

**UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

ADILSON EDUARDO SPAGIARI

**Extração automática e análise de características de manchas
solares do ciclo solar 23**

São Paulo
2016

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

ADILSON EDUARDO SPAGIARI

**Extração automática e análise de características de manchas
solares do ciclo solar 23**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte das exigências para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração em Engenharia da Computação.

Orientadora: Prof^ª. Dr^a. Adriana Benetti Marques Valio

Coorientador: Prof. Dr. Mauricio Marengoni

São Paulo
2016

S733e Spagiari, Adilson Eduardo
Extração automática e análise de características de
manchas solares do ciclo solar 23. / Adilson Eduardo
Spagiari - 2017.
72f.: il., 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2017.
Orientadores: Dra. Adriana Benetti Marques Valio
Bibliografia: f. 61-63

1. Manchas solares. 2. Ciclo solar 23. 3. Processamento
de imagem. Título.

CDD 523.74

À minha amada esposa, *Aurea Cristina de Souza*, e a sua mania de me fazer uma pessoa melhor a cada dia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela oportunidade de estar aqui e a meus pais, Neide e Ademir, que me ensinaram e me ensinam não só com palavras, mas também com exemplos.

A minha esposa, Aurea, por todo apoio e incentivo incondicionais.

A minha irmã, Amanda, por todos os momentos felizes que passamos juntos.

A minha orientadora Prof^a. Dr^a. Adriana Valio por toda ajuda, amizade, paciência, orientação e por não ter desistido de mim.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Mauricio Marengoni pela ajuda, apoio, incentivo e contribuições.

Ao corpo técnico e docente da Universidade Presbiteriana Mackenzie, em especial os professores com quem tive o privilégio de participar das aulas.

A todos os meus amigos, em especial Wander Lairson Costa e Israel Florentino dos Santos, que estiveram comigo desde o início dessa caminhada.

Agradeço ao projeto SOHO pelo fornecimento de dados, sem os quais este trabalho não seria possível.

RESUMO

As manchas solares são regiões mais frias, portanto mais escuras que surgem na superfície do Sol na região denominada fotosfera, camada visível mais baixa da atmosfera solar, sendo esse fenômeno associado às mudanças no campo magnético solar e ao seu ciclo de atividade. As manchas solares são a manifestação mais notável da variação da atividade solar, sendo que o número de manchas varia ao longo dos anos, aumentando e diminuindo segundo um ciclo de aproximadamente 11 anos. Fenômenos relacionados à atividade solar podem causar desde interferências nas comunicações terrestres até a alteração na temperatura global.

São conhecidas algumas correlações entre as características físicas das manchas solares e o campo magnético. Na década de 1990, observou-se uma relação não linear entre o campo magnético e o brilho da mancha solar. Trabalhos mais recentes apontaram uma relação entre a intensidade do campo magnético e a área da mancha solar. Também, em estudos recentes, foi investigada a evolução das características das manchas solares ao longo do tempo.

O presente trabalho tem como objetivo analisar as características físicas das manchas solares do ciclo solar 23. Para o processo de detecção e de extração das manchas solares, bem como para a análise de suas características, serão empregadas técnicas de visão computacional, por meio das imagens em luz visível e do magnetograma do instrumento MDI (Michelson Doppler Imager) do telescópio espacial SOHO (Solar and Heliospheric Observatory). Também serão analisados o fluxo de irradiância solar, número de manchas, quantidade de grupos, área, temperatura, brilho e campo magnético médio das manchas solares. Com base nos dados obtidos, verificou-se o comportamento dessas características e as relações entre estas ao longo dos períodos de mínimo e de máximo solar.

Foram detectadas e analisadas 32.317 manchas solares, com longitude entre -40° e 40° , ao longo de todo o ciclo solar. A série diária do número de Wolf foi comparada com os dados do centro de pesquisa SIDC, e apresentou uma correlação de 95%. Além disso foram encontradas também, correlações não lineares entre área e campo magnético extremo, assim como entre temperatura e área, e finalmente entre temperatura e campo magnético. Verificou-se também que estas correlações apresentaram variações pequenas ao longo do ciclo solar 23, e que as manchas solares maiores, mais frias e com campos magnéticos mais intensos ocorrem mais frequentemente durante períodos de máxima atividade.

Palavras-chave: *manchas solares, ciclo solar 23, processamento de imagem.*

ABSTRACT

Sunspots are cooler regions, therefore darker regions that appear on the surface of the Sun known as photosphere. This phenomenon is associated to changes in the solar magnetic field and its cycle of activity. Sunspots are the main manifestation of the variation of the solar activity, with the number of spots varying over the years, increasing and decreasing by a cycle of approximately 11 years. Phenomena related to solar activity can interfere in terrestrial communications and also change in global temperature.

Some correlations are known between the physical characteristics of sunspots and the magnetic field. In the 90's a non-linear relationship was observed between the field and the brightness of the sunspot. More recent work has pointed out a relation between the intensity of the magnetic field and the area of the sunspot. Here, we analyze the correlation between these characteristics of sunspots and their evolution over time are also investigated.

This work analyzed the physical characteristics of sunspots the solar cycle 23, detected using computer vision techniques. Images in visible light and magnetograms of the MDI instrument (Michelson Doppler Imager) of the space telescope SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) were used in the process of detecting sunspots and the extraction of their characteristics. The flow of solar irradiance, number of spots, number of sunspot groups, area, temperature, brightness and the average magnetic field of sunspots. Based on the sunspot data, the behavior of these characteristics and relationships between them were verified along the periods of solar minimum and maximum.

We detected and analyzed 32,317 sunspots, with longitude between -40° and 40° , throughout the entire solar cycle. The daily Wolf number series was compared with data from the SIDC research center, and showed a 95% correlation. In addition, nonlinear correlations were found regarding area and extreme magnetic field, as well as regarding temperature and area, and finally regarding temperature and magnetic field. It was also found that these correlations presented small variations over the time of the solar cycle 23, and that sunspots larger, colder and with stronger magnetic fields occur more frequently during periods of maximum activity.

Keywords: *sunspots, solar cycle 23, image processing.*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO	4
3	FÍSICA SOLAR	5
3.1	Atividade solar	5
3.2	Número de Wolf	6
3.3	Detecção automática de manchas solares	7
3.4	Coordenadas heliográficas	8
3.5	Ângulo heliográfico	9
3.6	Lei de Stefan-Boltzmann e a temperatura da mancha solar	9
4	VISÃO COMPUTACIONAL	11
4.1	<i>Blob</i>	11
4.2	Binarização	11
4.3	Morfologia matemática	12
4.3.1	Elemento estruturante	12
4.3.2	Erosão	13
4.3.3	Dilatação	14
4.3.4	Abertura	15
4.3.5	Fechamento	16
4.3.6	Transformadas <i>top-hat</i> e <i>bottom-hat</i>	17
5	METODOLOGIA	19
5.1	Algoritmo de detecção de manchas solares	20
5.2	Algoritmo de detecção de grupos de manchas solares e localização das manchas solares	23
5.3	Cálculo da intensidade central do Sol	26
5.4	Cálculo da área da mancha solar	26
5.5	Cálculo da intensidade e da temperatura da mancha solar	26
5.6	Leitura do campo magnético da mancha solar	27
6	RESULTADOS	28
6.1	Detecção de manchas solares	32

6.2	Ciclo 23	33
6.2.1	Histogramas	38
6.2.2	Correlações entre as características físicas das manchas solares . . .	47
7	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

As manchas solares foram observadas por meio de telescópios pela primeira vez por Galileu Galilei, entre outros, por volta de 1610 (EDDY, 1976). Deste então elas vêm sendo estudadas em detalhes, como sua quantidade no disco solar e sua área (HATHAWAY, 2015). Em 1995, a NASA lançou em órbita o satélite SOHO com a missão de observar o Sol utilizando diferentes instrumentos, incluindo o MDI (*Michelson Doppler Imager*), uma câmera CCD de 1024×1024 pixels, que observa o Sol nos comprimentos de onda do visível e detecta as manchas solares sem a interferência da atmosfera terrestre com alta resolução espacial (SCHERRER; HOEKSEMA; BUSH, 1991).

A observação contínua do Sol desde o século XVII, especificamente das manchas solares, revelou um comportamento cíclico da atividade solar. Oscilando entre períodos com poucas manchas e períodos de muitas manchas solares em intervalos de aproximadamente onze anos (HATHAWAY, 2015). Nos períodos de alta atividade solar, fenômenos como explosões solares e ejeções de massa coronal são frequentes e seus efeitos podem ocasionar inúmeros distúrbios em nosso planeta, como alterações temporárias no campo magnético, assim como afetar sistemas terrestres, tais como linhas de transmissão de energia elétrica, sistema de telecomunicação, missões espaciais, satélites artificiais, dentre outras (COLAK; QAHWAJI, 2007). Além disso, o ciclo de atividade solar de aproximadamente onze anos e as pequenas alterações na irradiância solar podem de uma forma menos imediatista influenciar o clima na Terra. Por exemplo, o mínimo de Maunder foi um período de atividade solar praticamente nula que comprovadamente influenciou o clima terrestre, causando uma miniera do gelo na primeira metade do século XVII (EDDY, 1976; AHLUWALIA; YGBUHAY, 2012).

O estudo do Sol, em particular das manchas solares, é motivado pelo fato destas serem a manifestação mais básica do campo magnético solar, as quais estão intrinsicamente ligadas ao ciclo solar. Técnicas de visão computacional para segmentação e extração automática de manchas solares, bem como análise de suas características, foram aplicadas nos últimos anos com altos níveis de correlação aos índices oficiais. Em 2003, Zharkova et al. (2003) utilizaram o algoritmo de detecção de borda de Canny para descobrir as manchas com base em seus contornos. Logo em seguida, em 2005, Zharkov et al. (2005) apresentaram uma técnica de detecção de manchas solares utilizando o algoritmo de Sob-

bel, filtros morfológicos, binarização e um processo de pré-processamento de imagem para remoção de ruídos e atenuação do efeito do escurecimento do limbo solar. Em 2007, Colak e Qahwaji (2007) argumentaram sobre a utilização de dados obtidos por meio do emprego de técnicas de visão computacional para a previsão do clima espacial. No ano seguinte Curto, Blanca e Martínez (2008) apresentaram um algoritmo com base em técnicas de binarização e morfologia matemática. Em 2012, Spagiari et al. (2012) desenvolveram um algoritmo inspirado no artigo de Curto, Blanca e Martínez (2008) para segmentação de manchas solares utilizando as imagens do observatório SOHO.

As características das manchas solares e suas relações foram estudadas ao longo dos anos. Em 1970, Dicke (1970) descreveu a temperatura de uma mancha solar em função do quadrado de seu campo magnético. Nos últimos anos em especial, foram feitos diversos trabalhos com o objetivo de investigar o comportamento das características das manchas solares ao longo do tempo. Em 1992, Kopp e Rabin (1992) pesquisaram a relação entre a intensidade do campo magnético e a temperatura na região da mancha solar encontrando uma relação não linear entre a intensidade do campo magnético e o brilho da mancha solar. Estes resultados vão ao encontro dos resultados obtidos por Dicke (1970). Penn e Livingston (2006) analisaram cerca de 900 manchas solares no período entre 1998 e 2005, observando mudanças no campo magnético e na temperatura das manchas, os resultados atingidos reafirmaram os resultados obtidos por Kopp e Rabin (1992).

Em 2013, Javaraiah (2013) investigou a variação da área das manchas solares. No trabalho, foram analisados dados de grupos de manchas solares de 1874 até 2011, o que ocasionou a descoberta de indícios de uma variação mais abrangente na atividade solar, um possível ciclo de aproximadamente quarenta e quatro anos. O autor também escreveu sobre a importância do estudo das características das manchas solares ao longo do tempo, pois estas podem revelar pistas sobre o funcionamento do dínamo solar. No mesmo ano, Toma et al. (2013) publicaram o resultado do seu estudo da evolução das áreas das manchas solares sobre os ciclos solares 22 e 23, concluindo que houve uma diminuição significativa na área das manchas solares do ciclo 23 em comparação com o ciclo 22. Os autores argumentaram que essa diminuição pode ser indício de mudanças no dínamo solar.

Neste trabalho serão empregadas as técnicas de visão computacional para detecção de manchas e extração automáticas de características de manchas solares em imagens do

disco solar. Serão utilizadas as imagens do instrumento MDI do satélite SOHO em luz branca e o magnetograma, para extração das características relevantes das manchas solares detectadas, tais como: área, temperatura, contraste e intensidade do campo magnético. Ressalta-se que a pesquisa será realizada para todo o ciclo solar 23 e buscará analisar a evolução temporal dos parâmetros físicos das manchas e também aferir se há alterações nas correlações conhecidas entre essas características ao decorrer do ciclo solar. Neste sentido, Toma et al. (2013) afirmam que o estudo das manchas solares e a sua relação com o ciclo solar são importantes, pois fornecem pistas sobre o funcionamento do dínamo solar, sendo este o mecanismo de geração do campo magnético do Sol.

2 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é utilizar ferramentas computacionais para extrair manchas solares, bem como para analisar características do Sol e das manchas solares ao longo de todo o ciclo solar 23. Com base nas informações coletadas serão verificadas as correlações conhecidas entre as características das manchas solares e se essas características sofrem alterações nos diferentes períodos do ciclo solar. Esta análise detalhada e abrangente do ciclo solar 23 fornecerá um melhor entendimento do campo magnético solar e de seus mecanismos de geração.

3 FÍSICA SOLAR

3.1 Atividade solar

A atividade solar envolve os mais energéticos fenômenos do Sistema Solar. O Sol possui períodos de alta e de baixa atividade apresentando um comportamento cíclico. O ciclo solar mais evidente é de aproximadamente onze anos, quando o Sol parte de um período de baixa atividade com poucas manchas e evolui para um período de alta atividade com muitas manchas em sua superfície e depois volta à baixa atividade gradativamente. Dados históricos sobre a atividade solar apresentam indícios de que existem outros ciclos mais longos ainda não totalmente compreendidos, como o ciclo de Gleissberg que evidencia duas componentes diferentes a primeira variando entre 90 e 100 anos e a segunda entre 50 e 60 anos (HATHAWAY; WILSON; REICHMANN, 1994; JAVARAIAH, 2013; HATHAWAY, 2015). Há indícios que a atividade solar influencia diretamente no clima terrestre podendo causar alteração na temperatura média anual e também causar invernos mais rigorosos e verões mais quentes e longos (EDDY, 1976; AHLUWALIA; YGBUHAY, 2012).

O campo magnético do Sol é gerado pelo processo físico conhecido como dínamo solar, e influi diretamente na atividade solar, em períodos de baixa atividade as linhas de campo magnético solar apresentam a configuração de um dipolo e a distribuição dos campos é mais homogênea em toda a superfície solar. Porém, em períodos de máxima atividade, esses campos ficam desordenados rearranjando-se localmente, formando regiões com altas concentrações de campo magnético que potencialmente podem liberar energia. Essas concentrações afetam o fluxo convectivo do plasma logo abaixo da fotosfera, camada visível mais baixa da atmosfera solar. Como o plasma tem o seu ciclo de convecção interrompido, a fotosfera não é eficientemente aquecida, assim o plasma confinado na fotosfera pelos campos magnéticos presentes na região formam manchas escuras no disco solar. As regiões são escuras, segundo a lei de Stefan-Boltzmann, porque o fluxo radiante de um corpo é descrito em função da temperatura do corpo, logo as regiões mais frias se apresentam menos brilhantes. As manchas solares geralmente apresentam duas regiões, uma região central mais escura e uma periférica mais clara denominadas umbra e penumbra respectivamente (HATHAWAY; WILSON; REICHMANN, 1994). Como pode ser visto na Figura 1.

A observação contínua das manchas solares comprovou que o Sol possui rotação diferencial, sendo que a região do equador solar gira um pouco mais rápido que os polos. Essa peculiar forma de rotação do Sol causa lentamente a torção das linhas de campo magnético até o ponto onde as configurações originais não se sustentam e os rearranjos de campos magnéticos acontecem, causando, assim, o ciclo de atividade solar de aproximadamente onze anos. O ciclo solar de onze anos marca a inversão dos polos magnéticos norte e sul solar, portanto, a cada dois ciclos de onze anos, os polos magnéticos solares voltam a sua configuração original, formando um ciclo de vinte e dois anos (BABCOCK, 1961). Na Figura 2 pode-se ver claramente o ciclo de onze anos por meio da média diária da área das manchas solares.

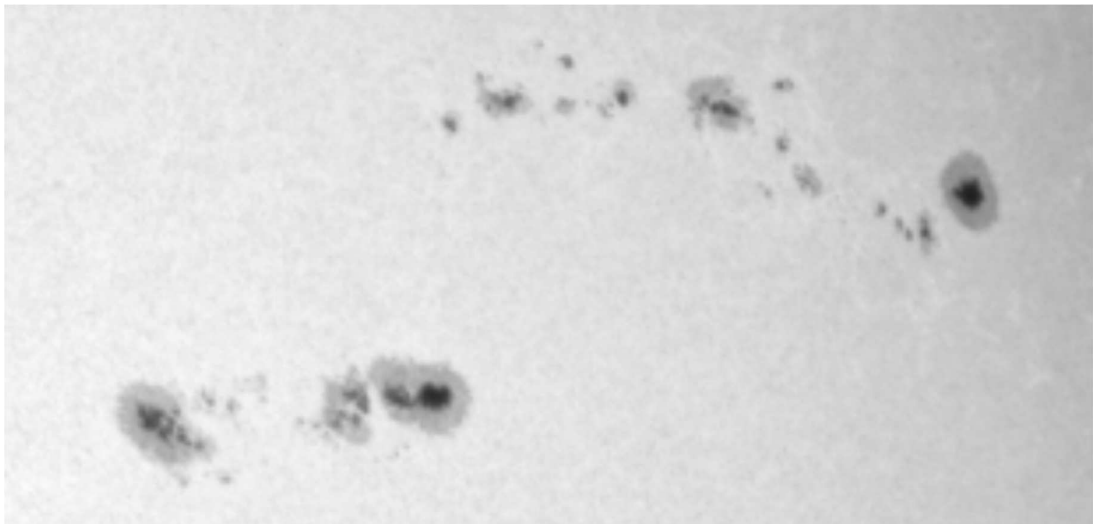


Figura 1: Imagem de regiões ativas no disco solar.

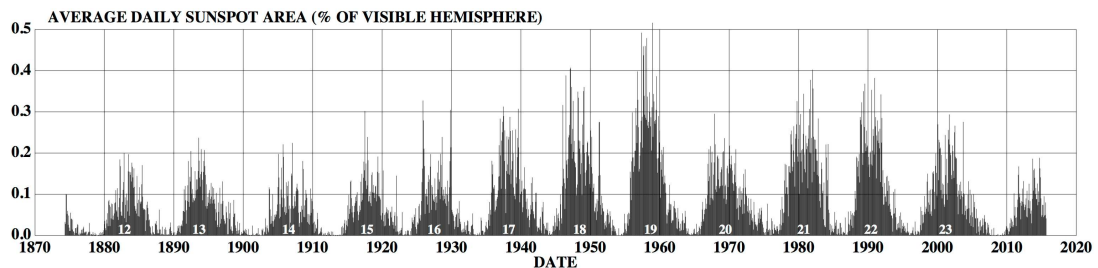


Figura 2: Série histórica diária da média da área das manchas solares no hemisfério visível do Sol (HATHAWAY, 2015).

3.2 Número de Wolf

O número de manchas solares é o índice mais utilizado no estudo de longo prazo da atividade solar. Rudolf Wolf, em 1961, definiu o número de Wolf como o número relativo de manchas solares, para minimizar os erros de observação causados principalmente pelas diferenças de resolução nos equipamentos óticos utilizados. Para tanto, o número de Wolf impõe um peso maior aos grupos de manchas solares, pois manchas próximas potencialmente compartilham os mesmos campos magnéticos fazendo parte da mesma região ativa, e as regiões ativas são estruturas mais fáceis de serem visualizadas (HATHAWAY, 2015).

O número de Wolf é calculado utilizando a Equação 1, onde o parâmetro k representa a constante do observatório, o parâmetro g é a quantidade de grupos e s representa a quantidade de manchas (HATHAWAY, 2015).

$$R = k(10g + s) \quad (1)$$

3.3 Detecção automática de manchas solares

As manchas solares evoluem e se dissipam nas regiões ativas. Geralmente mais de uma mancha compartilham a mesma região ativa. Esse conglomerado de manchas ligado a uma mesma região ativa é chamado de grupo de manchas. Por fazerem parte de uma mesma região ativa sujeitas à mesma configuração de arranjo de campos magnéticos, essas manchas compartilham características físicas, tais como tempo de vida e localização espacial (CURTO; BLANCA; MARTÍNEZ, 2008). Para estimar corretamente o número de Wolf em um determinado dia de observação, é necessário um método robusto de segmentação das áreas de interesse, no caso, as manchas solares, e um método igualmente confiável para se determinar os grupos de manchas.

Nos últimos anos, algumas técnicas de visão computacional foram aplicadas ao problema de detecção automática de manchas solares, obtendo-se resultados satisfatórios. Zharkov et al. (2005) utilizaram técnicas de processamento de imagens para remover ruídos e detalhes sem interesse e, após o pré-processamento utilizaram o algoritmo de

detecção de borda de Sobel para determinar os pontos candidatos a manchas solares. Depois da detecção de pontos candidatos, o método de Zharkov et al. (2005) utilizou binarização e filtragem morfológica para segmentação das manchas solares obtendo uma alta correlação com os dados do NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Colak e Qahwaji (2007) discutiram a classificação automática das manchas solares em tempo real para previsão de atividade solar. Outra abordagem proposta por Curto, Blanca e Martínez (2008), utilizando imagens do observatório de Ebro, apresentaram uma técnica empregando morfologia matemática na tentativa de detectar todo o perímetro de padrões, às vezes amorfos, das manchas solares.

3.4 Coordenadas heliográficas

O sistema de coordenadas heliográficas descreve a posição de qualquer ponto da esfera solar utilizando latitude e longitude expressas em graus. Observando imagens do disco solar no contexto de visão computacional um ponto qualquer do disco solar é expresso em coordenadas x e y que podem ser convertidas para coordenadas heliográficas cuja latitude é obtida pela Equação 2 e a longitude pela Equação 3, onde x e y são as coordenadas da imagem e r é o raio solar em pixels (THOMPSON, 2002).

$$l = \arcsen\left(\frac{y}{r}\right) \quad (2)$$

$$b = \arcsen\left(\frac{x}{\sqrt{r^2 - y^2}}\right) \quad (3)$$

Para a determinação dos grupos de manchas solares pode ser utilizado o critério de distância, pois a característica de proximidade espacial é um atributo físico compartilhado por manchas solares da mesma região ativa. Sendo assim é aceito e comprovado por amostras estatísticas que manchas com até 6 graus heliográficos de distância umas das outras fazem parte do mesmo grupo (CURTO; BLANCA; MARTÍNEZ, 2008). A Equação 4 apresenta um método para se mensurar a distância de dois pontos conhecidos em coordenadas heliográficas, onde l_1 e b_1 são as coordenadas heliográficas do ponto 1 e l_2 e b_2 são as coordenadas heliográficas do ponto 2.

$$\lambda = \arcsen(\sen(l_1) \times \sen(l_2) + \cos(l_1) \times \cos(l_2) \times \cos(b_2 - b_1)) \quad (4)$$

3.5 Ângulo heliográfico

O ângulo heliográfico, θ , de um determinado ponto de observação P na superfície do Sol é definido como o ângulo entre o vetor normal à superfície no ponto da observação P e a linha de visada (BORRERO; ICHIMOTO, 2011). O ângulo heliográfico de uma mancha solar pode ser calculado pela Equação 5, onde θ é o ângulo heliográfico e l e b são, respectivamente, a latitude e a longitude da mancha solar.

$$\theta = \arccos(\cos(l) * \cos(b)) \quad (5)$$

3.6 Lei de Stefan-Boltzmann e a temperatura da mancha solar

A lei de Stefan-Boltzmann descreve a temperatura de um corpo negro em função da irradiância luminosa de sua superfície. Supondo-se que tanto a fotosfera solar quanto a mancha irradiam como um corpo negro, a temperatura média (T_m) de uma determinada mancha solar é obtida por meio da Equação 6. As constantes h e K_b são, respectivamente, as constantes de Planck e de Boltzmann, T_c é a temperatura da fotosfera solar, $v = c/\lambda$ é a frequência associada ao comprimento de onda, λ , de interesse, f_i é a intensidade média

da mancha dividida pela intensidade central da estrela e c é a constante da velocidade da luz no vácuo (SILVA-VALIO et al., 2010).

$$T_m = \frac{h\nu}{K_b} \left[\ln \left(1 + \frac{e^{\frac{h\nu}{K_b T_c}} - 1}{f_i} \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

4 VISÃO COMPUTACIONAL

Neste capítulo descrevemos de maneira introdutória alguns conceitos básicos de visão computacional e as operações básicas da morfologia matemática.

4.1 *Blob*

Blob em computação são áreas de imagens que compartilham características iguais ou próximas próximas entre elas. A Figura 3 é um exemplo de imagem com alguns *blobs* em que a característica compartilhada é a intensidade dos pixels. Os pixels de interesse possuem valores próximos a 255 em escala de níveis de cinza (GONZALEZ; WOODS, 2010).



Figura 3: Exemplo de imagem, com alguns *blobs*, gerada pelo algoritmo de detecção de manchas solares.

4.2 Binarização

A binarização é uma técnica de transformação de intensidade dos pixels baseada na vizinhança mínima. A vizinhança mínima de um pixel compreende apenas ele próprio. O objetivo da binarização é converter uma imagem em níveis de cinza em uma imagem em preta e branca. A imagem binária $g(x, y)$ é dada por

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(x, y) > T \\ 0 & \text{se } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (7)$$

A Equação 7, representa a imagem binarizada ($g(x, y)$), onde $f(x, y)$ é a imagem original, e T é o parâmetro de corte. Os pixels de intensidades menores ou iguais a T serão transformados em 0 (preto) e os maiores serão transformados em 1 (branco) (GONZALEZ; WOODS, 2010).

4.3 Morfologia matemática

Em processamento digital de imagem, a morfologia matemática é uma técnica baseada na teoria dos conjuntos possuindo duas operações básicas: a erosão e a dilatação, as quais permitem diversas aplicações, tais como segmentação, filtragem e realce. No contexto de segmentação de imagens a morfologia matemática pode ser aplicada de forma a extrair, realçar ou desprezar características de grupos de pixels com base em outro conjunto predefinido de pixels chamado de elemento estruturante (GONZALEZ; WOODS, 2010).

No âmbito da morfologia matemática, as imagens são referidas como um conjunto de pixels. Por exemplo, em uma imagem binária, os pixels brancos (ou pretos) formam um conjunto de números inteiros da ordem de Z^2 , em que cada elemento do conjunto representa o vetor posição do pixel (x, y) . No caso de imagens em escala de cinza, de forma análoga ao exemplo anterior, cada pixel é representado por um conjunto de números inteiros da ordem de Z^3 , em que cada elemento do conjunto representa o vetor posição e a intensidade discreta de um pixel (x, y, c) (GONZALEZ; WOODS, 2010).

4.3.1 Elemento estruturante

Em morfologia matemática, o conceito de elemento estruturante é fundamental, pois é a base para todas as operações morfológicas. Elemento estruturante é geralmente um pequeno conjunto de pixels ou subimagem utilizado para examinar uma imagem com o objetivo de realçar, preservar ou descartar características de interesse (GONZALEZ;

WOODS, 2010). A Figura 4 mostra exemplos de elementos estruturantes e suas representações na forma de matrizes, cada quadrado cinza representa um pixel do elemento estruturante, e o quadrado com um ponto central representa o pixel âncora do elemento estruturante. A escolha da forma e do tamanho do elemento estruturante é muito importante no processamento de imagem utilizando morfologia matemática. Busca-se uma combinação de tamanho e forma de elemento estruturante com a intenção de se alcançar objetivos desejados no processamento da imagem.

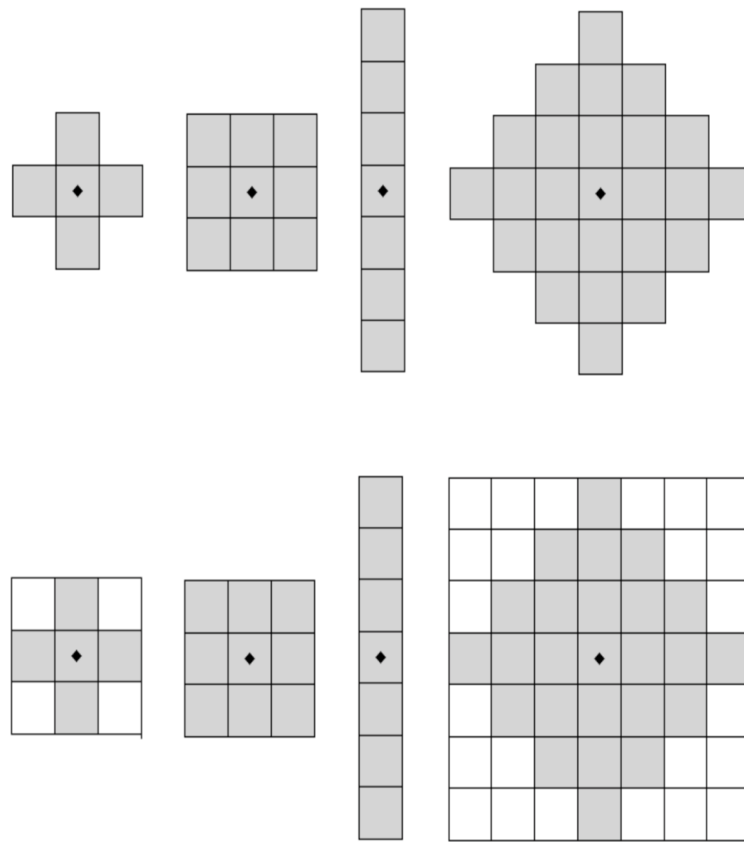


Figura 4: Acima, exemplos de elementos estruturantes e, abaixo, representação desses elementos estruturantes em matrizes (GONZALEZ; WOODS, 2010).

4.3.2 Erosão

Sendo uma imagem bidimensional definida pelo conjunto de pixels A e um elemento estruturante B , ambos conjuntos de Z^2 . A erosão é o conjunto de pixels da imagem que satisfazem à Equação 8.

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (8)$$

Dessa forma, a erosão de A por B é o conjunto de todos os pixels em z , sendo que B transladado por z está contido em A . Em outras palavras, sendo A e B matrizes, a operação de erosão é a convolução de B em A , onde a erosão de um pixel (x, y) é valor mínimo dentre seus vizinhos que pertencem ao elemento estruturante B . Isso faz com que padrões da imagem que não atendam ao padrão imposto pelo elemento estruturante sejam diminuídos. A imagem da Figura 5 mostra um exemplo da operação de erosão sobre uma imagem de uma conexão *wire-bond*. (GONZALEZ; WOODS, 2010).

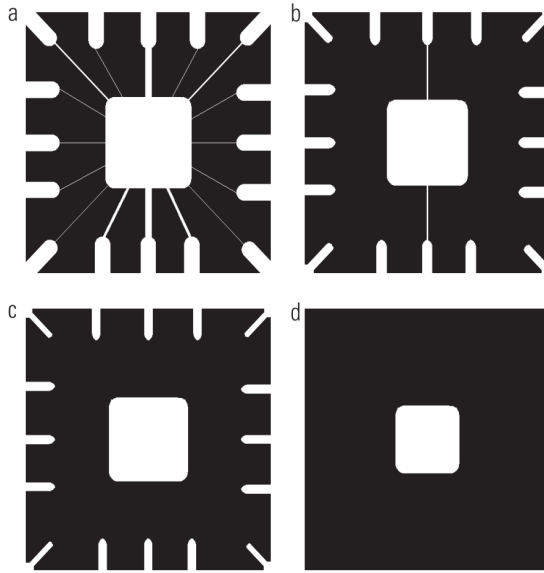


Figura 5: Exemplo de erosão. (a) Imagem binária de 486×486 pixels de uma conexão *wire-bond*; (b), (c) e (d) Imagens erodidas por elemento estruturante quadrado de tamanhos 11×11 , 15×15 e 45×45 respectivamente (GONZALEZ; WOODS, 2010).

4.3.3 Dilatação

Sendo uma imagem bidimensional definida pelo conjunto de pixels A e um elemento estruturante B , ambos conjuntos de Z^2 . A dilatação é o conjunto de pixels da imagem que satisfazem a Equação 9.

$$A \oplus B = \left\{ z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset \right\} \quad (9)$$

Dessa forma, a erosão de A por B é o conjunto de todos os pixels em z , sendo que a reflexão de B , transladada por z , tenha pelo menos um pixel contido em A . Em outras palavras, sendo A e B matrizes, a operação de dilatação é a convolução de B em A , onde a dilatação de um pixel (x, y) é o valor máximo dentre seus vizinhos que pertencem ao elemento estruturante B , fazendo com que padrões da imagem que não atendam ao padrão imposto pelo elemento estruturante sejam expandidos. A imagem da Figura 6 mostra um exemplo da operação de dilatação sobre uma imagem contendo um texto em baixa dilatação (GONZALEZ; WOODS, 2010).

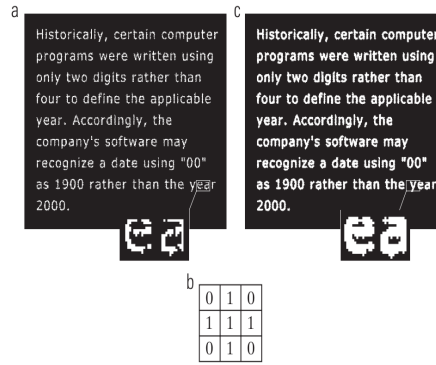


Figura 6: Exemplo de dilatação. (a) Imagem original; (b) Elemento estruturante; (c) Dilatação da imagem a pelo elemento estruturante em b . Observa-se na imagem dilatada e ampliada que falhas na imagem original foram preenchidas (GONZALEZ; WOODS, 2010).

4.3.4 Abertura

Descrita matematicamente pela Equação 10 é a combinação da operação de erosão seguida da operação de dilatação utilizando o mesmo elemento estruturante.

Esta operação resulta na suavização de bordas eliminando saliências finas e rompendo istmos, pois pequenas porções de pixels não compatíveis são suavemente diminuídas para se tornarem compatíveis ao padrão do elemento estruturante. Os painéis (b), (c), (d) e

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (10)$$

(e) da Figura 7 mostram um exemplo de abertura por meio de suas operações primitivas, erosão seguida de dilatação (GONZALEZ; WOODS, 2010).

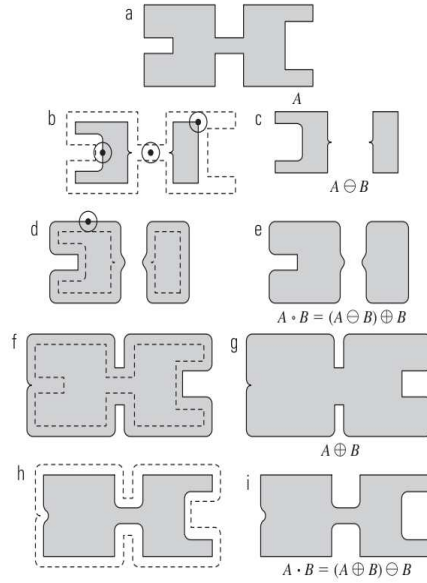


Figura 7: Exemplo de abertura e fechamento. (a) Imagem original; (b) e (c) Exemplo de erosão; (d) e (e) Exemplo de abertura; (f) e (g) Exemplo de dilatação; (h) e (i) Exemplo de fechamento. É possível observar os passos das operações de abertura e fechamento e os efeitos produzidos. O elemento estruturante está representado como um círculo com um ponto no centro (GONZALEZ; WOODS, 2010).

4.3.5 Fechamento

Descrito matematicamente pela Equação 11, combina a operação de dilatação seguida da operação de erosão utilizando o mesmo elemento estruturante.

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (11)$$

Esta operação resulta no preenchimento de pequenas áreas descontínuas, elimina pequenos buracos e completa pequenas falhas no contorno, pois pequenas porções de pixels não compatíveis são suavemente expandidas para se tornarem compatíveis ao padrão do elemento estruturante. Os painéis (f), (g), (h) e (i) da Figura 7 mostram um exemplo de fechamento por meio de suas operações primitivas, dilatação seguida de erosão (GONZALEZ; WOODS, 2010).

4.3.6 Transformadas *top-hat* e *bottom-hat*

São a combinação de subtração de imagem com as operações de abertura e fechamento. Geralmente, são utilizadas na remoção de estruturas que se destacam de seu fundo com base no elemento estruturante. A *top-hat* atua sobre estruturas claras com fundo escuro, enquanto a *bottom-hat* atua sobre estruturas escuras com fundo claro. As Equações 12 e 13 descrevem matematicamente as transformadas *top-hat* e *bottom-hat*, respectivamente.

$$T_{hat}(f) = f - (f \circ b) \quad (12)$$

$$B_{hat}(f) = (f \bullet b) - f \quad (13)$$

As Figuras 8 e 9 mostram exemplos da aplicação da transformada *top-hat* e *bottom-hat* respectivamente (GONZALEZ; WOODS, 2010).



Figura 8: Exemplo de transformada *top-hat*. À esquerda, a imagem original e à direita, o resultado da transformada *top-hat* (INTEL; GARAGE, 1999)



Figura 9: Exemplo de transformada *bottom-hat*. À esquerda, a imagem original e à direita, o resultado da transformada *bottom-hat* (INTEL; GARAGE, 1999)

5 METODOLOGIA

Este trabalho utiliza como dados de entrada imagens do instrumento MDI (Michelson Doppler Imager) do satélite espacial SOHO (Solar and Heliospheric Observatory). O MDI é equipado com um sensor CCD de 1024×1024 pixels possibilitando a realização de diversos tipos de observações, tendo como principais produtos a imagem do disco solar em luz branca (intensidade contínua) e o magnetograma, uma representação pictográfica da variação espacial da intensidade do campo magnético solar (SCHERRER; HOEKSEMA; BUSH, 1991). Pode-se ver um exemplo dessas imagens na Figura 10. Ambas as imagens têm suas séries históricas disponíveis no site do projeto SOHO em formato FITS (Flexible Image Transport System), sendo este o formato utilizado na Astronomia para troca de imagens e conteúdos.

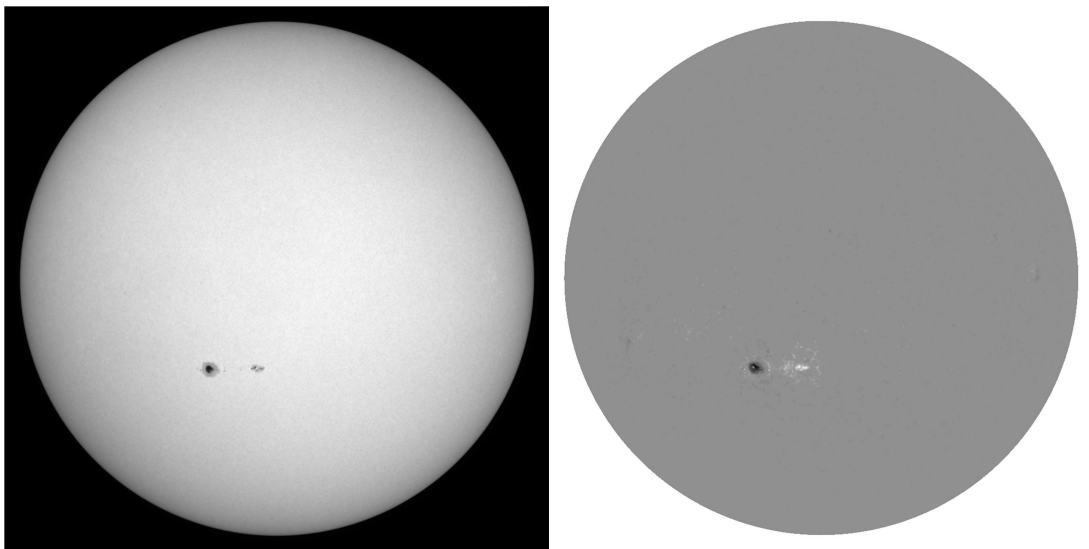


Figura 10: Imagem do Sol em luz visível do instrumento MDI no telescópio SOHO (à esquerda) e o magnetograma (à direita).

Para a extração das informações pretendidas para um determinado dia é necessário utilizar o par de imagens da luz visível e do magnetograma. Estas imagens devem ser separadas pelo menor tempo possível, visto que as duas observações não ocorrem no mesmo instante. Na base de imagens do SOHO, essas duas observações têm geralmente um intervalo de trinta segundos. A imagem em luz branca é convertida para o formato JPG para ser utilizada nos processos de visão computacional, e sua original em formato FITS que é utilizada como mídia de informação complementar, pois o formato FITS

mantém informações importantes sobre o momento da observação, bem como o valor absoluto de intensidade dos pixels, diferente do formato JPG que guarda apenas o valor relativo de intensidade dos pixels. O magnetograma também é utilizado como uma mídia auxiliar de informação, dele são extraídos dados dos campos magnéticos das regiões das manchas.

A Figura 11 mostra o macrofluxo do programa construído para extração das manchas solares e suas características. O programa tem como entrada uma lista de pares de imagens, sendo a primeira imagem o disco solar completo em luz visível, e a segunda, o magnetograma. Como parâmetro de saída, é produzido um vetor com as características extraídas do Sol no instante da observação e de cada mancha solar detectada.

Foram extraídos os indicadores usando amostras diárias ao longo de todo o ciclo solar 23, que se estendeu de maio de 1996 até abril de 2008. Os indicadores extraídos foram número de Wolf e os parâmetros das manchas solares como localização, área, intensidade relativa, temperatura, campo magnético e intensidade central do disco solar no instante da observação. O vetor de características de cada conjunto de imagens foi extraído e armazenado em forma de série temporal, sendo a base resultante dividida em quatro períodos para a análise. Cada período representará uma etapa no ciclo solar. O primeiro período vai do início do ciclo solar até o começo do período de alta atividade solar, a segunda etapa, do início do período de alta atividade até o ápice da atividade solar, o terceiro período do declínio do ápice até o fim do período de alta atividade solar e finalmente o quarto intervalo será o ponto de baixa atividade até o fim do ciclo solar 23. As correlações entre as características das manchas solares e o campo magnético solar foram analisadas e comparadas no próximo capítulo.

5.1 Algoritmo de detecção de manchas solares

Para detecção de manchas solares foi utilizado um algoritmo com base em binarização e morfologia matemática inspirado no método utilizado por Curto, Blanca e Martínez (2008) e adaptado para as imagens do observatório SOHO. O algoritmo de detecção de manchas solares é descrito por um fluxograma mostrado na Figura 14. O algoritmo de detecção de manchas solares recebe como parâmetro uma imagem do disco solar completo em formato JPG e retorna uma imagem processada binária de mesmo tamanho que a

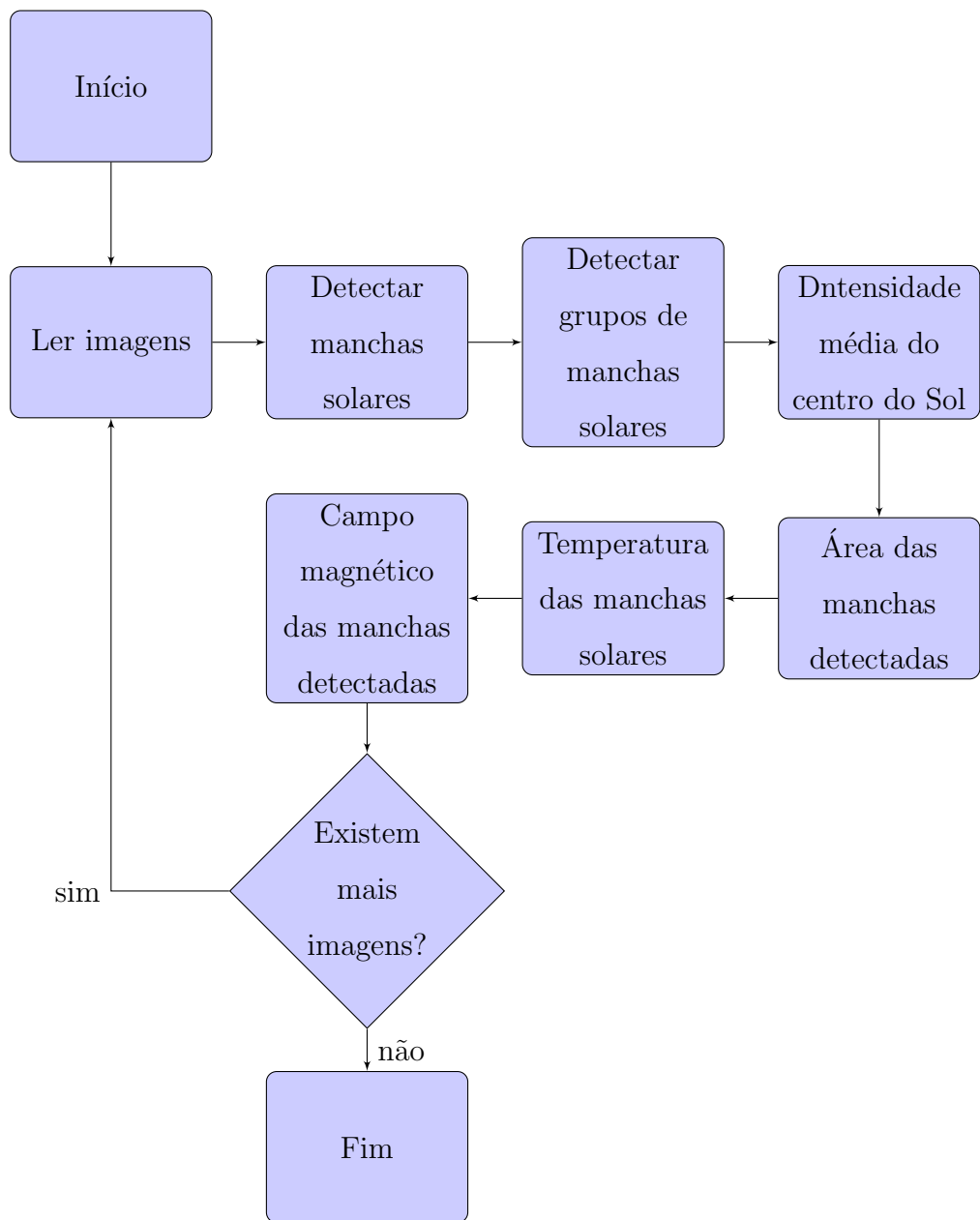


Figura 11: Fluxo principal de execução.

original, sendo que os pixels detectados como pertencentes a alguma mancha solar são brancos, e os pixels detectados como não pertencentes a nenhuma mancha solar são pretos. A Figura 12 mostra como exemplo a área de interesse da imagem original, enquanto a Figura 13 exemplifica o retorno do algoritmo

Os passos principais para detecção das manchas solares mostrados na Figura 14, são a transformada *bottom-hat*, a binarização e a abertura morfológica. Para a realização dessas operações, são necessários alguns parâmetros. As operações morfológicas precisam do formato e do tamanho do elemento estruturante (*BSS*). A forma de elemento estruturante utilizada foi a elíptica, e o tamanho ideal do elemento estruturante é encontrado pelo algoritmo, iniciando do tamanho mínimo de 3×3 pixels. O parâmetro ideal de corte para binarização (*BT*) também é estimado pelo algoritmo de detecção de manchas solares. O algoritmo calcula o parâmetro de corte para binarização (*BT*) ideal de forma iterativa incrementado seu valor a cada iteração, e a condição de parada do algoritmo se baseia na taxa de decaimento de pixels, portanto se P é o número de pixels pretos encontrados ao binarizar uma imagem com o parâmetro de corte BT , e n é o passo do algoritmo, então o processo se interrompe quando $P_n - P_{n-1} < MA$. Valores para MA próximos de zero aumentam a ocorrência de falsos positivos e altos valores aumentam a ocorrência de falsos negativos. O parâmetro MA para as imagens do telescópio SOHO foi estimado empiricamente utilizando uma amostra diária de imagens para o ano de 2001 e os dados de referência do centro de pesquisas SIDC.



Figura 12: Área de interesse de uma imagem do disco solar.

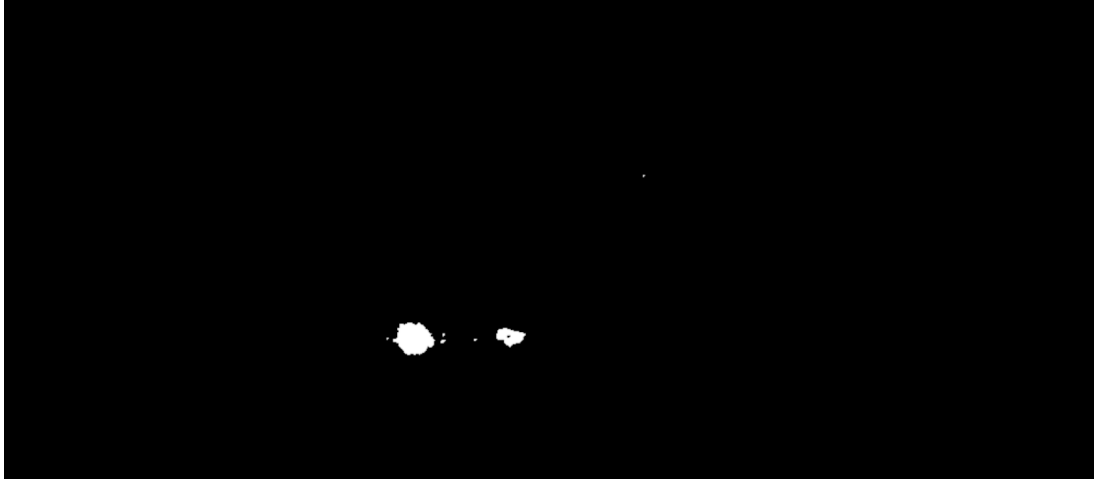


Figura 13: Área de interesse de uma imagem processada pelo algoritmo de detecção de manchas solares.

5.2 Algoritmo de detecção de grupos de manchas solares e localização das manchas solares

O algoritmo de detecção de grupo de manchas solares é aplicado imediatamente após a detecção de manchas solares. A Figura 15 detalha os passos de sua execução. O algoritmo recebe como entrada a imagem do disco solar completo em formato FITS, e fornece como saída uma imagem binária no qual todos os pixels pertencentes às manchas solares são brancos e os não pertencentes são pretos. O centro e o raio do Sol são lidos do cabeçalho do arquivo FITS. A imagem binária é processada por um algoritmo detector de *blobs* que detecta e calcula a posição central de cada mancha individualmente. Após a detecção de *blobs*, foi implementado um filtro para remover pequenas porções de pixels desconexos com o objetivo de eliminar falsos positivos. As coordenadas do centro x e y da mancha solar na imagem são convertidas para coordenadas heliográficas utilizando as Equações 2 e 3. Por fim, são calculadas as distâncias em graus entre todas as manchas. Manchas com menos de 6 graus de distância uma das outras fazem parte de um mesmo grupo de manchas solares. O retorno desse algoritmo é o número de grupos detectado e um vetor contendo todas as manchas detectadas, bem como suas posições.

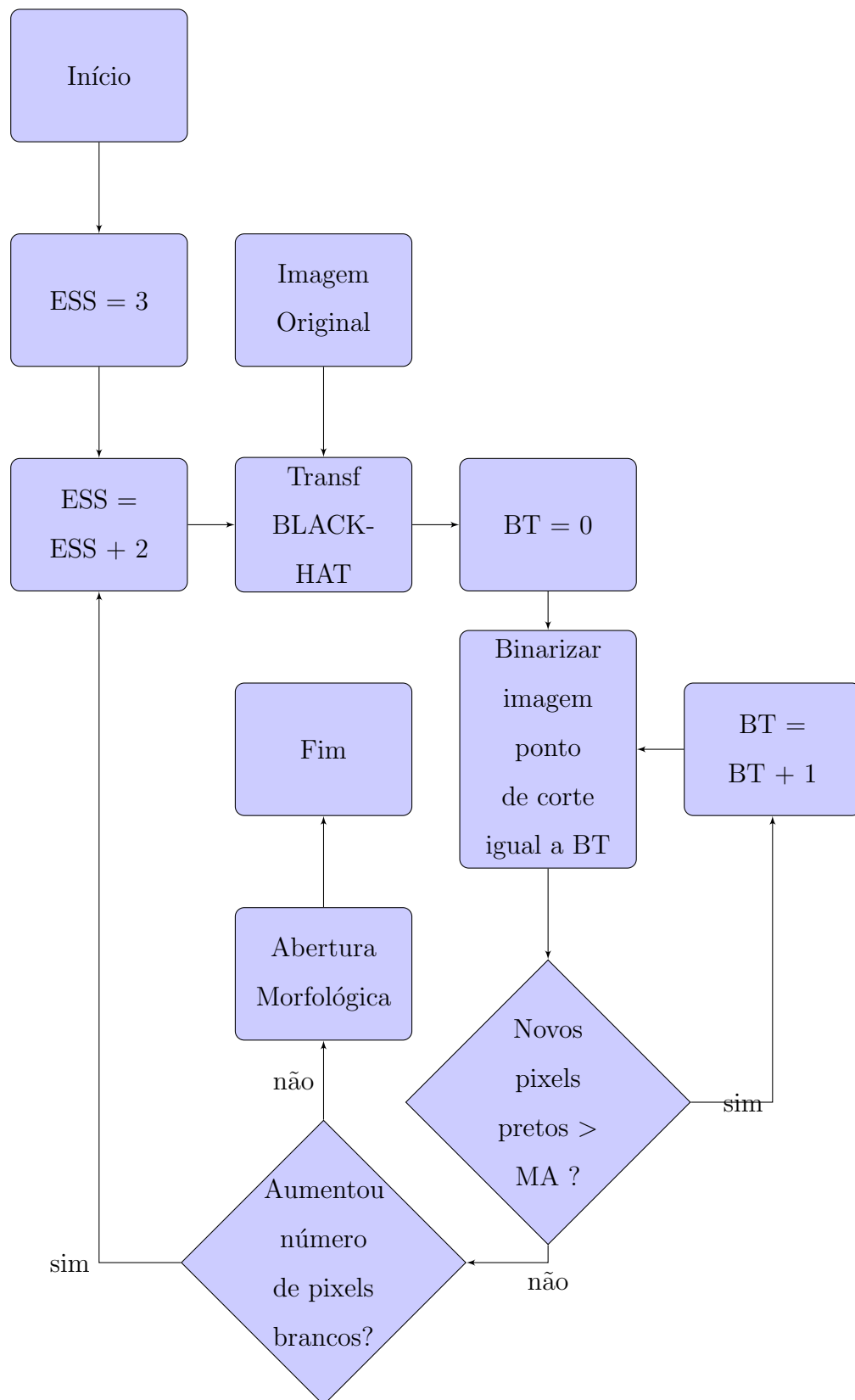


Figura 14: Algoritmo de detecção de manchas solares.

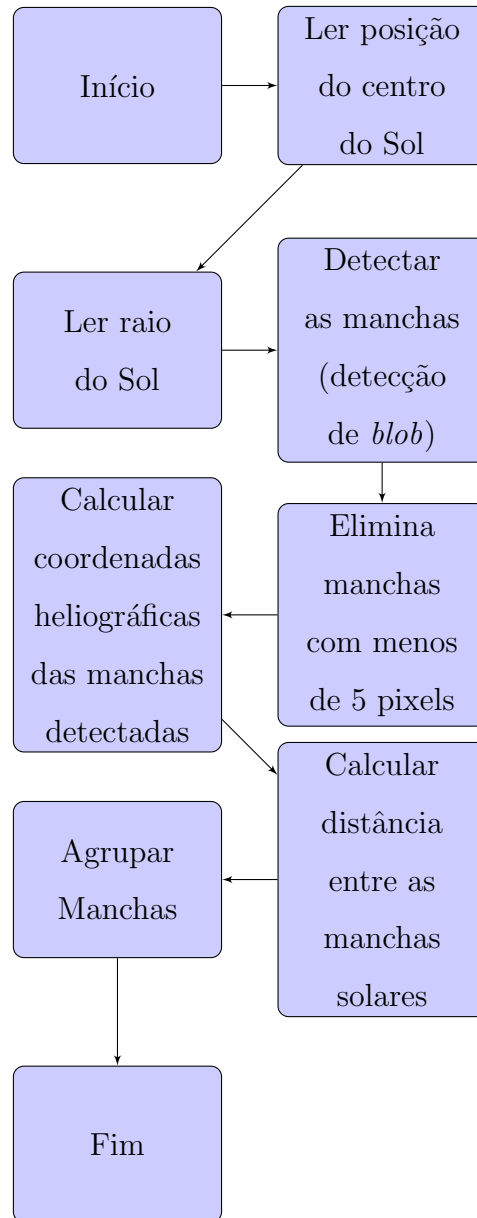


Figura 15: Algoritmo de agrupamento de manchas solares.

5.3 Cálculo da intensidade central do Sol

A intensidade do centro do Sol, I_c , é obtida por meio da imagem em luz branca do disco solar no formato FITS. É realizada uma média simples dos pixels pertencentes ao retângulo $(x - 5, y - 5), (x + 5, y + 5)$, onde x e y são as coordenadas do centro do disco solar obtidas no cabeçalho dos arquivos FITS. A média de uma pequena porção de pixels da região central do Sol fornece uma estimativa confiável da intensidade central do Sol. Imagens com manchas solares nessa região foram descartadas.

5.4 Cálculo da área da mancha solar

A área da mancha solar é estimada combinando os dados da localização da mancha solar obtidos no algoritmo de detecção de manchas solares e no algoritmo de detecção de grupos mostrados, respectivamente, nas Figuras 14 e 15. O cálculo de área da mancha solar é realizado pela Equação 14. O parâmetro p é o numero de pixels da mancha solar, θ é o tamanho angular dos pixels em segundos de arco obtido no cabeçalho do arquivo FITS, d é a distância do satélite SOHO ao Sol e l e b são, respectivamente, a latitude e a longitude da mancha solar em coordenadas heliográficas.

$$s = p \left(\frac{\frac{\theta}{3600} \frac{\pi}{180} d}{\cos(l) \cos(b)} \right)^2 \quad (14)$$

5.5 Cálculo da intensidade e da temperatura da mancha solar

A intensidade da mancha solar é obtida por meio da média das intensidades dos pixels da mancha lidos do arquivo de imagem do disco solar em luz branca no formato FITS. Essa definição é formalizada na Equação 15, onde I_p é o conjunto de intensidade dos p pixels que compõem a mancha solar e I_c é a intensidade média do centro do disco solar definido na sessão anterior.

A tempertura de todas as manchas solares detectadas são calculadas substituíndo a intensidade média (Equação 15) na Equação 6. Para a temperatura da fotosfera solar, T_c ,

$$f_i = \frac{1}{I_c} \left(\sum_0^p I_p \right) \frac{1}{p} \quad (15)$$

é usado um valor constante de 5780 K.

5.6 Leitura do campo magnético da mancha solar

Para análise do campo magnético de uma determinada mancha solar são obtidos 3 valores: o campo magnético médio, o campo magnético máximo e o campo magnético mínimo. O campo magnético da mancha solar é estimado dentre os dados de posição dos pixels pertencentes à mancha solar e obtidos pelo algoritmo de detecção de manchas solares. O algoritmo é utilizado em conjunto com o magnetograma do disco solar no formato FITS.

É importante que o magnetograma e a imagem em luz branca analisados sejam separados pelo menor intervalo de tempo possível para minimizar os efeitos da rotação solar. Este trabalho utilizou apenas conjuntos de imagens com intervalos de observação menores que trinta minutos.

No magnetograma em formato FITS, o valor correspondente a cada pixel representa a intensidade do campo magnético na região. Para cada pixel do conjunto de pixels que compõem uma mancha solar é realizada a leitura do valor correspondente a esse pixel no magnetograma e, assim, é realizada uma média de todos os pixels lidos, obtidos o pixel com máxima intensidade e o com menor intensidade.

No magnetograma, o valor de intensidade do campo magnético é sempre em referência ao observador e precisamos corrigir esse valor de intensidade pelos efeitos de projeção para a coordenada da mancha solar. Para essa correção foi utilizada a Equação 16, onde θ é o ângulo heliográfico da mancha solar e B_z é a intensidade do campo magnético obtido no magnetograma (BORRERO; ICHIMOTO, 2011).

$$B = \frac{Bz}{\cos \theta} \quad (16)$$

6 RESULTADOS

Os resultados do método de detecção de manchas solares para uma amostra dos dados, foram publicados em 2012 e suas sínteses são apresentadas nas Figuras 16 e 17 (SPAGIARI et al., 2012). A Figura 16 compara o resultado de detecção de manchas solares e número de Wolf para o ano de 2001 com os resultados oficiais apresentados pelos centros de pesquisa NOAA e SIDC. A Figura 17 faz a mesma comparação para o ano de 2009. Os anos de 2001 e 2009 foram escolhidos pois representam períodos diferentes do ciclo de atividade solar. O ano de 2009 representa um período com baixa incidência de manchas solares, e o ano de 2001 representa o período de transição para o período de máxima atividade solar. É importante para os resultados desse trabalho que o algoritmo tenha aplicabilidade robusta no decorrer de todo o ciclo solar. Pode-se notar por meio da Figura 17 que a metodologia de detecção utilizada por esse trabalho apresenta falsos positivos em comparação com indicadores oficiais em períodos de baixa atividade solar.

Observa-se por meio dos resultados que o algoritmo é muito robusto para períodos de maior atividade solar, porém se mostrou mais frágil em períodos de baixa atividade, detectando um pequeno número de falsos positivos. Os resultados obtidos para o número de Wolf tiveram alta correlação, 79% e 93%, respectivamente, com os números publicados pelos centros de pesquisa NOAA e SIDC.

Um programa chamado *sunspot*, foi desenvolvido em C++ utilizando as bibliotecas C++ Standard, OpenCV (INTEL; GARAGE, 1999) e FitsTools, que implementa os algoritmos e a metodologia descritos no item anterior. Em 2013, Valio e Spagiari (2013) utilizaram o *sunspot* para extrair os dados de manchas solares a partir de imagens do observatório SOHO das datas descritas na Tabela 1. A Tabela 2 descreve parte dos resultados gerados pelo programa. As informações extraídas foram úteis para compor um modelo de detecção de manchas estelares.

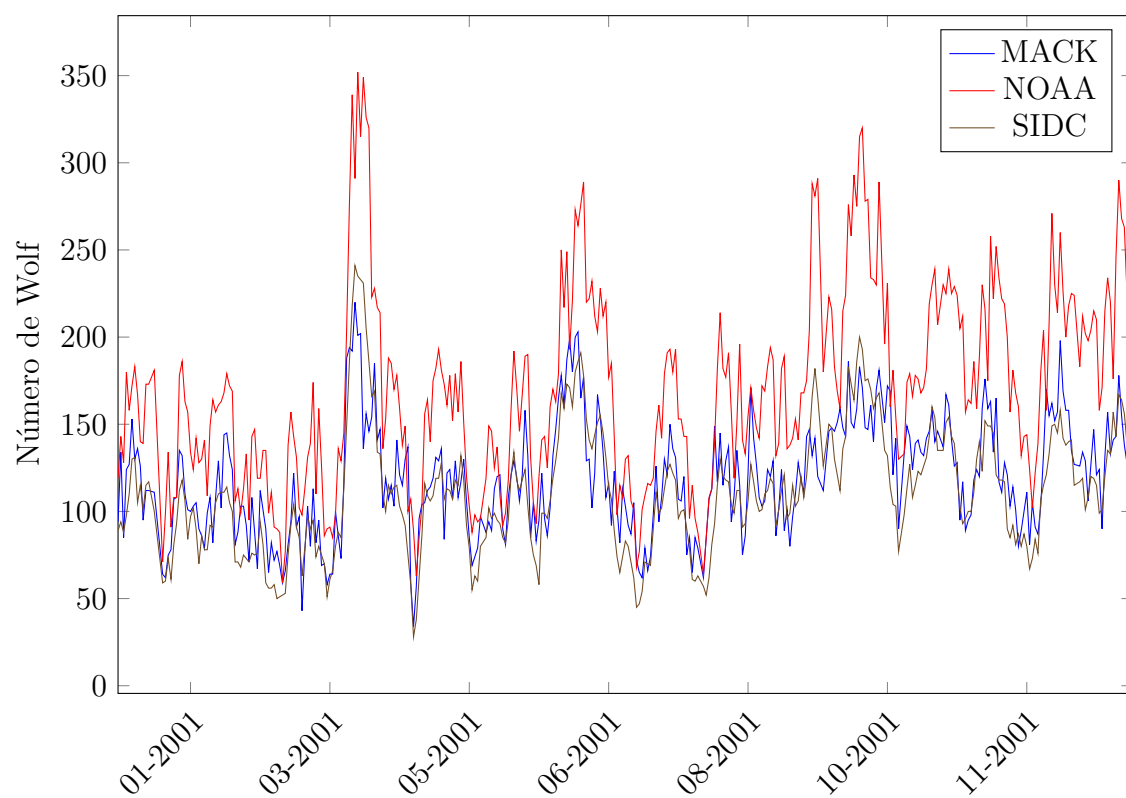


Figura 16: Comparação entre os resultados de detecção de manchas solares do ano de 2001.

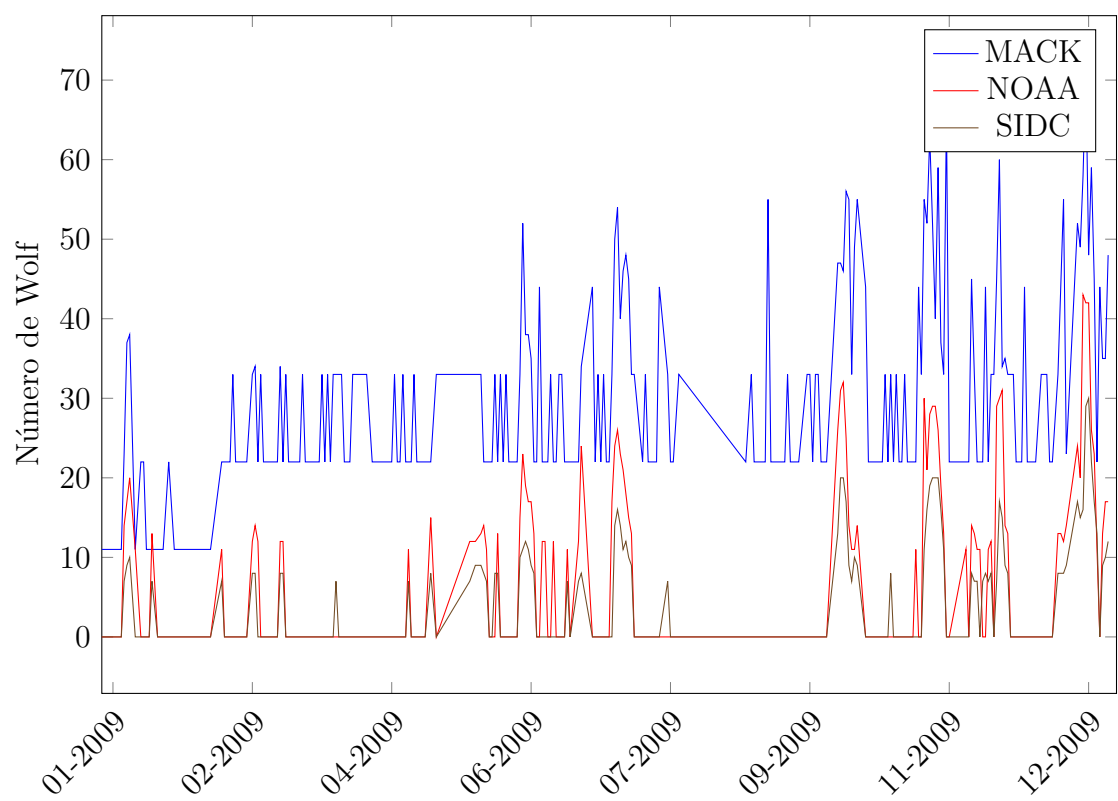


Figura 17: Comparação entre os resultados de detecção de manchas solares do ano de 2009.

Tabela 1: Imagens analisadas pelo programa *sunspot* base.

Imagem	Data
fd_Ic_6h_01d.3652.0001.jpg	2003.01.01_04:45:00_TAI
fd_Ic_6h_01d.3684.0001.jpg	2003.02.02_06:24:00_TAI
fd_Ic_6h_01d.3716.0001.jpg	2003.03.06_06:24:00_TAI
fd_Ic_6h_01d.3748.0001.jpg	2003.04.07_06:24:00_TAI
fd_Ic_6h_01d.3780.0002.jpg	2003.05.09_11:12:00_TAI
fd_Ic_6h_01d.3812.0001.jpg	2003.06.10_06:24:00_TAI
fd_Ic_6h_01d.3845.0001.jpg	2003.07.13_04:48:00_TAI
fd_Ic_6h_01d.3868.0000.jpg	2003.08.05_00:00:00_TAI
fd_Ic_6h_01d.3899.0002.jpg	2003.09.05_11:12:00_TAI
fd_Ic_6h_01d.3935.0000.jpg	2003.10.11_00:00:00_TAI
fd_Ic_6h_01d.3956.0002.jpg	2003.11.01_11:12:00_TAI
fd_Ic_6h_01d.3988.0002.jpg	2003.12.03_11:12:00_TAI

Tabela 2: Parte dos dados extraídos de manchas solares pelo programa *sunspot* com base nas imagens da Tabela 1

ID	Lat	Lon	Área (m^2)	Contraste	B Médio (G)	Ic
00	-20,987	24,306	1,47E+08	0,7643	5,7452	14315
01	4,616	-14,257	1,48E+07	0,9515	-23,9256	14315
02	4,732	-3,241	9,93E+06	0,9227	-429,742	14315
03	6,006	-6,856	8,47E+07	0,8379	-32,2894	14315
04	5,658	-5,104	3,60E+07	0,8911	-168,08	14315
05	6,238	-8,145	1,30E+08	0,8071	287,478	14315
06	15,044	-2,747	1,06E+07	0,9192	-36,7077	14315
11	-24,413	6,739	1,21E+07	0,9221	-447,175	15606
12	-2,195	-14,369	1,05E+07	0,9417	585,566	15606
13	-1,271	-13,529	1,04E+07	0,9464	-528,845	15606
14	-1,04	-12,697	3,11E+07	0,9212	-780,634	15606
15	1,271	-14,481	2,84E+08	0,7564	-863,181	15606

6.1 Detecção de manchas solares

Para melhorar a robustez do método de detecção de manchas solares para períodos de baixa atividade e eliminar os falsos positivos observados no gráfico da Figura 17, o algoritmo de detecção de manchas solares foi modificado para realizar um filtro e eliminar manchas detectadas que não atinjam um tamanho mínimo em pixels. Foram testados, para o ano de 2007, dois diferentes valores para o tamanho mínimo das manchas, e esses resultados do número de Wolf diários para o ano de 2007, foram comparados com a versão anterior do algoritmo de detecção de manchas solares sem o filtro de tamanho mínimo de mancha solar.

O resultado da comparação pode ser observado no gráfico da Figura 18. A linha azul representa o algoritmo *MACK* sem o filtro de tamanho mínimo de manchas solares, a linha vermelha mostra os resultados do algoritmo *MACK5* com filtro de tamanho mínimo de manchas com valor definido de 5 pixels, e finalmente a linha marrom é o resultado do algoritmo *MACK5* com filtro de tamanho mínimo de manchas com valor definido de 10 pixels. A versão do algoritmo *MACK5* teve a melhor correlação, 88%, em comparação com os dados do centro de pesquisas SIDC, contra 86% da versão anterior. Um incremento de 2% no índice de correlação é significativo e evidência que os resultados gerados seguem tendência e intensidade similares aos dos dados do centro de pesquisas SIDC.

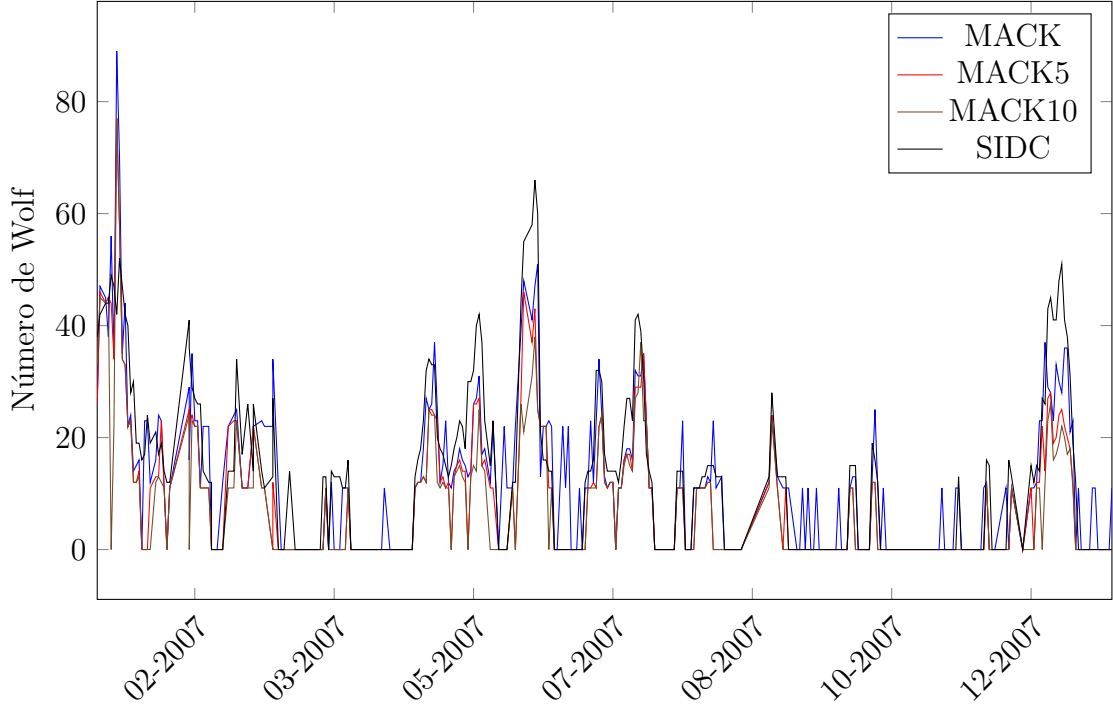


Figura 18: Comparação entre os resultados de detecção de manchas solares do ano de 2007. Utilizando dois diferentes filtros de manchas por tamanho em pixels.

6.2 Ciclo 23

Este trabalho utilizou o programa *sunspot* para processar 6.870 imagens do observatório SOHO. Estas imagens representam uma amostra diária de imagens do Sol para o período correspondente ao ciclo solar 23. Foram detectadas e analisadas 32.317 manchas solares com longitude entre -40° e 40° . A base completa de manchas solares foi segmentada em quatro períodos *A*, *B*, *C* e *D* cada um representando aproximadamente um quarto do ciclo solar 23, sendo o período *A* e *D*, respectivamente, o início e o fim do ciclo solar 23. A Tabela 3 mostra a quantidade de manchas solares por período para a amostra diária, e a Tabela 4 mostra a quantidade de manchas solares por período para a amostra mensal. A amostra mensal representa manchas solares detectadas nos dias 1 e 15 de cada mês para minimizar a detecção da mesma mancha a cada dia.

Os seguintes parâmetros físicos foram extraídos das manchas solares detectadas, o número de Wolf diário, a área, o contraste, a temperatura e o campo magnético extremo. Cada uma das características extraídas foram analisadas independentemente, sendo seus valores médios obtidos da distribuição estatística de cada parâmetro utilizando histogra-

mas. Estas análises foram feitas para todo o ciclo solar e também para cada período individualmente.

Também foram analisadas as relações entre as características das manchas solares extraídas. A seguir são apresentados os gráficos de dispersão entre área e temperatura, área e contraste, campo magnético máximo e temperatura, e campo magnético máximo e área. Estas análises foram feitas para todo o ciclo solar e também para cada período individualmente.

O gráfico da Figura 19 compara o número de Wolf obtido para cada dia do ciclo solar 23 com os dados publicados pelo centro de pesquisa SIDC. Os dados extraídos pelo *sunspot* na sua versão *MACK5* tiveram um coeficiente de correlação de 95% em comparação com os dados do SIDC. O número de manchas solares mostrado na Figura 19 mostra claramente o ciclo de atividade solar com máximo em 2000-2002.

Tabela 3: Número de manchas solares por período.

Período	Número diário de manchas solares
A	2945
B	16732
C	10427
D	2213
Total	32317

Tabela 4: Número de manchas solares de amostra mensal por período.

Período	Número de manchas solares
A	257
B	1108
C	627
D	140
Total	2132

A evolução temporal dos parâmetros físicos das manchas como área, contraste e campo magnético extremo são mostrados nas Figuras 20, 21 e 22, respectivamente. Cada período, no gráfico a seguir, foi destacado em uma cor diferente para melhorar a visualização do

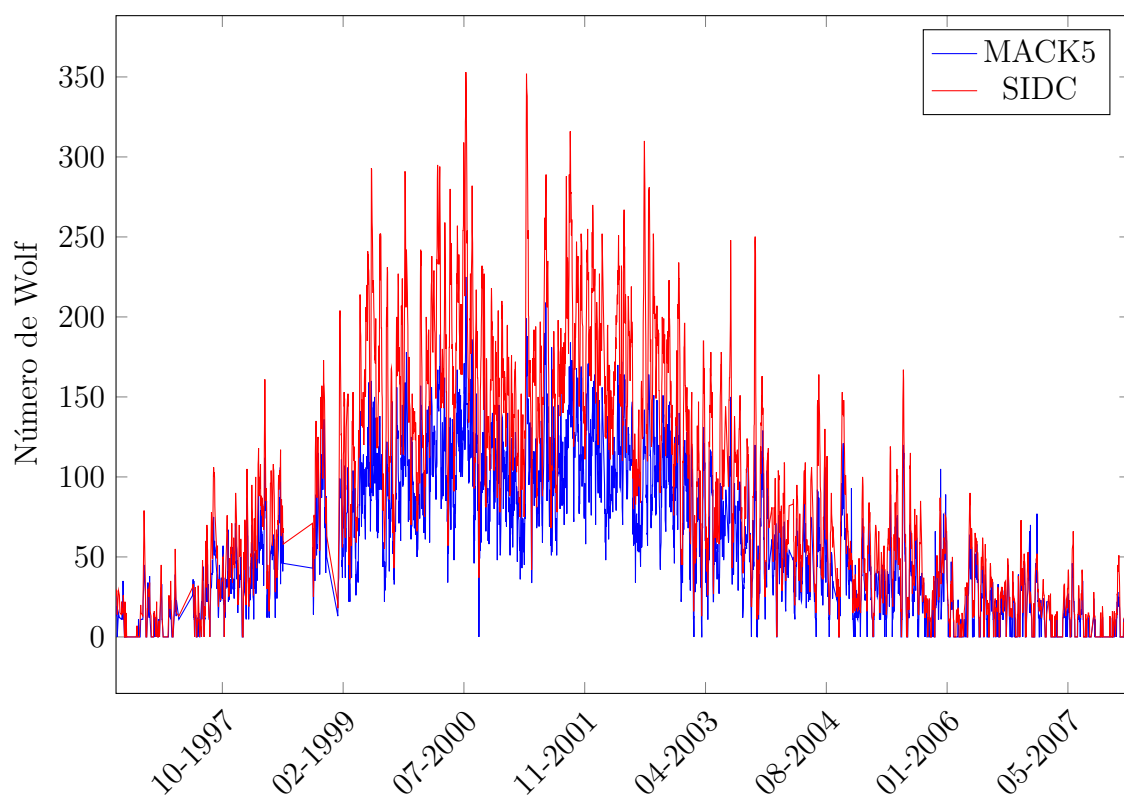


Figura 19: Comparação diária entre os resultados de detecção de manchas solares para o ciclo solar 23.

comportamento das características de cada um deles. Nota-se que essas características físicas guardam relação com a evolução do ciclo solar, como pode-se notar das Figuras 20 - 22, durante os períodos, B e C, as manchas solares maiores, mais frias e com campos magnéticos mais intensos ocorrem com maior frequência.

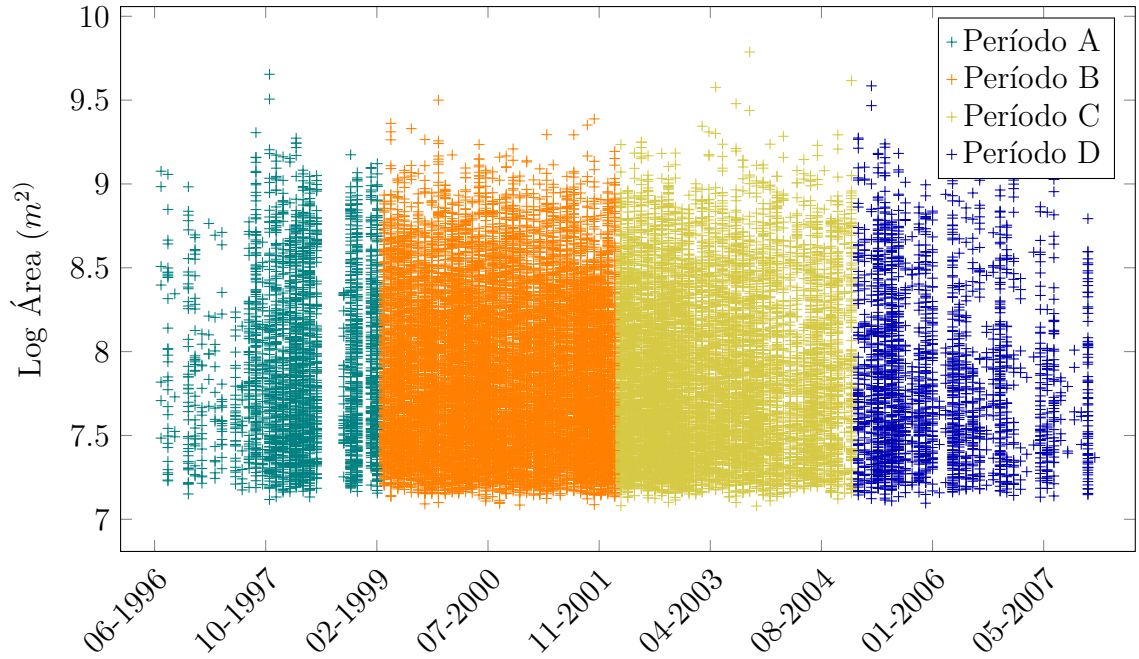


Figura 20: Evolução da área de manchas solares ao longo do ciclo solar 23.

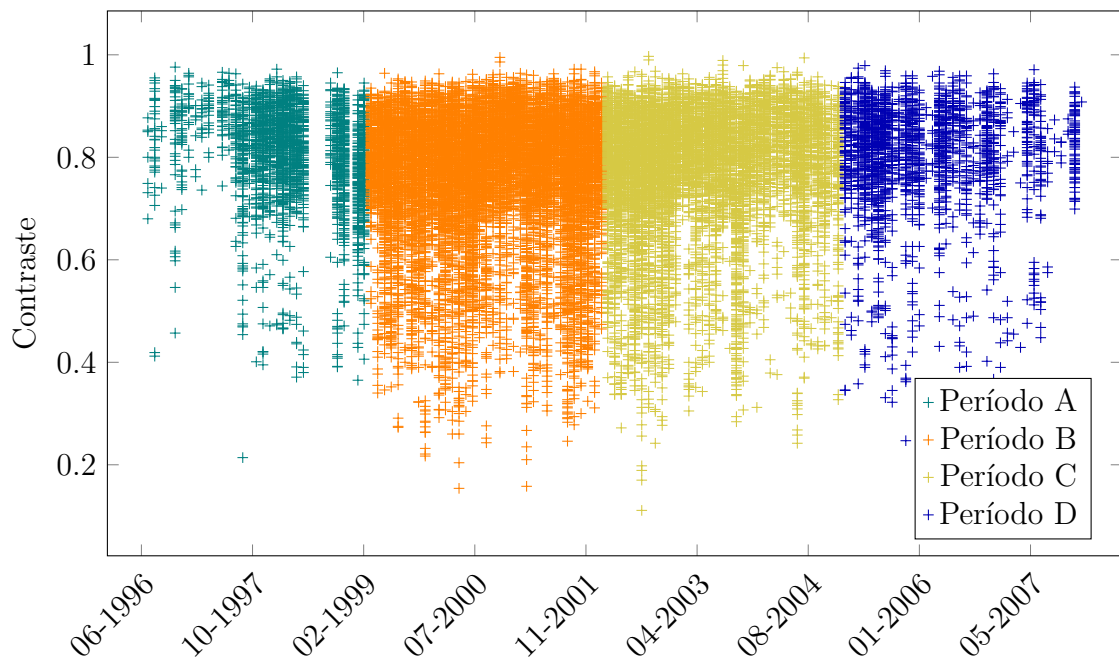


Figura 21: Contraste de manchas solares ao longo do ciclo solar 23.

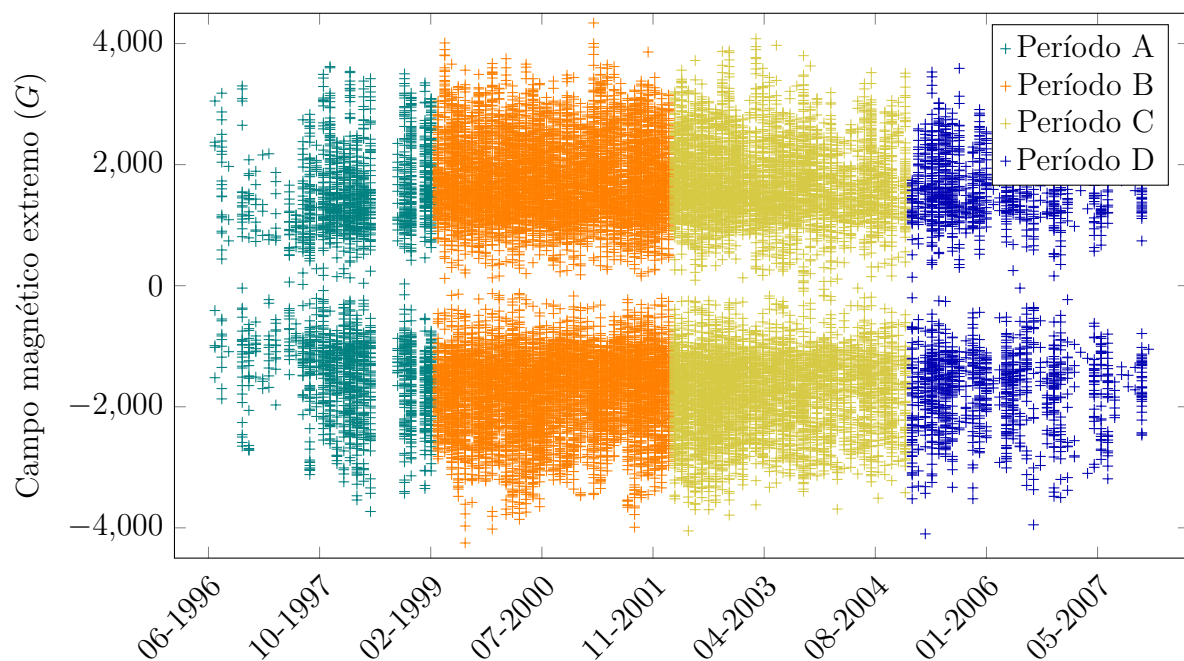


Figura 22: Campos magnéticos máximos e mínimos de manchas solares ao longo do ciclo solar 23.

6.2.1 Histogramas

Para analisar como os valores de contraste, temperatura, área e campo magnético máximo estão distribuídos, foram gerados histogramas utilizando como base as 32.317 manchas solares detectadas com longitude entre -40° e 40° . Para cada uma das características físicas das manchas foi gerado um histograma para todo o ciclo solar 23 e também um histograma para cada um dos quatro períodos do ciclo solar 23. Os histogramas gerados para os períodos A, B, C e D são para identificar alterações na distribuição das características ao longo do ciclo solar 23.

A Figura 23 mostra o histograma do contraste das manchas para o ciclo solar 23. O contraste das manchas solares para o ciclo solar 23 apresenta o valor médio de 0.78 ± 0.11 . Os histogramas do contraste das manchas solares dos períodos do ciclo podem ser vistos na Figura 24. A Tabela 5 traz a média de contraste das manchas solares para cada período do ciclo solar 23. Comparando a média dos períodos com a média para todo o ciclo 23, nota-se uma pequena variação no valor médio do contraste, sendo as manchas mais escuras no máximo do ciclo solar 23 (períodos B e C).

Tabela 5: Média do contraste para os períodos do ciclo solar 23.

Período	Contraste
A	0.81 ± 0.09
B	0.77 ± 0.11
C	0.78 ± 0.12
D	0.80 ± 0.11
Todo ciclo	0.78 ± 0.11

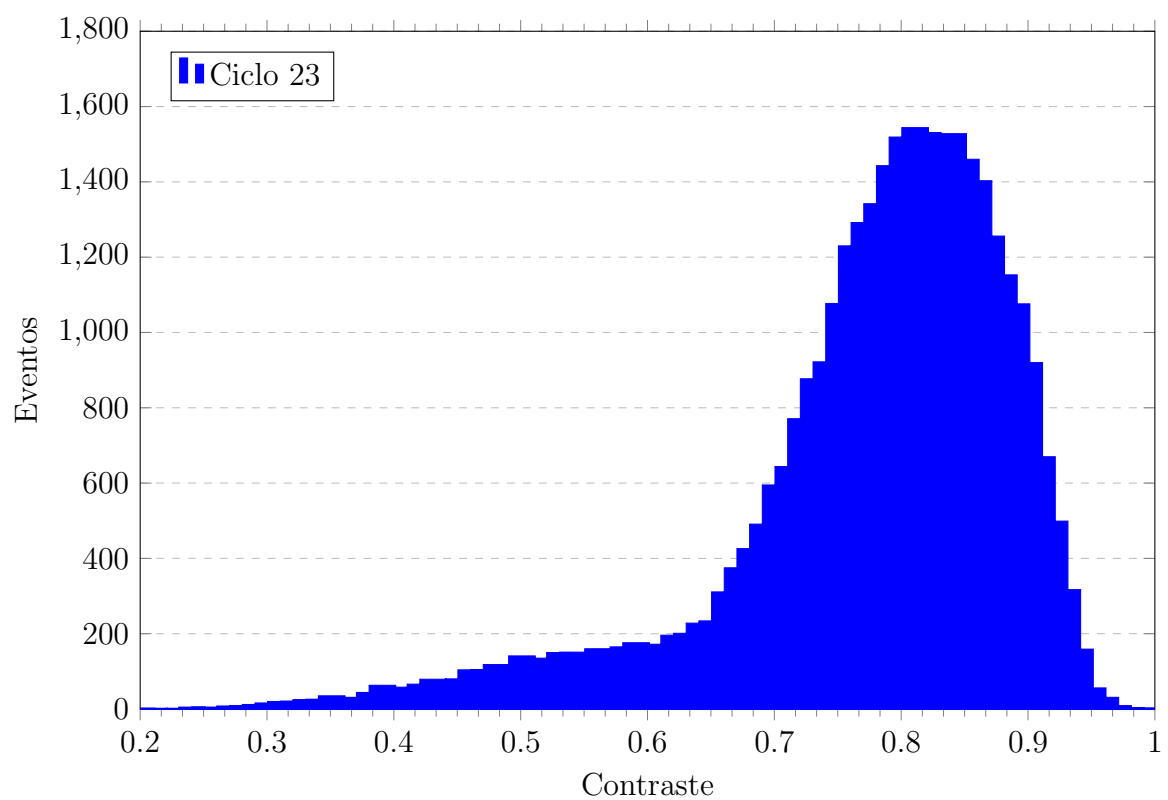
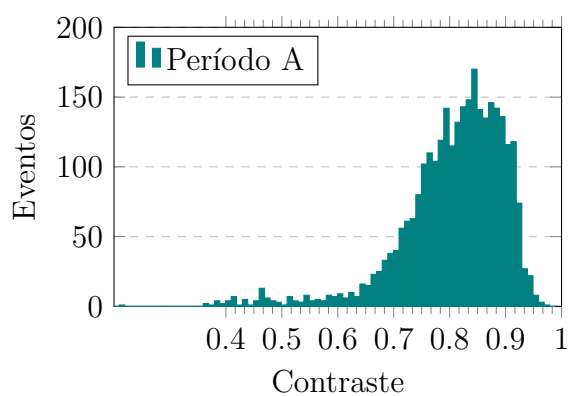
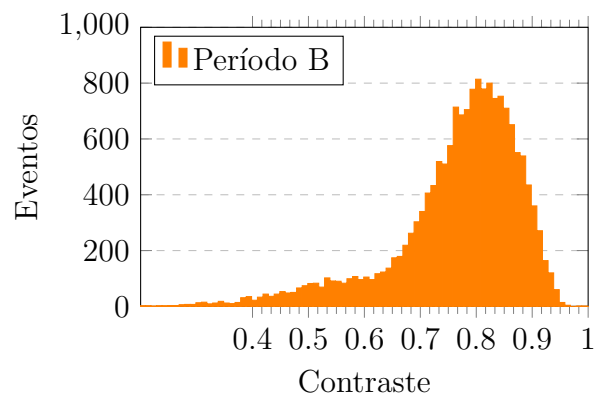


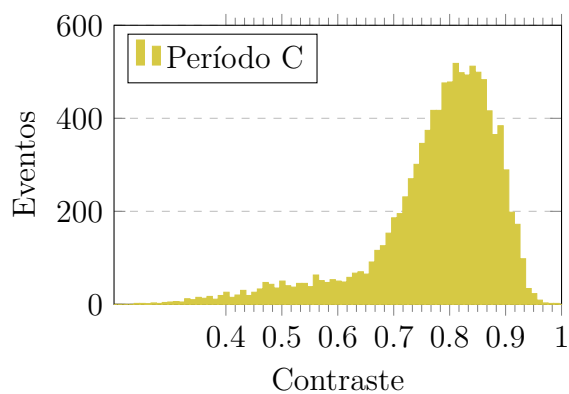
Figura 23: Gráfico do histograma de contraste das manchas solares para todo o ciclo solar 23.



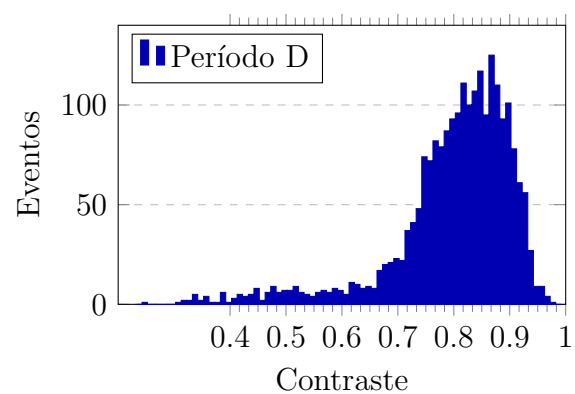
(a) Período A



(b) Período B



(c) Período C



(d) Período D

Figura 24: Gráfico do histograma de contraste das manchas solares separado por período do ciclo solar.

A Figura 25 mostra o histograma da temperatura das manchas para o ciclo solar 23 calculada a partir do contraste usando-se a Equação 6. A temperatura apresenta o valor médio de $5400 \pm 200K$. Os histogramas da temperatura das manchas solares dos períodos podem ser vistos na Figura 26. A Tabela 6 traz a média das temperaturas das manchas solares para cada período do ciclo solar 23. Comparando a média dos períodos com a média para todo o ciclo 23, nota-se que o valor médio da temperatura das manchas solares é 100 K mais fria durante o máximo do ciclo solar 23.

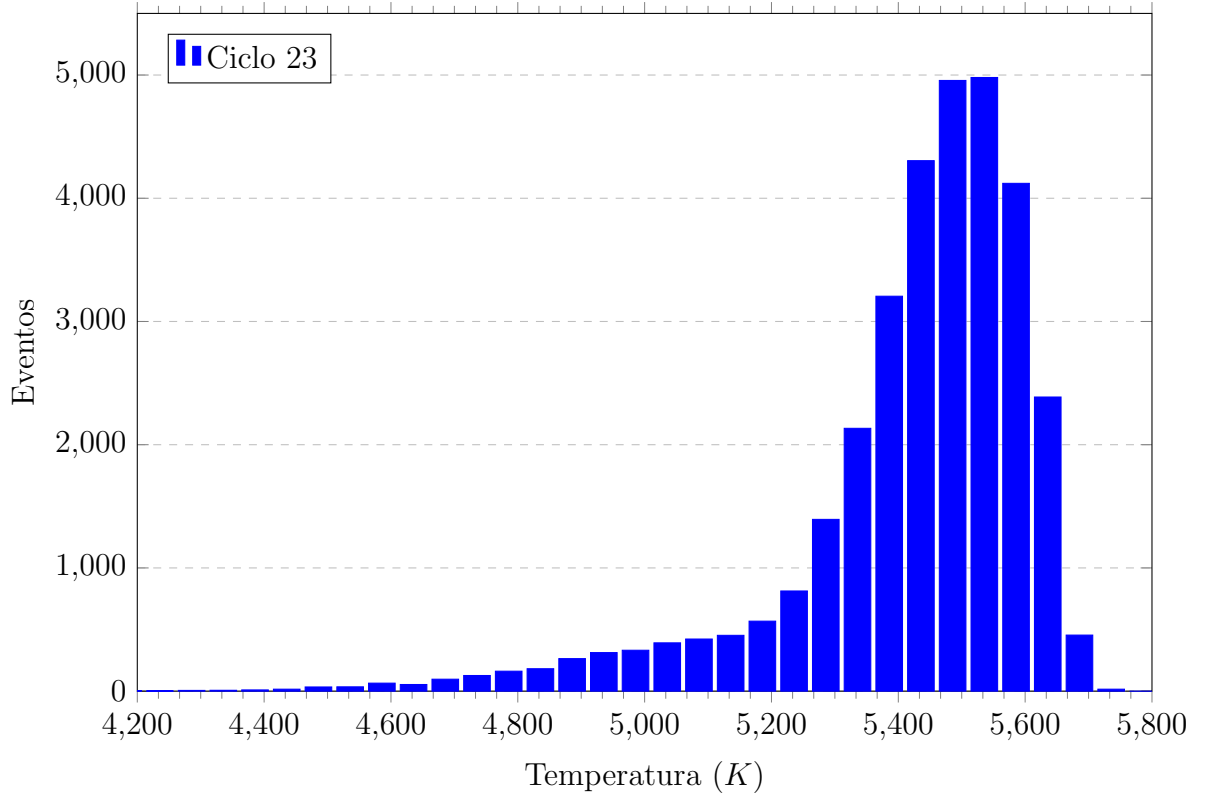


Figura 25: Gráfico do histograma da temperatura das manchas solares.

Assim como no histograma do contraste, a distribuição de temperatura das manchas apresenta uma segunda componente mais fria mais pronunciada nos períodos de máximo (B, C). A origem desta componente é desconhecida.

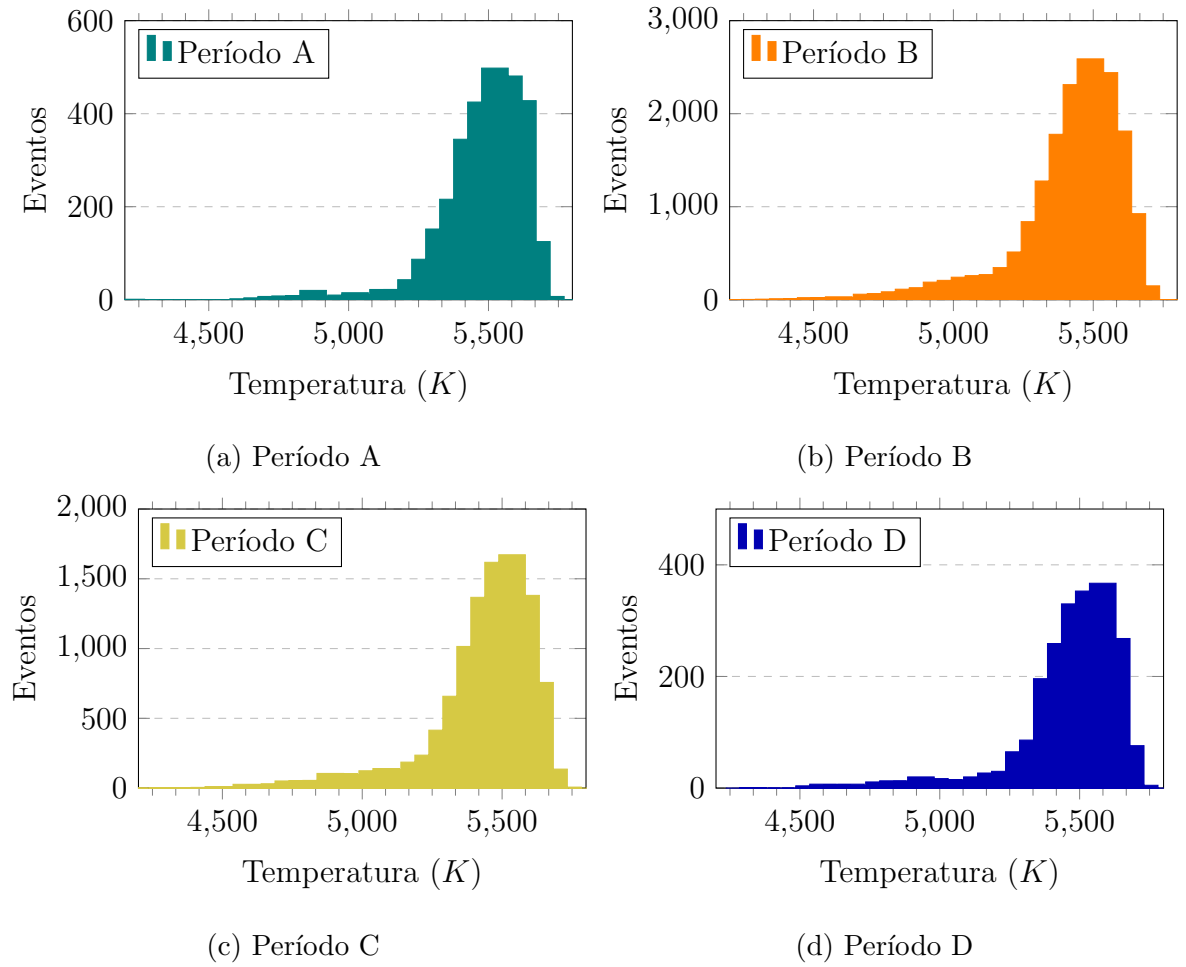


Figura 26: Gráfico do histograma de contraste das manchas solares separado por período do ciclo solar.

Tabela 6: Média da temperatura para os períodos do ciclo solar 23.

Período	Temperatura (K)
A	5500 ± 160
B	5400 ± 200
C	5400 ± 200
D	5480 ± 190
Todo ciclo	5400 ± 200

A Figura 27 mostra o histograma do log da área das manchas para o ciclo solar 23. Os histogramas do log da área das manchas solares dos períodos do ciclo podem ser vistos na Figura 28. Como pode-se observar as áreas das manchas solares variam de um fator de 100, sendo as manchas menores muito mais abundantes. Durante o período de mínima

atividade (A e D) parece haver uma segunda componente de manchas maiores que $10^8 m^2$

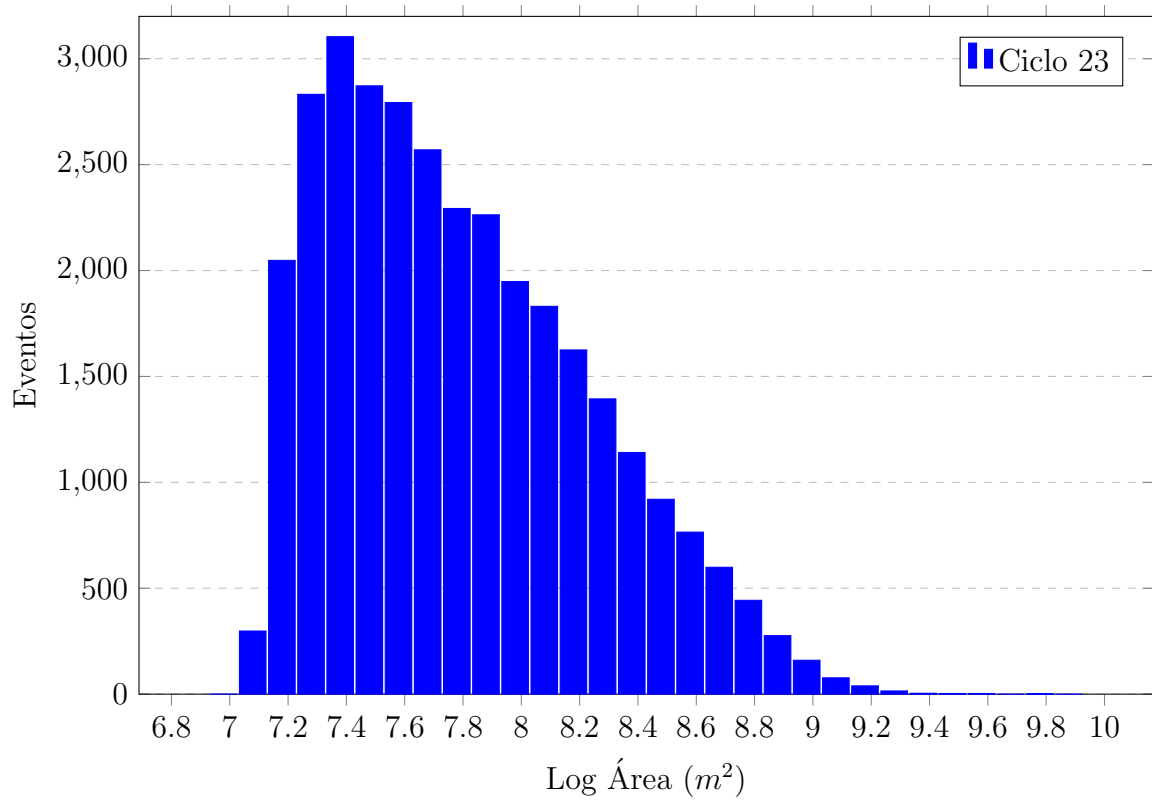


Figura 27: Gráfico do histograma de área das manchas solares.

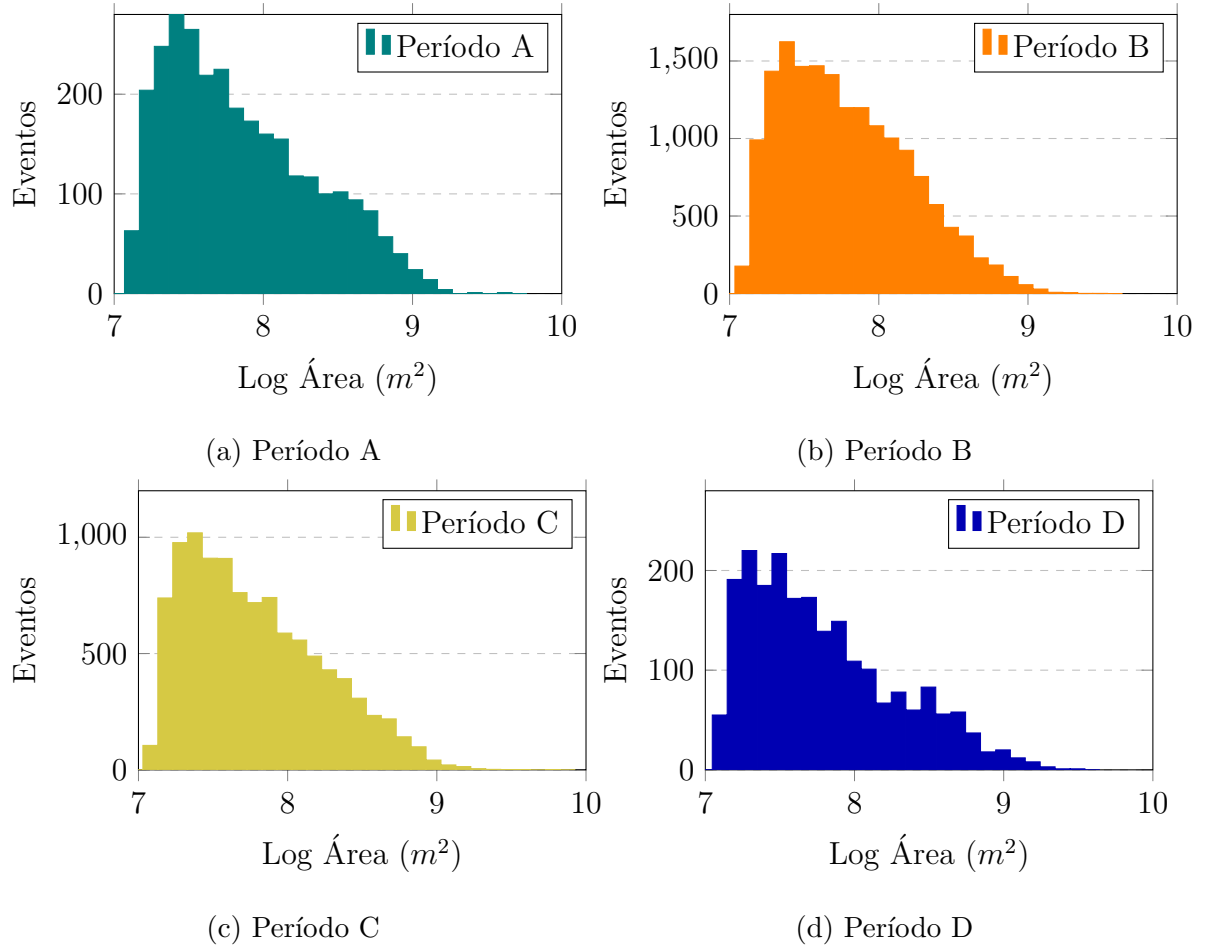


Figura 28: Gráfico do histograma de área das manchas solares.

A Figura 29 mostra o histograma do campo magnético máximo das manchas solares para o ciclo solar 23. Este parâmetro apresenta o valor médio de $1700 \pm 600G$, para o campo positivo, e $-1700 \pm 600G$, para o campo negativo. Os histogramas do campo magnético máximo das manchas solares dos períodos individuais podem ser vistos na Figura 30. A Tabela 7 traz a média do campo magnético máximo das manchas solares separando as partes positivas das negativas para cada período do ciclo solar 23. Pode-se observar um aumento, em módulo, de 100 a 200 G durante o período de máxima atividade (B e C).

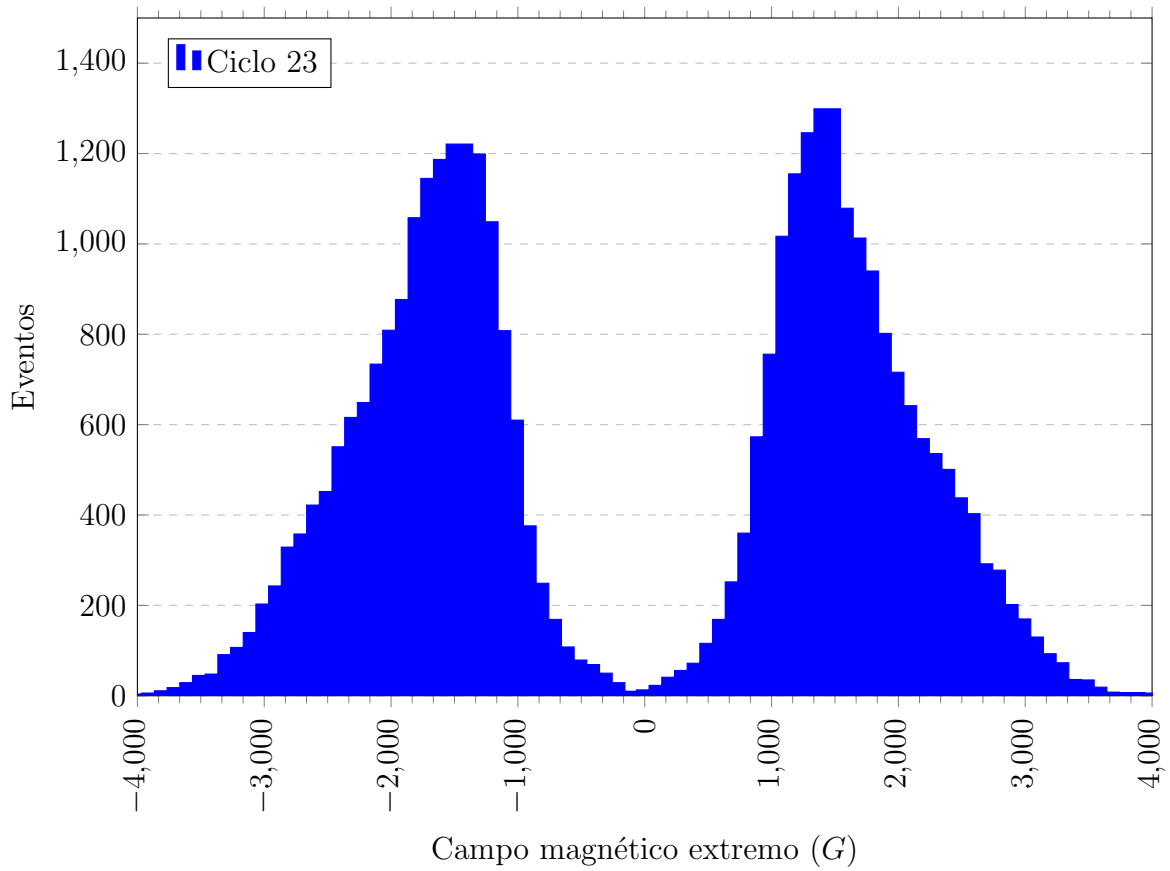
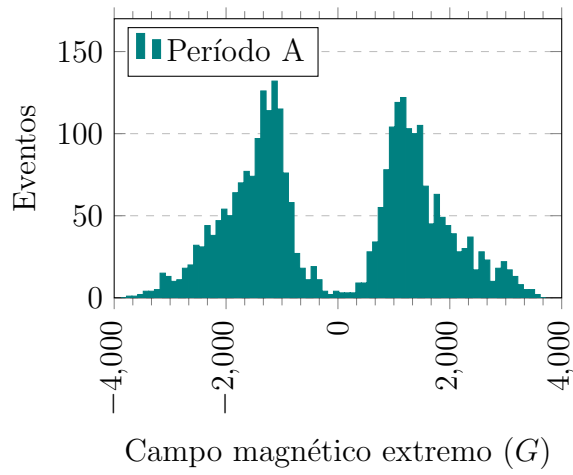


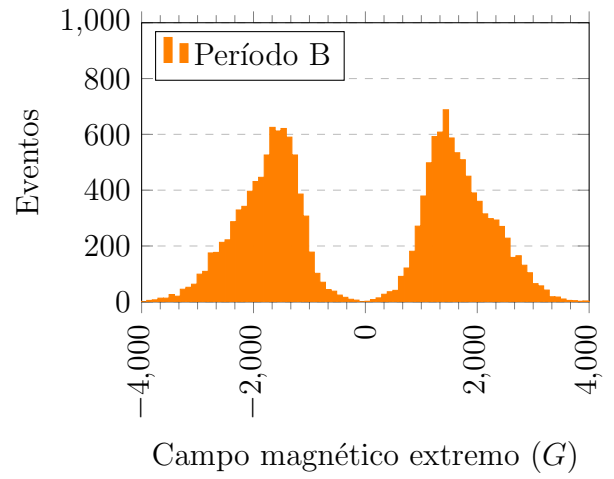
Figura 29: Gráfico do histograma de campo magnético extremo das manchas solares.

Tabela 7: Média dos máximos das componentes positiva e negativa do campo magnético das manchas para os períodos do ciclo solar 23.

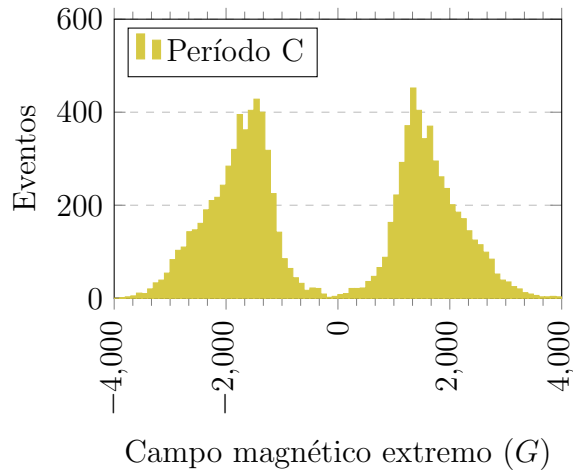
Período	$B_{pos}(G)$	$B_{neg}(G)$
A	1600 ± 700	-1500 ± 600
B	1800 ± 600	-1700 ± 600
C	1700 ± 600	-1800 ± 600
D	1600 ± 500	-1700 ± 600
Todo ciclo	1700 ± 600	-1700 ± 600



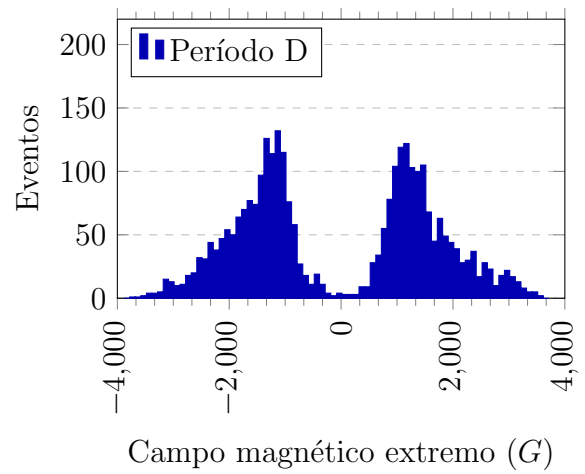
(a) Período A



(b) Período B



(c) Período C



(d) Período D

Figura 30: Gráfico do histograma dos extremos do campo magnético das manchas solares.

6.2.2 Correlações entre as características físicas das manchas solares

A análise da correlação entre as características das manchas foi feita utilizando a amostra mensal de manchas solares. Foram utilizadas 2132 manchas detectadas nos dias 1 e 15 de cada mês que compõem o ciclo solar 23.

O gráfico de correlação da Figura 31 entre temperatura e área (em escala logarítmica) mostra que a temperatura da mancha solar tem um relação com a sua área, onde manchas solares maiores são consistentemente mais frias que manchas solares menores. A mesma correlação pode ser verificada no gráfico de dispersão da Figura 32 entre área e contraste. Isso decorre do fato de que a temperatura é calculada a partir contraste (Equação 6). Nota-se novamente a presença de uma segunda componente de manchas mais frias ($T < 5300K$) e escuras (contraste < 0.7). Esta componente desvia o ajuste linear aumentando o coeficiente angular da reta, em módulo.

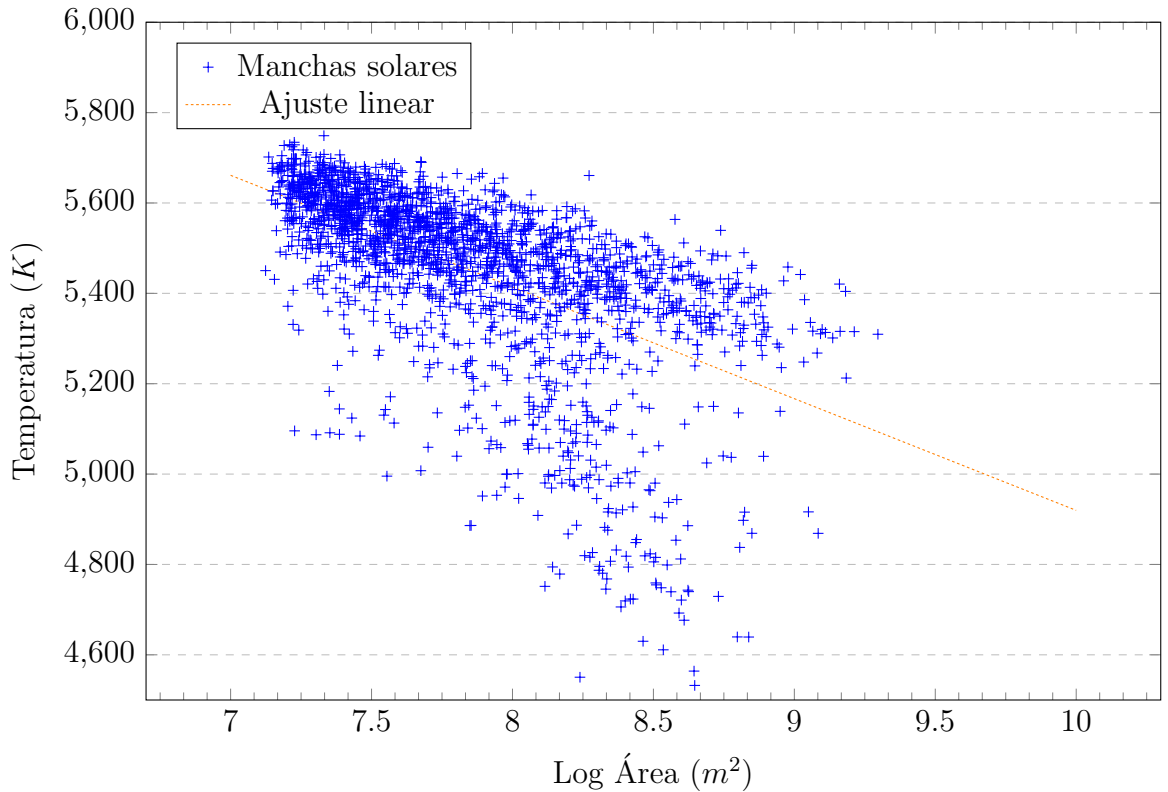


Figura 31: Gráfico da temperatura das manchas solares pela área das manchas solares.

O gráfico de correlação da Figura 33 entre campo magnético extremo e temperatura vai ao encontro dos resultados de Dicke (1970) e Kopp e Rabin (1992) evidenciando uma

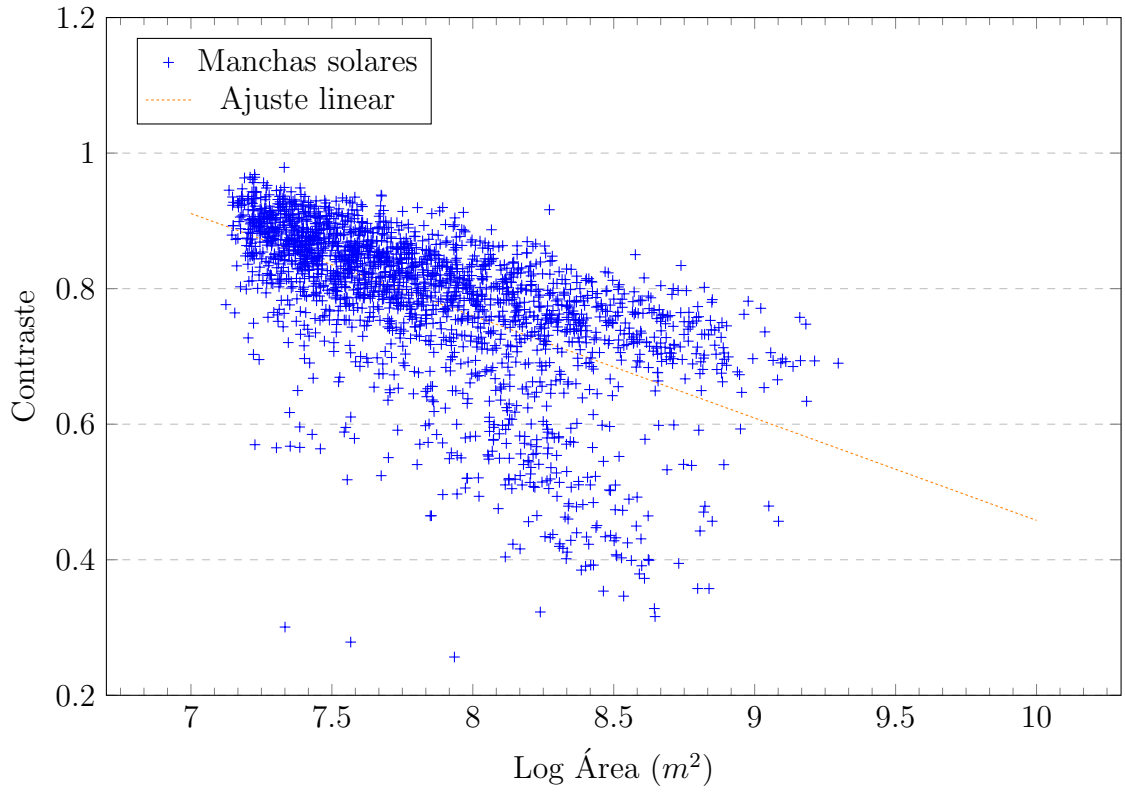


Figura 32: Gráfico do brilho relativo das manchas solares pela área da mancha solar.

relação não linear entre campo magnético e temperatura. A linha de ajuste em vermelho é baseada na Equação 17 (DICKE, 1970).

$$\frac{T}{T_e} = -3.21 \times 10^{-8} B^2 + 0.95 \quad (17)$$

Uma forma genérica da Equação 17 é $\frac{T}{T_e} = aB^2 + c$, foi ajustada aos dados extraídos por esse trabalho resultando nos valores $a = -1.08 \times 10^{-8}$ e $c = 0.98$ (linha verde). Nota-se que as manchas solares ajustadas por Dicke (1970) eram mais frias e com campos magnéticos menos intensos do que as detectadas no ciclo solar 23.

O gráfico de correlação entre área e campo magnético extremo pode ser observado na Figura 34. Analisando separadamente as componentes positiva e negativa do campo magnético extremo de cada mancha solar, observa-se que ambas as componentes estão relacionadas com a área. Essa correlação é mostrada por meio da curva de ajuste laranja.

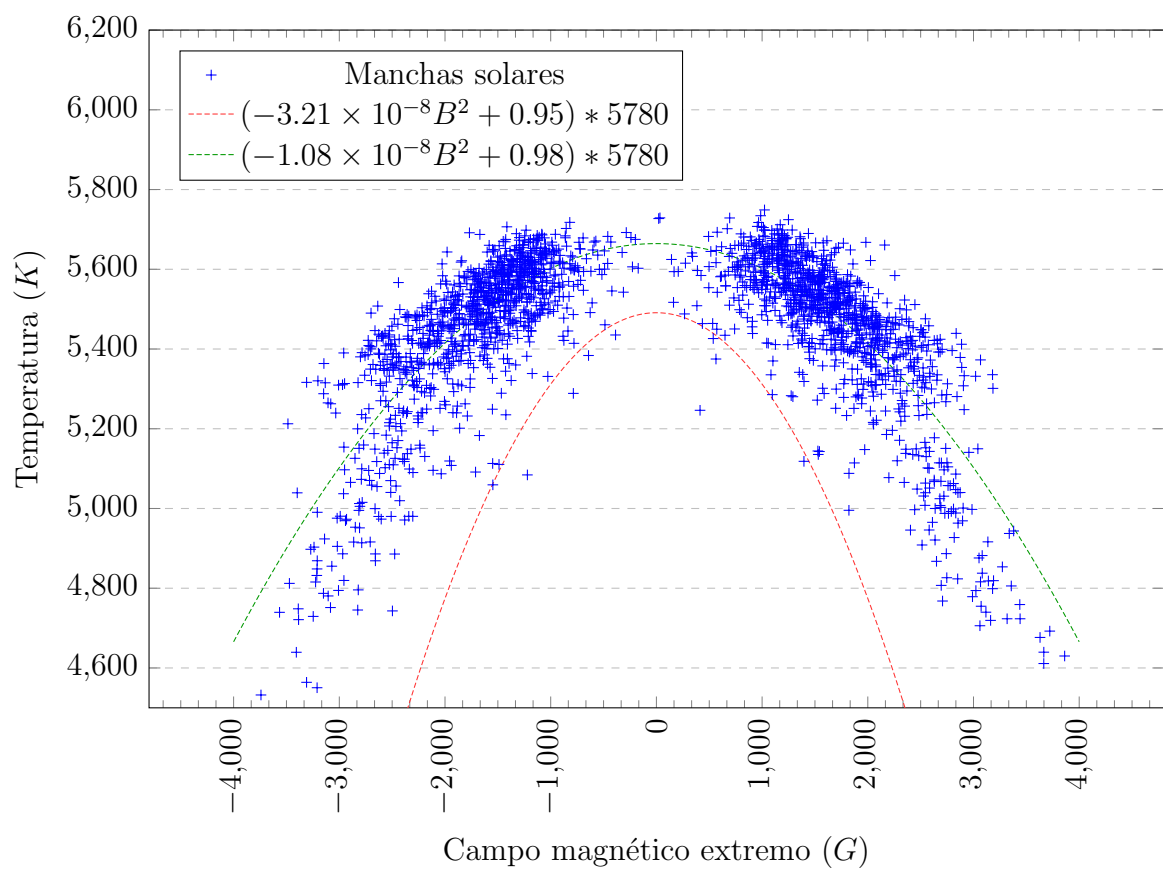


Figura 33: Gráfico do campo magnético máximo pela temperatura das manchas solares.

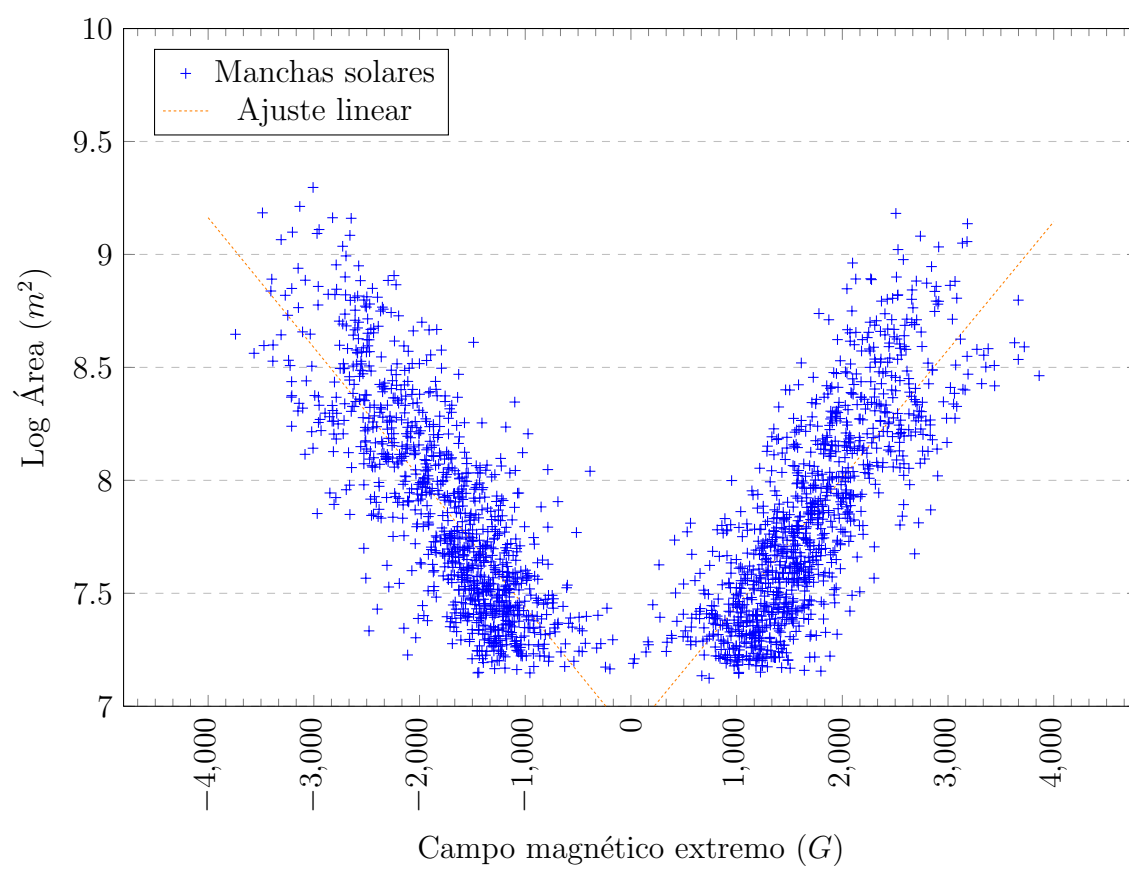


Figura 34: Gráfico do campo magnético extremo pela área das manchas solares.

A Figura 35 compara os gráficos de contraste pela área das manchas solares para cada período do ciclo solar 23. As linhas de ajuste em laranja para os quatro períodos A, B, C e D apresentam coeficientes muito semelhantes. A Tabela 8 mostra o ajuste equação logarítmica $y = a \times \log x + b$ ajustada para cada um dos quatro períodos. Comparando os parâmetros das equações de ajustes de cada período do ciclo solar 23, nota-se uma pequena variação entre eles. Os períodos B e C de máxima atividade possuem uma correlação mais íngreme do que os períodos A e D. O mesmo comportamento é observado na Figura 36 e na Tabela 9 que comparam a correlação entre a temperatura e área das manchas solares para cada período do ciclo solar 23. Entretanto a discrepância entre o coeficiente linear dos períodos A e D comparado com os períodos de máxima atividade do ciclo (B e C) muito provavelmente deve-se à existência da componente de manchas mais frias mencionada anteriormente.

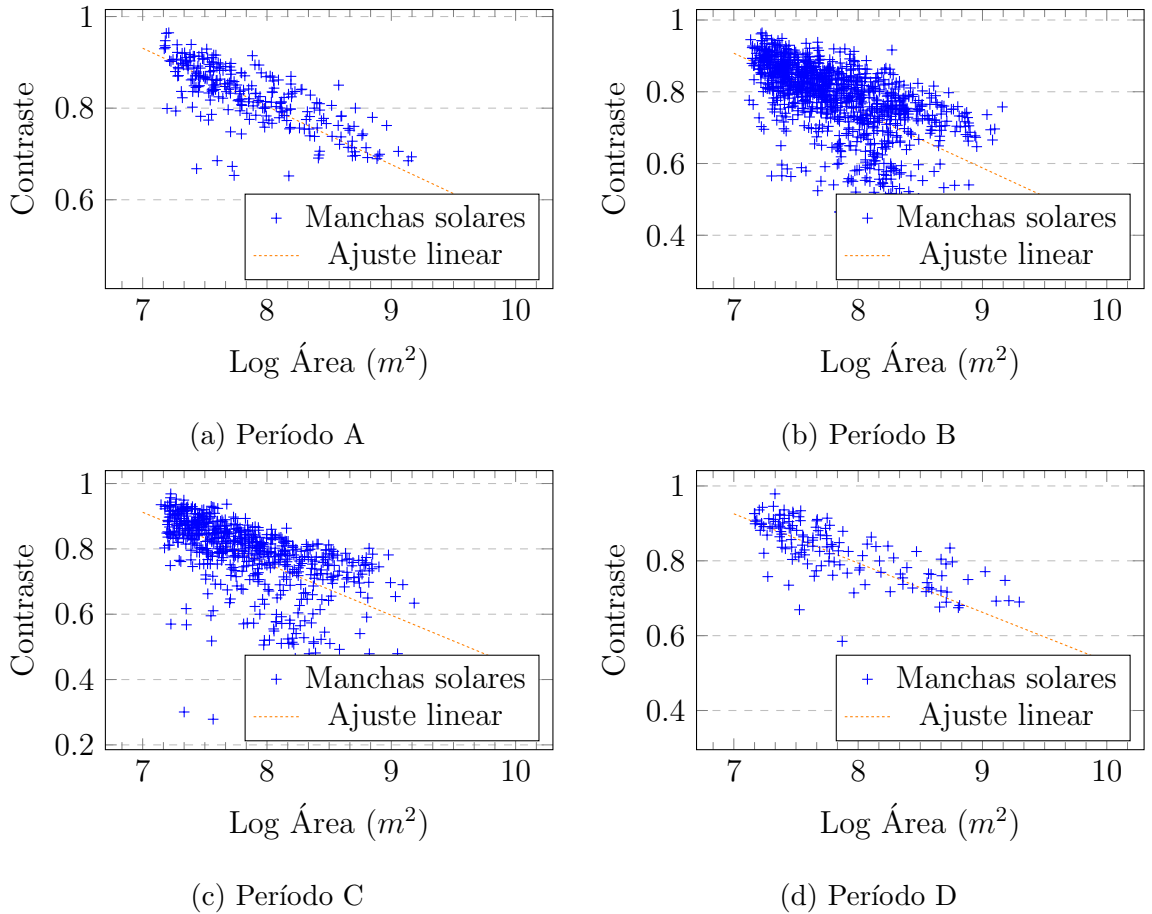


Figura 35: Gráfico do contraste em função da área das manchas solares.

Tabela 8: Comparação entres as equações de ajuste da correlação com o contraste e log da área (x) das manchas solares.

Período	Equação de Ajuste
A	$-0.12x + 1.82$
B	$-0.16x + 2.03$
C	$-0.16x + 2.02$
D	$-0.13x + 1.85$

Tabela 9: Comparação entre as equações de ajuste da correlação com a temperatura e o log da área (x) das manchas solares.

Período	Equação de Ajuste
A	$-200.15x + 7089.56$
B	$-264.28x + 7508.16$
C	$-258.63x + 7472.73$
D	$-212.56x + 7169.64$

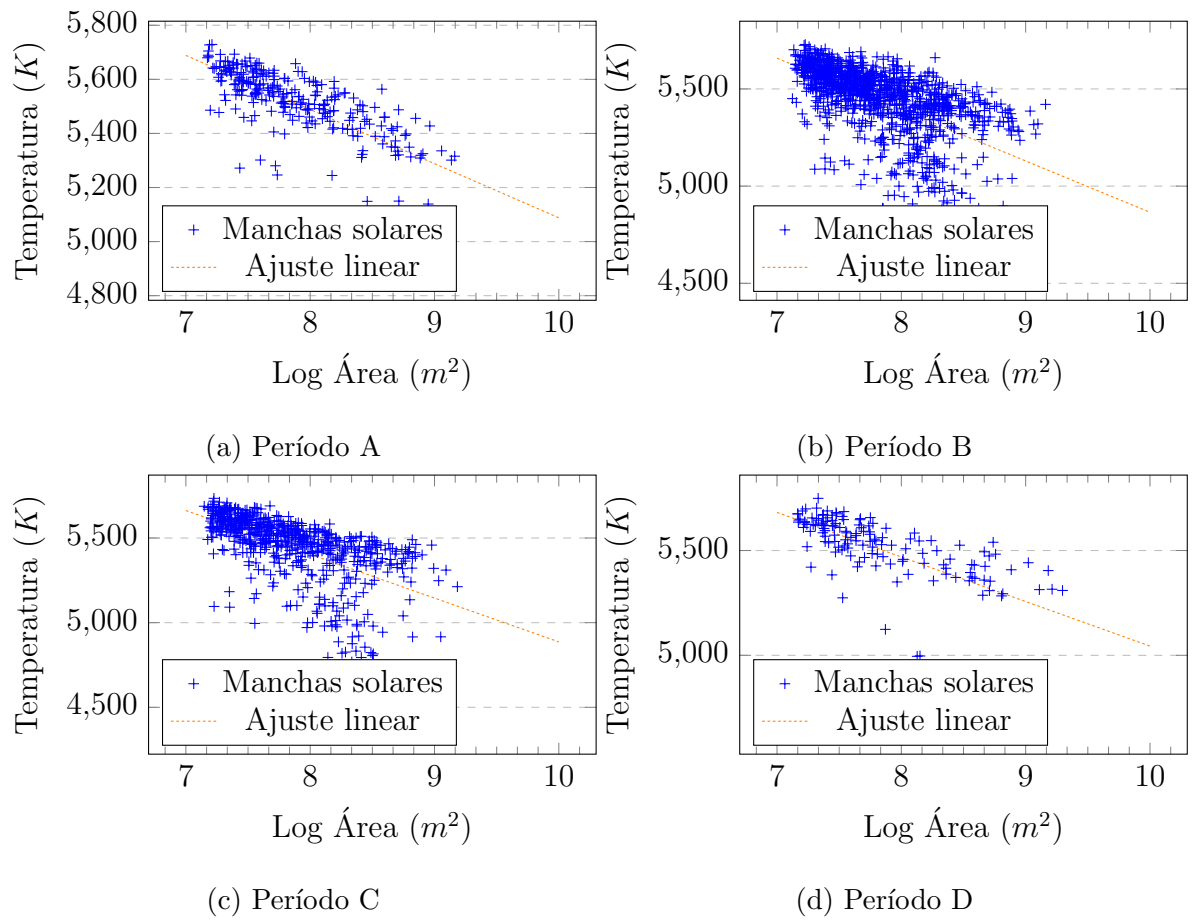


Figura 36: Gráfico da temperatura em função da área das manchas solares.

A Figura 37 apresenta as correlações do campo magnético extremo com o contraste das manchas solares de cada período do ciclo solar 23. As linhas de ajuste quadrático em laranja para os quatro períodos A, B, C e D apresentam coeficientes muito semelhantes. A Tabela 10 mostra a equação de segundo grau $ax^2 + bx + c$ ajustada para cada um dos quatro períodos. Comparando os parâmetros das equações de ajustes de cada período do ciclo solar 23, nota-se uma variação muito pequena entre eles. O parâmetro c da equação de segundo grau ajustada para os períodos do ciclo solar 23, apresentou um valor ligeiramente maior no período D, esse comportamento pode ser um indicio de que o período D apresentou manchas solares com menor contraste ou, em outras palavras, mais quente do que os outros períodos. O mesmo comportamento é observado na Figura 38 e na Tabela 11 que comparam a correlação entre temperatura e área das manchas solares para cada período do ciclo solar 23.

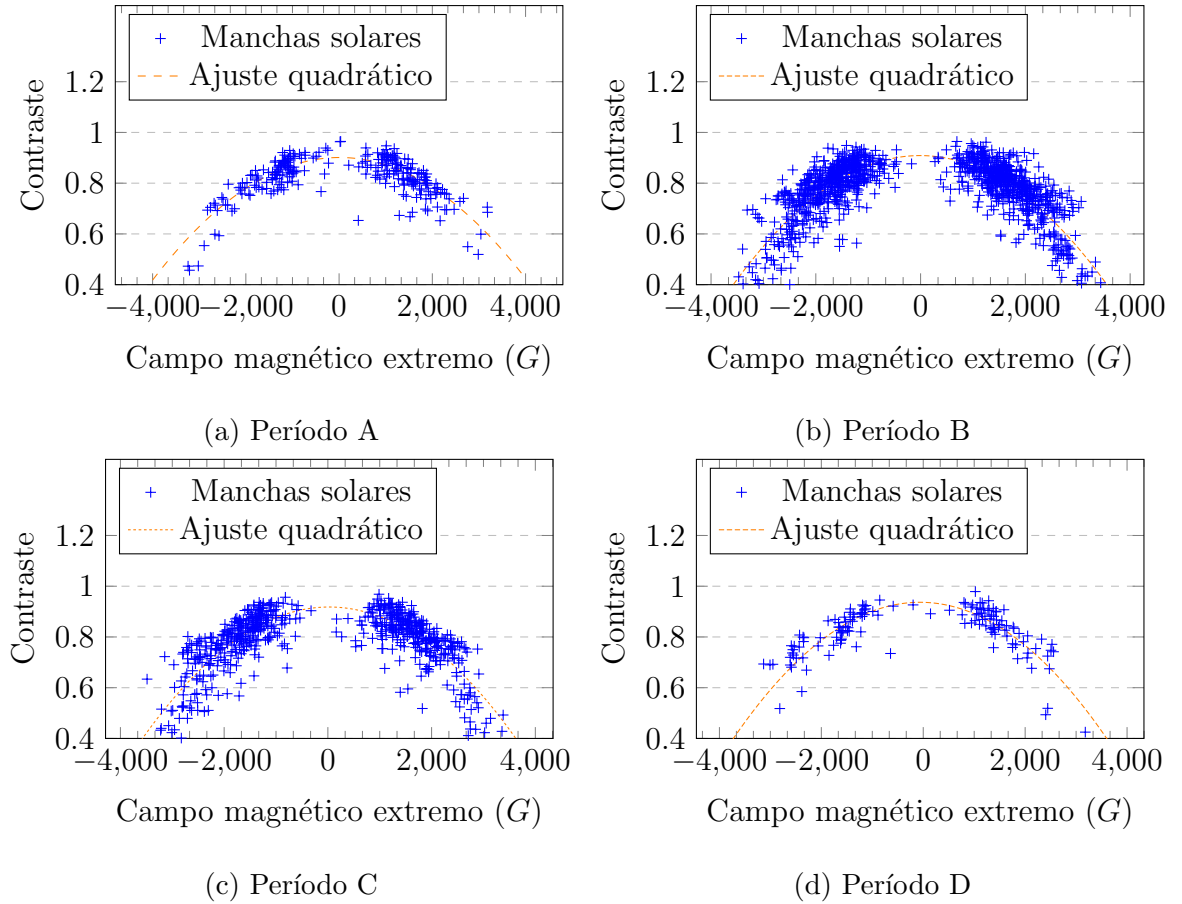


Figura 37: Gráfico do contraste em função do campo magnético extremo das manchas solares.

Tabela 10: Comparação entre as equações de ajuste da correlação com o contraste e o campo magnético extremo (x) das manchas solares.

Período	Equação de Ajuste
A	$-3 \times 10^{-8}x^2 + 8 \times 10^{-7}x + 0.9012$
B	$-4 \times 10^{-8}x^2 - 7 \times 10^{-7}x + 0.9088$
C	$-4 \times 10^{-8}x^2 + 2 \times 10^{-6}x + 0.9180$
D	$-4 \times 10^{-8}x^2 - 5 \times 10^{-6}x + 0.9365$

Tabela 11: Comparação entre as equações de ajuste da correlação com a temperatura e o campo magnético extremo (x) das manchas solares.

Período	Equação de Ajuste
A	$-5 \times 10^{-5}x^2 + 2.2 \times 10^{-3}x + 5645.2$
B	$-7 \times 10^{-5}x^2 - 1.3 \times 10^{-3}x + 5668.2$
C	$-7 \times 10^{-5}x^2 + 2.6 \times 10^{-3}x + 5681.9$
D	$-7 \times 10^{-5}x^2 - 9.4 \times 10^{-3}x + 5705.9$

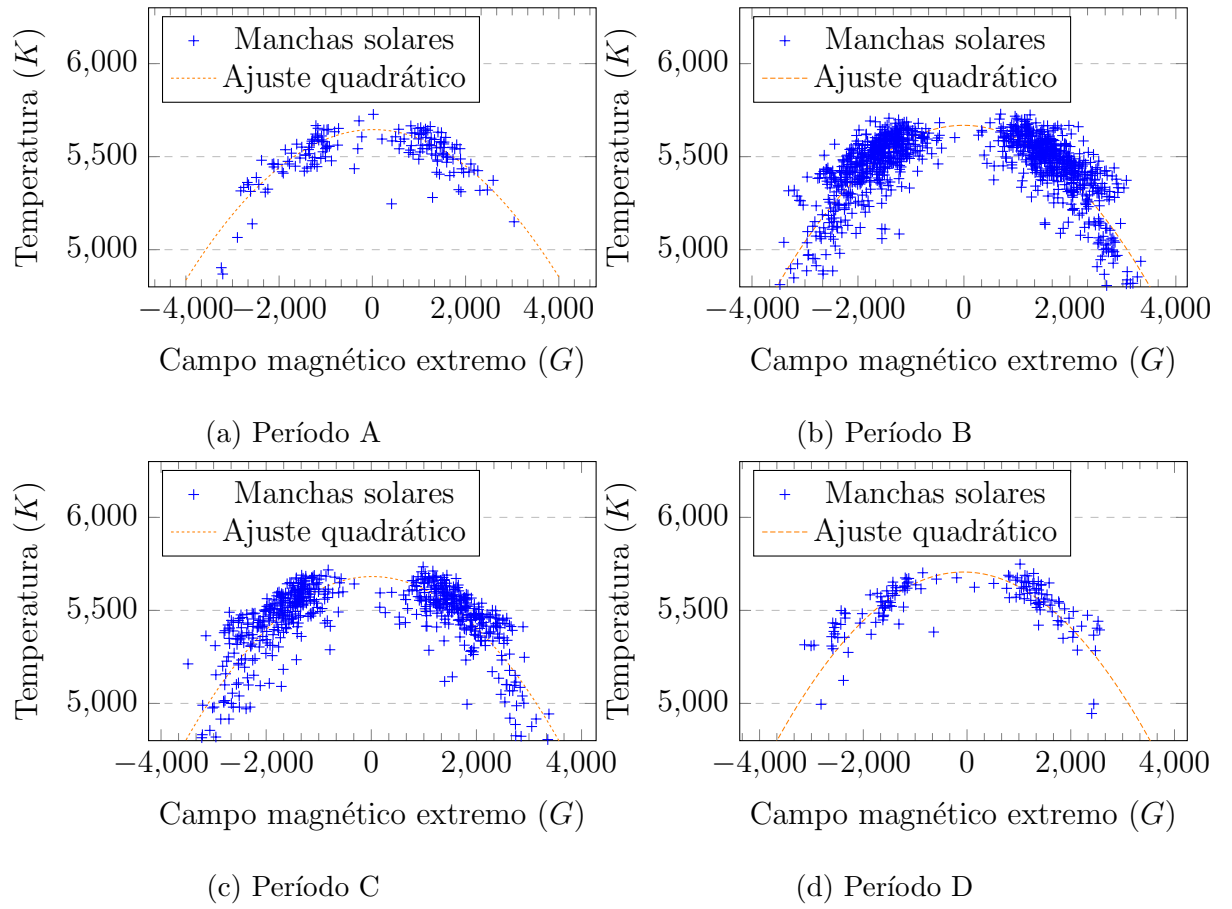


Figura 38: Gráfico da temperatura em função do campo magnético extremo das manchas solares.

A Figura 39 apresenta os gráficos do log da área em função do campo magnético extremo das manchas solares para cada período do ciclo solar 23. A linha laranja mostra o ajuste para os quatro períodos A, B, C e D enquanto a Tabela 12 lista a equação $y = ax + b$ ajustada para cada um dos quatro períodos aos valores positivos (B_{pos}) e negativos (B_{neg}) do campo magnético extremo das manchas solares.

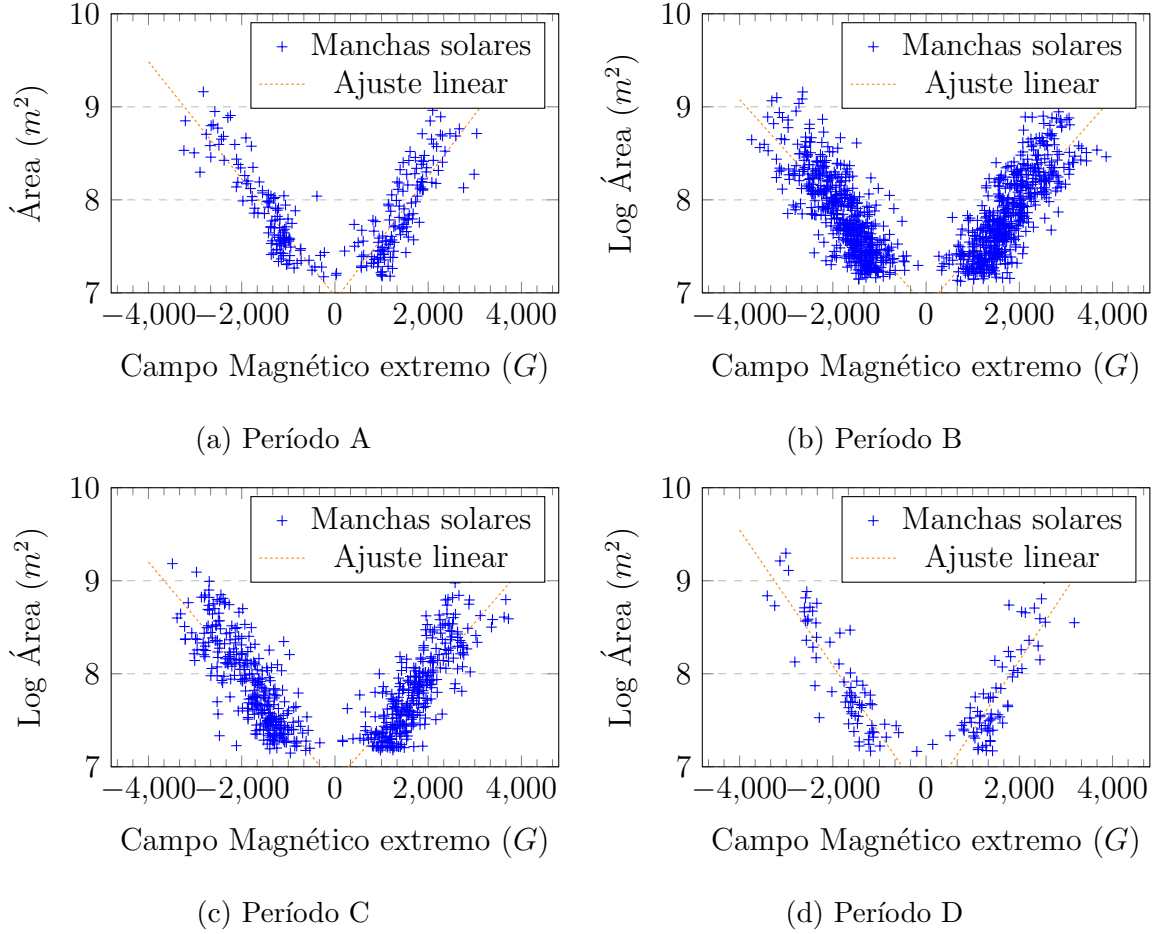


Figura 39: Gráfico de dispersão da área em função do campo magnético extremo das manchas solares.

Comparando os parâmetros das equações de ajustes de cada período do ciclo solar 23 nota-se uma diminuição do parâmetro a com o decorrer do ciclo solar 23 enquanto o parâmetro b é ligeiramente menor nos períodos de máxima atividade solar (B e C).

Tabela 12: Comparação entre as equações de ajuste da correlação com o log da área e o campo magnético extremo (x) das manchas solares.

Período	Equação de Ajuste	
	B_{pos}	B_{neg}
A	$6.66 \times 10^{-4}x + 6.92$	$-6.23 \times 10^{-4}x + 6.97$
B	$5.61 \times 10^{-4}x + 6.85$	$-5.56 \times 10^{-4}x + 6.86$
C	$5.72 \times 10^{-4}x + 6.83$	$-5.95 \times 10^{-4}x + 6.82$
D	$7.57 \times 10^{-4}x + 6.63$	$-7.29 \times 10^{-4}x + 6.63$

7 CONCLUSÕES

As manchas solares são regiões mais frias na fotosfera solar que evoluem até se dissiparem. A observação contínua das manchas solares revelou um comportamento cíclico da atividade solar, oscilando entre períodos de baixa atividade e períodos de alta atividade. As manchas solares são estudadas e catalogadas desde o monitoramento do fenômeno com telescópios a partir de 1610. O estudo do comportamento de suas características tem sido importante para entender outros fenômenos relacionados à atividade solar e ao dínamo solar.

Em 1995, a NASA colocou em órbita o satélite SOHO, com a missão de observar o Sol com diferentes instrumentos sem a interferência da atmosfera terrestre, fornecendo, assim, imagens mais detalhadas e precisas da fotosfera solar. Este trabalho utilizou imagens do satélite SOHO disponíveis no arquivo de imagens do projeto durante o ciclo 23.

O objetivo deste trabalho foi detectar manchas solares e extrair suas características automaticamente ao longo de todo o ciclo solar 23. Também analisamos os dados obtidos para verificar o comportamento das características físicas das manchas durante o ciclo solar 23 e determinar a existência de correlações entre estas.

Para detecção das manchas solares foi utilizada a morfologia matemática, uma versátil técnica de visão computacional usada tanto para filtragem de ruído quanto para realce de áreas de interesse em imagens. O algoritmo utilizado neste trabalho foi inspirado no algoritmo desenvolvido por Curto, Blanca e Martínez (2008) para detecção de manchas solares em imagens produzidas pelo observatório Ebro.

Foi desenvolvido um programa de nome *sunspot* que implementa os algoritmos e a metodologia descritos neste trabalho. O *sunspot* processou 6.870 imagens do disco solar completo, com data de observação de julho de 1997 até janeiro de 2008, que compreende o ciclo solar 23, e detectou 32.317 manchas solares, com longitude entre -40° e 40° . O *sunspot* calculou o principal indicador de atividade solar, o número de Wolf. A série diária do número de Wolf gerada foi comparada com os dados do centro de pesquisa SIDC, como pode ser observado na Figura 19 e apresentou uma correlação de 95%. Esse resultado reafirma os resultados de Zharkov et al. (2005), Curto, Blanca e Martínez (2008) e Spagiari et al. (2012) que as manchas solares podem ser detectadas automaticamente

utilizando visão computacional.

Com base nas características físicas extraídas das manchas solares detectadas, verificou-se uma correlação quadrática entre a temperatura e campo magnético das manchas solares. Esta correlação foi encontrada também por Kopp e Rabin (1992), anteriormente Dicke (1970) descreveu essa correlação não linear com a temperatura da mancha solar em função do quadrado do seu campo magnético, como pode ser visto na Equação 17. O ajuste da equação $aB^2 + c$ aos dados extraídos por este trabalho, resultou em parâmetros a e c próximos aos calculados por Dicke (1970), como pode ser visto na Figura 33, a linha vermelha é a equação de ajuste com os parâmetros calculados por Dicke (1970), e a linha verde é a equação de ajuste com os parâmetros calculados utilizando os dados gerados por este trabalho.

Foram encontradas, também, correlações lineares entre o logaritmo da área e campo magnético extremo, assim como, entre temperatura e log da área. Essas correlações podem ser verificadas, respectivamente, nas Figuras 34 e 31.

Verificou-se, também, se as correlações encontradas com base no conjunto de dados completo do ciclo solar 23 foram mantidas ou se sofreram alterações em diferentes períodos do ciclo solar. Para tanto, o ciclo solar 23 foi dividido em quatro partes e cada período representando aproximadamente um quarto do ciclo solar. Todas as correlações encontradas no conjunto de dados completo do ciclo solar 23 se mantiveram para os quatro subperíodos definidos com variações pequenas nas correlações entre as características.

Quanto à evolução temporal dos parâmetros físicos das manchas solares, notamos que durante períodos de máxima atividade, as manchas são maiores, mais frias e com campo magnético mais intenso que no início ou final do ciclo 23.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHLUWALIA, H. S.; YGBUHAY, R. C. Sunspot cycle 24 and the advent of dalton-like minimum. *Advances in Astronomy*, v. 2012, p. 5, 2012.
- BABCOCK, H. W. The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-YEAR Cycle. v. 133, p. 572, mar 1961.
- BORRERO, J. M.; ICHIMOTO, K. Magnetic structure of sunspots. *Living Reviews in Solar Physics*, v. 8, n. 4, 2011. Disponível em: <<http://www.livingreviews.org/lrsp-2011-4>>.
- COLAK, T.; QAHWAJI, R. Automatic sunspot classification for real-time forecasting of solar activities. *ICEEE Conference on Recent Advances in Space Technologies*, p. 733–738, Junho 2007.
- CURTO, J.; BLANCA, M.; MARTÍNEZ, E. Automatic sunspots detection on full-disk solar images using mathematical morphology. *Solar Physics*, Springer Netherlands, v. 250, p. 411–429, 2008. ISSN 0038-0938. 10.1007/s11207-008-9224-6. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11207-008-9224-6>>.
- DICKE, R. H. Why are Sunspots Dark and Faculae Bright? v. 159, p. 25, jan. 1970.
- EDDY, J. A. The maunder minimum. *Science*, v. 192, p. 1189–1202, 1976.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. C. *Processamento Digital de Imagens*. 3. ed. [S.l.]: Editora Pearson Prentice Hall, 2010. 415-449 p.
- HATHAWAY, D. H. The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, v. 12, n. 4, 2015. Disponível em: <<http://www.livingreviews.org/lrsp-2015-4>>.
- HATHAWAY, D. H.; WILSON, R. M.; REICHMANN, E. J. The shape of the sunspot cycle. *Solar Physics*, v. 151, p. 177–190, 1994.
- INTEL; GARAGE, W. *Open Source Computer Vision Library*. 1999. <http://opencv.willowgarage.com>.

- JAVARAIAH, J. Long-term temporal variations in the areas of sunspot groups. *Advances in Space Research*, v. 52, n. 5, p. 963 – 970, 2013. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117713002901>>.
- KOPP, G.; RABIN, D. A relation between magnetic field strength and temperature in sunspots. *Solar Physics*, v. 141, p. 253–265, 1992.
- PENN, M. J.; LIVINGSTON, W. Temporal Changes in Sunspot Umbral Magnetic Fields and Temperatures. *Astrophysical Journal*, v. 649, 2006.
- SCHERRER, P.; HOEKSEMA, J.; BUSH, R. The solar oscillations investigation a michelson doppler imager for soho. *Advances in Space Research*, v. 11, n. 4, p. 113 – 122, 1991. ISSN 0273-1177.
- SILVA-VALIO, A. et al. Properties of starspots on corot-2 *. *A&A*, v. 510, p. A25, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200911904>>.
- SPAGIARI, A. E. et al. *Avanços em Visão Computacional*. 1. ed. Curitiba, PR: Omnipax, 2012. Capítulo 18. ISBN 978-85-64619-09-8.
- THOMPSON, W. T. Standardized coordinate systems for solar image data. *Advances in Space Research*, v. 29, n. 12, p. 2093 – 2098, 2002. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117702001552>>.
- TOMA, G. de et al. Analysis of sunspot area over two solar cycles. *The Astrophysical Journal*, v. 89, p. 770–783, 2013.
- VALIO, A.; SPAGIARI, E. Starspots magnetic field by transit mapping. In: *Magnetic Fields throughout Stellar Evolution*. [s.n.], 2013. (Proceedings of the International Astronomical Union, v. 9), p. 220–221. Disponível em: <http://journals.cambridge.org/article_S1743921314002129>.
- ZHARKOV, S. et al. Technique for automated recognition of sunspots on full-disk solar images. *EURASIP J. Appl. Signal Process.*, Hindawi Publishing Corp., New York, NY, United States, v. 2005, p. 2573–2584, January 2005. ISSN 1110-8657. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/ASP.2005.2573>>.

ZHARKOVA, V. et al. A full-disk image standardisation of the synoptic solar observations at the meudon observatory. *Solar Physics*, Springer Netherlands, v. 214, p. 89–105, 2003. ISSN 0038-0938. 10.1023/A:1024081931946. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1024081931946>>.