campo magnético é realizada através de observatórios magnético espalhados pelo globo. Esses observatórios são estruturados para fornecer dados de forma permanente e seguindo padrões de qualidade pré-estabelecidos.

Os observatórios magnéticos começaram a funcionar em 1832, quando o astrônomo alemão Carl Friedrich Gauss criou um procedimento para determinar a intensidade do campo magnético. Nestes quase 200 anos, os observatórios evoluíram muito: atualmente existe uma rede internacional de instituições de diversos países, todas seguindo altos padrões de qualidade de medição e transmissão de dados em tempo real. A distribuição geográfica destes observatórios, no entanto, ainda é desigual. Poucos são aqueles instalados nos oceanos, África e na América do Sul, como indicado na Figura 7.

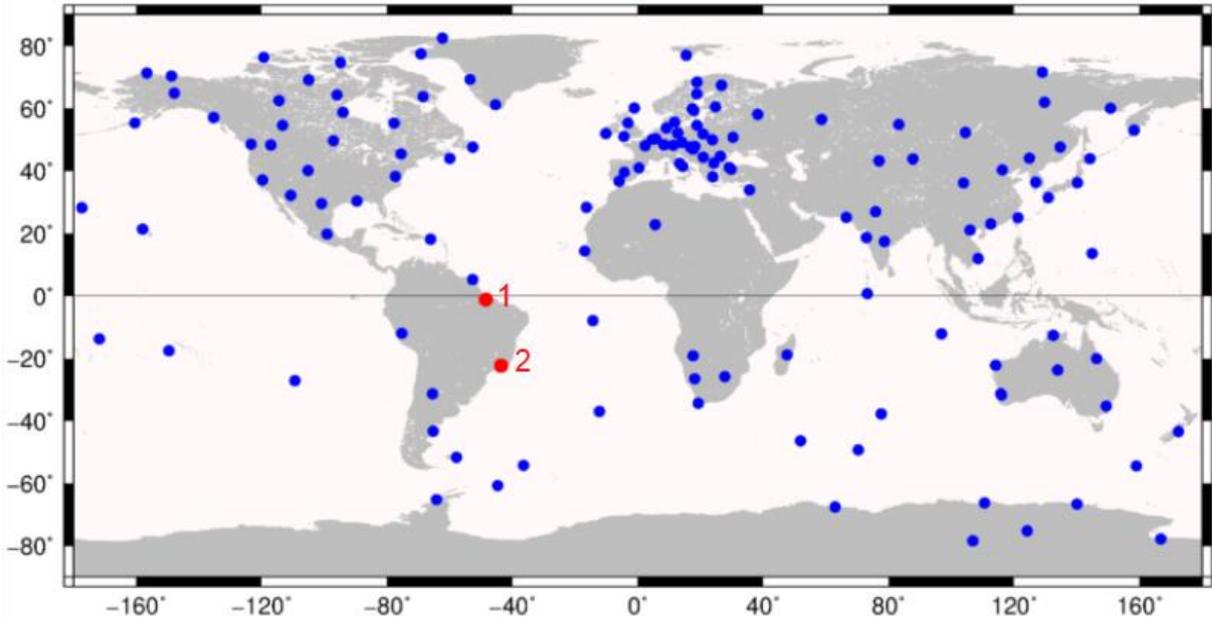


Figura 7: Mapa dos observatórios que fazem parte da rede *INTERMAGNET* (*International Real-time Magnetic Observatory Network*), onde os pontos vermelhos no mapa são os observatórios magnéticos de Tatuoca (1) e Vassouras (2). Fonte: Modificado de <https://observatoriosmagneticos.com>.

Atualmente, o Brasil possui dois observatórios magnéticos: Vassouras (VSS), a 120 km da cidade do Rio de Janeiro, e Tatuoca (TTB), que fica na ilha de Tatuoca, no Pará. Ambos indicados como círculos vermelhos na Figura 7. VSS funciona continuamente desde 1915, o que faz dele um dos observatórios mais antigos do mundo. TTB, por sua vez, opera desde 1957. Ambos são operados pelo Observatório Nacional (ON) e fazem parte da rede *INTERMAGNET*, uma rede internacional de observatórios de alto padrão. Outros dois observatórios estão em construção no Brasil. Um deles ficará no estado do Mato Grosso, em convênio com o SESC-Pantanal. O outro será instalado em Tefé, no Amazonas, e é desenvolvido em colaboração com o Instituto Mamirauá.

Com a escassez de observatórios na América do Sul, o monitoramento do campo magnético conta com o apoio das chamadas estações de repetição. Elas estão em locais fixos por todo o Brasil, onde idealmente são realizadas observações a cada cinco anos. É uma forma de complementar os dados obtidos pelos observatórios. Hoje, o Brasil conta com mais de mil observações obtidas por 175 estações de repetição. São mais de cem anos de história: a primeira observação foi realizada em 1903, e a última, em outubro de 2019.

A Figura 8 mostra os Observatórios Magnéticos presentes na América do Sul, em ênfase os pontos vermelhos que mostram os dois Observatórios presentes no Brasil (TTB e VSS).

Em um observatório magnético, diferentes tipos de magnetômetros são utilizados e, conseqüentemente, diferentes medidas são realizadas.

Os chamados magnetômetros absolutos são utilizados para realizar medidas absolutas do campo. Estes podem ser tanto magnetômetros escalares que fornecem o valor do campo total, quanto magnetômetros vetoriais do tipo fluxgate acoplados em um teodolito para a medição absoluta dos valores de declinação e inclinação. Tais medidas absolutas são realizadas periodicamente, idealmente de duas a três vezes por semana. Os valores relativos e contínuos do campo fornecidos pelos variômetros são calibrados em função dos chamados valores de linha de base. A linha de base de um observatório é construída a partir das observações absolutas realizadas periodicamente. Portanto, justifica-se assim a necessidade de se realizar tanto observações absolutas e relativas do campo a fim de se obter registros calibrados (absolutos) e contínuos do campo magnético. Tais dados geram séries temporais que permitem o estudo de várias feições do campo magnético bem como de suas aplicações na indústria.

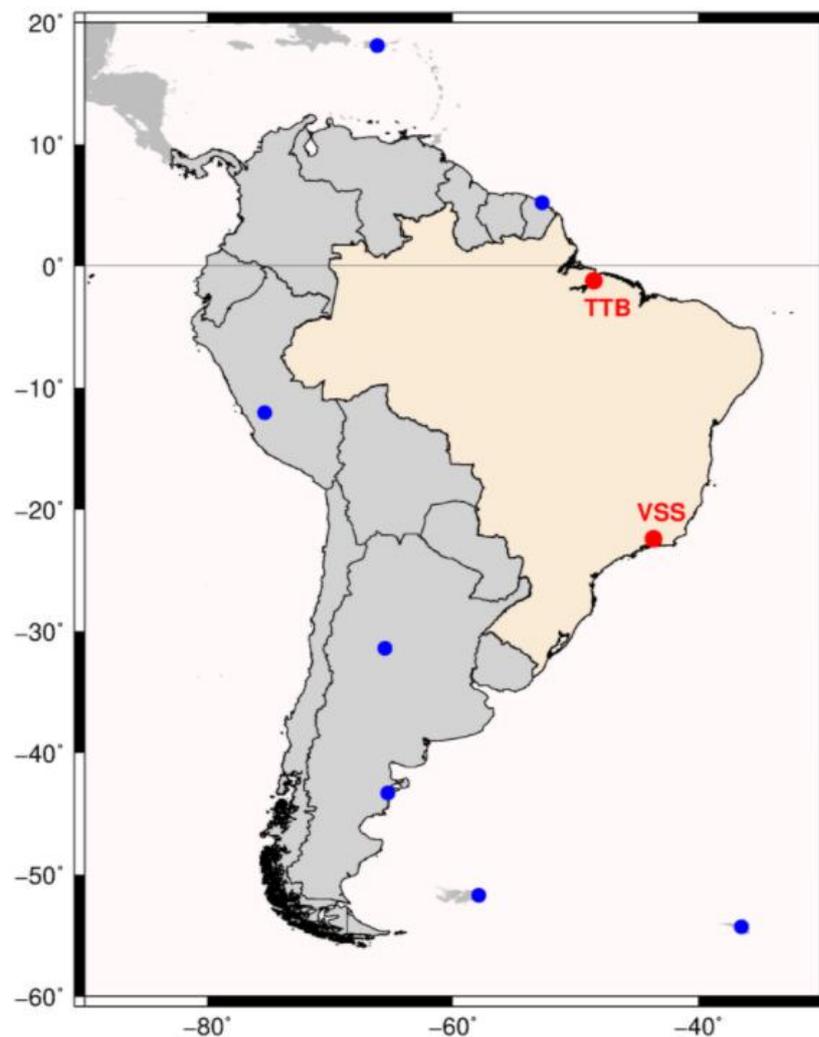


Figura 8: Mapa em ênfase na América do Sul (Pontos vermelhos são VSS e TTB), mostrando os observatórios que fazem parte da rede INTERMAGNET. Fonte: <https://observatoriosmagneticos.com>.

### 2.2.1 OBSERVATÓRIO MAGNÉTICO DE TATUOCA

O Observatório Magnético de Tatuoca (TTB) está situado em uma pequena ilha no estado do Pará (Morschhauser et al., 2017). Em 1933 foi construída uma estação magnética temporária na ilha. A escolha de Tatuoca foi estratégica: o local está próximo tanto do equador geográfico quanto do equador magnético da Terra, possui ambiente controlado para que nenhum material magnético possa afetar as medidas e as únicas atividades realizadas na ilha de Tatuoca são relacionadas ao observatório magnético. Apesar de seus anos de funcionamento, as medições contínuas só começaram em 1957, operado pelo Observatório Nacional. Os dados de TTB, junto aos de *Kourou*, na Guiana Francesa, fornecem importantes conclusões sobre o

equador magnético e o eletrojato equatorial (Soares et al., 2020). TTB é operado pelo Observatório Nacional do Rio de Janeiro, em parceria com o *GFZ-Potsdam* (Centro Alemão de Pesquisas em Geociências) desde 2015. Em 2019, TTB passou a integrar a rede *INTERMAGNET*.



Figura 9: Ilha de Tatuoca, no Pará, local onde fica um dos dois observatórios magnéticos em funcionamento no Brasil. Fonte: [www.observatoriosmagneticos.com](http://www.observatoriosmagneticos.com).

### **2.3 DADOS DE 60 ANOS DE TATUOCA DA DECLINAÇÃO MAGNÉTICA**

Os dados de variação magnética de Tatuoca são obtidos desde 1957. São realizados o registro até os dias de hoje, neste trabalho estamos interessados na declinação magnética. Os dados brutos para a realização deste trabalho foram registrados por técnicos que atuam no observatório magnético de Tatuoca. Muitos anos de dados da componente de declinação magnética estavam desorganizados, sem calibração (sem a soma dos valores de linha de base), sem nenhum tipo de processamento e disponíveis em fontes de dados distintas. O processamento destes dados são realizados digitalmente após a organização dos mesmos.

Com a disponibilidade de um longo conjunto de dados da declinação magnética, de aproximadamente 48 anos, é possível entendermos como a componente de declinação se comportou durante um longo período de tempo. Tal conjunto de dados disponibilizará informações inéditas sobre o campo magnético registrado no observatório de TTB.

## 4 METODOLOGIA

A figura 10 apresenta o fluxograma dos processos realizados assim como posteriormente é descrito como foi realizada a recuperação, o processamento e interpretação de dados da declinação magnética, em valores médios horários de TTB, do campo magnético registrado de 1957 a 2018.

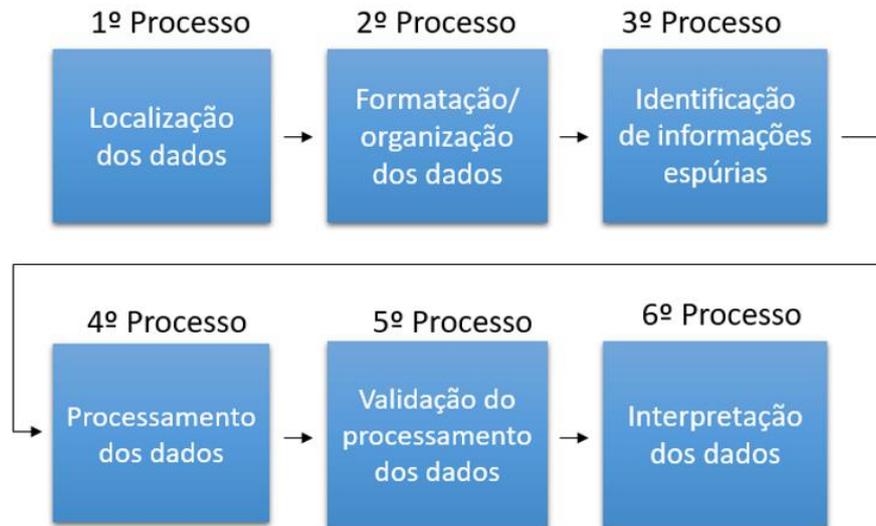


Figura 10: Fluxograma dos processos realizados para a obtenção e análise dos dados finais de declinação do observatório de TTB.

O primeiro processo consiste na localização dos dados de declinação magnética. Após esse processo, foi realizada a formatação/organização destes dados de maneira a padronizar todo o conjunto de dados. Em seguida, foi feita a identificação de informações espúrias nos dados, as quais devem ser consideradas e corrigidas. No passo do processamento, foi realizada a criação de scripts em Matlab a fim de corrigir *Spikes*, correção de algumas variações de amplitude e correções temporais que não fizeram sentido diante do restante da série temporal de Tatuoca. Finalizado este processo, foi realizada a validação do conjunto de dados obtidos por meio de comparações com modelos/índices geomagnéticos para confirmar se os dados processados estão de fato representando as feições conhecidas do campo magnético de forma precisa.

## 4.1 RECUPERAÇÃO DOS DADOS

Os dados de média horária da declinação estavam disponíveis em diferentes formatos e fontes. Primeiramente foi realizada a localização dos dados e a identificação dos tipos de formatos em que estes estavam disponíveis. Os dados do observatório TTB foram encontrados em fontes como o arquivo digital do Observatório Nacional, livros do ano com dados publicados (apenas em mídia impressa), no catálogo do *World Data Center* (<http://wdc.org.ua>), *GFZ Data Services* (<https://dataservices.gfz-potsdam.de>) e *INTERMAGNET* (<https://intermagnet.org>). Nas fontes mencionadas, dados foram encontrados digitais e não digitais tanto em formatos típicos utilizados para dados magnéticos (como IAGA-2002 e WDC) quanto em formatos não oficiais disponíveis em arquivos .txt ou Excel.

Os dados, então, foram organizados em planilhas Excel de dimensão 365 x 24 para cada ano (365 linhas representando os dias do ano e 24 colunas representando as horas do dia) e posteriormente salvos em formato csv. Em seguida, a leitura de cada arquivo foi feita por meio de scripts desenvolvidos em Matlab. Com os dados disponíveis no Matlab, foi realizada a transformação do formato de matriz para vetor. Desta forma, os dados de cada ano foram ordenados em um vetor de valores de declinação de tamanho 8760 (24 horas \* 365 dias). Em seguida, os dados de todos os anos foram concatenados sequencialmente, de forma a se obter um vetor único final (*D\_full*) de tamanho 543480x1. Um vetor de tempo correspondente, de mesmo tamanho, também foi criado, com uma amostragem de 1 hora.

Para determinados anos de registros, os dados de amplitude eram tabelados de maneira que os valores calibrados finais, só seriam obtidos após a soma de valores relativos com valores de base, ambos disponíveis em tabelas, para chegar aos valores de dados magnéticos absolutos. Desta maneira, além do agrupamento dos dados de diferentes fontes, em alguns casos também foi necessária uma etapa adicional de calibração dos valores de declinação.

Após a organização dos dados e a obtenção de um único vetor contendo todos os valores de declinação da série temporal, o processamento dos dados foi iniciado.

#### 4.1.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados foi baseado na abordagem realizada por Soares et al. (2020) e constituiu-se das seguintes etapas: (i) correções de *spikes*, saltos ou tendências errôneas nos dados. Para avaliar a existência ou não de informações espúrias no conjunto de dados, a série temporal dos dados de declinação magnética do observatório TTB foi comparada com a série temporal do índice de perturbação magnética DST ([https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html)), pois *spikes* artificiais podem ser confundidos com variações abruptas relacionadas à perturbações magnéticas. (ii) para os anos de 2004, 2005 e 2006 uma etapa adicional de processamento foi realizada a fim de converter para grau decimal o dado de declinação disponível inicialmente apenas como variações em milímetro, unidade de medida utilizada para magnetômetros analógicos que faziam seus registros em papel fotográfico. (iii) foi realizada correção temporal de forma que todo o conjunto de dados estivesse referenciada a hora universal (UT). Esta correção foi necessária pois os dados brutos de 1957 até 2000 estavam disponibilizados em hora local. Todas as etapas do processamento de dados foram realizadas por meio de scripts desenvolvidos em Matlab.

Na etapa (i) do processamento de dados, scripts foram utilizados para gerar gráficos de controle de qualidade para o período de 1957 a 2018. Por meio da inspeção visual da série temporal, foram identificados problemas a serem corrigidos no dado, como a ocorrência de *spikes* e saltos não realistas desviando da tendência média observada. *Spikes* podem ser definidos como *outliers* isolados, enquanto que saltos na tendência correspondem a intervalos de tempo com valores continuamente deslocados da tendência média do dado. Na figura 11 são mostrados alguns exemplos de *spikes* e saltos no valores de amplitude presentes nos dados brutos da componente D em Tatuoca sem nenhum processamento.

Os *spikes* que não tiveram relação com perturbações magnéticas representadas pelo índice DST foram deletados. Os *spikes* que não puderam ser explicados por perturbações magnéticas representadas pelo índice DST e que pareciam estar errados por valores de +100 ou -100 graus (possíveis erros de digitação) foram corrigidos de forma a voltar para a tendência do dado. Alguns saltos foram corrigidos com a soma de um valor constante durante um determinado período de tempo, fazendo com que esse período errôneo voltasse a tendência média. Outros saltos foram corrigidos

por meio de uma interpolação linear porque a soma de um valor constante não seria suficiente para que o período errôneo voltasse para a tendência média do dado.

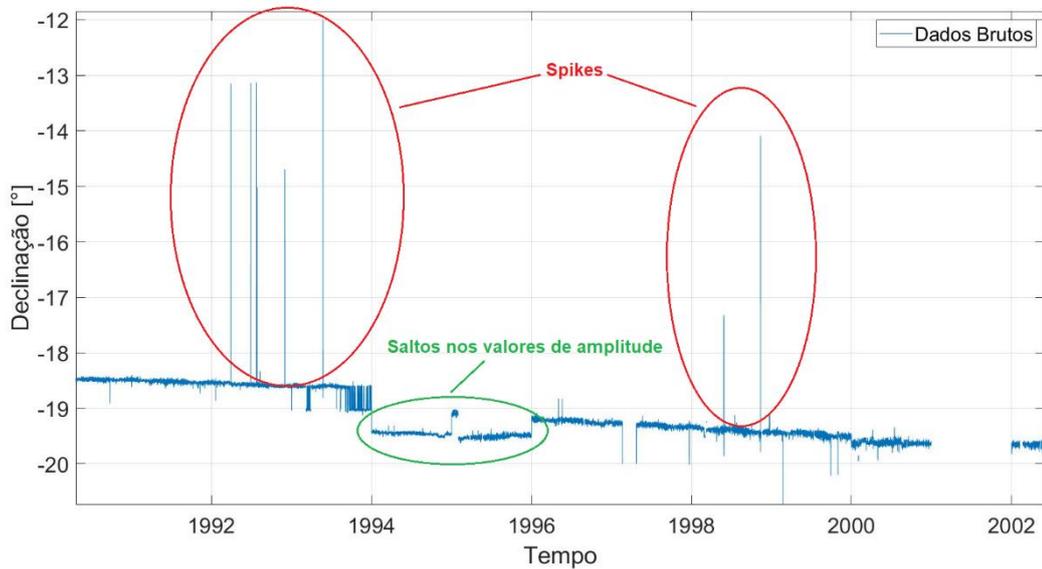


Figura 11: Série temporal de TTB com dados brutos (em azul) da declinação magnética, mostrando a presença de *spikes* e saltos nos valores de amplitude durante o período de 1992 à 2002.

Nas figuras 12 e 13 são mostrados trechos de scripts realizados para a correção de *spikes* presentes na série temporal da declinação magnética do observatório de Tatuoca, onde é utilizado o vetor de correção (*corrections\_D*), o vetor de tempo (*D\_time*) indicando o período a ser corrigido, resultando em NaN (*Not a Number*) que indica o período não teve registro de dados a fim de remover os *spikes* presentes em determinados períodos da série temporal da declinação magnética. Ao todo foram corrigidos 179 *spikes*.

```

81 %%
82 %4th: Correction of spikes and other inconsistencies
83
84 corrections_D(find(D_time=='04-Sep-1957 13:30')) = NaN;
85 corrections_D(find(D_time=='04-Sep-1957 14:30')) = NaN;
86 corrections_D(find(D_time=='13-Sep-1957 13:30')) = NaN;
87 corrections_D(find(D_time=='15-Jan-1958 15:30')) = NaN;
88 corrections_D(find(D_time=='11-Feb-1958 02:30')) = NaN;
89 corrections_D(find(D_time=='11-Feb-1958 03:30')) = NaN;
90 corrections_D(find(D_time=='31-May-1958 15:30')) = NaN;
91 corrections_D(find(D_time=='31-May-1958 16:30')) = NaN;
92 corrections_D(find(D_time=='29-Jun-1958 02:30')) = NaN;
93 corrections_D(find(D_time=='29-Jun-1958 15:30')) = NaN;
94 corrections_D(find(D_time=='08-Jul-1958 15:30')) = NaN;
95 corrections_D(find(D_time=='08-Jul-1958 16:30')) = NaN;
96 corrections_D(find(D_time=='08-Jul-1958 17:30')) = NaN;
97 corrections_D(find(D_time=='08-Jul-1958 18:30')) = NaN;
98 corrections_D(find(D_time=='08-Jul-1958 21:30')) = NaN;
99 corrections_D(find(D_time=='24-Jul-1958 16:30')) = NaN;
100 corrections_D(find(D_time=='14-Aug-1958 12:30')) = NaN;
101 corrections_D(find(D_time=='18-Aug-1958 12:30')) = NaN;
102 corrections_D(find(D_time=='04-Sep-1958 19:30')) = NaN;
103 corrections_D(find(D_time=='16-Sep-1958 13:30')) = NaN;
104 corrections_D(find(D_time=='25-Sep-1958 16:30')) = NaN;
105 corrections_D(find(D_time=='24-Oct-1958 17:30')) = NaN;
106 corrections_D(find(D_time=='04-Dec-1958 18:30')) = NaN;
107 corrections_D(find(D_time=='13-Dec-1958 13:30')) = NaN;
108 corrections_D(find(D_time=='13-Dec-1958 14:30')) = NaN;
109 corrections_D(find(D_time=='13-Dec-1958 15:30')) = NaN;
110 corrections_D(find(D_time=='13-Dec-1958 16:30')) = NaN;
111 corrections_D(find(D_time=='13-Dec-1958 17:30')) = NaN;
112 corrections_D(find(D_time=='18-Dec-1958 15:30')) = NaN;
113 corrections_D(find(D_time=='15-Jul-1959 14:30')) = NaN;
114 corrections_D(find(D_time=='15-Jul-1959 15:30')) = NaN;
115 corrections_D(find(D_time=='15-Jul-1959 16:30')) = NaN;
116 corrections_D(find(D_time=='15-Jul-1959 18:30')) = NaN;
117 corrections_D(find(D_time=='28-Nov-1959 02:30')) = NaN;
118 corrections_D(find(D_time=='15-Dec-1959 09:30')) = NaN;
119 corrections_D(find(D_time=='06-Mar-1960 06:30')) = NaN;
120 corrections_D(find(D_time=='01-Apr-1960 00:30')) = NaN;
121 corrections_D(find(D_time=='30-Apr-1960 14:30')) = NaN;
122 corrections_D(find(D_time=='31-May-1960 09:30')) = NaN;
123 corrections_D(find(D_time=='13-Nov-1960 03:30')) = NaN;
124 corrections_D(find(D_time=='15-Jul-1961 02:30')) = NaN;

```

Figura 12: Trecho de script realizado para a correção de *spikes* presentes na série temporal da declinação magnética do observatório de Tatuoca.

```

221 - corrections_D(find(D_time=='05-Aug-2002 07:30')) = NaN;
222 - corrections_D(find(D_time=='12-Aug-2002 23:30')) = NaN;
223 - corrections_D(find(D_time=='14-Aug-2002 13:30')) = NaN;
224 - corrections_D(find(D_time=='24-Aug-2002 15:30')) = NaN;
225 - corrections_D(find(D_time=='24-Aug-2002 16:30')) = NaN;
226 - corrections_D(find(D_time=='22-Aug-2002 11:30')) = NaN;
227 - corrections_D(find(D_time=='18-Sep-2002 23:30')) = NaN;
228 - corrections_D(find(D_time=='19-Sep-2002 23:30')) = NaN;
229 - corrections_D(find(D_time=='20-Sep-2002 23:30')) = NaN;
230 - corrections_D(find(D_time=='21-Sep-2002 23:30')) = NaN;
231 - corrections_D(find(D_time=='22-Sep-2002 23:30')) = NaN;
232 - corrections_D(find(D_time=='23-Sep-2002 23:30')) = NaN;
233 - corrections_D(find(D_time=='24-Sep-2002 23:30')) = NaN;
234 - corrections_D(find(D_time=='25-Sep-2002 23:30')) = NaN;
235 - corrections_D(find(D_time=='26-Sep-2002 23:30')) = NaN;
236 - corrections_D(find(D_time=='27-Sep-2002 23:30')) = NaN;
237 - corrections_D(find(D_time=='28-Sep-2002 23:30')) = NaN;
238 - corrections_D(find(D_time=='29-Sep-2002 23:30')) = NaN;
239 - corrections_D(find(D_time=='30-Sep-2002 23:30')) = NaN;
240 - corrections_D(find(D_time=='29-Jun-2002 12:30')) = NaN;
241 - corrections_D(find(D_time=='03-Feb-2003 03:30'): find(D_time=='03-Feb-2003 11:30')) = NaN;
242 - corrections_D(find(D_time=='29-Jun-2003 13:30')) = NaN;
243 - corrections_D(find(D_time=='29-Jun-2003 14:30')) = NaN;
244 - corrections_D(find(D_time=='29-Apr-2003 17:30')) = NaN;
245 - corrections_D(find(D_time=='29-Apr-2003 23:30')) = NaN;
246 - corrections_D(find(D_time=='02-Jul-2003 00:30')) = NaN;
247 - corrections_D(find(D_time=='29-Apr-2004 17:30'): find(D_time=='29-Apr-2004 23:30')) = NaN;
248 - corrections_D(find(D_time=='12-Jun-2014 14:30')) = NaN;
249 - corrections_D(find(D_time=='13-Sep-2017 15:30')) = NaN;
250 - corrections_D(find(D_time=='28-May-1998 06:30'): find(D_time=='29-May-1998 01:30')) = NaN;
251 - corrections_D(find(D_time=='22-Feb-1982 11:30')) = NaN;
252 - corrections_D(find(D_time=='30-Nov-2004 00:30'): find(D_time=='03-Dec-2004 08:30')) = NaN;
253 - corrections_D(find(D_time=='22-Dec-1998 14:30')) = NaN;
254 - corrections_D(find(D_time=='23-Dec-1998 23:30')) = NaN;
255 - corrections_D(find(D_time=='01-Feb-2000 11:30'): find(D_time=='03-Feb-2000 17:30')) = NaN;
256 - corrections_D(find(D_time=='06-Apr-2000 20:30'): find(D_time=='07-Apr-2000 02:30')) = NaN;
257 - corrections_D(find(D_time=='29-Apr-2000 03:30'): find(D_time=='30-Apr-2000 23:30')) = NaN;
258 - corrections_D(find(D_time=='25-Jul-2002 10:30')) = NaN;
259 - corrections_D(find(D_time=='25-Jul-2002 11:30')) = NaN;
260 - corrections_D(find(D_time=='01-Feb-2003 03:30'): find(D_time=='01-Feb-2003 11:30')) = NaN;
261 - corrections_D(find(D_time=='21-Feb-2003 00:30'): find(D_time=='21-Feb-2003 23:30')) = NaN;
262 - corrections_D(find(D_time=='14-Nov-2005 10:30'): find(D_time=='01-Dec-2005 23:30')) = NaN;
263

```

Figura 13: Trecho de script realizado para a correção de *spikes* presentes na série temporal da declinação magnética do observatório de Tatuoca.

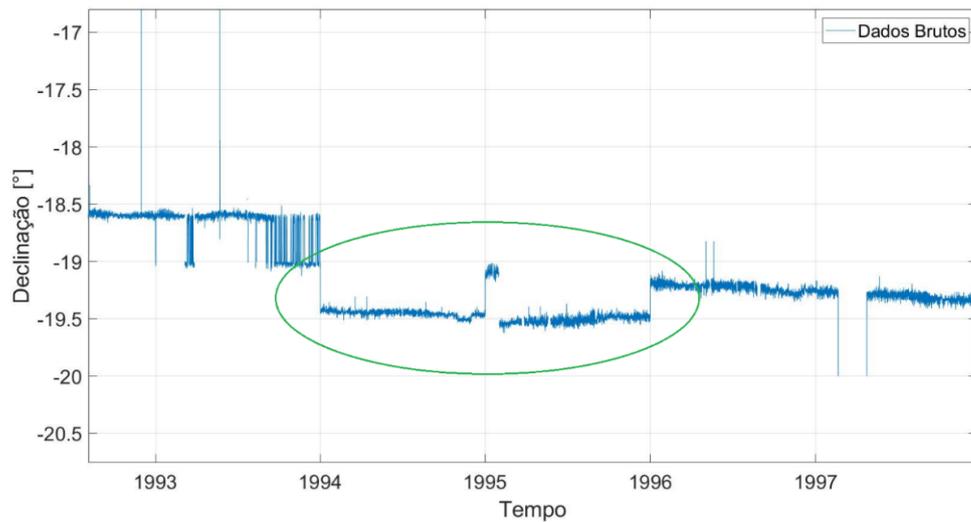


Figura 14: Zoom durante o período de janeiro de 1994 a janeiro de 1996, indicando os saltos na tendência dos valores de amplitude dos dados brutos da declinação magnética (em azul).

Na figura 15 é mostrado trecho do script realizado para a correção de saltos na tendência (*Jumps*) dos dados de declinação magnética presentes na série temporal do observatório de Tatuoca. É mostrado o vetor inicial da série temporal de Tatuoca (*D\_TTB*), o vetor de correção da declinação magnética (*corrections\_D*), indicando o período a ser corrigido. O código indica que para cada salto de tendência um determinado escalar foi somado ou subtraído de forma a reposicionar as amplitudes desviadas para a tendência média observada do restante da série temporal. Ao todo, foram corrigidos 7 saltos de tendência na série temporal da declinação magnética de Tatuoca.

```

%%
%2nd: starting the variables that will contain final time, data and correction values:
D_TTB = zeros(length(D_time),1); %Initialize the final H component vector.
corrections_D = zeros(length(D_time),1); %initialise the correction vector for WDC H.

%%
%3rd: Correction of Jumps:
corrections_D((find(D_time=='01-Sep-1957 00:30'):find(D_time=='31-Dec-1958 23:30')) = corrections_D((find(D_time=='01-Sep-1957 00:30'):find(D_time=='31-Dec-1958 23:30')) - 0.185;
corrections_D((find(D_time=='01-Sep-1961 00:30'):find(D_time=='30-Sep-1961 23:30')) = corrections_D((find(D_time=='01-Sep-1961 00:30'):find(D_time=='30-Sep-1961 23:30')) + 0.165;
%corrections_D((find(D_time=='01-Jan-1959 00:30'):find(D_time=='30-Dec-1962 23:30')) = corrections_D((find(D_time=='01-Jan-1959 00:30'):find(D_time=='30-Dec-1962 23:30')) + 0.185;
corrections_D((find(D_time=='31-Dec-1962 00:30'):find(D_time=='31-Dec-1963 23:30')) = corrections_D((find(D_time=='31-Dec-1962 00:30'):find(D_time=='31-Dec-1963 23:30')) - 0.350;
corrections_D((find(D_time=='01-Jan-1964 00:30'):find(D_time=='01-Jan-1965 02:30')) = corrections_D((find(D_time=='01-Jan-1964 00:30'):find(D_time=='01-Jan-1965 02:30')) + 0.0417;
corrections_D((find(D_time=='01-Jan-1994 00:30'):find(D_time=='31-Dec-1994 23:30')) = corrections_D((find(D_time=='01-Jan-1994 00:30'):find(D_time=='31-Dec-1994 23:30')) + 0.403;
corrections_D((find(D_time=='01-Feb-1995 00:30'):find(D_time=='31-Dec-1995 23:30')) = corrections_D((find(D_time=='01-Feb-1995 00:30'):find(D_time=='31-Dec-1995 23:30')) + 0.433;
corrections_D((find(D_time=='01-Jan-2000 00:30'):find(D_time=='30-Dec-2000 23:30')) = corrections_D((find(D_time=='01-Jan-2000 00:30'):find(D_time=='30-Dec-2000 23:30')) + 0.098;

```

Figura 15: Trecho do script realizado para a correção dos saltos de tendência presentes na série temporal da declinação magnética do observatório de Tatuoca.

Na figura 16 a seguir é mostrado o script realizado para a correção temporal em determinados períodos do conjunto de dados de declinação magnética. Foram realizadas correções temporais para 3 períodos distintos, com a conversão de hora local para hora universal para períodos entre os anos de 1957 a 1999 e 2000. A diferença entre hora local e hora universal para TTB é de 3 horas, fator que está representado no código da Figura 16. O vetor ( $corrections\_D2 = zeros(length(D\_time), 1)$ ) é o vetor de correção utilizado para corrigir a diferença de hora local para hora universal com o índice correto para determinados períodos.

```

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CORRECTING THE TIME SHIFT %%%%%%%%%
corrections_D2 = zeros(length(D_time),1); %Initialise the correction vector for WDC H.

%Updating the correction vector with the Local Time (LT) and Universal Time
%(UT) difference (3 hours for Tatuoca).

%Removing the first 3 values of 1957.
corrections_D2(1:3) = NaN;
%Removing the first 7 values of 01-Sep-1996: there is a timing error for Sep 1996.
corrections_D2(347713:347719) = NaN;
%Removing the first 3 values of 17-Mar-2000.
corrections_D2(378745:378747) = NaN;

%Shift LT to UT:
for i = 4:(find(D_time=='31-Dec-1999 20:30')+3)
    corrections_D2(i) = corrections_D2(i) + (D_TTB(i-3)-D_TTB(i));
end

```

Figura 16: Trecho do script realizado para a correção temporal presentes na série temporal da declinação magnética do observatório de Tatuoca.

## 4.2 VARIAÇÃO SECULAR

O valores de variação secular foram obtidos por meio do cálculo de médias anuais e posterior diferença entre médias anuais consecutivas. Para avaliar a coerência dos resultados, o comportamento da variação secular dos dados de TTB será comparado com a variação secular presente no modelo IGRF, calculada da mesma forma que o caso de dados observados. Este tipo de análise indicará se o processamento realizado faz sentido em termos de calibração dos dados e em termos de informação sobre o campo principal e sua variação secular.

### 4.2.1 VARIAÇÃO DIURNA

Em relação a variação diurna, foi selecionado o valor máximo da amplitude de cada dia em relação ao período noturno, pois durante a noite não há ionização relevante da atmosfera e, conseqüentemente, não há efeito de variação diurna. Para se calcular a amplitude da variação diurna em relação ao nível noturno, primeiro foi calculada uma média noturna para cada noite, utilizando-se apenas 4 amostras ao redor da meia noite (Soares et. al., 2018). Em seguida, foi realizada uma interpolação entre cada uma das médias noturnas, de forma a se ter uma representação contínua do nível noturno. Então, a diferença entre o máximo da amplitude diurna e o nível noturno fornece o valor de variação diurna para cada dia.

Para se avaliar a modulação de longo prazo da variação diurna em função da atividade solar, também é feita uma comparação da série temporal de variação diurna obtida com o número de manchas solares, que possuem forte controle na variação diurna. Médias anuais de manchas solares foram obtidos em: <https://www.bis.sidc.be/silso/datafiles>. Para uma comparação direta com as médias de manchas solares, também foram calculadas médias anuais para os valores de variação diurna dos dados do observatório TTB.

### 4.2.2 TEMPESTADES MAGNÉTICAS

Em relação as tempestades magnéticas, foram selecionados eventos específicos e bem documentados na literatura a fim de avaliar a coerência dos dados a serem processados. De forma a complementar a análise, foi realizada uma comparação visual das tempestades registradas em Tatuoca com o índices magnéticos DST ([https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html)).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 RECUPERAÇÃO E PROCESSAMENTO DA SERIE TEMPORAL DE TTB

A recuperação dos dados foi realizada em alguns passos. Primeiramente os dados obtidos pelos técnicos que atuam no Observatório Nacional de Tatuoca foram agrupados com amostragem de 1 em 1 hora. Ao todo estamos lidando com a série temporal de 61 anos de dados de Tatuoca, destes 61 anos, 14 anos ainda estão faltando dados, onde a maioria destes 14 anos sem dados estão na década de 1960, 1970 e também o ano de 2007 que não possui dados. Alguns anos de dados da década de 1960 e 1970 estão apenas disponíveis em papéis fotográficos, os quais necessitam de um projeto dedicado para digitalização e portanto não foram incluídos neste estudo.

Posteriormente a organização desses dados a partir de tabelas em Excel devido a distintos formatos em que se encontravam o arquivo foi salvo em formato "Csv", o que facilitou abrir estes dados atualizados no *software* Matlab. Ao passar para o Matlab o arquivo foi importado como uma matriz numérica a fim de os valores de declinação fossem importados corretamente para o Matlab, já com o arquivo importado o próximo passo foi criar o script para obter o gráfico com os dados da componente D. Primeiramente foi realizado a transposta das colunas para que no gráfico aparecesse os dados de forma correta e organizada em relação ao eixo X e Y, registrando os valores das amplitudes no eixo Y e no eixo X os anos, meses e dias.

A figura 17 mostra uma tabela de dados referente ao mês de março do ano de 1963, registrados pelos técnicos que atuam no Observatório de Tatuoca. A tabela indica os registros da componente D, formados pelo valor base de amplitude de  $-15^{\circ}$  (coluna 4) e pelos valores relativos indicados a partir da coluna 5 até a coluna 28, totalizando 24 valores médios, registrados de 1 em 1 hora, para cada dia (24H = 00:30H a 23:30H). A coluna 29 indica o valor médio de cada dia. Também é possível observar na Figura 17 a presença de algumas horas sem registro de dados, indicado por uma sequência de números 9.



Na figura 19 é possível observar correções temporais e correções de amplitude aplicadas na série temporal de TTB (de 1957 até 2018). As correções de amplitude incluem correções de *spikes* e de saltos anômalos na tendência dos dados. Estas tornam-se necessárias devido a problemas de funcionamento do magnetômetro, por influência de determinados tipos de objetos próximos ao local de registros destes dados, ou por erros durante etapas de processamento realizadas no passado. Ao todo, 179 *spikes* e 7 saltos na tendência foram corrigidos na série temporal da declinação magnética do observatório de TTB.

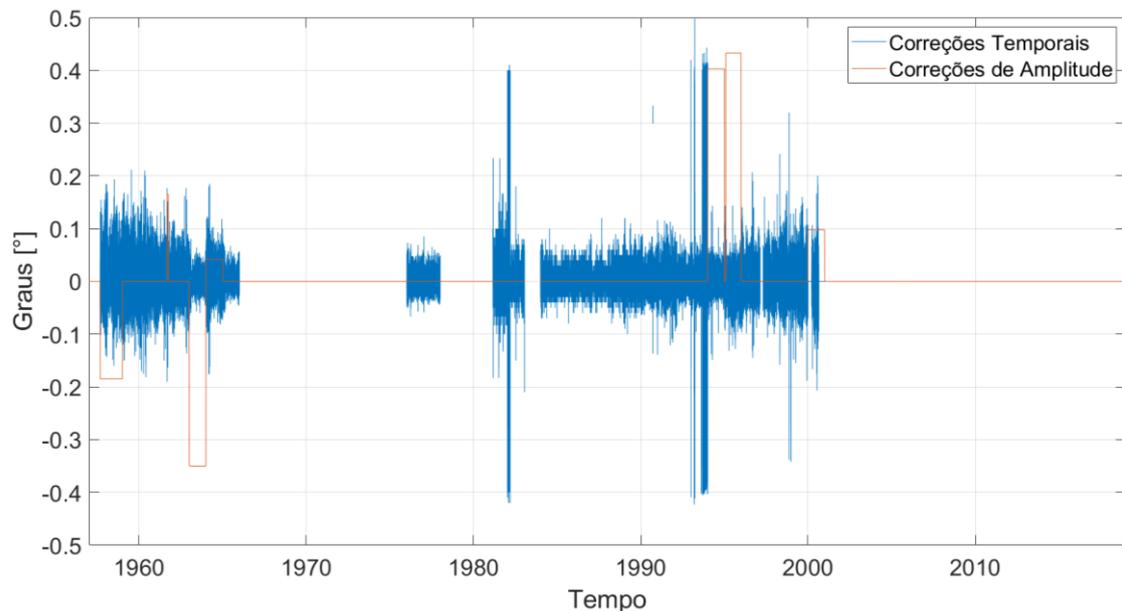


Figura 19: Correções temporais e de amplitude na série temporal de TTB.

Na figura 20 a seguir é possível observar a série temporal de TTB, onde o eixo Y indica os valores das amplitudes de declinação e o eixo X mostra o tempo em anos. Nesta figura é possível comparar o dado bruto, o corrigido, a tendência correta e a tendência errada. Tendência se refere a um comportamento que ocorre por um período mais longo. A tendência errada está associada a uma taxa de variação secular que aparentemente está errada, pois ela não está de acordo com o restante da série temporal de TTB, porque esse tipo de comportamento não se caracteriza como um comportamento do campo geomagnético. Se tais tendências erradas fossem um comportamento natural, seria possível indentificá-las em outros observatórios. A tendência

correta representa o comportamento médio de longo período da série temporal, excluindo-se os períodos de saltos. Nesta figura 20 também é possível observar a presença de *spikes* e variações com amplitudes totalmente incoerentes com a escala de variações magnéticas no dado bruto. Tais feições não existem no dado corrigido, o qual apresenta variações condizentes com o espectro de variações geomagnéticas.

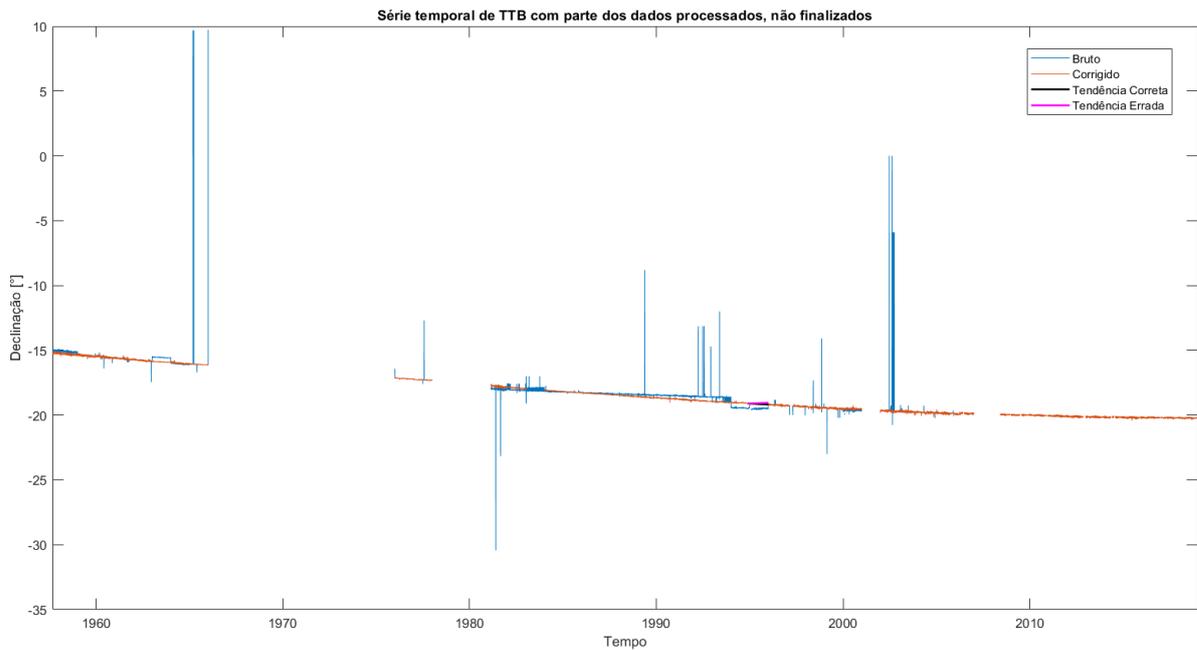


Figura 20: Série temporal de TTB no período de 1957 à 2018 com parte dos dados processados, não finalizados.

Nas figuras 21, 22, 23, 24, 25 e 26 mostram zooms para períodos específicos para facilitar a comparação entre dados brutos e corrigidos da figura 20, dividida em períodos aproximadamente de 10 em 10 anos para se obter uma melhor observação da variação dos dados de amplitude da declinação magnética na série temporal de Tatuoca.

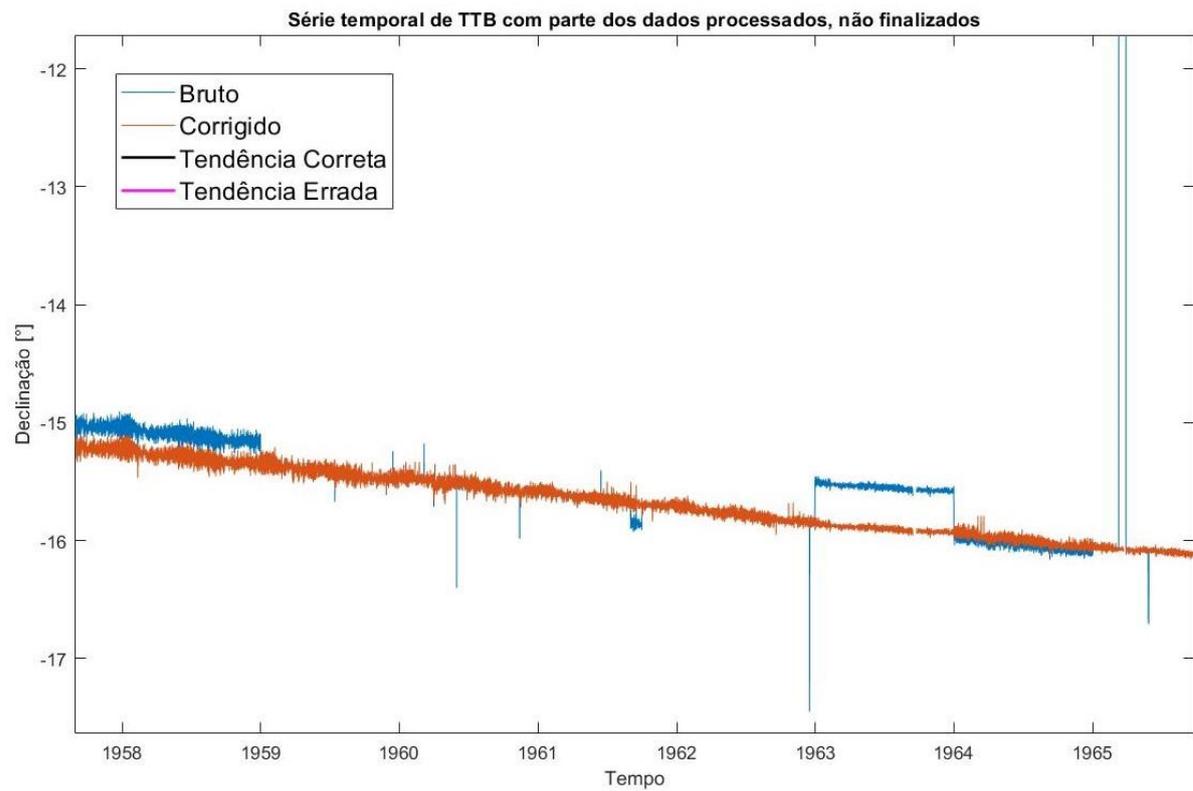


Figura 21: Zoom da série temporal de TTB no período de 1957 à 1967, permitindo a comparação entre dado bruto e corrigido.

Nas Figuras 22 e 23 a seguir, é possível visualizar no dado bruto a ocorrência de diversos *spikes*, a presença de um período ruidoso em 1982, com presença de variações anômalas.

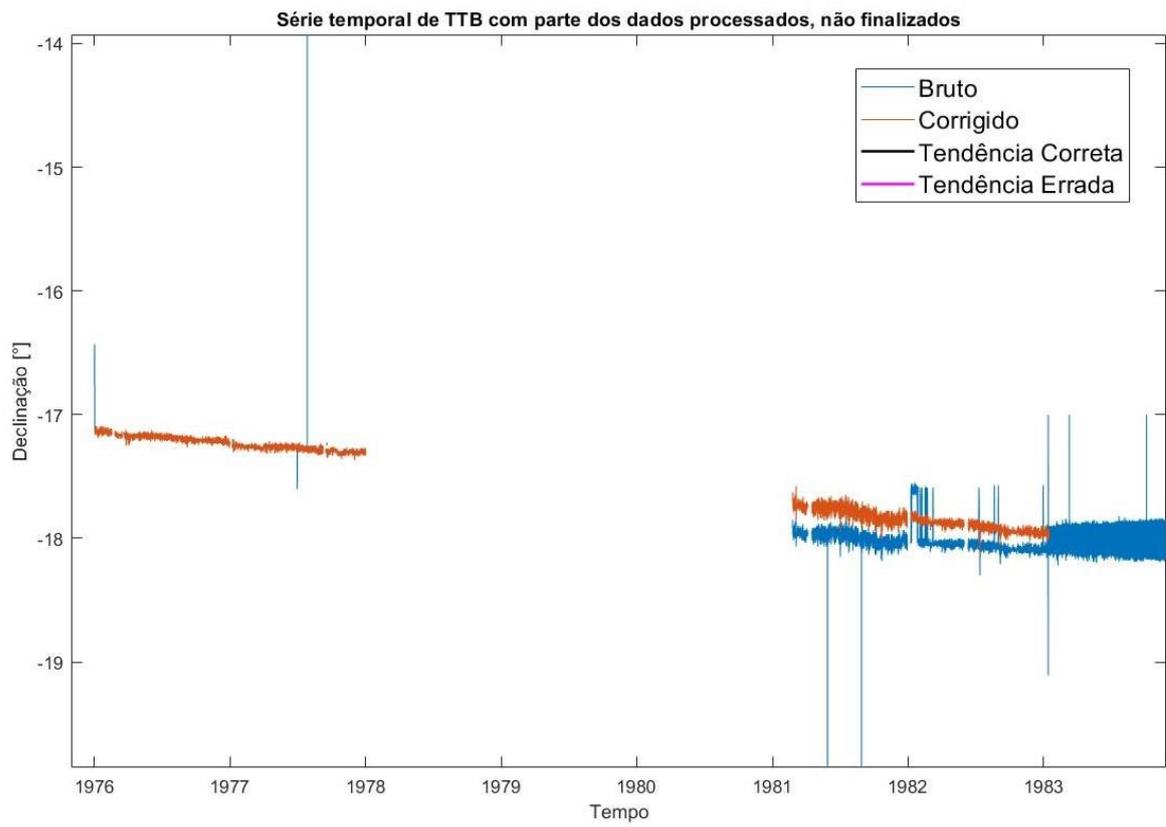


Figura 22: Zoom da série temporal de TTB no período de 1975 à 1985, permitindo a comparação entre dado bruto e corrigido.

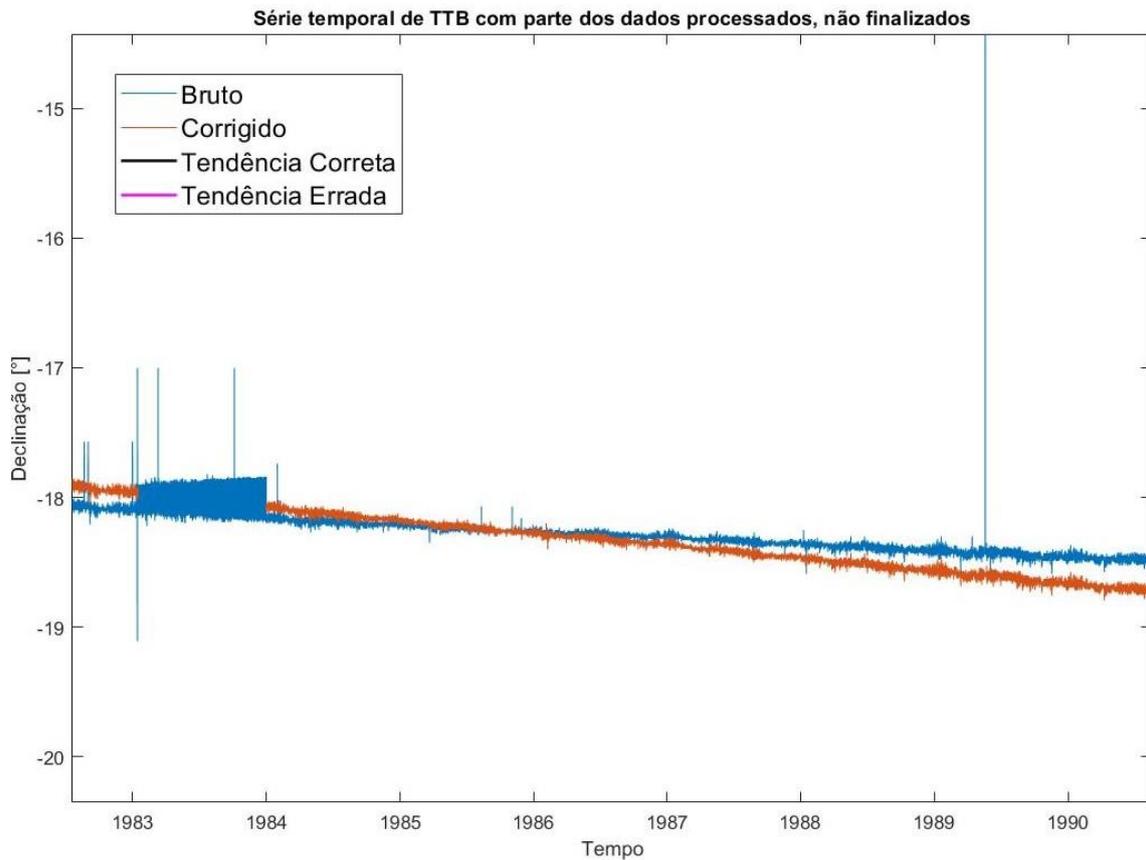


Figura 23: Zoom da série temporal de TTB no período de 1982 à 1991, permitindo a comparação entre dado bruto e corrigido.

Na figura 24 a seguir, é possível visualizar a presença de *spikes*, saltos do dado bruto da declinação entre o período de 1994 e 1996, e períodos de tendência errada. Nesta figura é possível ver um período com tendência errada que está destacado pelo dado bruto em 1995. A tendência errada desse período é representada pela interpolação linear da linha rosa. A tendência correta desse mesmo período, também estimada por interpolação linear, é representada pela linha preta.

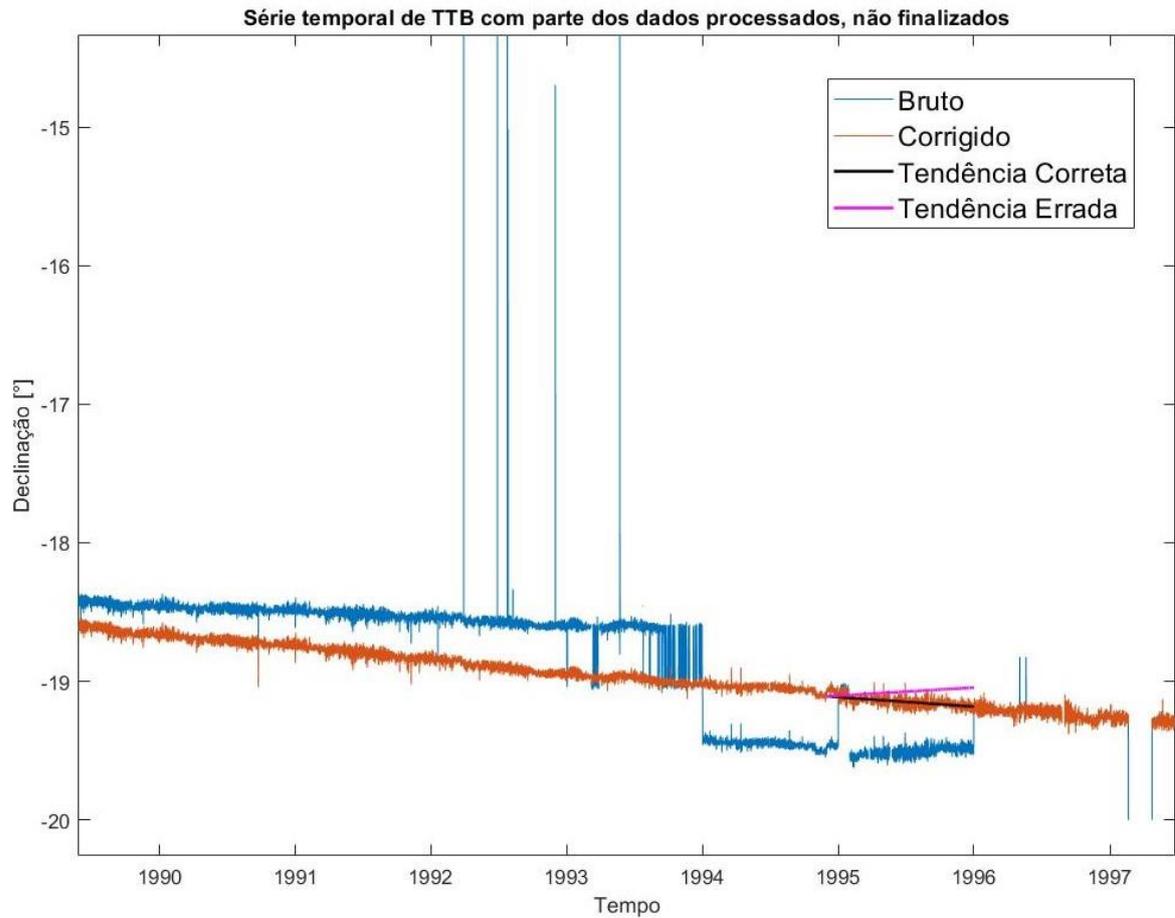


Figura 24: Zoom da série temporal de TTB no período de 1989 à 1998, permitindo a comparação entre dado bruto e corrigido.

A Figura 25 mostra o dado bruto e o dado corrigido de 2002 a 2018. É possível visualizar a presença de *spikes*, único tipo de evento espúrio que ocorreu durante esse período. Portanto, excetuando-se os *spikes*, a variação do dado bruto se manteve similar ao dado corrigido.

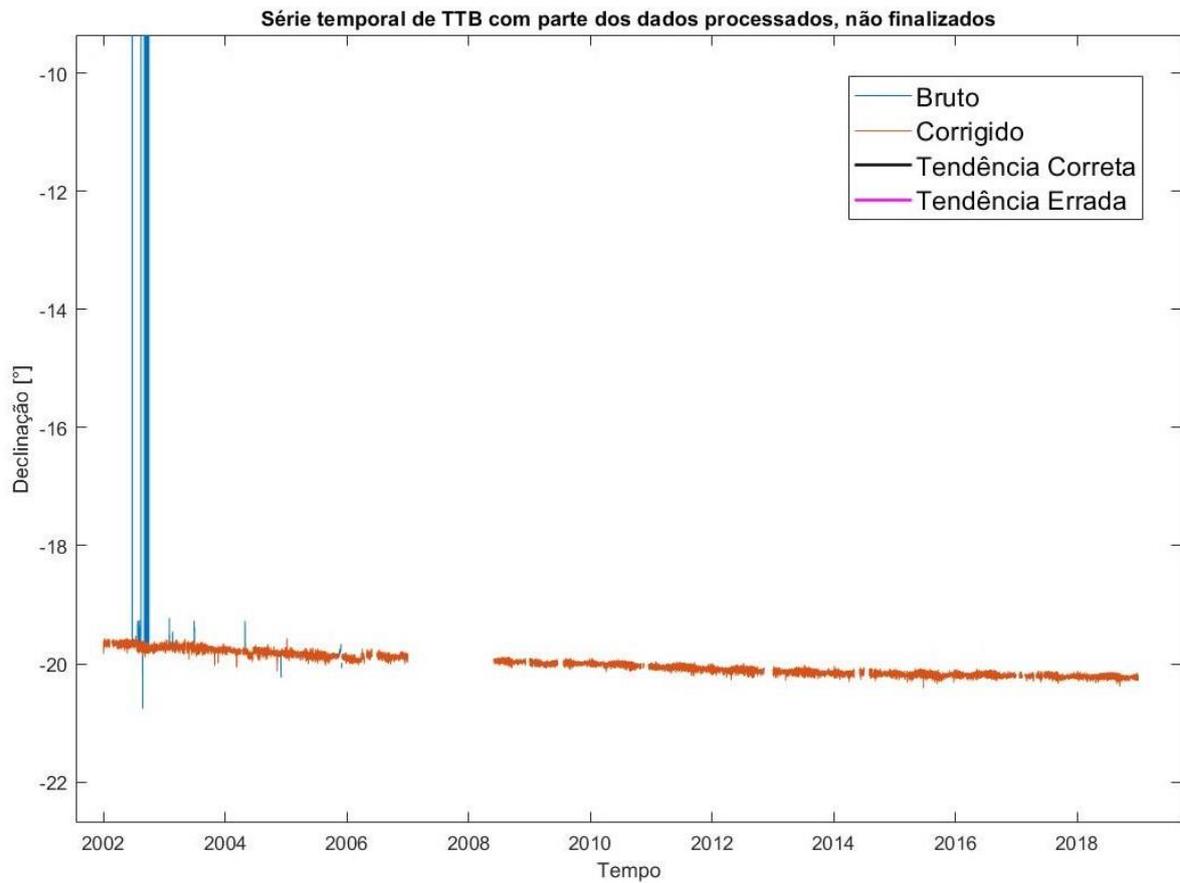


Figura 25: Zoom da série temporal de TTB no período de 2002 à 2018, permitindo a comparação entre dado bruto e corrigido.

Na figura 26 a seguir podemos observar a série temporal de TTB com os dados de variação da componente D totalmente corrigidos. Após as correções, não é possível observar *spikes* residuais ou saltos nas tendências ou qualquer outro tipo de comportamento espúrio. É possível observar que os valores obtidos de declinação seguem uma tendência consistente com o dado processado, especialmente para os anos analisados.

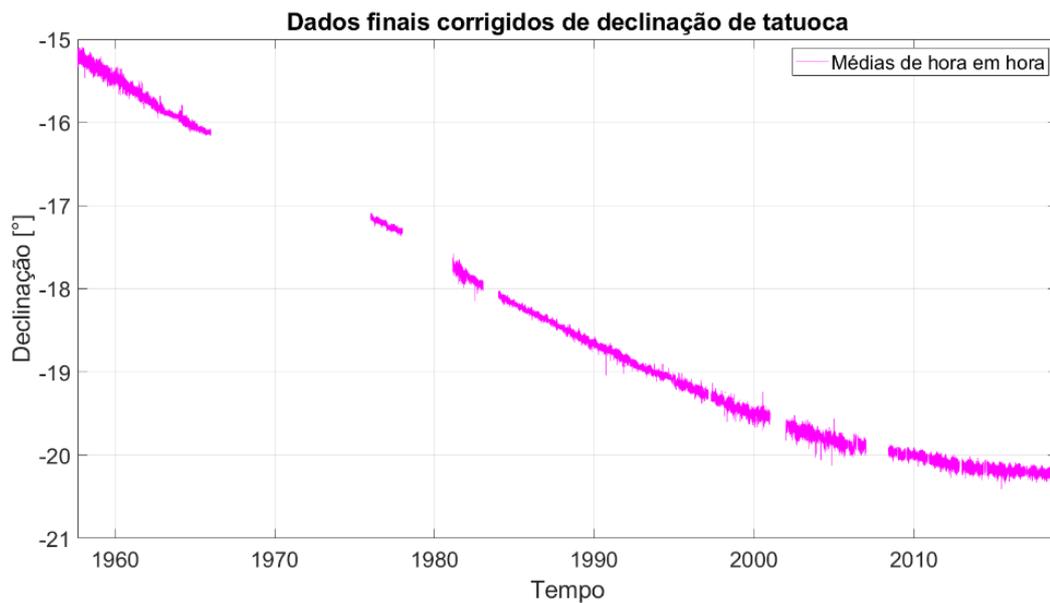


Figura 26: Dados finais da declinação magnética corrigida (médias horárias) do Observatório Magnético de Tatuoca de 1957 à 2018.

## 5.2 VARIAÇÃO SECULAR

Tratando-se da variação secular, foi realizado o processamento e análise dos dados de variação a longo prazo com uma diferença entre duas médias anuais consecutivas, para que possamos comparar com a variação secular calculada pela variação calculada do modelo IGRF.

A figura 27 a seguir apresenta a derivada das médias anuais dos valores de declinação para TTB (pontos pretos) e para o modelo IGRF (linha vermelha). A variação do modelo IGRF representa a variação esperada e, portanto, a comparação com a variação de TTB serve como uma ferramenta de validação dos resultados. Em geral, os padrões de variação secular de TTB e do IGRF são bastante similares, indicando que o processamento foi bem gerenciado. Existem exceções, como os anos de 1977, 1983 e 1984, em que os valores de variação secular de TTB desviam bastante tanto da tendência dos dados de TTB quanto da tendência do IGRF. Isso indica que os dados desses anos possuem algum erro associado a variação secular e devem ser ignorados para esse tipo de análise.

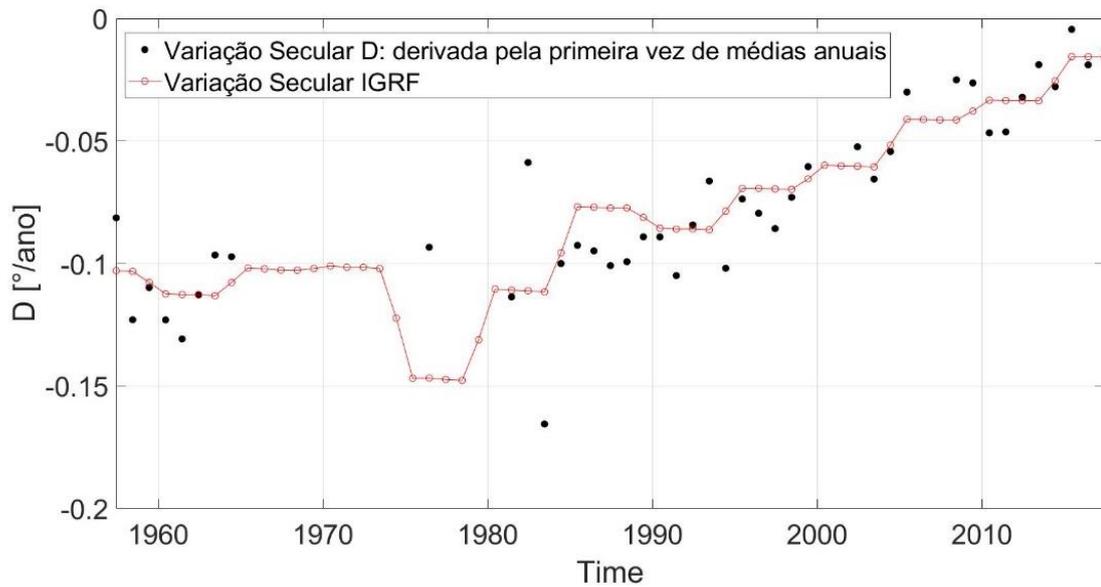


Figura 27: Dados do comportamento da Variação Secular presentes na série temporal de Tatuoca de 1957 a 2018.

### 5.2.1 VARIAÇÃO DIURNA

A figura 29 mostra o número de manchas solares desde 1957 até aproximadamente 2018, onde é possível ver a variação diurna da declinação magnética em TTB (pontos pretos) e o número de manchas solares (linha vermelha). A variação diurna apresenta um valor por dia, já o número de manchas solares é dado por valores anuais (painel a). Para uma comparação mais justa, também são mostradas as médias anuais da variação diurna (linha preta) no painel b, onde existe uma correlação entre essas duas grandezas, mais facilmente identificada no painel b. Vale salientar que foi realizado em um intervalo diário para se entender como se comportou esta variação diurna de TTB. Foi realizado uma comparação da variação diurna de TTB associado ao número de manchas solares, onde é mostrado uma diferença de 11 anos a cada pico de mancha solar registrado, que possuem forte controle na variação diurna. Os dados de manchas solares reflete a atividade solar, onde quanto maior for o número de manchas solares maior será a atividade solar em determinado período. O período de máxima atividade solar compreendeu aproximadamente o ano de 1960 e também o ano de 1980, bem como uma predição do número de manchas até aproximadamente 2019. A presença de períodos de baixa atividade solar é perceptível o declínio de manchas solares, no qual ocorre diminuição da ionização na atmosfera

terrestre. Normalmente também existe uma periodicidade de aproximadamente 27 dias associadas com a rotação solar.

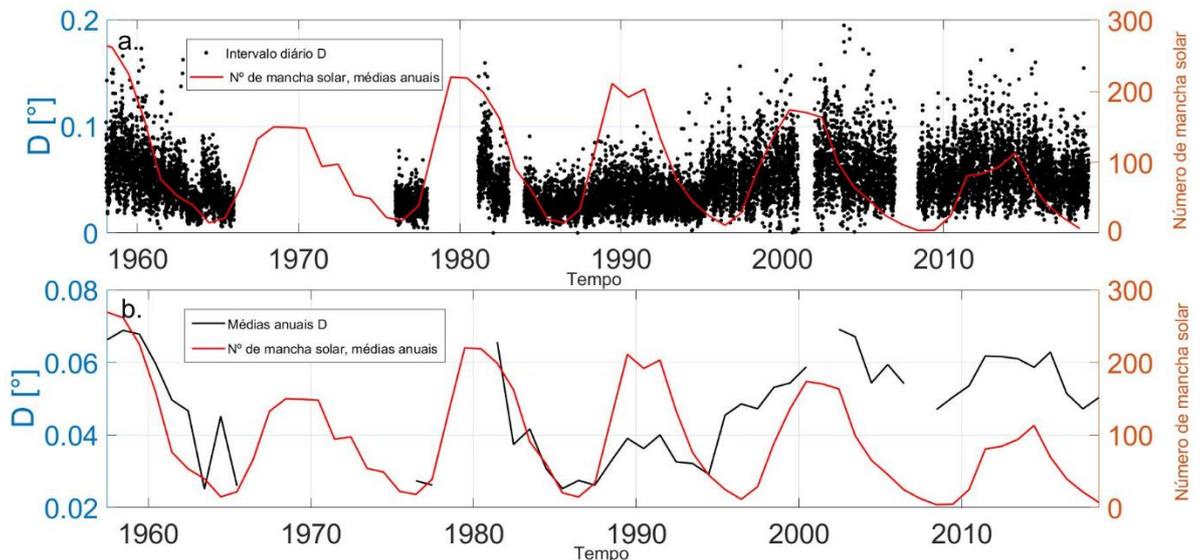


Figura 28: Dados de declinação do comportamento da Variação Diurna de acordo com o número de manchas solares presentes na série temporal de Tatuoca de 1957 à 2018.

### 5.2.2 TEMPESTADES MAGNÉTICAS

Foi realizado uma avaliação visual dos eventos de tempestades magnéticas registradas em Tatuoca com o intuito de verificar a consistência dos dados.

Na Figura 29 é mostrado o índice DST obtido a partir do *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto*, no período de outubro, novembro e dezembro de 2003, que representa o nível de atividade magnética. O índice DST é, portanto, um bom indicador da ocorrência de tempestades magnéticas. É possível observar a presença de tempestades magnéticas registradas entre o período de 29 de outubro a 1 de novembro de 2003, como também entre o período aproximadamente de 20 de novembro a 22 de novembro de 2003.

A figura 30 mostra a presença de tempestades magnéticas da declinação magnética entre outubro e dezembro no ano de 2003. Ao comparar as Figuras 29 e 30 é possível observar que os dados de tempestades magnéticas presentes são coerentes, onde os dados obtidos da declinação magnética mostrado na figura 30 estão de acordo com os índices magnéticos DST presentes na figura 29.

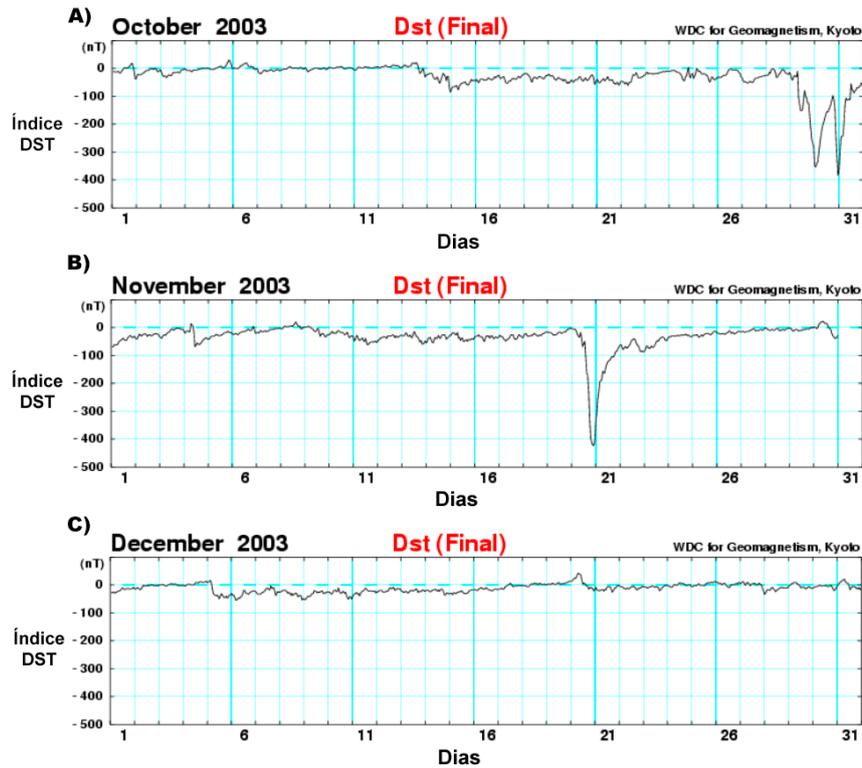


Figura 29: Índices magnético DST em A), B) e C) com registro de Tempestades magnéticas no mês de Outubro, Novembro e Dezembro do ano de 2003. Fonte: *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto*.

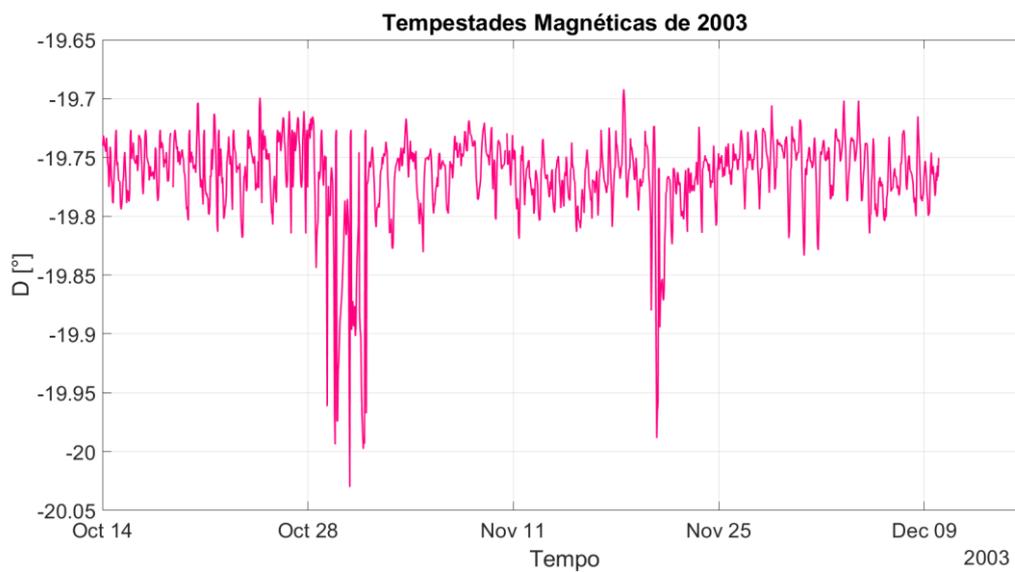


Figura 30: Tempestade magnéticas registradas no ano de 2003 da declinação magnética na série temporal de TTB.

## 6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho, um conjunto de dados referentes à declinação magnética registrada no observatório magnético de Tatuoca foi recuperado, processado e analisado, fornecendo informações inéditas sobre as variações magnéticas de Tatuoca. Esta condição nos permite examinar as mudanças a longo e curto prazo como a variação magnética secular e a variação diurna da declinação de Tatuoca, usando dados de 1957 até 2018. Essas informações possibilitaram perceber a modulação da variação diurna de  $D$  em TTB em função da atividade solar, possibilitando entender como se comportou a relação da atividade solar e números de manchas solares, mostrando que os períodos com maior atividade solar possuem um maior número de manchas solares assim como um maior valor de amplitude da declinação presentes na série temporal de TTB, como também a análise de variação secular permitiu entender como ocorre a variação magnética a longo prazo, e a presença de tempestades em determinados períodos estudados de Tatuoca. Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos, foi usado dados de variações magnéticas presentes no *World Data Center* (WDC) para realizar uma comparação com os dados da série temporal da declinação magnética de Tatuoca obtidos a partir deste trabalho, o que possibilitou determinar se os dados de variações magnéticas processados possuem coerência.

A realização deste trabalho está disponibilizando um código que foi desenvolvido no Matlab. Este código recebe como input o dado magnético bruto da declinação do observatório de Tatuoca com uma série de erros, e fornece como output o dado corrigido e finalizado. Esse código serve como uma documentação de todo os processos realizados, como remoção de todos os *spikes* e correções nos saltos de amplitude para chegar ao dado final corrigido, assim permitindo a outros usuários terem a flexibilidade de poderem realizar a mesma correção ou até mesmo mudarem para entenderem como foi realizado o processamento dos dados.

Este conjunto de dados inéditos obtidos possui diversas aplicações, sendo útil tanto para elaboração de modelos quanto em pesquisa de diversas áreas dentro do geomagnetismo e em áreas afins.

Nesta tese foram demonstrados dados inéditos da declinação de Tatuoca, porém ainda existem dados a serem processados de determinados anos registrados em documentação antiga como papéis fotográficos. A perspectiva futura é tornar esses dados de declinação magnética do observatório de Tatuoca utilizáveis para desenvolver novos estudos combinando o conjunto de dados recuperado com as demais componentes do campo magnético.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Langlais et al: **The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere** (2009). Setor de Geomagnetismo, Space Science Reviews - volume 155, páginas 95-127.

Manoj et al: **Ocean circulation generated magnetic signals** (2006). Setor de Geomagnetismo, Earth Planets and Space – volume 58, páginas 429–437.

Y. Yamazaki & A. Maute: **Sq and EEJ—A Review on the Daily Variation of the Geomagnetic Field Caused by Ionospheric Dynamo Currents** (2017). Setor de Geomagnetismo, Space Science Reviews - volume 206, páginas 299–405.

Lowrie: **Fundamentals of Geophysics - Second Edition** (2007). Livro – Setor de Geofísica / Geomagnetismo, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich.

Jackson, A. & Finlay, C.: **Geomagnetic secular variation and its applications to the core** (2015). Artigo Científico - Setor de Geomagnetismo, In Treatise on Geophysics, 2ª edição, Elsevier BV, Amsterdam.

Langel, R. A.: The main field. In: **Geomagnetism** – vol. 1 (1987), J. A. Jacobs, ed, cap. 4, páginas 249-512, Academic Press, New York.

R. K. Mishra & S.C.Dubey: **Impact of solar radiation on ionospheric disturbances** (2015). International Journal of Engineering Science Invention Research & Development; Vol. II. Department of Physics - A.P.S. University, Rewa & S.G.S. Govt. P.G. College, Sidhi, Índia.

Mandea, M., Holme, R., Pais, A., Pinheiro, K. J., Jackson, A., Verbanac, G., **Geomagnetic Jerks: Rapid Core Field Variations and Core Dynamics** (2010). Setor de Geomagnetismo, Space Science Reviews – volume 155, páginas 147–175.

Kelley, M. C.: **The Earth's Ionosphere Plasma Physics and Electrodynamics, 2nd Edition** (2009). Elsevier Academic Press, 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA.

Soares, G. B.: **Analysis of the Equatorial Counter Electrojet Longitudinal Variations** (2018). Tese (Mestrado em Geofísica) – Setor de Geomagnetismo, Observatório Nacional do Rio de Janeiro, Brasil.

Gonzalez et al: **What is a geomagnetic storm?** (1994). Setor de Geomagnetismo, Space Physics - volume 99, páginas 5771-5792.

J. Matzka: **Geomagnetic Observations for Main Field Studies: From Ground to Space** (2010). Artigo Científico – Setor de Geomagnetismo, DTU Space, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark

Wiermann, A. et al: **Construção de magnetômetro, de precessão nuclear de prótons, para observatórios magnéticos** (2003). Artigo Científico – Setor de Geomagnetismo, Observatório Nacional do Rio de Janeiro, Brasil.

Morschhauser et al.: **The magnetic observatory on Tatuoca, Belém, Brazil: history and recent developments** (2017). Artigo Científico – Setor de Geomagnetismo, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany.

Soares, G. B. et al.: **Hourly mean values of the geomagnetic field horizontal component H at the geomagnetic observatories Tatuoca (TTB) and Huancayo (HUA), 1957 to 2019** (2020). Artigo Científico – Setor de Geomagnetismo, Observatório Nacional do Rio de Janeiro, Brasil.

International Real-time Magnetic Observatory Network. **INTERMAGNET**.

Disponível em: <http://www.intermagnet.org>.

Acesso em: 23/11/2021.

Observatórios Magnéticos. **MOSAIC (Magnetic Observatories, Stations And Integrated researCh)**.

Disponível em: <http://www.observatoriosmagneticos.com>.

Acesso em: 10/09/2021.

WORLD DATA CENTER FOR GEOINFORMATICS AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **WDC**.

Disponível em: <http://wdc.org.ua/>.

Acesso em: 14/11/2021.

GFZ German Research Centre for Geosciences in Potsdam (Germany). **GFZ Data Services**.

Disponível em: <http://www.dataservices.gfz-potsdam.de>.

Acesso em: 17/11/2021.

World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. **WDC, Kyoto**.

Disponível em: [http://www.wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/index.html](http://www.wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html).

Acesso em: 18/11/2021.