



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA MARINHA

EVELYN PAIVA DO NASCIMENTO

Investigação sobre o registro de processos quase-periódicos em séries
geomagnéticas históricas.

NITERÓI – RJ
DEZEMBRO 2019

EVELYN PAIVA DO NASCIMENTO

Investigação sobre o registro de processos quase-periódicos em séries geomagnéticas históricas.

Trabalho de conclusão de curso submetido ao programa de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Ribeiro Franco

Coorientador: Prof. Me. Paulo Buarque de Macedo Guimarães

NITERÓI – RJ
DEZEMBRO 2019

EVELYN PAIVA DO NASCIMENTO

Investigação sobre o registro de processos quase periódicos em séries geomagnéticas históricas.

Trabalho de conclusão de curso submetido ao programa de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Trabalho aprovado. Niterói, RJ – Brasil, 19 de dezembro de 2019:

Prof. Dr. Daniel Ribeiro Franco

Orientador

COGEO – ON / MCTIC

Prof. Me. Paulo Buarque de Macedo Guimarães

Coorientador

UFF

Dra. Natália Braun dos Santos

Pesquisadora Convidada

COGEO – ON / MCTIC

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu pai, amigo, provedor de toda capacidade intelectual e emocional para tornar este projeto possível. Em quem deposito minha fé e esperança e quem faz a minha vida ter sentido.

Aos meus pais, Cynthia e Everton, por me sustentarem de todas as maneiras possíveis (financeira, emocional e em oração), por cumprirem seu papel de pais brilhantemente e me proporcionarem muito além do que uma boa educação, um bom caráter.

Ao meu orientador e amigo Daniel Franco, por toda a paciência e disponibilidade (horas e horas além de qualquer expediente), ajuda e compreensão. Por poder chamá-lo de amigo e saber que além de toda sua capacidade intelectual, mostra-se extremamente humano e sensível às necessidades de seus alunos.

Ao meu coorientador e mestre Paulo Buarque, por aceitar embarcar nessa jornada e contribuir para o meu conhecimento acadêmico. Assim também, a Dra. Natália Braun, por aceitar fazer parte da banca e ser tão gentil me dando “toques” preciosos para correção deste trabalho.

Aos meus avós, Almir e Elizabete, por serem muito mais do que avós e cuidarem tão bem de mim para que fosse possível estudar longe dos meus pais. E, também, por me sustentarem todos os dias em oração para sair e voltar segura para casa. Aos meus avós Edgar e Soely, pelas constantes orações. Assim também, todos os meus familiares, destacando meu tio Fernando, por ler meu primeiro trabalho e dar dicas preciosas para a realização dele.

Ao meu namorado, Jairinho, por acreditar em mim e me ajudar a transpor minhas próprias barreiras. E pela paciência nos momentos em que eu não podia dedicá-lo muita atenção.

À minha casa de aprendizado, Universidade Federal Fluminense, por prover mestres e pesquisadores tão competentes. Assim como a minha segunda casa, o Observatório Nacional, que me trouxe experiências tão incríveis em forma de conhecimento.

Dedico esse trabalho ao meu avô Almir, que não teve a mesma oportunidade de estudo que eu, mas contribuiu para que isso fosse possível.

“Entrega o teu caminho ao Senhor; confia Nele e o mais Ele fará.” Salmos 37.5.

SUMÁRIO

Resumo.....	6
Abstract.....	7
Lista de Figuras.....	8
Lista de Tabelas.....	9
Abreviaturas e Simbologia.....	10
1. Introdução.....	11
2. Sobre os Campos Geomagnético e Heliomagnético.....	13
2.1. O campo Geomagnético	
2.2. O campo Heliomagnético	
3. Ciclos Solares (escala sub-anual a multi decadal).....	23
4. Procedimentos e Métodos.....	28
4.1. Séries de dados geomagnéticos e solares	
4.1.1 Dados do VSS	
4.1.2 Dados de contagem de manchas solares (Rz)	
4.2. Análise de Sinais	
4.2.1 Análise Espectral	
5. Resultados.....	30
5.1. Análise espectral - série de dados de contagem de manchas solares	
5.2. Análise espectral – dados geomagnéticos	
5.2.1 Resolução mensal	
5.2.2 Resolução trimestral	
5.2.3 Resolução semestral	
5.2.4 Resolução anual	
6. Discussão Final.....	35
7. Bibliografia.....	39

RESUMO

Neste trabalho, são avaliados modos oscilatórios em diferentes escalas de tempo, relativos à atividade solar, e às séries de dados geomagnéticos. O objetivo é entender as conexões de escala de tempo sub-anual a centenário entre o comportamento da atividade solar e a resposta do campo geomagnético. Para tanto, foram realizadas análises espectrais, construídas em diferentes resoluções de tempo, no período 1915-2004 de atividade solar (série de contagem de manchas solares; R_z) e variação dos conjuntos de dados da componente horizontal do campo geomagnético (ΔH), provenientes do Observatório Magnético de Vassouras - VSS (Vassouras, Rio de Janeiro). Os resultados indicaram uma ampla gama de quase periodicidades, operando em escalas de tempo anual a decadal, que são indicativas de possíveis relações de atividades geomagnéticas e solares sob diferentes processos físicos.

Palavras-chave: Atividade Solar, séries temporais geomagnéticas, contagem de atividades de manchas solares, análise espectral.

ABSTRACT

In this work, we evaluated oscillatory modes at different timescales of solar activity and geomagnetic time datasets, as well as the possible coherency-phase relationships between its spectral contents, aiming to understand the decadal-to-centennial timescale connections between solar activity behavior and geomagnetic response. It was done by means of spectral analysis, coherency and phase analysis of time series, built at different time resolutions, for the period 1915-2004 of solar activity (sunspot numbering; R_z) and variation of horizontal component (ΔH) time datasets from the geomagnetic observatory of Vassouras - VSS (Southern Brazil). Our results indicate a wide range of quasi-periodicities operating at annual to decadal timescales, which are indicative of possible relationships of geomagnetic and solar activities under different physical processes.

Keywords: Solar Activity, geomagnetic time series, sunspot activity number, spectral analysis, spectral analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	A expressão da componente dipolar (principal) do campo magnético representado de acordo com a configuração atual. Modificada de Butler (2004).	14
Figura 2.2	Elementos do campo geomagnético.(Modificado de MCElhinny & MCFadden, 2000).	14
Figura 2.3	Primeiro e último magnetogramas adquiridos em Vassouras	18
Figura 2.4	Arranjo experimental utilizado no Observatório de Vassouras para obtenção das componentes do Campo Geomagnético.	19
Figura 2.5	Representação esquemática de um magnetômetro do tipo Fluxgate, de dois núcleos, com esquemas de enrolamento. Modificado de Lanza & Meloni, 2006.	22
Figura 2.6	Modelo simplificado das regiões solares. Modificado de Costa, Jr (2011).	23
Figura 2.7	Seção da superfície solar bastante ampliada com o efeito de granulação. Modificado de Sobrinho (2012).	24
Figura 2.8	Disco solar com manchas solares. Modificado de Cecatto (2006).	24
Figura 3.1	O ciclo de 11 anos de Swabe. Modificado de Moussas et. al (2005).	26
Figura 5.1	Análise espectral da série de dados de contagem de manchas solares	31
Figura 5.2	Análise espectral dos dados geomagnéticos em Resolução Mensal	32
Figura 5.3	Análise espectral dos dados geomagnéticos em Resolução Trimestral	33
Figura 5.4	Análise espectral dos dados geomagnéticos em Resolução Semestral.	34
Figura 5.5	Análise espectral dos dados geomagnéticos em Resolução Anual.	35

LISTA DE TABELAS

2.1	Relações matemáticas para as componentes do campo geomagnético.	15
2.2	Características da Variação Secular do CG.	17
2.3	Parâmetros de avaliação dos instrumentos magnéticos	20
2.4	Exemplos de instrumentos relativos e absolutos e princípios de funcionamento.	21
6.1	Escala de tempo ou picos espectrais e descrição dos eventos.	38

ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

CG	Campo Geomagnético
CH	Campo Heliomagnético
CMI	Campo Magnético Interplanetário
OMV	Observatório Magnético de Vassouras
VS	Variação Secular

1. INTRODUÇÃO

A Terra produz um campo magnético – conhecido como campo geomagnético (CG), cujos processos de geração têm sido debatidos há mais de 400 anos, e cuja proposta mais aceita é de que o núcleo seja o principal responsável (Courtilot & Le Mouël, 2007). De acordo com as concepções modernas da Geofísica, o valor de uma medição do CG, em um determinado ponto e em um determinado momento, é o resultado da sobreposição de contribuições de origens diferentes. As medidas do campo geomagnético podem ser realizadas através de observatórios magnéticos, estações magnéticas, levantamentos oceanográficos e aéreos ou mesmo através de sondas espaciais e satélites (Courtilot & Le Mouël, 2007; Freitas, 2017).

Em contrapartida, o Sol produz o campo Heliomagnético, cuja principal contribuição provém do dínamo solar (e.g., Cecatto, 2006; Costa Jr, 2011; Sobrinho, 2012). Devido a esse campo e às variações de correntes elétricas, às vezes encontram-se “buracos” na superfície mais externa solar, a coroa. Em épocas de baixa atividade solar os buracos coronais se confinam em regiões de altas latitudes, enquanto em períodos ativos ocorrem também em latitudes menores. Esses buracos coronais estão associados à formação do vento solar. O vento solar é um fluxo de partículas ionizadas (núcleos de hélio e elétrons), resultado da enorme diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário (Costa Jr, 2011).

Ambos os campos geomagnético e heliomagnético se relacionam através do contato entre o vento solar e a magnetosfera, e, devido à ação/interação do vento solar, esta última se encontra confinada em uma região finita e bem delimitada do espaço interplanetário. A magnetosfera compreende o CG e impede que partículas com alta radiação penetrem a atmosfera terrestre (Cecatto, 2006). Por ser um plasma altamente condutor, o vento solar transporta consigo as linhas de campo magnético do Sol. E o campo heliomagnético controla o acoplamento entre o vento e a magnetosfera,

mediando a transferência de energia. Dessa forma, variações no vento solar afetam a estrutura dinâmica da Magnetosfera, refletindo-se em perturbações no campo geomagnético, as chamadas atividades geomagnéticas (Costa Jr, 2011).

Advindo da relação entre a magnetosfera e o campo heliomagnético (na forma de vento solar) e do contato com um registro histórico sistemático quase contínuo do campo Geomagnético no Observatório Magnético de Vassouras, desenvolve-se a motivação para a realização deste trabalho.

Nesse quadro, uma das perspectivas mais importantes da pesquisa é a interação Sol-Terra, nas escalas decadal a centenária, bem como a origem da variabilidade quase periódica solar - que é explicada pelo efeito dínamo (discutido posteriormente) muito embora sua periodicidade ainda dependa de modelos mais apropriados (Charvátová, 2000; Versteegh, 2005; Paluš & Novotná, 2007; Love et al., 2011; Mufti & Shah, 2011). Conforme discutido por alguns autores (e.g., Ponyavin, 2004; Velasco & Mendoza, 2008), os principais desafios sobre esse assunto são baseados no conhecimento, ainda incipiente, sobre os modos de oscilação solar e suas causas.

Um exemplo ilustrativo deste fato refere-se ao campo de estudo relativo ao registro de contagem de manchas solares (R_z – grandes distúrbios eletromagnéticos na superfície solar, com periodicidades indicativas de atividade solar em erupção; Landscheidt, 2003; Niroma, 2009). Apesar do número considerável de estudos baseados no emprego de séries de dados de R_z , ainda não é possível compreender-se convenientemente a ciclicidade solar geral e sua evolução a longo prazo. Isso pode ser explicado, como discutido por Ponyavin (2004), devido ao fato de que esses registros revelam apenas parcialmente a atividade heliomagnética geral e fornecem, portanto, informações insuficientes sobre o comportamento da heliosfera interna.

No entanto, registros geomagnéticos históricos e modernos têm sido eficientemente utilizados como proxies, com o objetivo de descrever as tendências do vento solar e da variabilidade do campo magnético interplanetário (CMI) com base nas periodicidades decadal a centenária da

atividade heliomagnética. Recentemente, tem-se revisto o papel que as séries de manchas solares teriam para previsões mais precisas de processos quase-periódicos solares (Ponyavin, 2004; Svalgaard & Cliver, 2007).

Neste trabalho, serão apresentados os resultados de análise de séries temporais históricas geomagnéticas, obtidas a partir da operação do Observatório Magnético de Vassouras – VSS (estado do Rio de Janeiro, Brasil) e de contagem de manchas solares para o período 1915-2004, com o objetivo de se observar os modos oscilatórios comuns a ambas as séries temporais, os processos periódicos registrados nas séries geomagnéticas e que são operantes em escalas distintas de tempo, bem como discorrer sobre suas possíveis explicações.

2. SOBRE OS CAMPOS GEOMAGNÉTICO E HELIOMAGNÉTICO

2.1 O Campo Geomagnético

De acordo com o discutido na literatura (e.g., Buffett, 2000; Fowler, 2007; Lowrie, 2007), a estrutura física da Terra pode ser descrita, da seguinte maneira: (i) a crosta terrestre - uma parte externa e sólida, de menor espessura, (~ 5-10 km - crosta oceânica), (~35-60 km - crosta continental); (ii) o manto - parte intermediária que encontra-se abaixo da crosta, correspondendo a ~ 83% do volume total do planeta; e (iii) o núcleo – constituído essencialmente de Fe e Ni, e correspondendo a cerca de 32% da massa total da Terra.

A estrutura dinâmica da Terra está intimamente ligada à geração, à manutenção e às variações do campo geomagnético (CG) (Johnson & McFadden, 2007), cujos processos de geração têm sido tema de debate há mais de 400 anos (Courtilot & Le Mouël, 2007). Segundo Tarduno et al. (2010), o CG é gerado no núcleo externo fluido, e possui, ao menos, 3,4 Ga de existência. É, possivelmente, tão antigo quanto o próprio núcleo da Terra (Freitas, 2017).

Nos dias atuais, considera-se que a maior parte (~93,7%) do campo medido à superfície da Terra é de origem interna, cuja principal contribuição é majoritariamente dipolar - como descrito pela Teoria do Dipolo Geocêntrico Axial (GAD) (Courillot & Le Mouël, 2007). Apenas uma pequena parcela apresenta uma característica não dipolar, além do eixo ser deslocado em cerca de 11,5° com relação ao eixo da Terra e possuir um valor de $\sim 7,78 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ (Korte e Constable, 2006) (Figura 2.1).

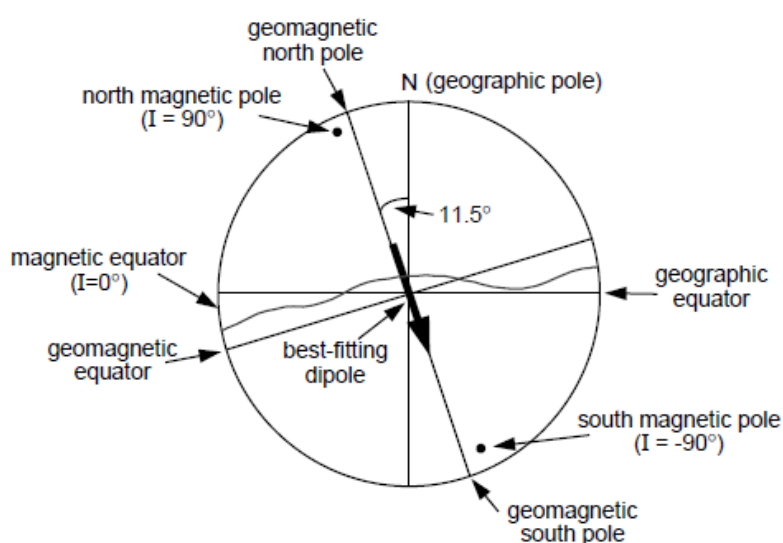


Figura 2.1: A expressão da componente dipolar (principal) do campo magnético representado de acordo com a configuração atual. Originado no núcleo da Terra, pode ser aproximado ao campo de um dipolo, com o polo Sul e Norte magnético na direção oposta ao Norte e Sul geográfico. Além disso, o eixo do dipolo magnético apresentaria uma inclinação em relação ao eixo de rotação da Terra de cerca de 11,5° nos dias atuais. Modificada de Butler (2004).

Assim, por tratar-se de uma grandeza vetorial, o CG é medido à superfície da Terra com base em suas componentes vetoriais, conforme esquematizado na Figura 2.2 abaixo.

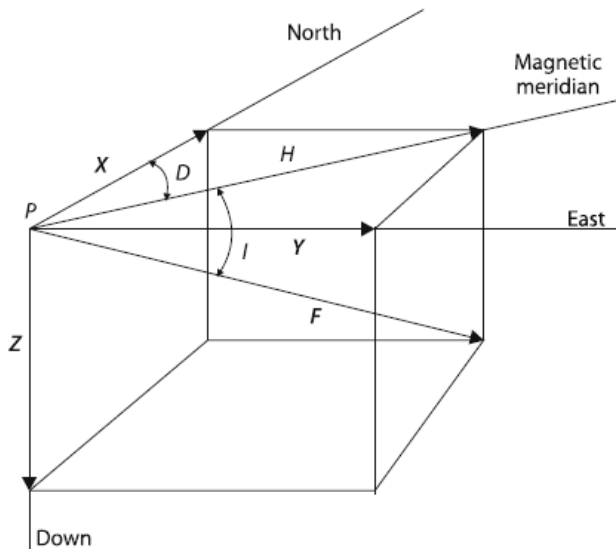


Figura 2.2: Elementos do campo geomagnético. No ponto P, na Terra, três eixos apontam respectivamente para norte geográfico (x), leste geográfico (y) e ao longo da vertical para baixo (z). O vetor de campo magnético F da Terra pode ser projetado ao longo dos três eixos, e três componentes magnéticas são obtidos X, Y e Z. F também forma um ângulo I, inclinado, com o plano horizontal; H é a projeção horizontal de F e o ângulo D, declinação, é o ângulo entre H e X. (Modificado de MCELHINNY & MCFADDEN, 2000).

Os elementos magnéticos X, Y, Z são os componentes do vetor de campo B em um sistema de coordenadas ortogonal, cujos eixos apontam para o norte geográfico, para o leste geográfico e para baixo verticalmente, respectivamente.

Os elementos magnéticos derivados são: o ângulo entre o norte geográfico e a direção (horizontal) ao qual uma agulha da bússola está apontando, denotada como declinação D, o ângulo entre o plano horizontal local e o vetor de campo, denotado como inclinação I; intensidade horizontal H; e intensidade total F.

As relações entre estas grandezas podem ser expressas conforme a tabela abaixo.

Tabela 2.1: Relações matemáticas para as componentes do campo geomagnético (*)

$X = F \cdot \cos I \cdot \cos D$	$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$
$Y = F \cdot \cos I \cdot \sin D$	$D = \arctan \frac{Y}{X}$
$Z = F \cdot \sin I$	$I = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$

(*) Modificado de McElhinny & McFadden (2000).

Segundo o Glossário Geológico Ilustrado da Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP) - Serviço Geológico do Brasil (CPRM) -, a inclinação magnética é definida como sendo o “ângulo de mergulho que fazem as linhas de fluxo magnético, dado pela inclinação da agulha da bússola, com o plano horizontal em um determinado ponto da terra e em determinada data. No equador magnético, a inclinação é de 0° e nos polos magnéticos é vertical ($\pm 90^\circ$)”. A declinação magnética é definida como sendo o “ângulo entre o norte verdadeiro e o norte magnético, cujo valor varia de ponto a ponto da terra e ao longo do tempo”.

É de consenso entre a maioria dos pesquisadores que o CG apresenta variações ao longo do tempo. As variações temporais do CG podem se dividir em duas classes: as de origem externa (menores que cinco anos) e as de origem interna (maiores que cinco anos) em relação à superfície da Terra. As de origem interna à Terra são comumente chamadas de *variação secular* (VS) (Merrill et al., 1996; Lanza e Meloni, 2006; Johnson e McFadden, 2007;).

As variações temporais de origem externa são reconhecidas em dados de observatórios magnéticos e estações. Processos periódicos como os relacionados ao ciclo solar de Schwabe (cerca de 11 anos), que serão discutidas posteriormente, geralmente podem ser reconhecidos em dados de observatório. Variações temporais de origem interna, como a VS, podem, além de ser detectadas por registros de observatórios magnéticos, podem ser também verificadas nos registros arqueológicos ou geológicos, quando investigações magnéticas são realizadas em amostras arqueológicas datadas ou rochas (Merrill et al., 1996).

A variação secular (VS) pode ser atribuída a mudanças de campo não-dipolar dominante em curtos períodos e a mudanças no campo dipolar em longos períodos. Ela resulta em mudanças direcionais e de amplitude do dipolo geomagnético, operantes em períodos da ordem de 10^2 a 10^4 anos (Merrill et al., 1996; Oliveira, 2017; Freitas, 2017). Conforme destacam Lanza e Meloni (2006), é possível observá-la por intermédio de gráficos das componentes do CG em função do tempo (para intervalos de alguns anos), provenientes dos

dados de observatórios geomagnéticos (geralmente tomando-se suas médias anuais ou mensais).

A VS resulta de numerosas causas complexas. É possível resumir suas principais características de acordo com as informações relevantes derivadas de observações diretas ou análises de rochas ou artefatos arqueológicos cuja magnetização remanente característica (ou primária) esteja preservada. A seguir, apresenta-se a Tabela 2.2 que contém um resumo das principais características da VS de acordo com observações geomagnéticas realizadas nos últimos 400 anos:

Tabela 2.2: Características da Variação Secular do CG (*)

-
- Diminuição média anual do momento dipolar da ordem de 0,05% do seu valor médio com uma aceleração considerável nos últimos 30-40 anos.
 - Precessão para o oeste do eixo do dipolo de $0,08^\circ \text{ ano}^{-1}$.
 - Deslocamento para o norte do dipolo da ordem de 2 km/ano^{-1} .
 - Desvio para o oeste do campo não-dipolo, ou de uma parte dele, de $0,2-0,3^\circ \text{ ano}^{-1}$, associado a uma possível deriva para o sul, mas não especificada.
 - Variação de intensidade (aumento ou diminuição) do campo não-dipolo a uma taxa média de cerca de 10 nT/ano^{-1} .

(*) Lanza & Meloni (2006); Johnson & McFadden (2007).

Como dito anteriormente, alguns tipos de variações do campo são obtidas pelos observatórios magnéticos. Os observatórios magnéticos são unidades de pesquisa projetadas para a realização de monitoramento contínuo do Campo Geomagnético. As operações pioneiras deste tipo de observatório tiveram início em Londres no século XVI, e em Paris no século XVII. Em Portugal, foram introduzidos a partir de 1860 nos observatórios da Escola Politécnica (atualmente fora de operação) e de Coimbra. No Brasil, as medidas do CG começaram em 1915 com o funcionamento do primeiro Observatório Magnético, localizado em Vassouras (RJ) (McElhinny & McFadden, 2000; Miranda, 2002).

Conforme descrito pelo site do Observatório Nacional (RJ), “O primeiro dado magnético do Observatório Magnético de Vassouras (OMV) foi obtido no

dia 1º de janeiro de 1915. Desde então, o OMV – o segundo observatório da América do Sul – gera dados diariamente, sem interrupção, sobre o campo magnético terrestre”.

Esses dados magnéticos, no início da década de 90, eram registrados em folhas de papel fotossensível, os magnetogramas, que continham as componentes do CG. Como já dito, o campo magnético é uma grandeza vetorial, logo possui componentes com direção e sentido. Cada magnetograma continha o registro das componentes do campo geomagnético (componentes horizontal, vertical e declinação) durante o intervalo que vai da segunda metade de um determinado dia até o final da primeira metade do dia seguinte.

No século passado, as medidas do CG eram obtidas através de um arranjo experimental composto por três variômetros, três feixes de luz e um graficador. Os variômetros registravam o campo pela utilização de três sensores distintos, sendo cada um deles responsável pelo registro de uma das componentes do campo geomagnético. Cada componente devia ser calibrada de acordo com medições absolutas, a partir das chamadas "linhas de base", que era registrada concomitantemente à variação temporal do campo geomagnético. Eles eram compostos por um fio de quartzo, com um ímã na ponta acoplado a um espelho. O graficador constituía um tambor giratório que continha o magnetograma. As medidas então eram obtidas a partir da emissão dos feixes de luz que incidiam nos respectivos espelhos produzindo as linhas no papel conforme o graficador girava, medindo 24h em resolução de minuto a minuto.

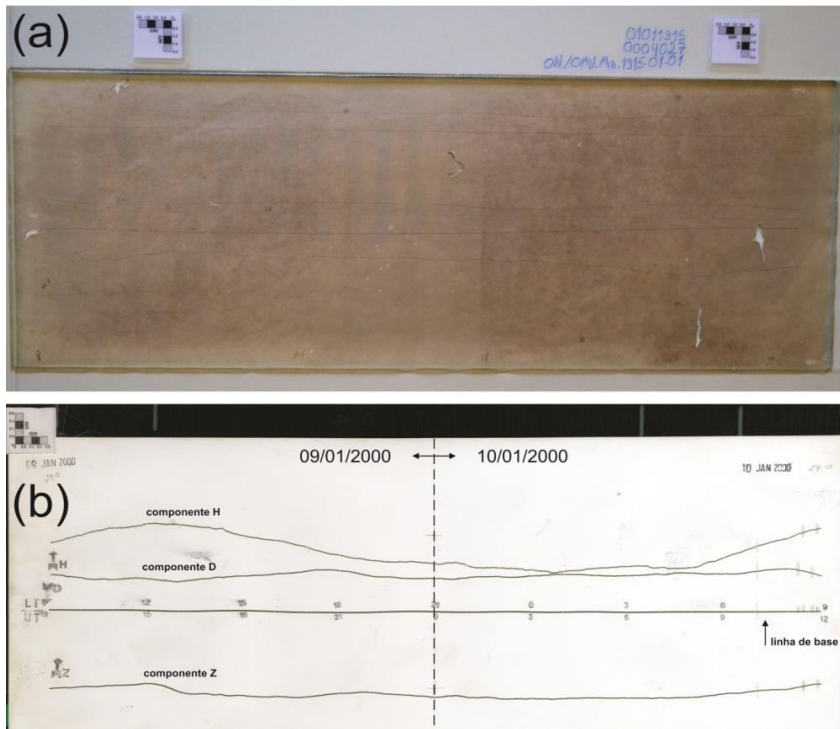


Figura 2.3: a) Primeiro Magnetograma VSS (12-31-1914 / 01-01-1915); b) Magnetograma VSS (fim do Século XX) (09/01/2000 / 10/01/2000).

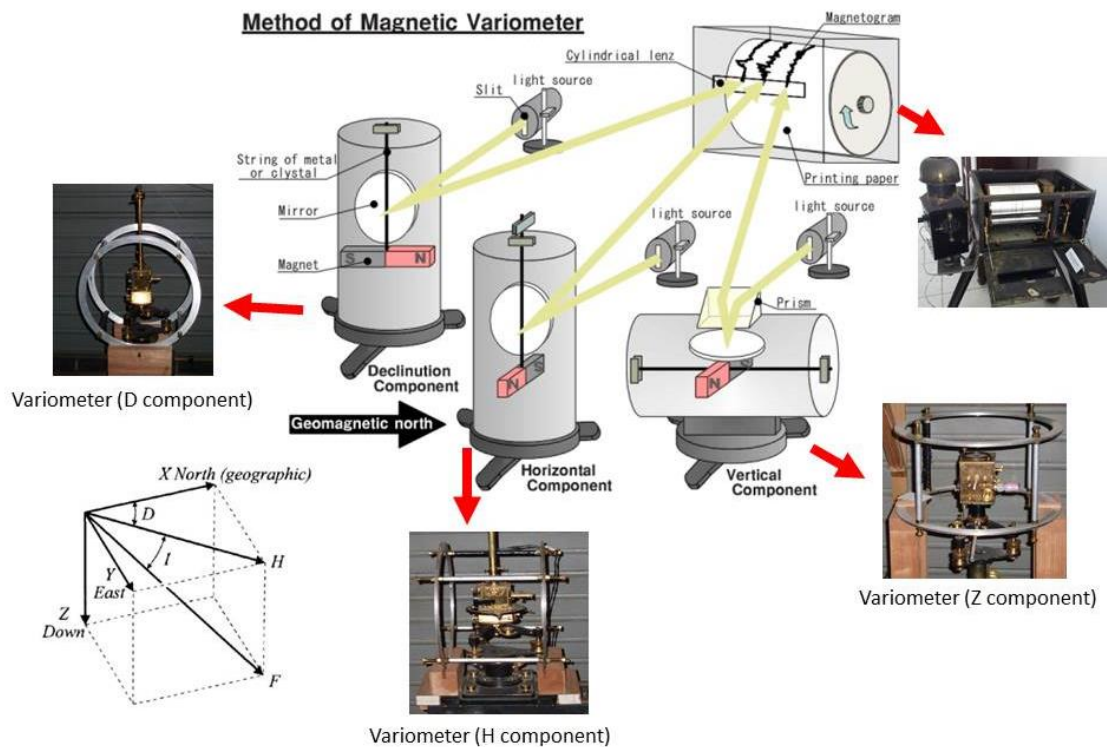


Figura 2.4: Arranjo experimental utilizado no Observatório de Vassouras para obtenção das componentes do CG.

Atualmente, instrumentos magnéticos que utilizam ímãs para o seu funcionamento são raramente usados em observatórios magnéticos. E a

medição dos ângulos de declinação e inclinação é um procedimento empregado principalmente para medições magnéticas absolutas.

Os valores dos parâmetros necessários para avaliar a capacidade de medição dos instrumentos são relatados na tabela a seguir:

Tabela 2.3: Parâmetros de avaliação dos instrumentos magnéticos (*).

-
- Acurácia: indica o quanto um instrumento é preciso, ou seja, a diferença máxima entre valores medidos e valores reais.
 - Precisão: está relacionado com a dispersão dos valores medidos e refere-se à capacidade do instrumento de repetir o mesmo valor ao medir a mesma quantidade.
 - Resolução: representa a menor alteração da quantidade medida que é detectável pelo instrumento.
 - Faixa: refere-se aos limites superior e inferior (extremo) que podem ser medidos com o instrumento. O intervalo dinâmico é a razão entre a quantidade máxima mensurável e a resolução, normalmente expressa em dB, ou seja, $20\log(A_{\max} / A_{\min})$.
 - Sensibilidade: indica quantas unidades de escala do instrumento correspondem a uma unidade da unidade física medida.
 - Valor da escala: é o recíproco da sensibilidade.
-

(*) Modificado de Lanza e Meloni (2006).

Hoje em dia, os instrumentos magnéticos além de dedicados à medição magnética, também são frequentemente capazes de memorizar dados medidos e fazer interface com PCs para comunicação de dados em tempo real, ou *off-line* (Lanza e Meloni, 2006).

A Tabela 2.4 abaixo exhibe informações sobre exemplos de instrumentos relativos e absolutos, seus funcionamentos e respectivas vantagens e desvantagens.

Tabela 2.4: Exemplos de instrumentos relativos e absolutos e princípios de funcionamento (*).

TIPO	EXEMPLO	FUNCIONAMENTO	VANTAGENS E DESVANTAGENS
ABSOLUTO	MAGNETÔMETRO DE PRECESSÃO DE PRÓTONS	<p>Paramagnetismo nuclear (Um <i>spin</i> magnético do núcleo atômico se orienta ao longo de um campo magnético externo).</p> <p>Sensor em forma de “garrafa” com bobinas é estimulado por uma corrente elétrica, gerando um campo e forçando os prótons a alinhar seu <i>spin</i> ao longo deste, precessionando a uma frequência dependente da magnitude do campo.</p>	<p>Vantagem: como depende apenas da medição de uma frequência, a medição do campo é muito precisa e absoluta: a resolução atinge agora facilmente 0,1 a 0,01 nT.</p> <p>Desvantagem: a corrente de polarização precisa ser desligada para fazer uma medição.</p>
Relativo	MAGNETÔMETRO FLUXGATE	<p>Instrumentos eletromagnéticos que podem fornecer medições magnéticas diretas ao longo de uma direção.</p> <p>Um modelo usual possui sensores cilíndricos com enrolamentos de alta permeabilidade magnética. Uma corrente de excitação na primeira bobina gera um campo alternativo que satura o testemunho. Um campo magnético constante atua ao longo do eixo central e soma-se ao alternado levando o núcleo à saturação na direção paralela ao CG. Na segunda bobina, uma corrente de dupla frequência aparecerá com amplitude linearmente proporcional à magnitude do campo externo atuando ao longo da direção do núcleo (Figura 2.5).</p>	<p>Vantagem: resolução razoável de 0,1 nT e são instrumentos frequentemente usados para registrar variações magnéticas de tempo.</p> <p>Desvantagem: variação de temperatura, as bobinas de polarização precisam de uma estabilização, como enrolar as bobinas em torno de tubos de quartzo.</p>

(*) Modificado de Lanza e Meloni (2006).

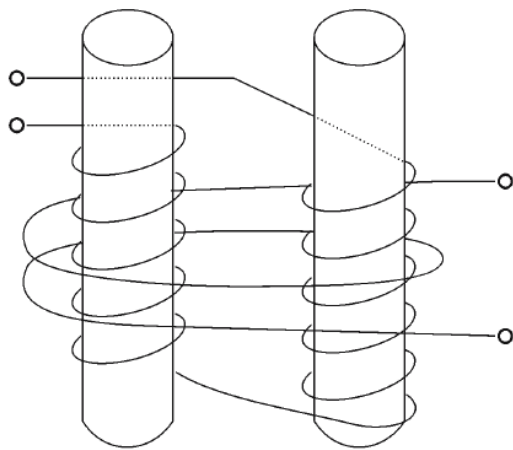


Figura 2.5: Representação esquemática de um magnetômetro do tipo Fluxgate, de dois núcleos, com esquemas de enrolamento.

2.2 O Campo Heliomagnético

O Sol é uma estrela que se encontra aproximadamente no centro geométrico e gravitacional do sistema solar, a aproximadamente 150 milhões de quilômetros da Terra. À sua volta orbitam alguns dos principais corpos do sistema solar, como planetas, asteroides e cometas (Cecatto, 2006). Possui uma massa de cerca de $2,0 \times 10^{30}$ kg e um raio de cerca de $7,0 \times 10^5$ km e é composto essencialmente por hidrogênio e hélio - elementos mais simples e abundantes do Universo (Merrill et al, 2006; Sobrinho, 2012).

De acordo com o discutido na literatura, (e.g., Cecatto, 2006; Costa Jr, 2011; Sobrinho, 2012;) as principais regiões que compõem o Sol se dividem da seguinte maneira: i) coroa – camada mais externa do Sol e invisível a olho nu, com temperaturas de ordem 10^6 K; ii) cromosfera - abaixo da coroa e só vista em eclipses solares totais com uma temperatura que aumenta da base para o topo (~ 15000 K); iii) a fotosfera – possui cerca de 500 km de espessura e temperatura da ordem de 5800 K, sendo a camada mais visível; iv) zona convectiva – detém movimento de bolsas de gás quente em direção a superfície acompanhadas do movimento contrário de bolsas de gás frio e compreende cerca de 15% do raio solar; v) zona de radiação – onde a energia gerada no centro mais quente vai para o exterior sendo por diversas vezes absorvida e reemitida gerando um longo processo do centro do Sol até 70% do

raio; vi) núcleo – responsável pela produção de radiação através de reações termonucleares, a 10^7 K. Essa descrição é ilustrada na Figura 2.6 abaixo.

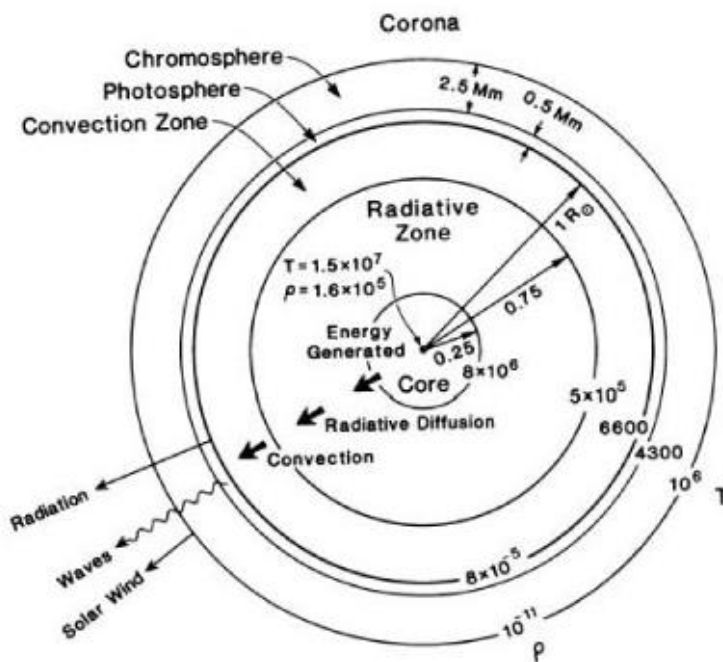


Figura 2.6: Modelo simplificado das regiões solares. Modificado de Costa Jr. (2011).

As primeiras três regiões citadas (coroa, cromosfera e fotosfera) compõem a atmosfera solar. Dessas três, destaca-se a fotosfera, camada mais externa visível a olho nu. Segundo Costa (2011) e Cecatto (2006), a fotosfera é uma fina camada que corresponde a aproximadamente, um milésimo do raio solar ($\sim 500 \text{ km}$). Dela provém a maior parte da luz visível, por três razões: a coroa e a cromosfera são praticamente transparentes, o gás presente na mesma é opaco – impedindo a visão do interior solar – e a magnitude de sua temperatura comparada a “fina” espessura a tornam uma potente fonte térmica de radiação. A fotosfera apresenta dois fenômenos a se destacar: i) a granulação fotosférica (Figura 2.7) - onde os grânulos refletem uma aparência ondulada devido à presença de espículas (jatos de gás quente que se elevam acima da borda e se formam na zona convectiva); ii) as manchas solares (figura 2.8) - regiões escuras de forma irregular que surgem e praticamente desaparecem por completo regularmente (tempo médio de ~ 11 anos), isoladamente ou em grupo.

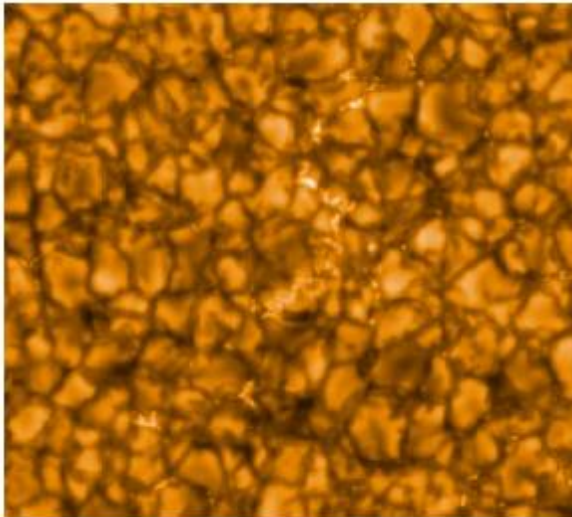


Figura 2.7: Seção da superfície solar bastante ampliada com o efeito de granulação, causada por processos de convecção na fotosfera (as zonas mais claras são gás quente a subir e as zonas mais escuras são gás frio a descer). Modificado de Sobrinho (2012).

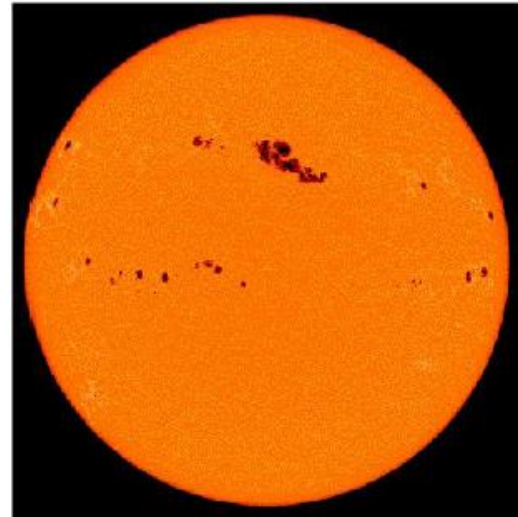


Figura 2.8: Disco solar com manchas solares. Modificado de Cecatto (2006).

A presença de manchas solares está associada à existência de campos magnéticos intensos na atmosfera solar, pois um campo magnético intenso inibe o processo convectivo. Logo, as manchas são significativamente mais frias (gás frio) emitindo menos radiação do que a superfície e, portanto, são escuras, contrastando com a superfície solar mais brilhante (Sobrinho, 2012).

Concluiu-se que o Sol, após diversos estudos e observações, exibe uma variedade enorme de fenômenos magnéticos em uma ampla gama de escalas espaciais e temporais. Segundo Tobias (2007), “esses fenômenos podem variar espacialmente desde o raio solar até o limite da resolução atual da mais poderosa instrumentação por satélite, e com durações variando de minutos a centenas de anos. Esse campo dinâmico e ativo é responsável por todos os fenômenos magnéticos solares”. No entanto, nesse trabalho será abordada apenas a presença do campo na atmosfera solar, culminando na manifestação das manchas solares.

Acredita-se que exista um campo magnético polar muito débil gerado por correntes no núcleo solar. No entanto, o campo magnético dominante no Sol é

gerado pelo dínamo solar, através do fluxo de plasma na zona convectiva. De modo simples, as leis de Maxwell para o eletromagnetismo podem ser invocadas, mostrando que o transporte de fluxo plasmático na região, forma correntes elétricas responsáveis pela existência de três componentes distintas na atmosfera solar. Essas componentes são ortogonais ao sentido de circulação da corrente de plasma: corrente de convecção, corrente meridional norte-sul assimétrica e corrente rotacional (que é variável porque a rotação do Sol varia segundo a latitude). As três componentes têm linhas de campo variáveis no tempo. O ciclo solar de onze anos reflete o máximo da atuação da combinação destas linhas de campo e o mínimo quando a combinação das linhas praticamente resulta num campo solar magnético nulo (Bushby e Mason, 2004; Choudhuri, 2007). Ao cabo de cada ciclo solar o campo heliomagnético (CH) troca de polaridade, devido à anomalia norte-sul que faz com que campos residuais existam em hemisférios opostos a cada ciclo.

O campo heliomagnético em larga escala é definido por Tobias (2007) como aquele que é observado em tamanho comparável ao raio solar e sua manifestação é como já dito, o aparecimento de manchas solares na superfície solar. Essa conexão entre as manchas solares e o campo magnético do Sol só foi determinada em 1908 por Hale. Dessa forma, de modo a simplificar esse fenômeno, as manchas solares assemelham-se a um ímã gigante com uma das extremidades exibindo polaridade magnética Sul e outro Norte. Todos os grupos de manchas no hemisfério norte do Sol apresentam a mesma orientação na polarização. Todos os grupos de manchas no hemisfério Sul apresentam a polarização contrária à do hemisfério Norte. A cada 11 anos a polaridade é invertida tanto nas manchas como no próprio Sol. Assim o padrão repete-se a cada dois ciclos solares, ou seja, a cada 22 anos (Sobrinho, 2012).

3. CICLOS SOLARES (ESCALA SUB-ANUAL A MULTI-DECADAL)

As manchas solares são o principal indicador de atividade solar e seus registros ao longo de centenas de anos foram estudados para entender a variabilidade do sol. (Hathaway, 2010; Lomb, 2013).

Thomas Harriot foi um dos primeiros a usar um telescópio para estudar o universo e observou as primeiras manchas solares em 1610, seguido por David Fabricius e seu filho Scheiner e naturalmente Galileu (Moussas, 2005).

Observar manchas solares se tornou um costume interessante para muitos astrônomos (utilizando necessariamente filtros ou projeções) levando à uma profunda investigação solar de vários observatórios astronômicos, acompanhados de imagens frequentes em forma de desenhos. A análise dessas imagens do Sol levou à descoberta da rotação e posteriormente da periodicidade de 11 anos de atividade solar por Schwabe (1841, 1844, 1876), conhecida por ciclo solar (Figura 3.1).

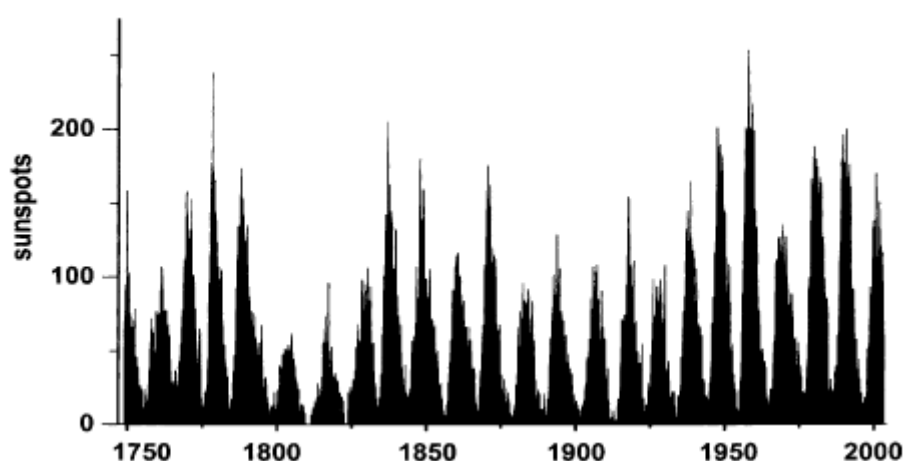


Figura 3.1: Os valores mensais de contagem de manchas solares variam periodicamente (11 anos) e é um índice muito bom de atividade solar. Modificado de Moussas et al. (2005).

O registro das manchas solares constitui um dos maiores tempo/série de observações reais feitas por seres humanos (Usoskin et al., 2002; Usoskin e Mursula, 2003). Análises de todos os dados mostraram que o período real do ciclo de Schwabe varia entre 8 e 15 anos. Segundo Moussas, “O tempo de subida é geralmente menor que o tempo de queda do ciclo solar, gerando um padrão muito assimétrico. Em média, grandes ciclos solares, ou seja, ciclos solares com máximos grandes têm tempos de subida curtos e longos tempos de queda”.

Hale em 1908 descobriu e mediu o campo magnético em manchas solares usando muito efetivamente o efeito Zeemann (resposta espectral a aplicação de um campo) e a espectroscopia à distância. Ao usar essa análise notou que campo magnético geral do Sol é dipolar e muda de polaridade a cada 11 anos. Logo, ao reverter, o campo dipolar geral do Sol tem um período de 22 anos.

Mediante esse entendimento, serão apresentados os ciclos de longa e curta variabilidade, entre outros. Variações sistemáticas de ciclo a ciclo e ao longo de muitos ciclos podem ser discriminadores significativos nos modelos do ciclo solar e pode ajudar na previsão de ciclos futuros.

Em 1890, Maunder, baseado em estudos pretéritos confirmados posteriormente por Eddy (1976), notou que por um período de setenta anos, de 1645-1715 o curso do ciclo das manchas solares foi interrompido. Esse período ficou conhecido como Mínimo de Maunder e foi confirmado como um período de baixíssima atividade sugerindo que o ciclo magnético ainda estava em progresso, mas fraco demais para produzir os intensos campos magnéticos nas manchas solares (Hathaway, 2010). O mínimo Maunder também está associado a um período prolongado de baixa temperatura na Terra, chamado de Pequena Idade do Gelo e acredita-se que tenha sido causado por uma variação de emissão solar associada à ausência de manchas solares e, talvez, à ausência de fortes campos magnéticos no sol (Moussas, 2005). No entanto, isso é discutível porque uma menor quantidade de manchas leva a um aumento na superfície solar emissora e conseqüentemente mais transporte de energia. Então, uma das hipóteses para essa associação citada por Moussas, é o aumento da superfície hidrostática solar, com uma saída energética constante, porém com menos energia por km², ocasionando uma menor absorção de energia na Terra, explicando a pequena idade do gelo.

“Periodicidades com períodos de várias décadas são muito importantes, mas difíceis de estudar e aceitar sem qualquer dúvida. As limitações vêm da pequena extensão da série temporal. Tais periodicidades de longo prazo foram encontradas em vários índices solares” (Moussas, 2005).

Algumas variações significativas na atividade solar são apresentadas em escalas de tempo mais curtas que o ciclo das manchas solares. Isso é realizado filtrando o registro do contagem de manchas solares para remover os efeitos de rotação solar e os efeitos do ciclo solar (Hathaway, 2010).

Um dos exemplos é um sinal periódico de explosões solares de 154 dias observado na atividade dos raios gama durante uma Missão Máximo Solar (MMS – missões realizadas por satélites para medir a irradiância solar - 1980-1989) por Rieger et al. (1984) para o intervalo de tempo de 1980 a 1983. Esse sinal também foi encontrado por Bai e Cliver (1990), Ballester et al. (2002) e sendo analisado por Lean (1990) descobriu-se que ocorre em episódios ao redor das épocas do ciclo máximo das manchas solares e que sua frequência também varia.

Outra periodicidade pertinente é aquela encontrada com um período de cerca de dois anos, chamada oscilação quase bienal (Benevolenskaya, 1995; Mursula et al., 2003). Descritos por Kane, 1997, índices de atividade geomagnética submetidos à análise espectral geraram oscilações entre ~2 a 3,7 anos, chamadas de quase bienais e quase trienais. Essa análise em comparação com o vento solar (a partir de 1965) mostrou uma boa correspondência, indicando que as variações dos índices geomagnéticos eram principalmente devidas a variações semelhantes no vento solar, que devem ter sua origem nos processos físicos solares.

4. PROCEDIMENTOS E MÉTODOS

4.1. Séries de dados geomagnéticos e solares

4.1.1. Dados do VSS

Os conjuntos de dados de tempo geomagnético para este estudo foram realizados a partir de compilações de observações geomagnéticas realizadas no Observatório Magnético de Vassouras (VSS), durante o período de 1915 a 2004. Foi adotada a componente geomagnética horizontal (H) do CG.

Posteriormente, a variação temporal do conjunto de dados da componente H (ΔH) foi preparada em quatro resoluções de tempo distintas (1, 3, 6 e 12 meses), a fim de observar possíveis padrões harmônicos que poderiam estar relacionados a eventos solares ou alguns processos climáticos em tempos distintos.

4.1.2. Dados de Manchas Solares

Os conjuntos de dados de atividade solar foram construídos com base na contagem das manchas solares (R_z) para o período 1915-2004. Esses dados foram fornecidos pelo National Geophysics Data Center (NGDC, EUA - disponível no [website](http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?t=102827&s=5&d=8,430,9) <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?t=102827&s=5&d=8,430,9>) e construiu ao mesmo tempo as resoluções discutidas acima.

4.2. Análise de Sinais

4.2.1 Análise Espectral

Em relação à presença de 'lacunas' nos conjuntos de dados geomagnéticos devido a descontinuidades na aquisição de dados VSS ao longo do tempo, a análise espectral de séries temporais geomagnéticas foi realizada pelo uso do software SPECTRUM (Schulz & Stattegger, 1997) baseado na Transformada de Fourier de Lomb-Scargle (que é comumente empregada na análise de sinais de séries temporais com espaçamento desigual) em combinação com o método WOSA (Welch-Overlapped-Segment Averaging; Welch, 1967; Tröbs & Heinzel, 2006). Esse procedimento permite a supressão de picos espectrais aleatórios pela segmentação de uma determinada série temporal, e fornece um espectro médio com base nos segmentos sobrepostos. Cada série temporal foi dividida em 2 a 3 segmentos e que foram superpostos em 50% de seus respectivos intervalos. Em seguida, cada segmento foi multiplicado por uma função de janela Welch I (Harris, 1978) para a redução dos efeitos relacionados à dispersão espectral, e posteriormente tratados pela Transformada de Fourier.

Os periodogramas foram então calculados e o periodograma médio resultante foi associado à sua largura de banda de 6 dB e nível de confiança (α), definido em 0,05 para este trabalho.

5. RESULTADOS

A análise espectral de Rz (resolução de 12 meses) e séries temporais de ΔH tomadas em diferentes resoluções de tempo (1, 3, 6 e 12 meses) exibiu vários picos espectrais significativos (acima de um nível de confiança de 95%), o que levou diferentes intervalos periódicos para os espectros de ΔH .

Neste trabalho, as análises espectrais serão divididas em legendas para facilitar a identificação e compreensão, da seguinte maneira: 1º) a letra que corresponde à série (série geomagnética corresponde a H e solar corresponde a Rz), 2º) o número de sua resolução (mensal será 1, trimestral será 3, semestral será 6 e anual será 12), acrescentando um ponto e 3º) o número da faixa ou pico espectral (escolhidos a priori). Conforme o exemplo: H1.1 (série geomagnética H, na resolução mensal, na primeira faixa/pico espectral). A análise de manchas solares (Rz) seguirá apenas a sigla que corresponde às manchas, no caso Rz, seguida de ponto e o número de faixas/picos espectrais, pois todos estão na resolução anual. As séries de picos espectrais serão sempre identificadas da esquerda para direita, ou seja, dos menores valores para os maiores.

5.1. Análise espectral - série de dados de contagem de manchas solares

A análise espectral de manchas solares (Rz) (Figura 5.1) apresenta sinais bem marcados correspondentes a alguns ciclos solares já mencionados. Logo, encontramos três picos espectrais bem marcados: Rz.1) 8,0 anos; Rz.2) 10,4 anos; Rz.3) 48,0 anos.

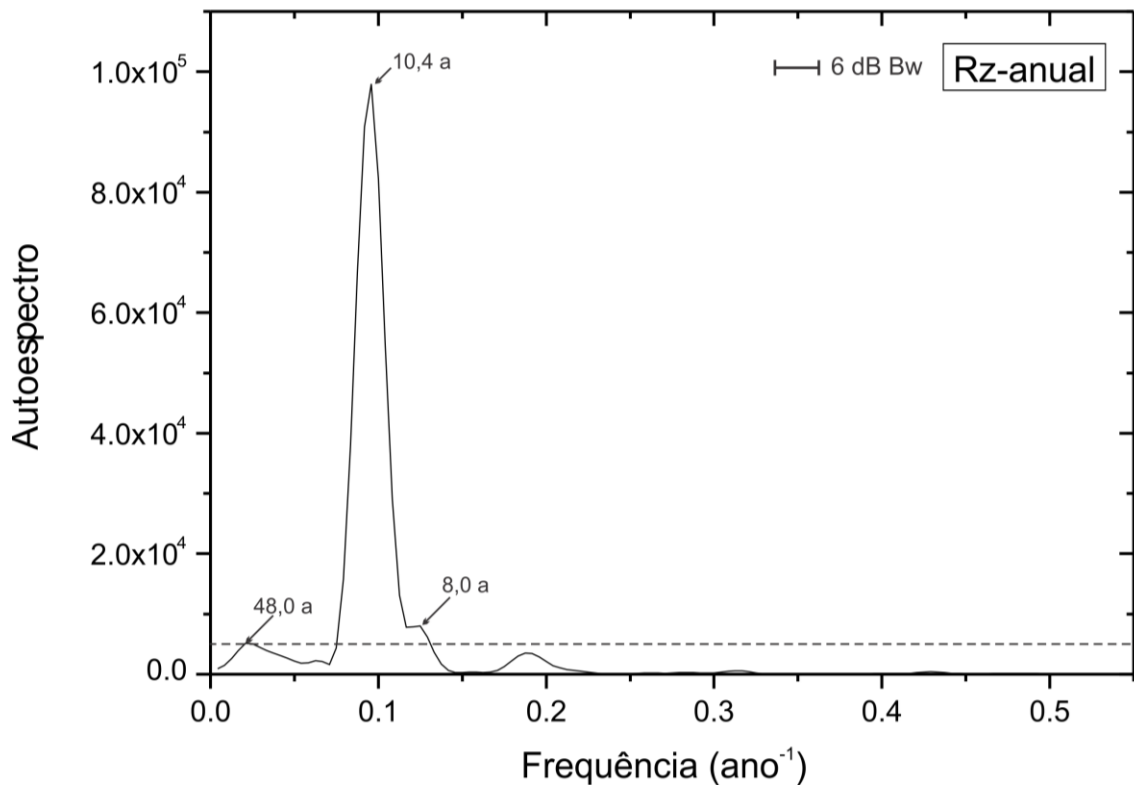


Figura 5.1: Análise espectral da série de dados de manchas solares (Rz).

5.2. Análise espectral – dados geomagnéticos

5.2.1. Resolução Mensal

A análise espectral mensal de ΔH (Figura 5.2) apresenta sinais bem marcados correspondentes a aproximadamente cinco faixas de valores de pico espectral: H1.1) 0,20 - 0,24 ano; H1.2) 0,24 - 0,29 ano; H1.3) 0,32 - 0,44 ano; H1.4) 0,51 - 0,65 ano; e H1.5) 0,77 - 1,2 ano; e três picos esparsos de H1.6) 2,3 anos; H1.7) 5,1 anos; H1.8) 9,5 anos e H1.9) 20,0 anos.

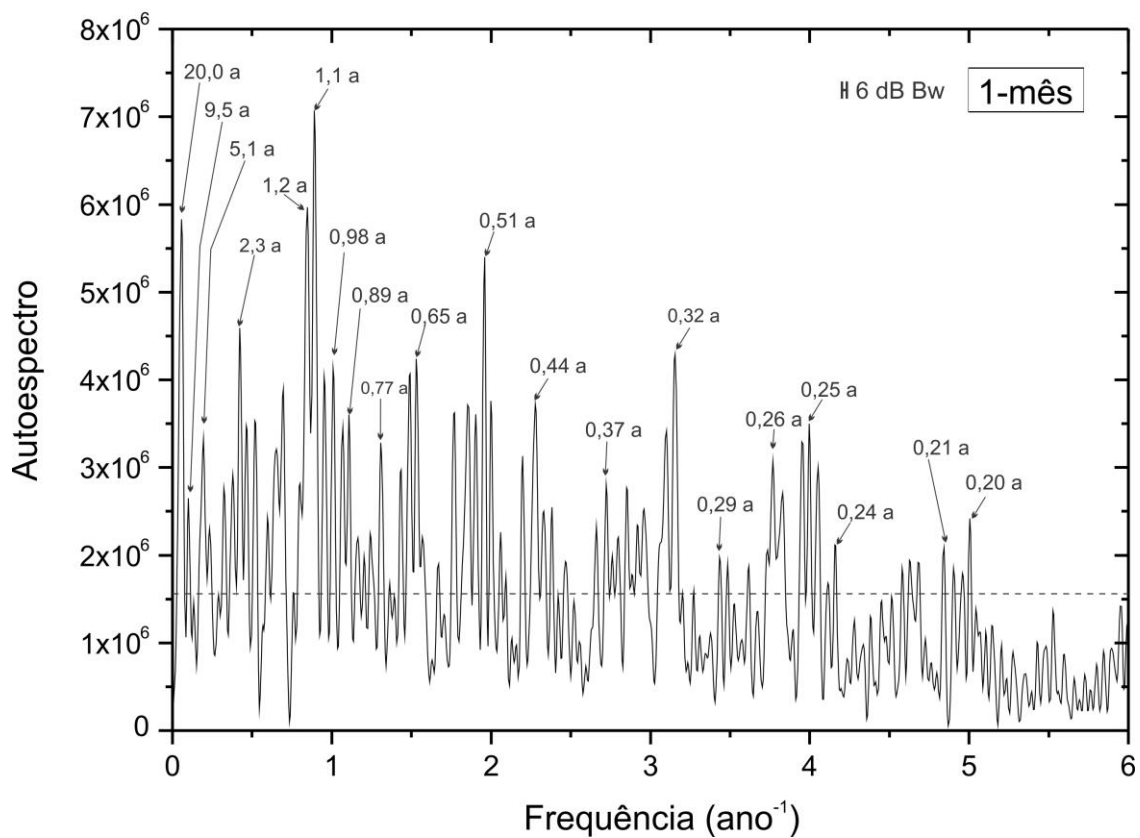


Figura 5.2: Análise espectral dos dados geomagnéticos em resolução mensal.

5.2.2. Resolução Trimestral

A análise espectral trimestral de ΔH (Figura 5.3) apresenta sinais bem marcados correspondentes a aproximadamente três faixas de valores de pico espectral: H3.1) 0,51 - 0,68 ano; H3.2) 0,83 – 1,4 anos; H3.3) 1,6 - 2,9 anos; e três picos esparsos de H3.4) 5,1 anos; H3.5) 8,9 anos; e H3.6) 17,9 anos.

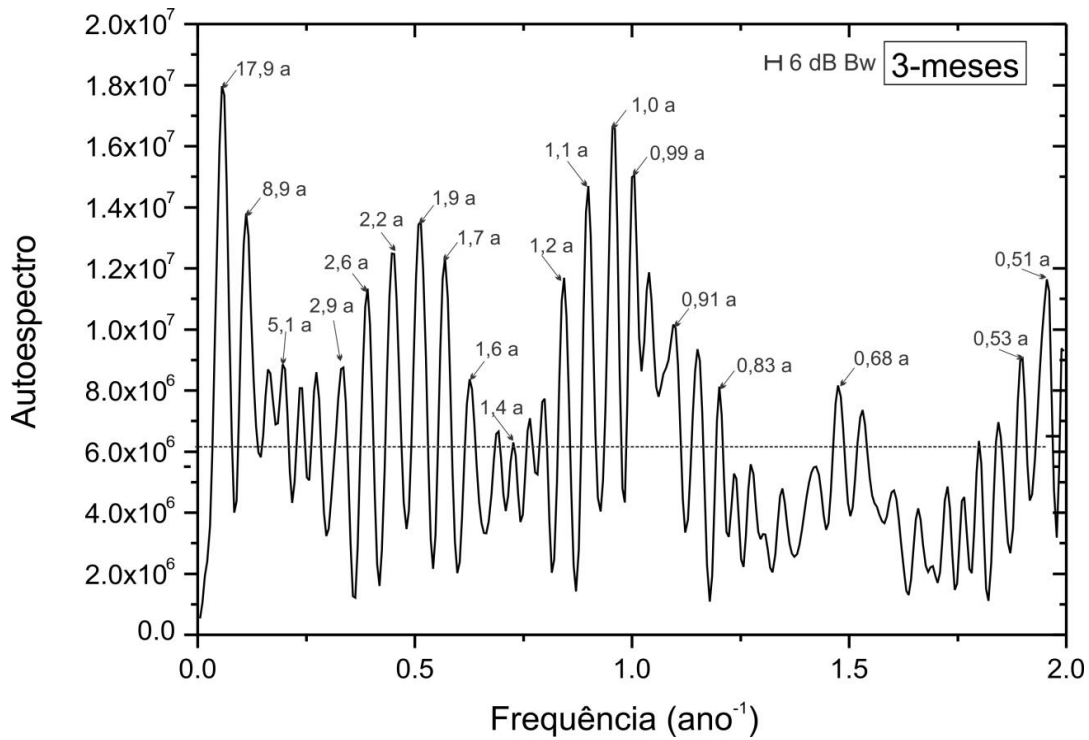


Figura 5.3: Análise dos dados geomagnéticos em resolução trimestral.

5.2.3. Resolução Semestral

A análise espectral semestral de ΔH (Figura 5.4) apresenta sinais bem marcados correspondentes a aproximadamente três faixas de valores de pico espectral: H6.1) 1,0 - 1,2 ano; H6.2) 1,8 – 2,3 anos; e quatro picos esparsos de H6.3) 4,9 anos; H6.4) 6,4 anos; H6. 5) 9,9 anos e H6. 6) 22,2 anos.

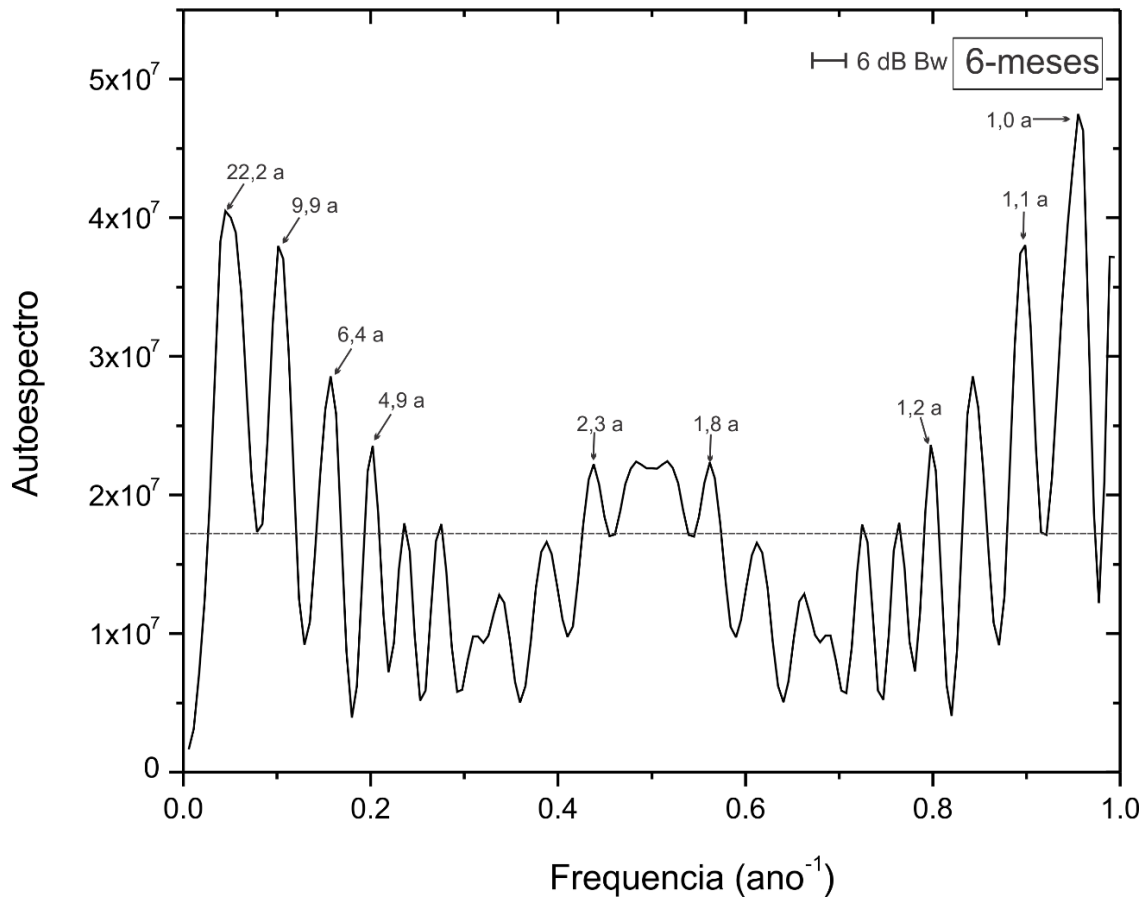


Figura 5.4: Análise dos dados geomagnéticos em resolução semestral.

5.2.4. Resolução Anual

A análise espectral anual de ΔH (Figura 5.5) apresenta sinais bem marcados correspondentes a aproximadamente duas faixas de valores de pico espectral: H12.1) 2,2 - 2,8 anos; H12.2) 4,3 - 5,1 anos; e dois picos esparsos de H12.3) 9,1 anos; H12.4) 39,3 anos;

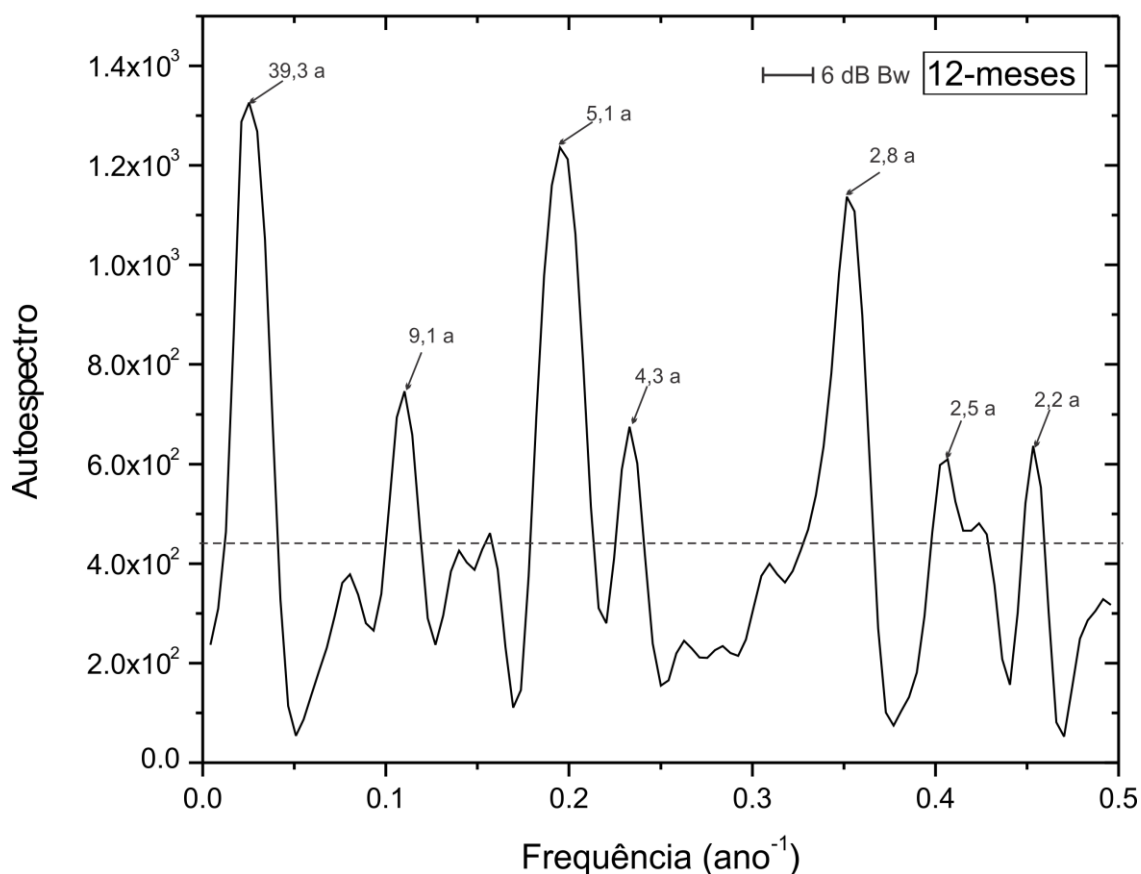


Figura 5.5: Análise dos dados geomagnéticos em resolução anual.

6. DISCUSSÃO FINAL

Os autoespectros resultantes da análise espectral para séries temporais desigualmente espaçadas, nas quatro resoluções de tempo consideradas (limite de nível de confiança de 95%), foram dispostos nas figuras mostradas no capítulo anterior (Fig. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5).

Os resultados do autoespectro de manchas solares evidenciaram um intenso sinal correspondente ao ciclo de Schwabe, pois os picos mais altos denotam uma determinação mais precisa e uma variabilidade mais intensa. O sinal menor de 48,0 anos será discutido mais adiante.

Os autoespectros de conjuntos de dados ΔH em resoluções de 1 e 3 meses (Fig. 5.2 e 5.3) exibem diferentes modos oscilatórios de vários picos

espectrais acima do limite de confiança de 95%, o que poderia ser explicado pela pequena largura de banda de 6 dB fornecida pela alta resolução de dados. A faixa espectral (H1.1) e (H1.2) que exibem valores de potência espectral mais baixos do que as faixas espectrais restantes, são sugestivas do primeiro harmônico da variação semestral de ~ 6 meses da atividade geomagnética - que também é possível observar na faixa espectral (H1.4) e (H3.1) - valores espectrais dos picos 0,51 - 0,65 ano (Fig. 5.2) e 0,51 - 0,68 ano (Fig. 5.3). Prestes et al. (2006) sugeriram, a partir da análise espectral das séries de atividades geomagnéticas antipodais, a presença de um pico espectral de 0,5 ano, caracterizado por uma melhor resposta do campo geomagnético nos períodos equinociais, e não nos períodos de solstício.

Não há explicação direta para a ocorrência da faixa espectral (H1.3) e dos picos 0,77 e 0,89 ano (H1. 5) na resolução mensal, e dos picos 0,83 e 0,91 ano faixa espectral na resolução trimestral (H3.2). No entanto, pode ser sugerido para a faixa espectral (H1.3) o registro de modos oscilatórios relacionados à modulação da atividade geomagnética pela atividade solar devido a sazonalidade anual. Por outro lado, alguns estudos (por exemplo, Rieger et al., 1984 ; Krivova & Solanki, 2002) apontaram que a variabilidade solar de 154 dias, também conhecida como período Rieger de explosões solares - compatível com o pico espectral de 0,44 ano na faixa espectral (H1.3) - poderia corresponder ao terceiro harmônico de 1,3 anos de quase periodicidade solar.

Abrangendo também o conjunto de dados de resolução semestral é possível notar a ocorrência de seis picos espectrais nas faixas (H3.2), (H1.5) e (H6.1) em 1,0 anos, 1,1 1,2 1,5 ,1,6 e 1,8 anos. Alguns autores (e.g., Paularena et al., 1995; Krivova & Solanki, 2002) discutiram uma periodicidade de 1,3 ano relacionada à taxa de rotação solar próxima à base da zona de convecção solar, o que parece ser compatível com a intensidade do Campo Magnético Interplanetário (Kudela et al., 2002). Conforme relatado por Mursula e Zieger (2000), uma variação de 1,3 anos corresponde a uma quase periodicidade que ocorre em ciclos solares pares, enquanto para ciclos ímpares foram verificadas periodicidades mais longas, que variam de 1,5 a 1,7 anos, e relacionadas à evolução de orifícios coronais - portanto, essas características espectrais,

observáveis nos registros geomagnéticos, podem ser indicativas de diferenças na evolução dessas características da atividade solar durante ciclos solares pares e ímpares.

Os picos espectrais variando de $\sim 1,9$ a $2,8$ anos, que podem ser observados em todos os autoespectros fornecidos por este estudo, são bastante semelhantes às características harmônicas discutidas na literatura como as oscilações quase bienais e quase trienais (QBO e QTO, respectivamente) em estudos sobre séries temporais de índices geomagnéticos e possivelmente relacionados a processos físicos solares devido à periodicidade na emissão de ventos solares (por exemplo, Bucha, 1991; Kane, 1997; Prestes et al., 2006; Paluš & Novotná, 2006) e que também têm sido associados à variabilidade nos níveis de precipitação (Kane, 1998).

Os picos espectrais em $5,1$ anos (Fig. 5.2, Fig. 5.3, Figura 5.5), $4,9$ anos, $6,4$ anos (Fig. 5.4), podem ser interpretados como o primeiro harmônico do ciclo Schwabe de 11 anos. Isso foi evidenciado a partir de picos espectrais na faixa de $8,0 - 13,5$ anos (por exemplo, Prestes et al., 2006; Niroma, 2009) - o que pode explicar a variabilidade dos valores de pico espectral relacionados a esse harmônico. De fato, também pode estar relacionado aos picos espectrais observados com $8,9$, $9,1$, $9,5$, $9,9$, anos visíveis em todas as resoluções apresentadas no registro geomagnético, bem como no autoespectro R_z com $8,0$ e $10,4$ anos (Fig. 5.1). No entanto, uma periodicidade de $\sim 5,3$ anos foi sugerida por alguns autores (por exemplo, Dmitriev et al., 2000) como um padrão harmônico relacionado à densidade do vento solar, conhecido como um dos fatores de controle mais importantes na atividade geomagnética (Stamper et al., 1999).

Além disso, as periodicidades observadas de $17,9$, $20,0$, $22,2$ anos (Fig. 5.2, Fig. 5.3 e Fig. 5.4) podem ser explicadas respectivamente como correspondendo aos intervalos esperados (Velasco & Mendoza, 2008) para o ciclo magnético solar de Hale.

Em especial, dois picos de quase periodicidade chamaram a atenção, são eles os de $\sim 39,3$ e $48,0$ anos. Na literatura, encontra-se uma inferência relacionada ao ciclo solar de 50 anos que funciona como um modelador de

ciclos solares (Komitov, 2016). Corresponde a um envoltório de sequência de ciclos associado a ciclos mais e menos intensos (vide Figura 3.1). E também pode relacionar-se ao ciclo de ~ 50-60 anos associado a fortes explosões solares e ejeções de massa coronal (Komitov, 2016). A descrição dessa correlação entre as escalas de tempo ou picos espectrais e a descrição dos eventos está resumida na tabela abaixo.

Tabela 6.1: Escala de tempo ou picos espectrais e descrição dos eventos.

ESCALA DE TEMPO OU PICOS ESPECTRAIS	DESCRIÇÃO DOS EVENTOS
< 6 meses	- Quase periodicidade de 154 dias associado a explosões solares de Rieger et al. (1984).
<1 ano	- Evidências para variação semestral da atividade geomagnética; - Modulação da atividade geomagnética pela atividade solar devido à sazonalidade anual.
1,0 - 1,8 anos	- Evolução de orifícios coronais durante ciclos solares pares / ímpares.
1,9 - 2,8 anos	- QBO / QTO - Relacionados a processos físicos solares devido à periodicidade na emissão de ventos solares.
4,9 - 6,8 anos	- Primeiro harmônico do ciclo de Schwabe. - Possível modo oscilatório associado à variabilidade da densidade do vento solar.
8,0 - 13,5 anos / 17,9 - 22,2 anos	- Ciclos de Schwabe e Hale;
39,3 anos / 48,0 anos	- Quase-periodicidade de três ciclos solares (Bruckner cyle); - Quase-periodicidade de 50 anos, responsável por modular outros ciclos e/ou associado a fortes explosões solares e ejeções de massa coronal;

Levando-se em conta o que foi observado, fazem-se necessárias algumas considerações finais. É possível inferir uma forte interação entre o campo Heliomagnético e o campo Geomagnético. Isso é notável pela presença dos principais ciclos solares – Ciclo de Hale e Schwabe –, e de quase periodicidades – QBO e QBO – em todas as resoluções das séries geomagnéticas. No entanto, a limitação da série e dos dados analisados não permite inferir uma causalidade óbvia.

7. BIBLIOGRAFIA

- BAI, T. and CLIVER, E.W., “A 154 Day Periodicity in the Occurrence Rate of Proton Flares”, *Astrophys. J.*, 363, 299–309. [DOI], [ADS], (1990).
- BAI, T., “Hot Spots for Solar Flares Persisting for Decades: Longitude Distributions of Flares of Cycles 19-23”, *Astrophys. J.*, 585, 1114–1123. [DOI], [ADS], 2003.
- BALLESTER, J.L., OLIVER, R. AND CARBONELL, M., “The Near 160 Day Periodicity in the Photospheric Magnetic Flux”, *Astrophys. J.*, 566, 505–511. [DOI], [ADS], (2002).
- BARD, E., DELAYGUE, G., Comment on “Are there connections between the Earth's magnetic field and climate?” by V. Courtillot, Y.Gallet, J.-L. Le Mouel, F. Fluteau, A. Genevey *EPSL* 253, 328, 2007, *Earth Planet. Sci. Lett.* 265, 302-307 (2008).
- BENEVOLENSKAYA, E.E., “Double Magnetic Cycle of Solar Activity”, *Solar Phys.*, 161, 1–8. [DOI], [ADS], (1995).
- BRANCO, P. Serviço Geológico do Brasil, 2014. Espeleologia: o estudo das cavernas. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Espeleologia%3A-o-estudo-das-cavernas-1278.html>>. Acesso em: outubro, 2019.
- BUCHA, V. Correlations of the changes in the Earth's magnetic field—the climate and weather, electromagnetic field of the Earth (A79-2601309-46). Veda-Vydavatelstvo Slovenskej Akademie Vied, Bratislava. 59–67. (1978).
- BUCHA, V. Variations of the geomagnetic field, the climate and weather. *Stud. Geophys. Geod.*; 20:149–167. (1976)
- BUFFETT, B.A. Earth's Core and the Geodynamo. *Science*, 288, p. 2007-2012, 2000.
- BUSHBY, P., MASON, J., “Understanding the Solar Dynamo”, *Astron. Geophys.*, **45**, pp. 7–13, (2004).
- CAMPUZANO, S. A.; SANTIS, De. A., et al. New perspectives in the study of the Earth's magnetic field and climate connection: The use of transfer entropy. *PLoS ONE* 13(11): e0207270, (2018).
- CECATTO, J. R. O Sol. In: Curso de Introdução à Astronomia e Astrofísica, 9. 2006, São José dos Campos. Resumo. São José dos Campos: INPE (2006).

- CHOUDHURI, A. R., CHATTERJEE, P., JIANG, J., “Predicting Solar Cycle 24 With a Solar Dynamo Model”, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 131103, (2007).
- CHRISTL, M et al. Evidence for a link between the flux of galactic cosmic rays and Earth’s climate during the past 200,000 years. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 66 p. 313 – 322 (2004).
- COSTA Jr. E., F.J.R. SIMÕES Jr., F.R. CARDOSO e M.V. ALVES, *Revista Brasileira de Ensino de Física* 33, e4301, (2011).
- COURTILLOT, V. et al. Are there connections between the Earth's magnetic field and climate? *Earth and Planetary Science Letters*. 253 p. 328–339. (2007).
- DMITRIEV, A.V., SUVOROVA, A.V., VESELOVSKY, I.S., Solar wind and interplanetary magnetic field parameters at the Earth’s orbit during three solar cycles, *Phys. Chem. Earth (C)* 25, 125-128 (2000).
- FOWLER, C.M.R. *The Solid Earth: An Introduction to Global Geophysics*. 2 Ed. Cambridge: Cambridge University Press. 685 p. (2007).
- FRANCO, D.R. “Magnetoestratigrafia e Análise Espectral de Ritmos Permocarboneiros da Bacia do Paraná: Influências dos Ciclos Orbitais no Regime Depositional”. Tese de Doutorado, IAG-USP, pp. 119-127 (2007).
- FREITAS, F.B.V. “Comportamento da variação paleo-secular durante a hiperzona de polaridade mista illawarra, período de transição paleozoico-mesozoico”. Dissertação de Mestrado- ON/MCTIC/Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Observatório Nacional, 97 p. (2017).
- GALLET, Y. et al. Does Earth’s magnetic field secular variation control centennial climate change? *Earth and Planetary Science Letters*. France. v. 236 p. 339–347. (2005).
- HATHAWAY, D.H., “The Solar Cycle”, *Living Rev. Solar Phys.*, **7**, Irspl-2010-1. [ADS], (2010).
- JOHNSON, C.L. MCFADDEN, P. “Paleosecular Variation and the Time-Averaged Paleomagnetic Field”. In: Kono, M. (eds.), *Treatise on Geophysics*, **5**, Elsevier, Amsterdam, pp. 417-453 (2007).
- KANE, R.P., Quasi-biennial and quasi-triennial oscillations in the rainfall of Northeast Brazil, *Rev. Bras. Geofis.* 16 (1), 37-52 (1998).
- KITABA, I. *et al.* Geological support for the Umbrella Effect as a link between geomagnetic field and climate. *Sci. Rep.* **7**, 40682; doi: 10.1038/srep40682 (2017).
- KNUDSEN, F. M.; RIISAGER, P. Is there a link between Earth’s magnetic field and low-latitude precipitation? *Geology*. v. 37; no. 1; p. 71–74. (2009).
- KOMITOV, B., et al “THE SUB- AND QUASI-CENTURIAL CYCLES IN SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY DATA SERIES”., *Bulg. Astron. J.* **25**, p 78, (2016).
- KORTE, M., CONSTABLE, C.G., Centennial to millennial geomagnetic secular variation, *Geophys. J. Int.*, **167** (1), 43 – 52 (2006).
- KRIVOVA, N.A., SOLANKI, S.K., The 1.3-year and 156-day periodicities in sunspot data: Wavelet analysis suggests a common origin, *Astron. Astrophys.* 394, 701-706 (2002).
- KUDELA, K., RYBÁK, J., ANTALOVÁ, A., STORINI, M., Time evolution of low-frequency periodicities in cosmic ray intensity, *Sol. Phys.* 205, 165-1475 (2002).

- LANDSCHEIDT, T., New Little Ice Age instead of Global Warming?, *Energy Environ.* 14 (2-3), 327-350 (2003).
- LANZA, R., MELONI, A. *The Earth's Magnetic Field*, Springer, Berlin, 278 p. (2006).
- LEAN, J., "Evolution of the 155 Day Periodicity in Sunspot Areas During Solar Cycles 12 to 21", *Astrophys. J.*, 363, 718–727. [DOI], [ADS], (1990).
- LOMB, N. The sunspot cycle revisited *J. Phys: Conf. Ser.*, 440, p. 012042, 10.1088/1742-6596/440/1/012042 (IOP Publishing), (2013).
- LOVE, J.J., MURSULA, K., TSAI, V.C., PERKINS, D.M., Are secular correlations between sunspots, geomagnetic activity, and global temperature significant?, *Geophys. Res. Lett.* 38, L21703 (2011).
- LOWRIE, W. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press, New York, 381 p. (2007).
- MACMILLAN, S., DROUJININA, A., Long-term trends in geomagnetic daily variation, *Earth Planets Space* 59 (3), 391-395 (2007).
- MERRILL R.T., McELHINNY M.W., McFADDEN P.L. *The Magnetic Field of the Earth*, International Geophysics Series, 63, (1996).
- MERRILL, R.T. MCELHINNY, M.W. MCFADDEN, P.L. *The Magnetic Field of the Earth – Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*. Academic Press, London, 531 p., (2006).
- MERRILL, R.T. MCFADDEN, P.L. Paleomagnetism. In: GUBBINS, D. HERRERO-BERVERA, E. (eds.), *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, Springer, Dordrecht, pp. 84- 89 (2007).
- MERRILL, R.T. MCFADDEN, P.L. The geomagnetic axial dipole field assumption. *Phys. Earth Planet. In.*, 139, pp. 171-185 (2003).
- MIRANDA, J.M.A. *Introdução ao Geomagnetismo*. Lisboa: Instituto Geofísico Dom Luiz, 2002. Disponível em:< <http://www.igidl.ul.pt/download.htm>> Acesso em maio de 2019.
- MOUSSAS X, POLYGIANNAKIS J M, PREKA-PAPADEMA P, et al. Solar cycles: A tutorial. *Adv Space Res*, 35: 725–738, (2005).
- MUFTI, S., SHAH, G.N., Solar-geomagnetic activity influence on Earth's climate, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 73, 1607-1615 (2011).
- MURSULA, K., ZIEGER, B., The 1.3-year variation in solar wind speed and geomagnetic activity, *Adv. Space Res.* 25 (9), 1939-1942 (2000).
- MURSULA, K., ZIEGER, B. and VILPPOLA, J.H., "Mid-term Quasi-periodicities in Geomagnetic Activity During the Last 15 Solar Cycles: Connection to Solar Dynamo Strength", *Solar Phys.*, 212, 201–207. [DOI], [ADS], (2003).
- NIROMA, T., Understanding solar behaviour and its influence on climate, *Energy Environ.* 20 (1-2), 145-159 (2009).
- OLIVEIRA, W.P. "Análises de dispersão angular de polos geomagnéticos virtuais referentes ao Superchron Reverso do Permo-Carbonífero". Dissertação de Mestrado - ON/MCTIC/Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Observatório Nacional (2017).
- PALUŠ, M., NOVOTNÁ, D., Common oscillatory modes in geomagnetic activity, NAO index and surface air temperature records, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 69, 2405–2415 (2007).

- PALUŠ, M., NOVOTNÁ, D., Quasi-biennial oscillations extracted from the monthly NAO index and temperature records are phase-synchronized, *Nonlinear Processes Geophys.* 13, 287- 296 (2006).
- PAULARENA, K. I., SZABO, A., RICHARDSON, J.D., Coincident 1.3-year periodicities 346 in the ap geomagnetic index and the solar wind, *Geophys. Res. Lett.* 22 (21), 3001-3004 (1995).
- PAZUR, A. WINKLHOFER, M. Magnetic effect on CO² solubility in seawater: A possible link between geomagnetic field variations and climate. *Geophysical research letters.* v. 35. (2008).
- PONYAVIN, D.I., Solar cycle signal in geomagnetic and climate, *Sol. Phys.* 224 (1), 465-471 (2004).
- PRESTES, A., RIGOZO, N.R., ECHER, E., VIEIRA, L.E.A., Spectral analysis of sunspot number and geomagnetic indices (1868-2001), *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 68, 182-190 (2006).
- ROSSI, C. et al. Paleoclimate variability during the Blake geomagnetic excursion (MIS 5d) deduced from a speleothem record. *Quaternary Science Reviews.* v.102 p.166–180. (2014)
- SCHREIBER, T. «*Measuring Information Transfer*». *Physical Review Letters.* **85** (2): 461–464. [doi:10.1103/PhysRevLett.85.461](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.461). (2000).
- SHEA, A. M.; SMART, F. D. Preliminary study of cosmic rays, geomagnetic field changes and possible climate changes. *Advances in Space Research.* v. 34 p. 420–425. (2004).
- SOBRINHO, J. L. G., 2012, O Sol e o seu interior, Formação Contínua de docentes: Introdução à Astronomia (texto de apoio ao módulo 1), pp. Universidade da Madeira (2012).
- STAMPER, R., LOCKWOOD, M., WILD, M.N., CLARK, T.D.G., Solar causes of the long-term increase in geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.* 104, 28325-28342 (1999).
- SVALGAARD, L., CLIVER, E.W., Interhourly variability index of geomagnetic activity and its use in deriving the long-term variation of solar wind speed, *J. Geophys. Res.* 112, A10111 (2007).
- TOBIAS, S. “Magnetic Field of Sun” *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, Springer, 505 – 508. (2007).
- VELASCO, V.M., MENDOZA, B., Assessing the relationship between solar activity and some large scale climatic phenomena, *Adv. Space Res.* 42, 866-878 (2008).
- VERSTEEGH, G.J.M., Solar forcing of climate. 2: evidence from the past, *Space Sci. Rev.* 120, 243-286 (2005).
- WOLLIN, G. ERICSON, D.B. RYAN, W.B.F. Magnetism of the Earth and climatic changes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1971; 12: 175–183.
- HARRIS, F.J., On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier Transform, *Proc. IEEE* 66 (1), 51-83 (1978).
- WELCH, P.D., The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms, *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* 15 (2), 70-73 (1967).
- TRÖBS, M., HEINZEL, G., Improved spectrum estimation from digitized time series on a logarithmic frequency axis, *Measurement* 39, 120-129 (2006).

- SCHULZ, M., STATTEGGER, K., SPECTRUM: Spectral analysis of unevenly spaced paleoclimatic time series, *Comput. Geosci.* 23 (9), 929-945 (1997).
- SCHWABE, H. Beobachtungen von Sonnenflecken im Jahre 1840 von Herrn Hofrath Schwabe. *Astrm. Nachr.* 18, 149–152, (1841).
- SCHWABE, H. Solar observations during 1843. *Astron. Nachr.* 21, 283– 286, (1844).
- SCHWABE, H. his Sun-spot drawings. *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* 36, 297–299, (1876).
- TARDUNO, J. A. “Geodynamo, Solar Wind, and Magnetopause 3.4 to 3.45 Billion Years Ago”. *Science*, 327 (5970), pp. 1238-1240 (2010).
- USOSKIN, I.G., MURSULA, K.K. Long-term solar cycle evolution: review of recent developments. *Solar Phys.* 218, 319–343, 2003.
- USOSKIN, I.G., MURSULA, K., KOVALTSOV, G.A. Lost sunspot cycle in the beginning of Dalton minimum: new evidence and consequences. *Geophys. Res. Lett.* 29, 36–39, 2002.