

Fernanda Clara Monteiro Hermes

**Comparando a Variação Diurna do Campo
Geomagnético no Arquipélago de Abrolhos
com o IGRF-13: Observações Iniciais**

Brasil

2023

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG Gerada com
informações fornecidas pelo autor

H553c Hermes, Fernanda Clara Monteiro
Comparando a Variação Diurna do Campo Geomagnético no
Arquipélago de Abrolhos com o IGRF-13: Observações Iniciais
/ Fernanda Clara Monteiro Hermes. - 2023.
31 f.

Orientador: Luiz Carlos de Carvalho Benyosef. Coorientador: Paulo
Buarque de Macedo Guimarães. Trabalho de Conclusão de
Curso (graduação)-Universidade
Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Niterói, 2023.

1. Geomagnetismo. 2. Arquipélago de Abrolhos. 3. IGRF-13.
4. Produção intelectual. I. Benyosef, Luiz Carlos de Carvalho,
orientador. II. Guimarães, Paulo Buarque de Macedo,
coorientador. III. Universidade Federal Fluminense.
Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD - XXX

Fernanda Clara Monteiro Hermes

Comparando a Variação Diurna do Campo Geomagnético no Arquipélago de Abrolhos com o IGRF-13: Observações Iniciais

Projeto Final de Graduação apresentado ao curso de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito para a Obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Universidade Federal Fluminense - UFF

Departamento de Geologia e Geofísica

Graduação em Geofísica

Orientador: Luiz Carlos de Carvalho Benyosef
Coorientador: Paulo Buarque de Macedo Guimarães

Niterói

2023

Fernanda Clara Monteiro Hermes

**Comparando a Variação Diurna do Campo
Geomagnético no Arquipélago de Abrolhos com o
IGRF-13: Observações Iniciais**

Projeto Final de Graduação apresentado ao curso de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito para a Obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Comitê composto pelos seguintes avaliadores:

Luiz Carlos de Carvalho Benyosef
(Orientador)

Paulo Buarque de Macedo Guimarães
(Coorientador)

André Luiz Ferrari

Niterói
2023

*"Vento solar e estrelas do mar. A terra azul
da cor do seu vestido."*

Lô Borges; Um
Girassol da cor de seu cabelo
(1972)

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus avós maternos, Xerxes e Lourdes, que durante toda a graduação me deram um lar, por todo o apoio, pela ajuda e por sempre estarem ao meu lado. Aos meus pais, Márcio e Mônica, por me darem a vida, amor e todas as ferramentas para que eu pudesse estar aqui trilhando esta jornada. Aos Hermanos, meus amigos de ensino médio, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho. Aos meus colegas de curso, com quem convivi intensamente durante os últimos anos na UFF. Um convívio de maneira não tão trivial nos anos de pandemia, mas com muito companheirismo e trocas de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formanda, e por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado. Gostaria de agradecer imensamente ao meu orientador de estágio, Professor Luiz Benyosef por todo o incentivo para que eu pudesse realizar este trabalho que vem de um longo e incrível ano de pesquisa. Durante o estágio pude apresentar em congressos nossas pesquisas relacionadas ao tema, tendo a oportunidade de enriquecer meu conhecimento em cada um destes eventos, com o apoio financeiro do Observatório Nacional. Instituição onde sempre quis fazer parte como geocientista desde o dia que visitei sendo aluna de ensino médio do IFRJ com o grupo do Curso de Astronomia do Professor Gustavo Pinheiro. Agradeço ao Professor Miguel Sette que certamente teve um impacto na minha formação acadêmica, me dando a oportunidade de ser monitora do laboratório de física lá em 2015, por todas as aulas que pude acompanhar e colaborar, pelos nossos projetos de física óptica, por todas as conversas e conselhos. Agradeço especialmente ao meu amor, Bernardo, por estar comigo nesta jornada desde a pandemia incentivando e trilhando comigo esta formação tão bonita que é a Geofísica. Agradeço ao projeto Rebom do Observatório Nacional e em especial ao técnico Ronaldo Marins de Carvalho, pelos registros e fotos de ABR. Também agradeço ao INPE pelos registros de SMS. Meus agradecimentos ao CNPq e ao MCTI pela bolsa. E a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar a grande diferença de valores entre a intensidade da variação magnética diurna medida no Arquipélago de Abrolhos e os valores teóricos do Campo de Referência Geomagnético Internacional versão 13 (IGRF-13). Foram considerados registros de 146 dias de uma estação magnética construída em uma ilha do arquipélago. Neste trabalho utilizamos duas componentes do campo magnético: horizontal (H), vertical (Z) e a intensidade total do campo magnético (F).

Como referência externa, foram consideradas duas estações magnéticas montadas no continente e todas as geologias envolvidas. Como esperado, os valores previstos pelo modelo teórico são bastante consistentes com os valores medidos nas estações de referência. No entanto, os dados do arquipélago são bastante diferentes para todas as três componentes do campo geomagnético, especialmente em H, onde os valores de intensidades são da ordem de cinco vezes maiores que os valores previstos pelo IGRF-13. Esta é a primeira publicação que mostra a variação diurna registrada pela primeira estação magnética construída no Arquipélago de Abrolhos.

PALAVRAS CHAVE: VARIAÇÃO DIURNA, GEOLOGIA REGIONAL, IGRF, SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA, ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL.

Abstract

The goal of this work is to introduce the big difference between intensity values from daily magnetic variation measured at Abrolhos Archipelago and theoretical values provided by the International Geomagnetic Reference Field version 13 (IGRF-13). It was considered 146 days' data recorded by a magnetic station built on an island in this archipelago. We considered two components of the magnetic field: horizontal (H), vertical (Z) and the total magnetic field intensity (F).

As external reference, two magnetic stations mounted on the continent and all correspondent geologies were considered. The predicted values by the theoretical model are quite consistent with measured values at the reference stations, however, the archipelago data are quite different for all three geomagnetic field components, especially in H, with intensity values five times bigger than predicted values by IGRF-13. This is the first publication showing daily variation recorded by the first magnetic station built at Abrolhos Archipelago.

KEYWORDS: DAILY VARIATION, REGIONAL GEOLOGY, IGRF, MAGNETIC SUSCEPTIBILITY, SOUTH ATLANTIC MAGNETIC ANOMALY.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVO.....	13-14
3. CAMPO MAGNÉTICO.....	14
3.1 Modelo teórico do campo magnético da terra e o IGRF-13.....	14
3.2 Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS).....	14-15
3.3 O Arquipélago de Abrolhos e as Estações magnéticas usadas.....	15-17
4. GEOLOGIA REGIONAL DAS ESTAÇÕES.....	17-18
4.1 Estação Magnética de Abrolhos.....	18-20
4.2 Estação Magnética de São Martinho da Serra.....	20
4.3 Observatório Magnético de Vassouras.....	21
5. METODOLOGIA.....	22-23
6. RESULTADOS.....	23-29
7. CONCLUSÕES.....	29-30
8. REFERÊNCIAS.....	30-32

Lista de Figuras

<i>Figura 1 – 1a) Representação da Intensidade total (F) do campo geomagnético e 1b) Representação da Inclinação magnética (I) para o ano 2020 (Chulliat, A. et al., 2020)</i>	15
<i>Figura 2 – Localização da Estação Magnética de Abrolhos na Ilha de Santa Bárbara. (Google Earth - 2022)</i>	16
<i>Figura 3 – A Estação Magnética de Abrolhos (ABR) é protegida por um cercado de madeira</i>	16
<i>Figura 4 - Localização das estações ABR, VSS e SMS e região central da AMAS. (imagem gerada pela autora)</i>	17
<i>Figura 5 - Mapa Geológico da região de Abrolhos (Sobreira, J. & França, R. - 2005)</i>	19
<i>Figura 6 - Seção geológica regional entre os poços na região emersa (Caravelas) e na plataforma continental da Ilha de Santa Bárbara (Mohriak, W., 2006)</i>	20
<i>Figura 7 – Geologia da Folha de São Martinho da Serra (CPRM – Carta Geológica, disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/>, acesso em: 10 de setembro de 2022)</i>	20
<i>Figura 8 - Geologia da Folha Barra do Piraí, CPRM – Carta Geológica (disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/>, acesso em: 05 de junho de 2022)</i>	21
<i>Figura 9 - Tabela de Bartels (disponível em: <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>, acesso em: 05 de junho de 2022)</i>	22
<i>Figura 10 – Comparativo mostrando as variações registradas nas três estações e as previsões teóricas fornecidas pelo IGRF-13, em intervalo horário para as componentes H, Z e F</i>	24-25
<i>Figura 11 – Registro da variação diurna, em dias calmos (Sq) para as componentes H, Z e intensidade F, com a identificação da SSC inicial em cada estação para os dias 25 de janeiro e 19 de abril de 2016</i>	25-26
<i>Figura 12 – Registro da variação diurna em dias perturbados (Sd) para as componentes H, Z e intensidade F, com identificação da SSC inicial em cada estação para os dias 20 de dezembro de 2015 e 16 de fevereiro de 2016 indicado pelas setas</i>	26
<i>Figura 13 – Correlação entre pares de estações para os dias selecionados na Tabela 3 em Z, H e F separados por dias calmos e perturbados com os seus respectivos coeficientes de correlação</i>	28-29

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Coordenadas geográficas e geomagnéticas das estações de ABR, VSS e SMS _____ 17

Tabela 2 - Susceptibilidade magnética das principais rochas encontradas na geologia dos locais das estações (Telford et al., 1976) _____ 18

Tabela 3 - Dias calmos e perturbados selecionado de cada mês de acordo com o índice Kp (disponível em: <<https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>>, acesso em: 29 de setembro de 2022) _____ 23

Tabela 4 – Mostra na sequência, os valores médios dos elementos H, Z e F registrados nas três estações; os valores médios teóricos obtidos pelo IGRF-13; a diferença entre estes valores para cada estação e o percentual da diferença destes valores _____ 27

1 Introdução

O campo magnético da Terra é gerado no seu núcleo externo, de composição níquel-ferro, em um processo semelhante a um dínamo auto excitado (*Campbell, W.H., 2003*). Correntes elétricas fluem lentamente neste núcleo externo gerando o campo magnético principal. Entretanto, o campo medido na superfície da terra apresenta não somente a parte interna, mas também contribuições da parte externa que surge devido a interação do vento solar com a ionosfera. Em termos de período, deve-se considerar que o campo magnético na superfície apresenta variações que se estendem desde frações de segundo até milhões de anos. As variações de longo período, ou lentas, tem origem no interior da Terra, enquanto as de curto período, ou rápidas, estão associadas com as contribuições da parte externa. Estas variações rápidas estão relacionadas com a interação Terra - Sol e dependem basicamente da atividade solar, das estações do ano e do ciclo solar de 11 anos.

A variação diurna tem período de 24 horas e está diretamente associada com a rotação da terra e com a interação do fluxo de energia proveniente do sol, ou vento solar, com as partículas em suspensão na ionosfera. Dessa maneira, as variações do campo magnético para diferentes pontos na superfície da terra apresentam características diferentes. Em função da atividade do vento solar, os dias podem ser classificados como calmos (Sq: Solar quiet) ou perturbados (Sd: Solar disturbed). Nos períodos em que a atividade solar é instável tem-se as tempestades magnéticas, cujas intensidades podem ser avaliadas com antecedência por estarem associadas com as manchas solares. Desta maneira é possível prever tempestades magnéticas (*Kubicka, M. et al., 2016*) com bom nível de confiabilidade. Desde a segunda metade do século XIX, com a construção dos primeiros observatórios magnéticos, são realizados registros rotineiros da variação diurna, dando origem a uma longa série histórica. Estes observatórios estão distribuídos em praticamente todas as regiões do planeta. No Brasil, o Observatório Magnético de Vassouras, criado em 1913, desde 1915 registra de maneira ininterrupta as variações do campo magnético. As normas e os padrões da moderna metrologia geomagnética são gerenciados pela IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy), surgida em 1873 e que tem entre outros objetivos, organizar e padronizar modelos matemáticos confiáveis que possam ser utilizados em qualquer ponto da superfície terrestre, considerando a latitude, longitude, altitude e o tempo.

O modelo mais utilizado para a representação do campo magnético terrestre é o IGRF (International Geomagnetic Reference Field). Sua primeira edição é de 1965 e foi adotado como referência a partir de 1969 com a denominação de IGRF-1. Este primeiro modelo fornecia informação dos elementos do campo geomagnético, válido para o período 1900 - 1970 (*IAGA Working Group on IGRF*). Assim, por sua confiabilidade, é fundamental em trabalhos que se utilizam de técnicas geomagnéticas, como em prospecção magnética (aérea, terrestre e marítima), topografia e navegação, dentre outras. A atualização dos coeficientes das equações do IGRF é feita através dos registros fornecidos pelas redes mundiais de observatórios magnéticos, estações magnéticas ou de repetição e nas últimas décadas por modernos satélites, como: Órsted, Champ, Swarm (*Matzka et al., 2010 e Thebault, E. et al., 2015*).

Considerando a dinâmica da variação de longo período, ou secular, do campo magnético, os coeficientes da equação devem ser corrigidos a cada intervalo de cinco anos. Entretanto, mudanças recentes no posicionamento do pólo norte magnético (*Witze, A., 2019*) sugerem que esta revisão seja feita em intervalos menores que o recomendado atualmente.

2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados da primeira estação magnética montada em Abrolhos e fazer uma comparação com duas estações de referência no continente. Desta maneira deseja-se mostrar as possíveis interferências da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), considerando que Abrolhos está no limite nordeste de atuação da anomalia.

Usando registros simultâneos das três estações magnéticas, o objetivo deste trabalho é analisar a relação entre os valores para a variação diurna medidos no arquipélago de Abrolhos e os teóricos obtidos pela última versão do modelo para o campo geomagnético de referência internacional (IGRF-13).

Este trabalho também tem sua importância por ser a primeira publicação de resultados para a variação diurna, registradas pela primeira estação magnética instalada na história do Arquipélago de Abrolhos.

3 Campo Magnético Terrestre

O modelo mais simples para representar o campo geomagnético, em qualquer local da superfície da Terra, é feito utilizando um sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) de forma que o plano (X, Y) esteja paralelo à superfície e o Z no sentido do centro da Terra. Adotando que o eixo X aponte para o norte geográfico, o Y estará na direção leste. A intensidade total do campo (F ou B) é obtida pela soma dos elementos da equação (1):

$$F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2} \quad (1)$$

A unidade adotada para intensidade do campo geomagnético, desde os anos 1980, substituindo o γ é o nanoTesla ($1 \text{ nT} = 1 \gamma = 10^{-5} \text{ Oe}$). Em valores médios, a intensidade do campo magnético nos polos é da ordem de 60.000 nT e no equador magnético de 30.000 nT.

3.1 O MODELO TEÓRICO DO CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA E O IGRF-13

As contribuições internas para o campo magnético principal terrestre (\mathbf{B}) (Lanza, R and Meloni, 2006) são avaliadas utilizando-se de harmônicos esféricos. A intensidade deste campo é obtida considerando o gradiente negativo do potencial escalar V , ou seja: ($\mathbf{B} = -\nabla V$) que é expresso como uma série finita, utilizando coeficientes de Gauss: g_n^m e h_n^m na forma:

$$V(r, \theta, \phi, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} [g_n^m(t) \cos(m\phi) + h_n^m(t) \sin(m\phi)] P_n^m(\cos\theta) \quad (2)$$

A equação (2) é válida para modelo do International Geomagnetic Reference Field, de 13ª geração - a versão mais recente de uma descrição matemática padrão do principal campo magnético da Terra que é amplamente usada em estudos do interior profundo da Terra, sua crosta e sua ionosfera e magnetosfera, o IGRF-13, onde $a = 6.371,2 \text{ km}$ e $N = 13$. Nesta expressão a colatitude geocêntrica ($90^\circ - \text{latitude}$) é representada por θ e a longitude leste por ϕ . A conversão das coordenadas geocêntricas e geodésicas é realizada, desde 1984, usando o esferóide do Sistema Geodésico Mundial. O termo $P_n^m(\cos\theta)$ é a função de Legendre, sendo n o grau e m a ordem semi-normalizadas de Schmidt. O IGRF é o produto de um esforço colaborativo entre modeladores de campo magnético e os institutos envolvidos na coleta e disseminação de dados de campo magnético de satélites e de observatórios e pesquisas em todo o mundo.

3.2 ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (AMAS)

A Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) abrange uma extensa área que cobre todo o Atlântico Sul e parte da América do Sul. Tem considerável importância por ser a região onde o campo magnético global apresenta as menores intensidades, atualmente com valores inferiores a 23.000 nT. Dotada de grande dinâmica, está sofrendo forte deriva para oeste e se afasta da África em direção à América do Sul. Atualmente seu centro está na região centro-oeste do Paraguai, próximo da capital Assunção e da fronteira com a Argentina. Sua velocidade é estimada (Hartmann, G. and Pacca, I., 2009) em $0,22^\circ/\text{ano}$ para oeste e $0,015^\circ/\text{ano}$ para o sul.

A interação da AMAS com o campo magnético principal é consideravelmente grande e interfere deslocando a continuidade da linha do equador de inclinação $I = 0$ em termos globais. O resultado pode ser observado nas Figuras 1a e 1b. A primeira mostra a representação da intensidade do campo total F e a segunda a inclinação magnética (I) que divide os dois hemisférios magnéticos. Ambas são válidas para o ano 2020 e foram obtidas pelo IGRF-13.

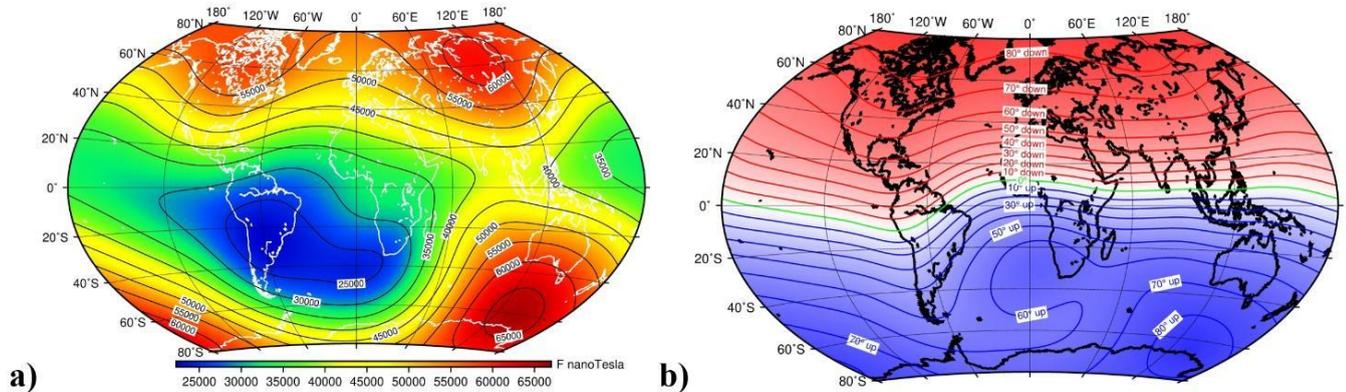


Figura 1 – 1a) Representação da Intensidade total (F) do campo geomagnético e 1b) Representação da Inclinação magnética (I) para o ano 2020 (Chulliat, A. et al., 2020).

Trabalhos mostrando informações que possam auxiliar no estudo dos mecanismos da interação de campos magnéticos na região da AMAS são de grande importância para as geociências. Dentre eles, pode-se também destacar a influência mútua desta anomalia com o Eletrojato Equatorial (EEJ) localizado na região norte do Brasil (Bellinghini et al - 2018). O EEJ é uma faixa relativamente estreita de partículas ionizadas e está situado na altitude média de 110 km, sobre a linha do dip equatorial, ou seja, a região com inclinação magnética nula, representado pela linha verde na Figura 1b.

Para aplicações diversas, deve-se também destacar a ação da AMAS que funciona como uma porta de entrada para partículas cósmicas na magnetosfera (Heynderickx, D., 1996). Esta interação provoca forte interferência na instrumentação de aviões e satélites que transitam na região e tem sido reportada por diversas missões (Heirtzler, J.R., 2002). A partir de 2017 modificações consideráveis na morfologia da AMAS têm sido observadas pela constelação de satélites *Swarm* mostrando o surgimento rápido de grandes áreas anômalas (European Space Agency - website, 2020) nas costas do continente africano.

Escolhemos a componente horizontal do campo geomagnético, H , por ser a mais indicada para fornecer as informações da interação do vento solar na magnetosfera sob a região. Foi ainda considerada a componente vertical do campo, Z , pelo fato desta estar diretamente associada às informações da interação do campo magnético externo com o solo, que está sob ação contínua do campo interno, onde a exerce fundamental importância. Finalmente, incluímos a intensidade total do campo magnético total, F , por ser o elemento principal.

3.3 O ARQUIPÉLAGO DE ABROLHOS E AS ESTAÇÕES MAGNÉTICAS USADAS

O Arquipélago de Abrolhos está situado entre o litoral sul da Bahia e o norte do Espírito Santo, sendo composto por cinco ilhas. Apesar do arquipélago ter sido motivo de ótimos trabalhos ao longo dos anos em diferentes áreas de geociências (Leão et al 1982, Montes-Lauar et al 1992 Collins 2006, e etc) em geomagnetismo este trabalho é o primeiro. A escolha do sítio para instalação da primeira estação magnética do arquipélago obedeceu a razões logísticas e a pré-requisitos técnicos. A ilha de Santa Bárbara foi então selecionada. Esta caracteriza-se por ser a maior ilha do arquipélago e a que ofereceu as melhores condições logísticas. Na fase de preparação, foi realizado o serviço de escolha de sítio antes da instalação dos instrumentos pela equipe do Projeto Rebom do Observatório Nacional. A estação Magnética de Abrolhos (ABR) está identificada na Figura 2. O instrumento principal utilizado nesta coleta de dados é um magnetômetro triaxial LEMI-417 e os sensores estão orientados nas direções: (H, Z, F).



Figura 2 – Localização da Estação Magnética de Abrolhos na Ilha de Santa Bárbara. (Google Earth - 2022).

A Figura 3 mostra a primeira estação magnética montada no Arquipélago de Abrolhos. A parte eletrônica, sistema de aquisição de dados e alimentação estão agrupados em um pequeno cercado. O sensor do magnetômetro, está coberto por uma estrutura cilíndrica e aparece em primeiro plano sobre o solo rochoso da ilha. Para garantir a operacionalidade do sistema, um painel solar foi montado para a recarga das baterias.



Figura 3 – A Estação Magnética de Abrolhos (ABR) é protegida por um cercado de madeira.

Na escolha das estações de referência, para comparação da variação diurna, foi escolhido o Observatório Magnético de Vassouras (VSS) que está situado no estado do Rio de Janeiro e distante 716 km de Abrolhos. A segunda estação magnética, São Martinho da Serra (SMS) está situada no Rio Grande do Sul, a 2.005 km da Ilha de Santa Bárbara. É de se destacar que SMS pela proximidade é a que mais está sujeita a influência da AMAS. Os registros foram coletados simultaneamente nas três estações. A Tabela 1 indica as coordenadas geográficas e geomagnéticas das estações.

Tabela 1 - Coordenadas geográficas e geomagnéticas das estações de ABR, VSS e SMS.

Estação	Coordenadas geográficas		Coordenadas Geomagnéticas	
	Latitude (°)	Longitude (°)	Latitude (°)	Longitude (°)
ABR	17.964 S	38.695 W	9.80 S	32.73 E
SMS	29.260 S	53.490 W	19.96 S	17.84 E
VSS	22.400 S	43.390 W	13.80 S	27.84 W

A Figura 4 mostra a localização das estações utilizadas com a escala das distâncias entre elas.

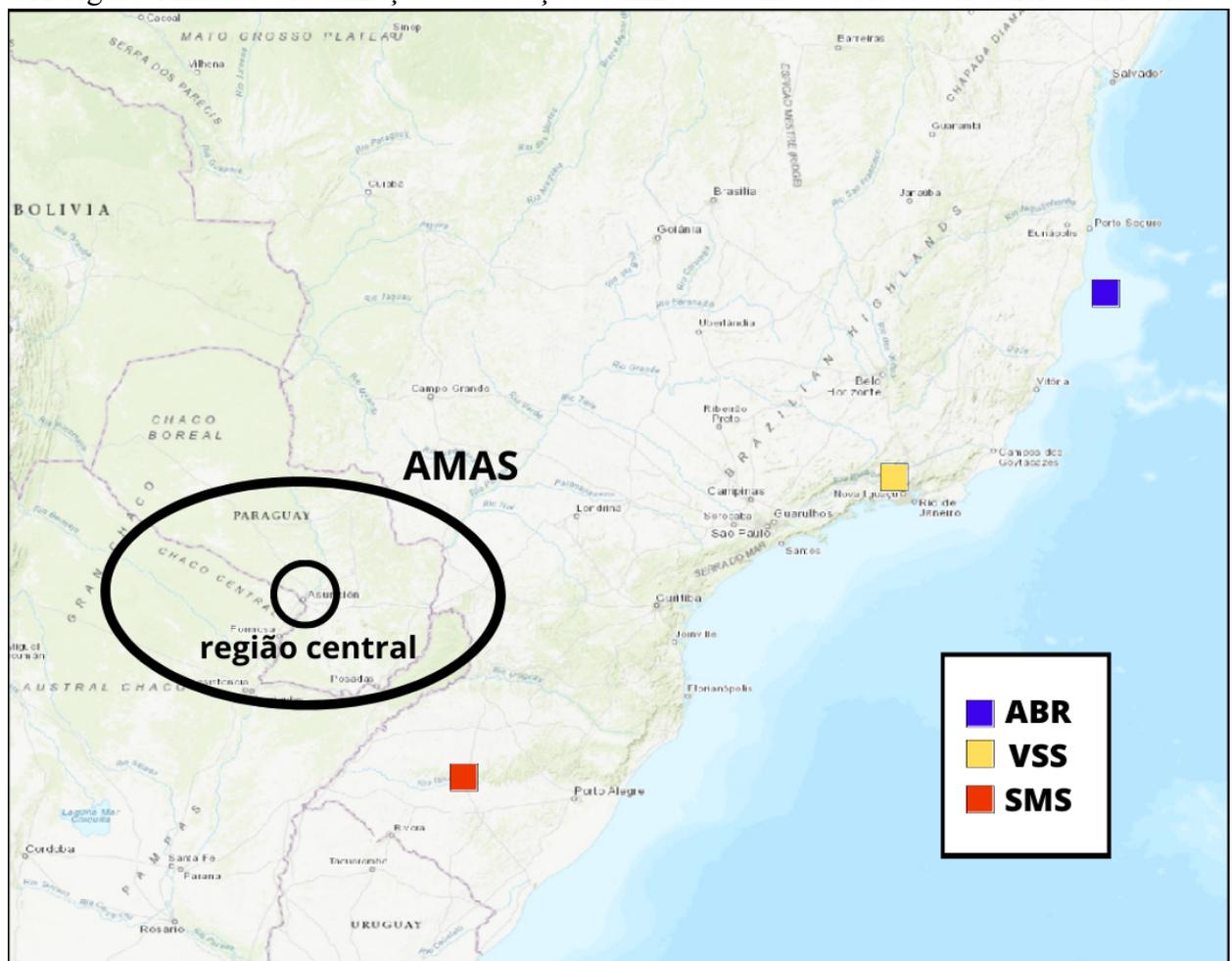


Figura 4 - Localização das estações ABR, VSS e SMS e região central da AMAS. (imagem gerada pela autora).

4 Geologia Regional das Estações

A concentração de materiais com altos valores de susceptibilidade magnética nos solos pode alterar de maneira significativa as medições magnéticas, por gerar anomalias. Por esta razão, foi analisada a composição das rochas presentes nas três estações utilizadas neste trabalho. A (Tabela 2)

mostra os valores da susceptibilidade magnética para diferentes materiais.

Tabela 2 - Susceptibilidade magnética das principais rochas encontradas na geologia dos locais das estações (Telford et al., 1976).

Tipo	X(SI_z)
Arenito	0 a 20000
Basalto	200 a 175000
Calcário	0 a 3000
Dolomito	0 a 900
Gabro	1000 a 90000
Gneisse	100 a 25000
Granito	0 a 50000
Peridotito	90000 a 200000
Riolito	200 a 35000
Serpentinito	3000 a 17000
Xisto	300 a 3000

4.1 ARQUIPÉLAGO DE ABROLHOS (ABR)

Todas as cinco ilhas que compõem o arquipélago de Abrolhos tiveram origem em afloramentos vulcânicos e estão situadas na plataforma continental (Figura 5). São predominantemente compostas por rochas basálticas, consideradas intrusivas, com idades entre 40 e 60 milhões de anos (Paleoceno-Eoceno). A região também mostra a presença de depósitos piroclásticos intercalados nos sedimentos fossilíferos (Cordani, U.G. e Blazekovic, A., 1970).

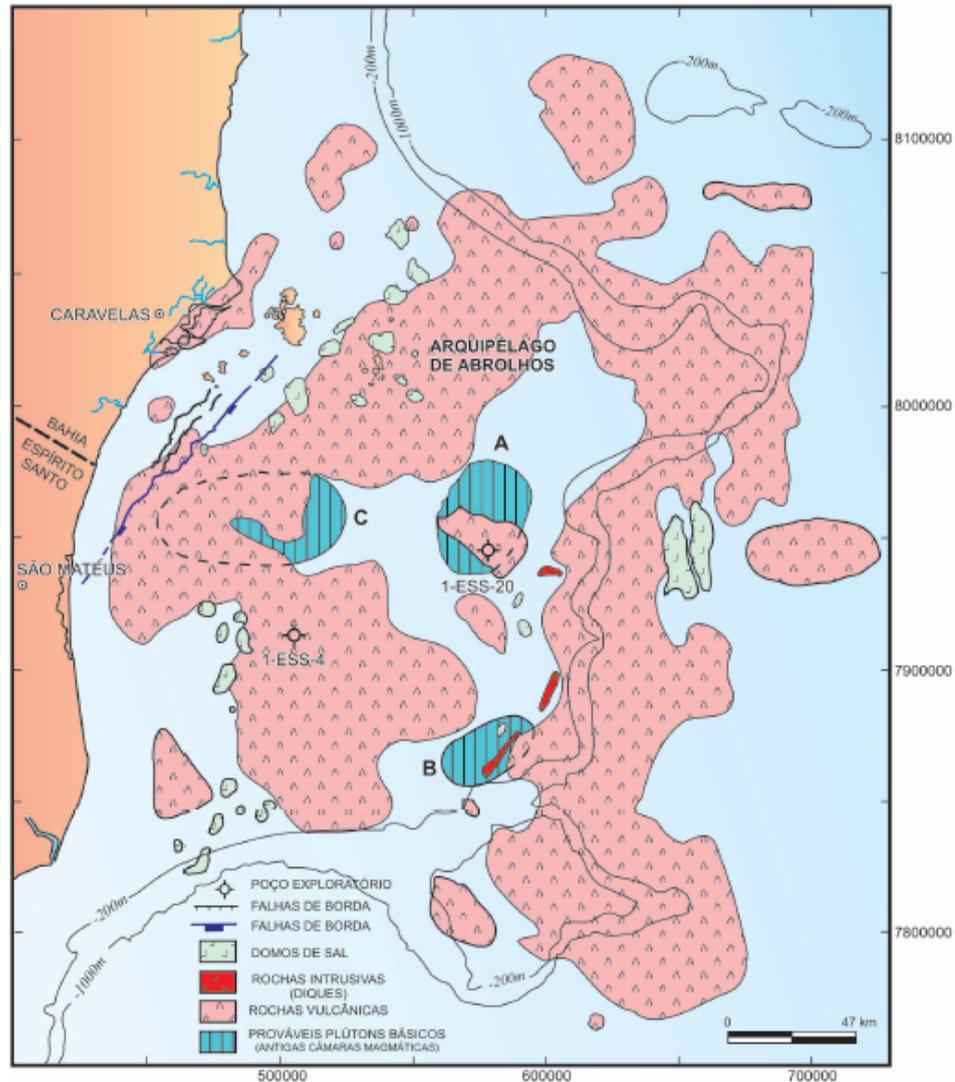


Figura 5 - Mapa Geológico da região de Abrolhos (Sobreira, J. & França, R. - 2005).

Na ilha de Santa Bárbara pode ser identificada uma sequência de rochas ígneas (basaltos, diabases e brechas) e sedimentares (arenitos grosseiros, conglomerados em canais, arenitos com estratificação concordante e discordante com rochas vulcânicas, siltitos e folhelhos) que foram soerguidas após a deposição original entre o Neocretáceo e o Paleógeno (Mohriak, W., 2006).

Os afloramentos sedimentares nas ilhas são formados por sedimentação turbidítica do terciário inferior na margem continental brasileira, com espessas camadas de arenitos maciços que se sobrepõem aos ritmitos (Mohriak, W., 2006). Assim, o conhecimento da geologia de Abrolhos tem enorme importância, já que esta formação é composta por rochas vulcânicas com altos valores de susceptibilidade magnética. Além disso, tem que levar em consideração que o mar em torno da ilha se comporta como uma placa condutora horizontal que influi na componente geomagnética Z . A Figura 6 mostra a geologia característica da região de Abrolhos (ABR).

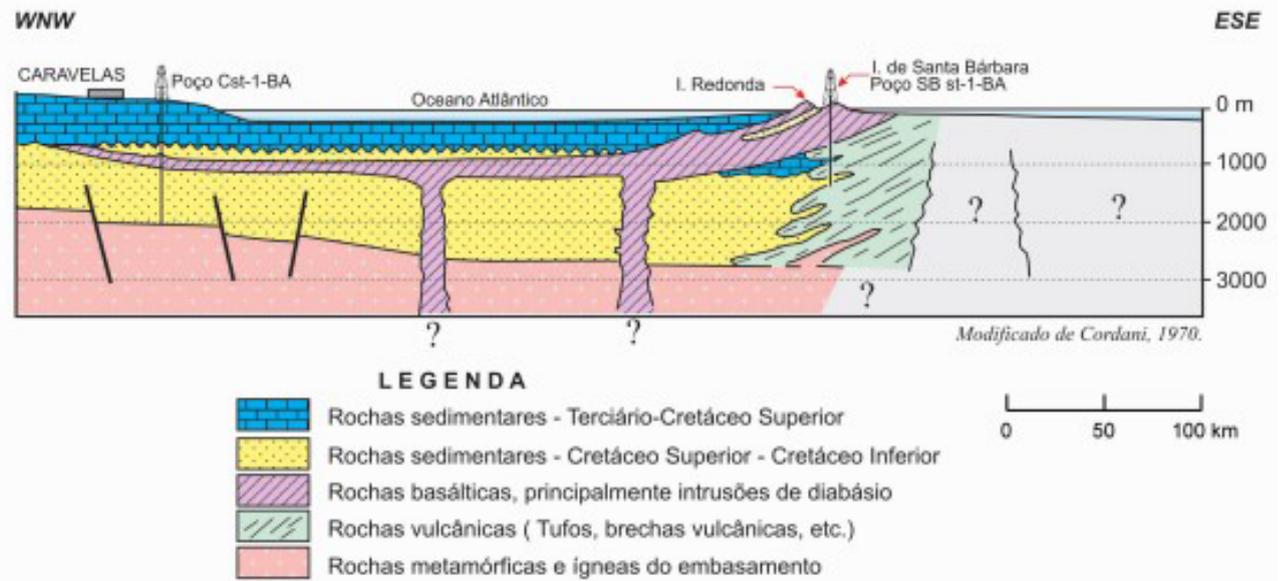


Figura 6 - Seção geológica regional entre os poços na região emersa (Caravelas) e na plataforma continental da Ilha de Santa Bárbara (Mohriak, W., 2006).

4.2 ESTAÇÃO MAGNÉTICA DE SÃO MARTINHO DA SERRA (SMS)

Os sedimentos presentes em SMS basicamente estão divididos em dois grupos. Na Figura 7 a parte correspondendo aos riolitos e riolitos, mesocráticos, microgranulares a vitrofíricos, de textura esferulítica comum é identificada com a legenda de K1 α cx. Com forte disjunção tabular no topo dos derrames e maciço na porção central, e dobras de fluxo e auto brechas frequentes. Tendo como fonte de mineralização, vesículas preenchidas predominantemente por calcedônia e ágata.

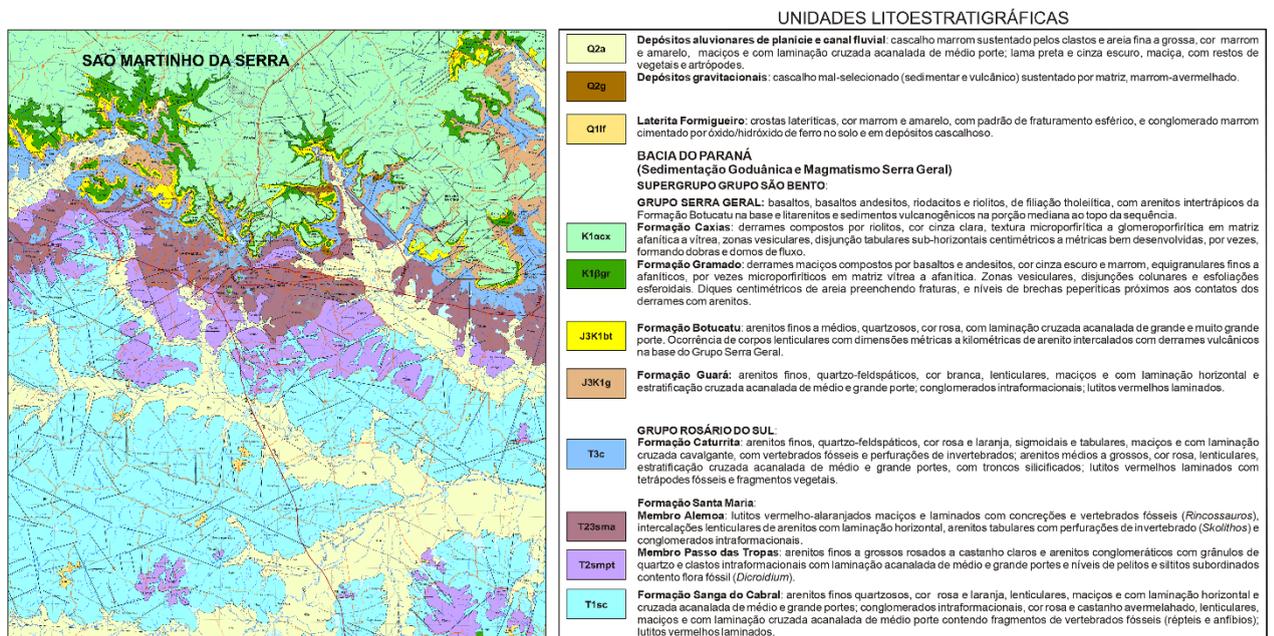


Figura 7 – Geologia da Folha de São Martinho da Serra (CPRM – Carta Geológica, disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>, acesso em: 10 de setembro de 2022).

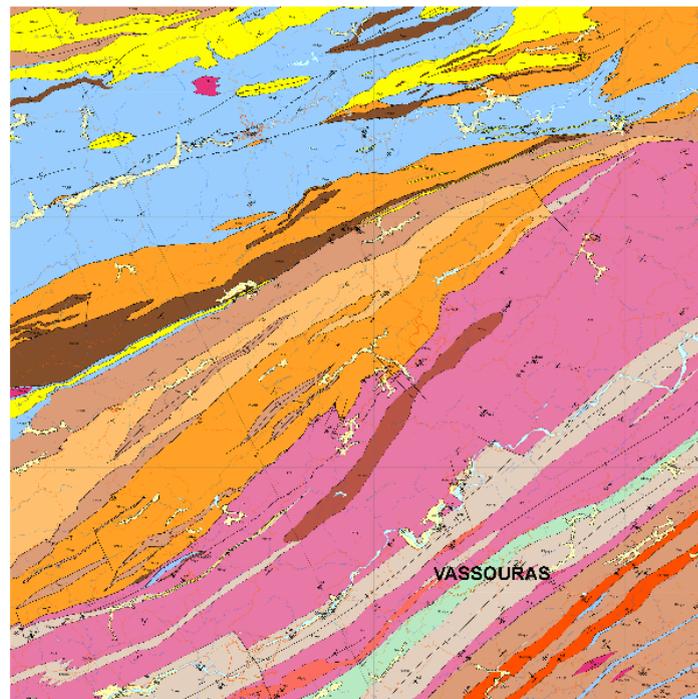
A área K1 β gr corresponde a derrames basálticos granulares finos a médio, melanocráticos cinza, com horizontes vesiculares preenchidos por zeolitas, carbonatos, apofilitas e saponita, estruturas de fluxo e comuns, intercalações com os arenitos Botucatu.

Em concordância com a Tabela 2, é verificado que os basaltos, que predominam na região de SMS, possuem susceptibilidade magnética de média a alta intensidade.

4.3 OBSERVATÓRIO MAGNÉTICO DE VASSOURAS (VSS)

A geologia regional de Vassouras é caracterizada pela presença de rochas metamórficas, como gnaiss, migmatito, anfibolito e quartzito, junto com diques de basalto e gabro. Alguns minerais, como biotita e hornblenda também podem ser encontrados nesta região. Esses minerais possuem grande quantidade de materiais magnéticos, como ferro, biotita e hornblenda representando boa parte das rochas metamórficas locais, fator que pode indicar altos valores de susceptibilidade magnética.

A Figura 8 representa a geologia de Barra do Pirai, onde encontram-se informações geológicas da região de Vassouras.



N4a	01 - Sedimentos aluviais holocênicos: areias e argilas
	02 - Diques de rochas básicas cretácicas: diabásios e gabros (K1βsm)
ε 1-1jp	03 - Granito Serra do Ipiranga: biotita leucogranito
NP1γ2hgp	04 - Biotita granito porfirítico foliado
NP1γ3rt	05 - Granada-biotita granito porfirítico foliado: Suite Rio Turvo (rt) e granito porfiróide foliado
NP1γ3cc	06 - Suite Serra da Concórdia: granada-biotita granito porfiróide foliado
NPαqgn	07 - Megassequência Andrelândia: Sillimanita-granada-biotita gnaiss bandado com intercalações de anfibolitos, xistos, quartzitos (NPαq1), rochas ultramáficas e rochas na fácies granulito
NPαhgn	08 - Megassequência Andrelândia: Biotita gnaiss bandado com intercalações de sillimanita-granada-biotita gnaiss (NPαggn), quartzitos (NPαq1), anfibolitos e rochas calcissilicáticas
PP1αqgn	09 - Complexo Paraíba do Sul: Sillimanita-granada-muscovita-biotita gnaiss bandado com intercalações de biotita gnaiss, mármore, rochas calcissilicáticas, gndito, anfibolito e quartzito
PP1αhgn	10 - Complexo Paraíba do Sul: Biotita gnaiss bandado com intercalações de sillimanita-granada-muscovita-biotita xisto e rochas calcissilicáticas
PP2αru2	11 - Complexo Mantiqueira: Hornblenda-biotita gnaiss migmatítico
PP2γjgn	12 - Complexo Juiz de Fora: Ortognaiss bandados, por vezes miloníticos, com composição variando entre granítica e tonalítica/diorítica, com lentes de rochas anfibolíticas
PP2γjgd	13 - Complexo Juiz de Fora: Ortogranulitos com texturas variando entre granoblástica a milonítica, com composição variando entre charnockítica a enderbítica, com lentes de granulitos máficos
PP2q	14 - Complexo Quirino: Hornblenda-biotita gnaiss migmatítico e hornblenda granitóide (hg)

Figura 8 - Geologia da Folha Barra do Pirai, CPRM – Carta Geológica (disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>, acesso em: 05 de junho de 2022).

5 Metodologia

O período considerado nesta análise foi de 14 de dezembro de 2015 a 07 de maio de 2016, totalizando 146 dias. Considerando a fase do ciclo solar de 11 anos, o período analisado neste trabalho corresponde a fase descendente do ciclo atual, Ciclo Solar 24. Os dados foram registrados com período de segundos e reduzidos para minutos. Para compensar erros, foi utilizada uma equação de ajustes para cada componente e os dados foram complementados de maneira a não alterar o comportamento sazonal do campo geomagnético.

Para facilitar, os valores foram agrupados em períodos e a análise para as variações obtidas foram comparadas com os valores teóricos fornecidos pelo IGRF-13. Na seleção dos períodos de atividades magnéticas calmas e moderadas foi utilizada a Tabela de Bartels (*Bartels, J. - 1957*). A Figura 9 mostra a atividade magnética para o período deste trabalho.

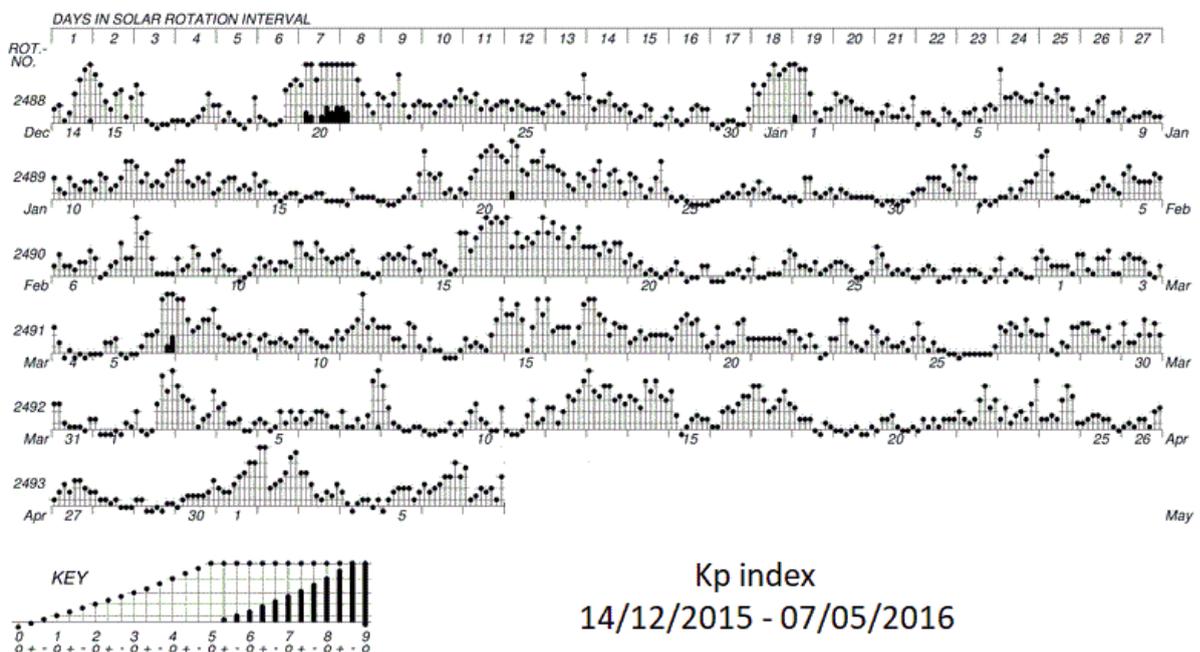


Figura 9 - Tabela de Bartels (disponível em: <<https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>>, acesso em: 05 de junho de 2022).

O índice Kp permite avaliar a atividade solar permitindo classificar os dias em diferentes níveis de atividade geomagnética e representados na Tabela 3. Utilizando este índice e a tabela de Bartels, os intervalos foram agrupados considerando os dias magneticamente calmos (Sq) e perturbados (Sd). Foi também identificada a presença de variações SSC (Storm Sudden Commencements) inicial que fornece informações quanto ao início da tempestade geomagnética ou o aumento na atividade solar da variação diurna. A primeira indicação de um GMD (dados de distúrbio geomagnético) geofetivo é o aumento súbito na intensidade do campo geomagnético. A chegada do vento solar na proa da magnetosfera leva a uma compressão da magnetopausa e a um consequente aumento súbito do campo magnético no lado diurno da Terra. Este evento é conhecido como início súbito de tempestade (SSC) e é tipicamente de curta duração (minutos). Quando eventos SSC ocorrem em regiões de baixa e média latitude, resultam em mudanças no campo geomagnético de < 200 nT, o que é significativamente menor do que as variações associadas a distúrbios causados por eletrojetos em altas latitudes. No entanto, a rápida mudança no campo magnético durante SSCs tem sido associada à ocorrência de grandes GICs (Geomagnetically Induced Currents) observados em regiões de baixa e média latitude onde não há aumentos de eletrojetos aurora. (*David T.O. Oyedokun et al, 2018*)

Para a geração dos valores da variação diurna foi utilizado uma linha de base proposta por Yamazaki (*Yamazaki, Y et al. - 2011*) que permitem observar as variações em conjunto preservando as

intensidades, demonstrado na equação (3):

$$D_t = D_x - \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_{22} + X_{23} + X_{24}}{6} \quad (3)$$

A linha de base foi determinada como a média dos valores onde o campo sofre menos interferência da variação diurna. As três primeiras horas (X_1, X_2, X_3) e as três últimas horas (X_{22}, X_{23}, X_{24}) para cada dia, onde D_t representa a variação final e D_x os valores coletados para cada estação de onde foram subtraídas as médias para cada período analisado.

Também foram calculados os coeficientes de correlação entre os pares de estações (ABR – SMS), (ABR – VSS) e (SMS - VSS). A Tabela 3 mostra os 2 dias mais calmos e os 2 dias mais perturbados, que foram selecionados utilizando a tabela de Bartels e o índice Kp.

Tabela 3 - Dias calmos e perturbados selecionado de cada mês de acordo com o índice Kp (disponível em: <<https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>>, acesso em: 29 de setembro de 2022).

MÊS-ANO	(Sq)	(Sd)
Dezembro-2015	30 – 28	20 – 31
Janeiro-2016	25 – 30	21 – 01
Fevereiro-2016	22 – 28	16 – 17
Março-2016	26 – 13	06 – 15
Abril-2016	19 – 09	13 – 14
Mai-2016	04 – 05	02 – 01

6 Resultados

Para explicar a grande diferença verificada entre os valores teóricos, fornecidos pelo IGRF-13, e os medidos na estação magnética instalada no Arquipélago de Abrolhos, foram utilizados registros de 146 dias ininterruptos, com início em 14 de dezembro de 2015 e finalizado em 07 de maio de 2016.

A análise foi feita através da comparação dos registros das três estações (ABR, VSS, SMS) em dias calmos e perturbados. Foram analisadas as intensidades máximas e mínimas, a morfologia das variações e a morfologia da variação diurna.

A Figura 10 mostra a variação diurna do campo geomagnético registrada no período completo, relacionando as três estações com cada componente separadamente e seus respectivos valores teóricos para o IGRF-13, com a remoção de spikes.

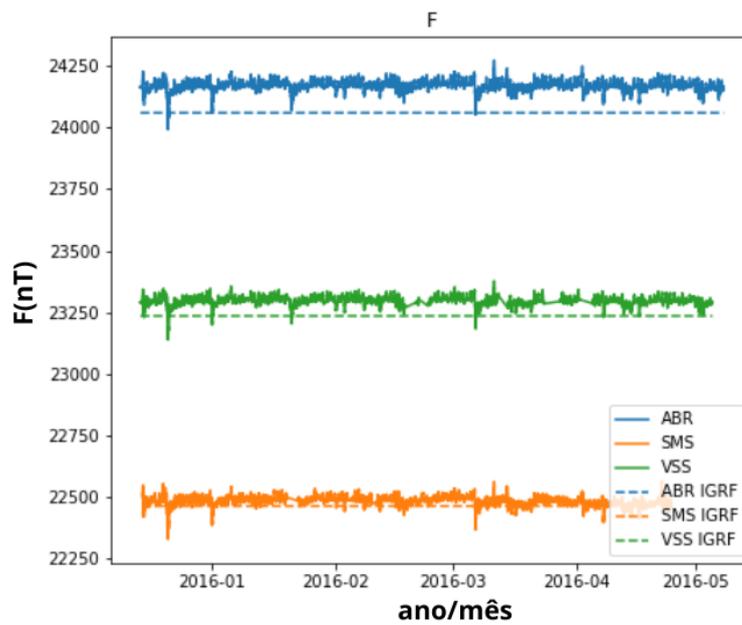
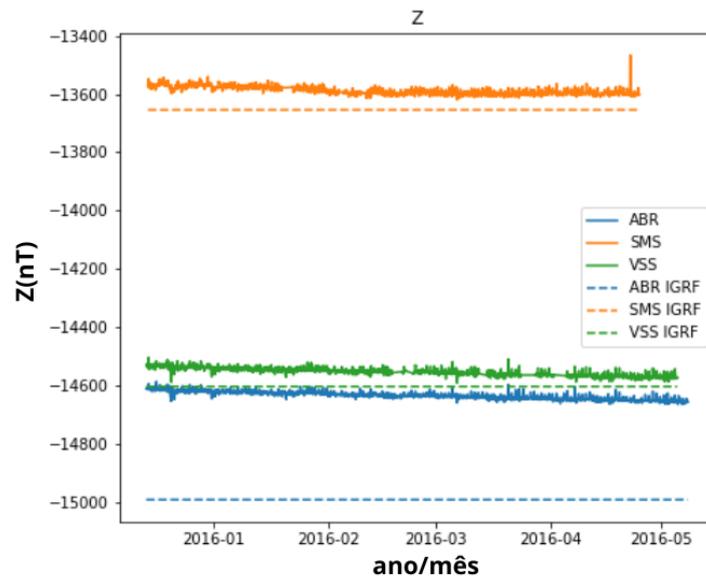
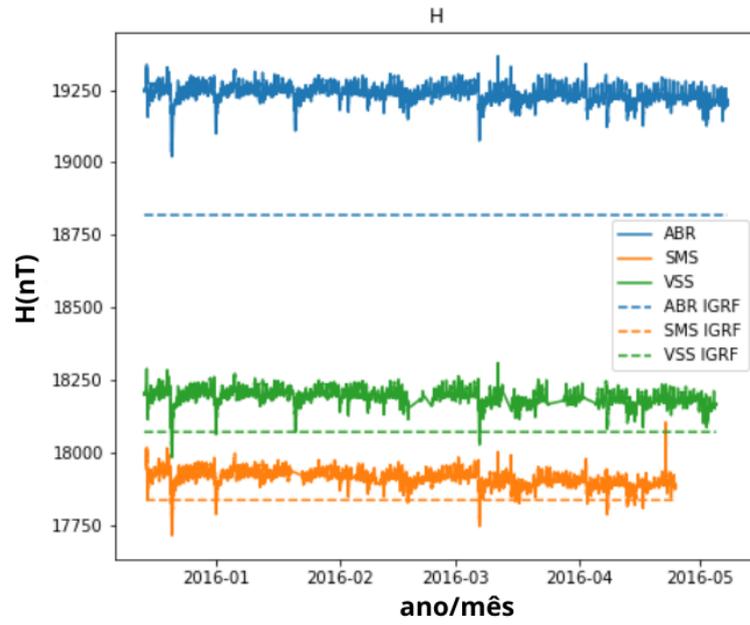


Figura 10 – Comparativo mostrando as variações registradas nas três estações e as previsões teóricas fornecidas pelo IGRF-13, em intervalo horário para as componentes H , Z e a intensidade total do campo magnético F .

As Figuras 11 e 12 respectivamente mostram as variações nos dias calmos e perturbados escolhidos e classificados de acordo com a tabela de Bartels e do índice K_p . O aparecimento das SSC está indicado pelas setas para auxiliar na análise e na classificação das variações diurnas. Neste período os melhores dias para observar a variação solar quiet (Sq) foram 25 de janeiro e 19 de abril e para observar a variação solar disturbed (Sd) foram os dias 20 de dezembro e 16 de fevereiro.

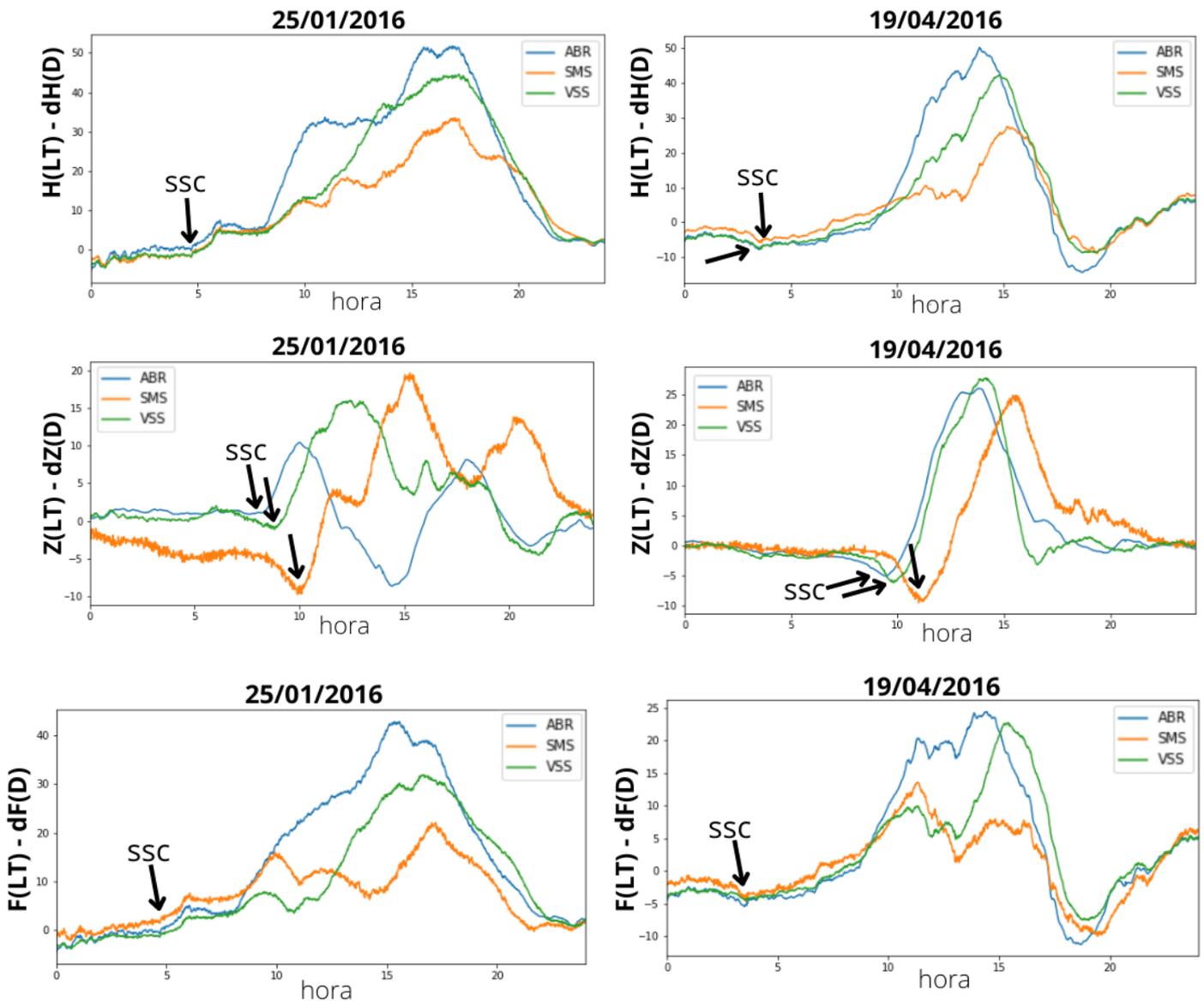


Figura 11 – Registro da variação diurna, em dias calmos (Sq) para as componentes H , Z e intensidade F , com a identificação da SSC inicial em cada estação para os dias 25 de janeiro e 19 de abril de 2016.

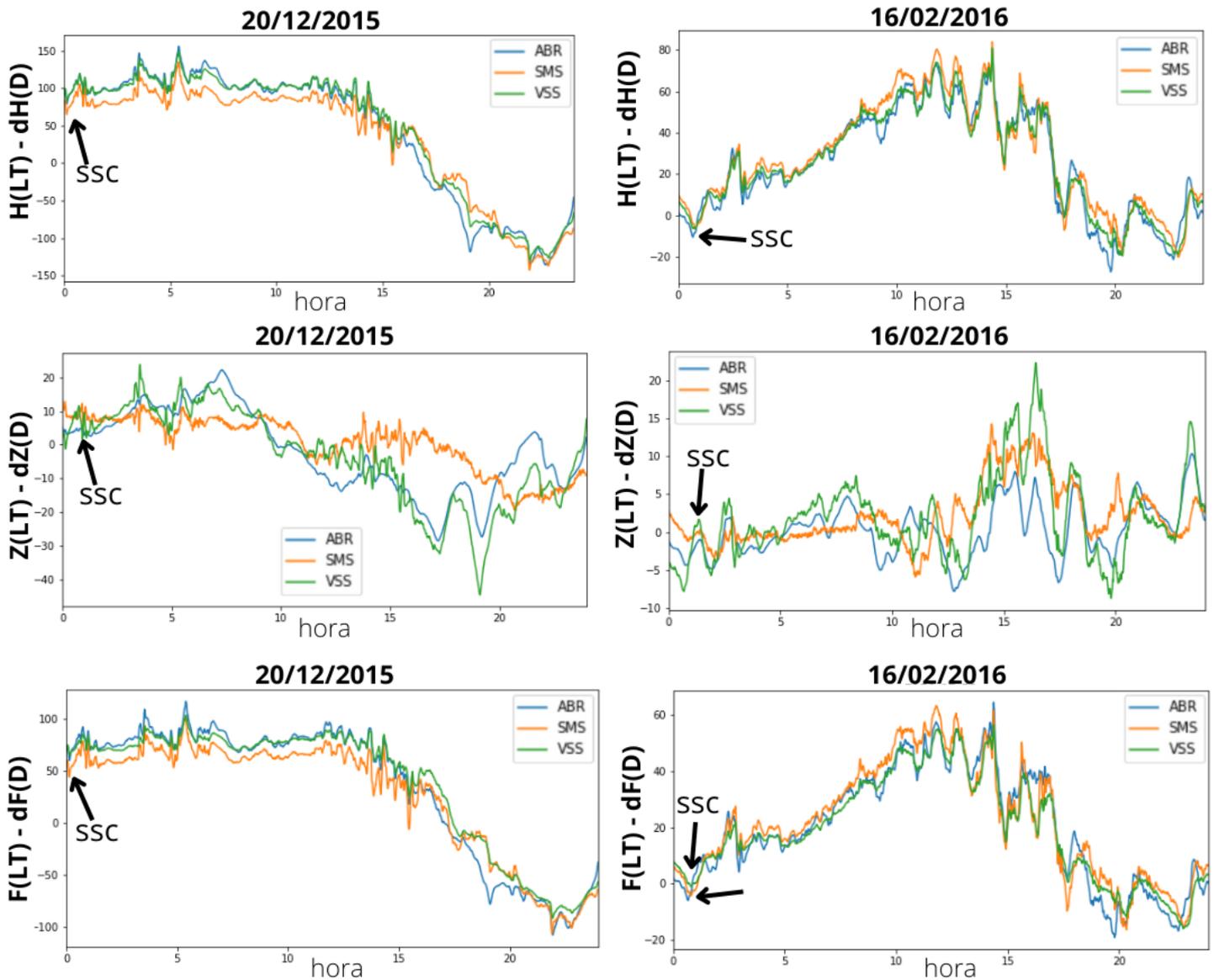


Figura 12 – Registro da variação diurna em dias perturbados (Sd) para as componentes H , Z e intensidade F , com identificação da SSC inicial em cada estação para os dias 20 de dezembro de 2015 e 16 de fevereiro de 2016 indicado pelas setas.

Nos dias calmos a variação diurna observada na componente vertical apresentou comportamento bastante aleatório nas três estações. Entretanto SMS foi a que registrou variações mais bruscas, e que podem ser observadas nos dias perturbados nas primeiras 08 horas do dia. Após esse período as amplitudes sofrem acréscimo significativo em todas as componentes. Esse comportamento mostra que a AMAS interfere, mostrando forte influência na variação diurna de todas as estações. É possível verificar esses valores de forma analítica observando a Tabela 4, que considera a média dos registros ajustados com os valores médios obtidos pelo modelo teórico. Assim em ABR as componentes H e Z e a intensidade magnética total F mostram uma significativa discrepância quando comparados com as outras estações no continente.

Tabela 4 – Mostra na sequência, os valores médios dos elementos H , Z e F registrados nas três estações; os valores médios teóricos obtidos pelo IGRF-13; a diferença entre estes valores para cada estação e o percentual da diferença destes valores.

ESTAÇÕES VALORES	ABR	SMS	VSS
	<i>Média H (nT)</i>	19236	17910
<i>Média Z (nT)</i>	-14634	-13591	-14554
<i>Média F (nT)</i>	24170	22483	23296
<i>Média IGRF-13 H (nT)</i>	18819	17837	18072
<i>Média IGRF-13 Z (nT)</i>	-14991	-13654	-14603
<i>Média IGRF-13 F (nT)</i>	24060	22463	23235
<i>Variação de H (nT)</i>	417	73	118
<i>Variação de Z (nT)</i>	357	63	49
<i>Variação de F (nT)</i>	110	20	61
<i>Variação de H (%)</i>	2,2	0,4	0,6
<i>Variação de Z (%)</i>	2,4	0,5	0,3
<i>Variação de F (%)</i>	0,5	0,1	0,3

Pela Tabela 4 pode-se verificar que as componentes **H** e **Z** da estação situada no arquipélago de Abrolhos apresentam diferença maior de 2% quando são comparados os valores medidos e teóricos. Entretanto nas demais estações essa diferença é bastante reduzida. Esta é uma primeira constatação de que os coeficientes do novo modelo teórico ainda não estão suficientemente adequados para serem aplicados em todos os locais e o arquipélago de Abrolhos é um deles. Isto pode indicar que não há dados suficientes nessa região para um bom ajuste. Pela literatura desconhece-se outros resultados medidos.

Pode-se observar que para **Z** as estações de VSS e ABR possuem um comportamento similar para os dias perturbados, enquanto SMS sofre influência maior possivelmente por estar mais próxima do centro da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). De maneira geral os valores registrados em SMS são compatíveis com valores teóricos fornecidos pelo IGRF-13. Considerando os valores medidos na estação ABR pode-se verificar que pelo fato de estar mais distante da AMAS não sofre grande influência ainda que esteja em sua região de abrangência. Dessa maneira, a grande diferença entre os valores do modelo teórico e das medições, sendo mais intensos e aproximadamente 5 (cinco) vezes maiores do que nas outras estações, demonstra estar mais associada com as diferentes litologias do arquipélago de Abrolhos.

As estações continentais VSS e SMS possuem valores de susceptibilidade magnética que podem ser classificados de média a altas intensidades, mas inferiores a ABR. Este fato é evidente devido aos derrames basálticos, os quais são ricos em silicatos de magnésio e ferro, ou seja, os principais contribuintes para valores mais altos da susceptibilidade magnética. Analisando os gráficos das Figuras 11 e 12 da componente **Z** verifica-se que SMS apresentou maiores amplitudes na variação diurna para dias calmos e VSS as maiores para dias perturbados.

Pode-se observar pela Figura 13 que nos dias perturbados, considerando a componente **H** e intensidade **F**, os valores dos coeficientes de correlação entre as estações: ABR-SMS e ABR-VSS se

aproximam de um, o que equivale à correlação máxima, e demonstra a grande influência na variação diurna nestas estações. Para Z , também é observado aumento nos coeficientes, mas não tão intenso quanto para H e F . Este fato é associado a diferenças da geologia local quando comparando com os pares das estações, ABR-SMS e ABR-VSS. Este último par mostra maior similaridade.

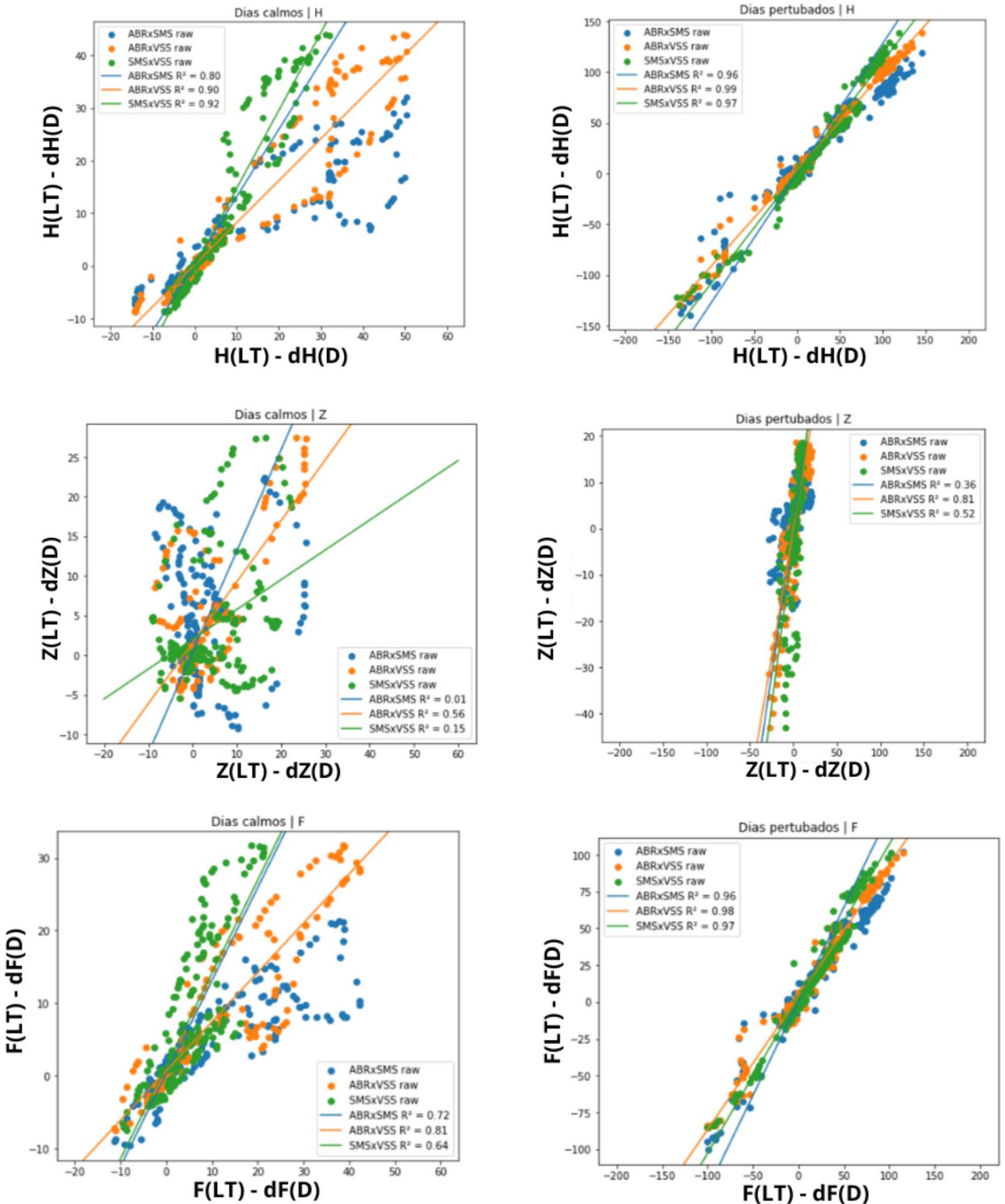


Figura 13 – Correlação entre pares de estações para os dias selecionados na Tabela 3 em H , Z e

intensidade F separados por dias calmos e perturbados com os seus respectivos coeficientes de correlação.

Com a utilização de 200 amostras randômicas que representam 10% do total de dados utilizados verificou-se que a correlação de ABR com VSS, para a componente Z é a maior entre os pares aqui considerados. Entretanto, os registros das variações diurnas registrados no Arquipélago de Abrolhos sugerem que sua geologia local é a que exerce a maior influência em comparação com as outras estações, com menor influência da AMAS devido a distância maior até o centro da anomalia do que as estações de referência.

7 Conclusões

Com base nos valores, resultados e discussões aqui apresentados, pode-se afirmar que a variação diurna registrada no Arquipélago de Abrolhos é a que apresenta, em relação às duas continentais deste trabalho, a maior diferença em relação ao modelo teórico IGRF-13. Considerando que a geologia regional de Abrolhos (ABR) é de origem majoritariamente vulcânica e com elevado valor de susceptibilidade magnética. Logo, o modelo global do campo geomagnético não pode ser aplicado com pleno sucesso na Ilha de Santa Bárbara, a maior do arquipélago.

Observou-se ainda que devido a condição de ilha oceânica, em ABR, as variações S_q medidas pela componente Z podem realmente estar sujeitas a influências devido a condutividade da água do mar e correntes induzidas no interior da Terra, especialmente em períodos de forte atividade magnética. Estes resultados estão de acordo com trabalhos recentes (*Matzka, J. et al – 2009, Olsen and Kuvshinov, 2004 e Kuvshinov et al., 2007*).

Pode-se verificar que a variação diurna observada na estação mais próxima da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, a estação de São Martinho da Serra (SMS), tanto em dias calmos quanto perturbados, apresenta comportamento bastante diferenciado em todas as componentes medidas. Este fato pode ser atribuído pelo fato de estar mais próximo do centro da anomalia e a componente que sofre as maiores variações é a vertical Z .

A estação de ABR, mesmo dada a distância considerável da área de maior influência do Eletrojato Equatorial (EEJ), é a mais próxima das três, e segundo estudos (*Kuvshinov et al.- 2007*), nos oceanos a influência dessa anomalia pode chegar a 50% do sinal externo, enquanto nos continentes aproxima a 1%, o que pode ser observado pelas variações na componente H para os dias perturbados.

As variações diurnas em Z possuem um comportamento similar para todas as estações na parte inicial do dia, entretanto na sequência, as componentes começam a demonstrar comportamentos bastante diferenciados, exemplificando os fatores avaliados neste trabalho que interferem nas medições.

Deve ser observado que os valores medidos e os calculados pelo IGRF-13 em ABR, para a componente vertical Z apresentam diferença máxima de 380,74 nT e mínima de 350,63 nT. Para a componente horizontal H mostra máxima de 549,62 nT e mínima de 183,42 nT. Enquanto para a intensidade total F apresenta diferença máxima de 211,72 nT e mínima de -67,09 nT.

Os valores medidos na estação magnética de Abrolhos apresentam valores cinco vezes mais intensos do que os teóricos pelo IGRF-13. Esta diferença se mantém tanto para as duas componentes do campo (H e Z) quanto para a intensidade total (F). Atribuímos esta diferença à geologia regional do arquipélago, em menor escala a menor influência da AMAS e ao problema da amostragem.

Pelos coeficientes de correlação apresentados, também pode-se observar que ABR possui uma grande correlação com a estação de Vassouras (VSS) para a componente H e F , mas que para Z ainda existe uma grande diferença a ser considerada para se realizar previsões teóricas que de fato representem o comportamento e a morfologia do campo na região.

Conclui-se assim, que a geologia regional é o fator determinante para a grande diferença entre os valores medidos e os correspondentes valores fornecidos pelo modelo teórico, e que os novos coeficientes de ajuste do modelo internacional não são capazes de atenuar a grande diferença entre os valores medidos e os teóricos fornecidos pelo IGRF-13, especialmente em locais onde a geologia regional apresenta altos valores para a susceptibilidade magnética, como no Arquipélago de Abrolhos.

8 Referências Bibliográficas

BARTELS, J. The technique of scaling indices K and Q of geomagnetic activity. *Annal of the International Geophysics Year*, Pergamon Press 1957.

BELLINGHINI, C. F.; CANDIDO, T.; GONÇALVES, C.; LEBRE, M.; BENYOSEF, L. *Análise da Variação Geomagnética em Estações Situadas em Médias e Baixas Latitudes e Seus Fatores de Influência na Geologia e Geofísica Marinha*. SBGGM, 2018.

CAMPBELL, W. H. - *Introduction to Geomagnetic Fields*. Cambridge University Press, Cambridge – 2003.

CHULLIAT, A. et al - *The US/UK World Magnetic Model for 2020 - 2025 NOAA/BGS - Technical Report DOI: 10.25923/ytk1-yx35 – 2020*.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Programa Geologia do Brasil. Carta Geológica. Mapa Geológico, Folhas SH-22-V-C-IV (Santa Maria – CPRM, 2016) e SF23-Z-A-III (Barra do Pirai – CPRM, 2007), Escala 1:100.000. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 05 de junho de 2020.

CORDANI, U.G. & BLAZEKOVIC, A. - *Idades Radiométricas das Rochas Vulcânicas em Abrolhos*; Anais do Congresso Brasileiro de Geologia – Brasília, 1970.

GFZ – GERMAN RESEARCH CENTRE FOR GEOSCIENCES. Índice Kp, dias calmos e dias perturbados. Tabela de Bartels. Disponível em: <<https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>>. Acesso em: 05 de junho de 2022.

HARTMANN, G. & PACCA, I. - *Time Evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly - Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 2009.

HEIRTZLER, J.R. - *The Future of the South Atlantic Anomaly and Implications for Radiation Damage in Space - Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 64: 1701–1708, 2002.

HEYNDERICKX, D. - *Comparison Between Methods to Compensate for the Secular Motion of the South Atlantic Anomaly - Radiation Measurements - Vol. 26 Issue 3, May 1996*.

IAGA Working Group on IGRF. Disponível em: <<http://www.iugg.org/associations/iaga.php>>. Acesso em: 05 de junho de 2022.

KUBICKA, M. et al - *Prediction of Geomagnetic Storm Strength from Inner Heliospheric In Situ Observations. The Astrophysical Journal*, Vol. 833 Number 2, December 2016.

KUVSHINOV, A. et al - *On Induction Effects of Geomagnetic Daily Variations from Equatorial Electrojet and Solar Quiet Sources at Low and Middle Latitudes - Journal of Geophysical Research*, vol. 112, B10102, doi:10.1029/2007JB004955, 2007.

LANZA, R. & MELONI, A. - *The Earth's Magnetism, An Introduction for Geologists -*

Springer-Verlag, Berlin Heidelberg – 2006.

MATZKA, J. et al. - Geomagnetic Observations on Tristan da Cunha, South Atlantic Ocean - *Annals of Geophysics*, vol. 52, N. 1, February 2009.

MATZKA, J.; CHULLAT, A.; MANDEA, M.; FINLAY, C.C.; QAMILLI, E. - Geomagnetic Observations for Main Field Studies: From Ground to Space - *Space Science Review* DOI 10.1007/s11214-010-9693-4 – 2010.

MOHRIAK, W. - Interpretação Geológica e Geofísica da Bacia do Espírito Santo e da Região de Abrolhos: Petrografia, Datação Radiométrica e Visualização Sísmica das Rochas Vulcânicas - *Petrobras-Exploração e Produção E&P - Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 133-142, nov. 2005/maio 2006.

OLSEN, N. & KUVSHINOV, A. - Modeling the Ocean Effect of Geomagnetic Storms. *Earth Planets Space*, 56 DOI:10.1186/BF03352512 – 2004.

SOBREIRA, J. & FRANÇA, R. - Um Modelo Tectono-Magmático para a Região do Complexo Vulcânico de Abrolhos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, 2005.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERI, R. E.; KEYS, D.A. - *Applied Geophysics*, Cambridge University Press - Cambridge; 1976.

THE EUROPEAN SPACE AGENCY/SWARM PROBES. Disponível em: <https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Swarm/Introducing_Swarm> – 2020. Acesso em: 05 de junho de 2022.

THÉBAULT, E. et al - International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation - *Earth, Planets and// Space* DOI: 10.1186/s40623-0150228-8 pag. 01 – 19 – 2015.

WITZE, A. - Earth's Magnetic Field is Acting up and Geologists don't Know Why. *Nature* 565: P. 143-144, DOI: 10.1038/d41586-019-00007-1, January 2019.

YAMAZAKI, Y. et al. - An Empirical Model of the Quiet Daily Geomagnetic Field Variation - *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, A103112 – 2011.