

Alinhamento automático de imagens do disco solar e determinação precisa de coordenadas heliográficas de manchas solares com PySDIA

Cicero Dário Grangeiro¹, Tharcísyo Sá e Sousa Duarte¹, Jefferson Soares Da Costa² e Hugo Rodrigues Coelho²

¹Universidade Federal do Cariri

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo

Este trabalho apresenta o PySDIA (Python Solar Disc Image Alignment), um código Python automatizado para alinhamento e correção rotacional de imagens de discos solares capturadas com telescópios de pequena abertura. Aplicamos o PySDIA a um conjunto de 101 imagens próprias, abrangendo o período de 8 de novembro de 2022 a 4 de dezembro de 2023, para caracterizar e extrair coordenadas heliográficas de 250 manchas solares. Para validar nossos resultados, comparamos nossos dados com medições do SDO extraídas usando o software HelioViewer v2.2. O PySDIA alinhou e rotacionou efetivamente nossas imagens, alcançando excelente correlação entre as coordenadas das nossas manchas solares e as do SDO. Nossos resultados demonstram que medições precisas de coordenadas de manchas solares podem ser obtidas ao longo do tempo usando equipamentos prontamente disponíveis, permitindo contribuições independentes para registros e estudos de manchas solares.

Abstract

This work introduces PySDIA (Python Solar Disc Image Alignment), an automated Python code for image alignment and rotational correction of solar disc images captured with small aperture telescopes. We have been applied PySDIA to a set of 101 self-obtained images spanning November 8, 2022 to December 4, 2023, to characterize and extract heliographic coordinates for 250 sunspots. To validate our results, we compared our data with SDO measurements extracted using HelioViewer v2.2 software. PySDIA effectively aligned and rotated our images, achieving excellent correlation between our sunspot coordinates and those from SDO. Our results demonstrate that precise sunspot coordinate measurements can be obtained over time using readily available equipment, enabling independent contributions to sunspot records and studies.

Palavras-chave: telescópio de pequena abertura, manchas solares, coordenadas heliográficas, PySDIA.

Keywords: small aperture telescope, sunspots, heliographic coordinates, PySDIA.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.44352](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.44352)

1 Introdução

As observações das manchas solares desempenharam um papel crucial na compreensão da atividade solar. Os primeiros registros datam de 1500-1050 A.C. com astrônomos chineses realizando observações a olho nu [1]. Na Europa, as observações documentadas de manchas solares começaram por volta de 807 D.C. [2]. No entanto, os estudos sistemáticos começaram apenas em 1610 com o advento do telescópio por Harriot e Galileo [3]. Desde então, o Sol tornou-se um objeto passível de ser observado e registrado

nos mais variados comprimentos de onda e com foco principalmente nas manchas solares [3], que conduziu, por exemplo, às descobertas do ciclo de manchas solares de 11 anos por Schwabe em 1843 [4] e a rotação diferencial por Carrington em 1860 [5].

Uma das abordagens mais acessíveis para observar e estudar a superfície solar envolve a criação de um sistema de observação composto por um telescópio de pequena abertura, um filtro solar e uma câmera comercial. Com esta configuração é possível fazer observações e registrar

imagens diretamente, seja utilizando câmeras comerciais ou *webcams* adaptadas à ocular do telescópio, desde que um filtro de luz branca esteja sempre acoplado à lente objetiva [6–8]. Tais registros, mesmo com câmeras simples como as dos *smartphones*, poderiam ser a base para a criação de um catálogo independente de manchas solares. Ao fazer estas observações de forma consistente durante um período prolongado, registrando diariamente o disco solar, processando as imagens para melhorar a sua qualidade e armazenando-as cuidadosamente para análise posterior, é possível construir um valioso repositório de dados. Este catálogo pode permitir a extração de informações valiosas e o estudo de características físicas periódicas, permitindo o estudo da morfologia das manchas solares e a detecção de um padrão cíclico na atividade solar, já descrito por vários trabalhos como os de [4, 9–13].

Uma das aplicações que este catálogo também pode oferecer é a possibilidade de contribuir para programas oficiais de observação solar, como o programa de contagem de manchas solares administrado pela AAVSO (*American Association of Variable Star Observers*), descrito por [6], em seu livro “*The sun and how to observe it*”. Outra aplicação é inferir a rotação diferencial do Sol monitorando essas manchas solares ao longo dos dias, como feito por [5]. Esta atividade é acessível em vários níveis de complexidade, tornando-a flexível e adaptável a diferentes contextos de investigação e observação.

Um desafio significativo que encontramos nas nossas observações foi o de registrar imagens do disco solar preservando a mesma configuração inicial. Isso se deve a variações nas configurações dos equipamentos, telescópios e câmeras, em que os equipamentos são frequentemente montados e desmontados entre as sessões de observação. Isto torna impossível determinar com precisão os polos norte e sul celestes e a orientação do disco solar nas imagens, a fim de determinar um sistema de coordenadas, conforme descrito por [6]. Como resultado da variabilidade do sistema de observação, as imagens por nós obtidas mostram um disco solar deslocado do centro da imagem e rotacionado, podendo esta rotação variar, tanto pela inclinação do eixo de rotação solar, que varia durante o ano, como a configuração da posição da câmera. Esta variabilidade dificulta a

determinação precisa dos parâmetros de latitude e longitude das manchas solares, tornando essencial o alinhamento dessas imagens para a realização de estudos eficazes. O desafio, portanto, está no fato de que realizar o alinhamento manualmente, por meio de programas de edição de fotos, pode ser uma tarefa tediosa e suscetível a imprecisões, principalmente quando se trata de um grande volume de imagens. Além disso, o alinhamento manual pode resultar em erros sistemáticos nas medidas analisadas.

Diante desses fatores, desenvolvemos um código em linguagem de programação Python, denominado PySDIA¹ (*Python Solar Disc Image Alignment*). O PySDIA é um código desenvolvido na nossa Instituição, IFE/UFCA, sendo projetado para otimizar e automatizar o alinhamento de imagens do disco solar, um processo fundamental em diversas áreas da física solar. Sendo assim, o objetivo principal do nosso trabalho é apresentar e detalhar essa ferramenta computacional, com foco particular em seu processo de calibração.

A estrutura do artigo está organizada da seguinte forma: a segunda seção detalha os procedimentos e dados observacionais utilizados para validar o PySDIA. Na terceira seção, aprofundamos a descrição dos procedimentos metodológicos empregados no desenvolvimento e aplicação do código. A quarta seção apresenta e discute os resultados obtidos através da aplicação do PySDIA, evidenciando sua eficácia e potencial para física solar. Por fim, a quinta seção sintetiza as nossas conclusões.

2 Procedimentos observacionais e registros de manchas solares

Para o processo de observação do disco solar utilizando um telescópio de pequena abertura, e dependendo do nível de investimento, é possível utilizar as mais variadas câmeras digitais comerciais para capturar imagens do disco solar. Após o advento das câmeras digitais, houve avanços significativos no registro, processamento e arquivamento de imagens do disco solar, o que possibilitou o desenvolvimento do estudo das manchas solares. Os telescópios passaram então a ser equipados com instrumentos desse tipo, como o

¹<https://github.com/grangeirodario/PySDIA>



Figura 1: O processo de montagem da câmera no telescópio usando o método focal. À esquerda, câmera Canon EOS Rebel T6i com adaptador *T-Mount* no lugar da lente, ao centro, câmera acoplada ao telescópio e destacando o filtro solar, e à direita, telescópio alinhado e pronto para observação.

Observatório de Ebro, localizado na região da Catalunha/Espanha, que em 2001 foi equipado com uma câmera CCD (charge-coupled device) para registrar e estudar a fotosfera solar [14].

De maneira geral, os registros do disco solar podem ser feitos por qualquer pessoa que domina conceitos básicos de astronomia, para isso pode utilizar um telescópio simples de pequena abertura, acoplado a um filtro solar certificado e uma câmera digital, ou com a câmera do próprio *smartphone*. Com base nessa ideia, nós do Grupo de Física e Astronomia do Cariri (GFAC) iniciamos o monitoramento diário do disco solar em 2022 para registrar e estudar a evolução das manchas solares e suas características físicas. As observações e registros de dados foram e continuam sendo feitos a partir do nosso Instituto de Formação de Educadores - IFE, campus da Universidade Federal do Cariri - UFCA, localizado na cidade de Brejo Santo, interior do estado do Ceará, Brasil (latitude $-7,486^\circ$ e longitude $-38,984^\circ$).

Para observar e registrar as imagens, utilizamos um telescópio refletor Newtoniano Celestron Astromaster com abertura de 114 mm e distância

focal de 1000 mm com montagem equatorial germânica, filtro solar de luz branca Baader acoplado à abertura do telescópio e uma câmera *Canon EOS Rebel T6*. Esta câmera é categorizada como DSLR (*Digital Single Lens Reflex*), possui sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) com resolução máxima de 1,04 milhão de *pixels*, que gera imagens com até 6000×4000 *pixels*. As gravações foram feitas no modo focal (foco primário). O modo focal consiste em uma técnica de observação e gravação em que retiramos a lente da ocular do telescópio e montamos a câmera (sem objetiva) diretamente na ocular do telescópio, utilizando um adaptador *T-Mount*, conforme mostra a Figura 1. Mais detalhes sobre o modo focal e afocal de observação e registro podem ser encontrados no trabalho de [15]. Na objetiva do telescópio utilizamos um filtro solar de luz branca Baader. Este filtro permite-nos visualizar com segurança o disco solar e consequentemente observar e registrar as manchas solares, pois quando observamos o Sol em luz branca, a camada que pode ser visualizada é a fotosfera, região onde se destacam as manchas solares.

Os dados são registrados diariamente quando as condições climáticas são favoráveis. As observações são feitas no período da tarde, por volta das 15h, e ao longo da semana (segunda a sexta) para monitoramento semanal do disco solar. Dias sem manchas solares, previamente verificados conforme dados base do SDO ou dias cujas condições não sejam favoráveis à observação, são desconsiderados para efeito de registro. Em relação às configurações da nossa câmera, adotamos: ISO 400 e tempo de abertura do obturador de 1/4000 segundo. Vale destacar que o ISO controla a sensibilidade do sensor à luz, valores mais altos captam mais luz, ideal para objetos pouco brilhantes em ambientes escuros, o que não era o nosso caso. Por outro lado, a velocidade do obturador determina o tempo de exposição do sensor à luz, tempos mais curtos congelam o movimento, ideal para objetos brilhantes e rápidos, nesse caso coerente para as observações do Sol. É importante fazer vários testes para determinar a melhor configuração para seu objeto de estudo. A respeito do processo de registro das imagens, elas são obtidas em RGB, características do equipamento, com dimensões de 6000x4000 *pixels*. Em cada observação, realizamos o registro em média de trinta imagens do disco solar usando o modo de disparo contínuo da câmera. Essas imagens são então empilhadas para gerar uma nova imagem a fim de melhorar sua qualidade.

2.1 Perspectiva do disco solar nas imagens

Ao registrar o disco solar para estudar a evolução das manchas solares, é importante considerar um método confiável para identificar os polos norte e sul do Sol nas imagens, a fim de determinar e comparar as coordenadas heliográficas que serão extraídas com imagens de referência. No entanto, esta pode ser uma tarefa desafiadora, já que os telescópios refletores frequentemente invertem as imagens. Além disso, o observador deve estar ciente de que o eixo solar e o equador sofrem variações anuais em suas posições. O equador solar está inclinado em um ângulo de $7,25^\circ$ em relação ao plano da órbita da Terra (a eclíptica). Ao longo do ano, a latitude heliográfica B_0 do centro do disco solar varia entre $+7,25^\circ$ e $-7,25^\circ$. O ângulo de posição P_0 entre o eixo solar e a direção norte-sul no céu varia entre $+26,37^\circ$ e $-26,37^\circ$ [7]

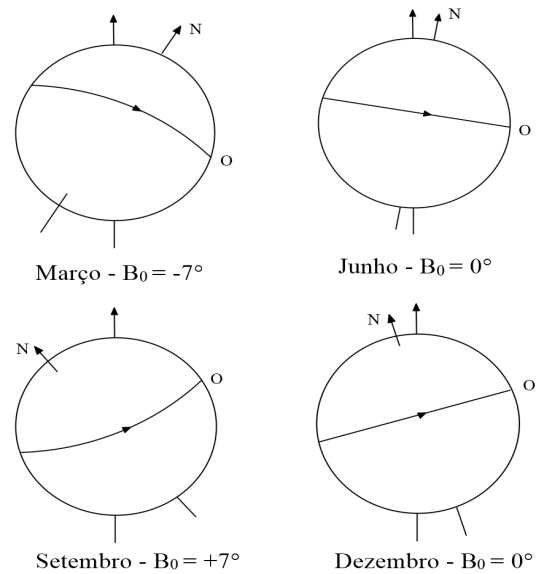


Figura 2: Ilustração das variações anuais na posição do eixo e do equador solar (imagem adaptada de [7]). Durante certas épocas do ano, o polo norte do Sol está inclinado em direção à Terra, enquanto em outras épocas está inclinado para longe da Terra.

conforme ilustrado na Figura 2.

Para definir a posição do eixo solar, uma abordagem simples é girar a imagem usando como referência uma imagem de mesma data e hora aproximada obtida de um observatório de referência como o *Solar Dynamics Observatory* (SDO). O SDO registra diversas imagens durante um único dia e seus dados são acessíveis publicamente e podem ser facilmente obtidos através do repositório do *Heliviewer*². Porém, ao utilizar imagens do SDO, encontramos alguns desafios. As imagens obtidas no SDO possuem dimensões de 4096x4096 *pixels* e nossas imagens possuem dimensões de 6000x4000 *pixels*, o que inicialmente resulta em discos solares de diferentes escalas entre as imagens. Além disso, a disposição do disco solar na imagem captada pelo nosso instrumento em relação ao centro da imagem pode mudar, diferentemente da imagem SDO, onde o disco solar fica perfeitamente centralizado na imagem, como pode ser visto na Figura 3.

Para resolver problemas de discrepâncias entre

²*Heliviewer.org* faz parte do *Heliviewer Project*, um projeto de código aberto para a visualização de dados solares e heliosféricos. O Projeto *Heliviewer* é financiado pela ESA e NASA.

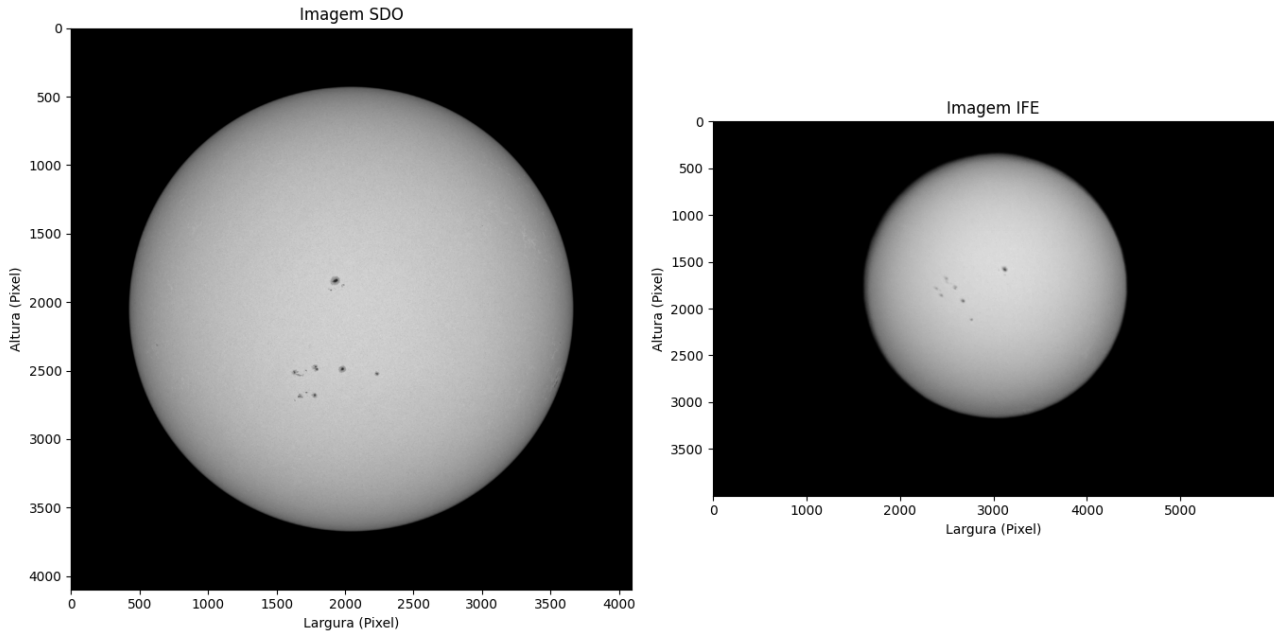


Figura 3: Comparação entre uma imagem SDO (esquerda) e a nossa própria imagem (direita) do mesmo dia, 12/04/2023. Nossas imagens têm resolução diferente das do SDO, o disco solar é deslocado do centro da imagem e rotacionado em um certo ângulo.

as nossas imagens e as de referência, poderíamos utilizar um programa de edição de fotos, mas isso seria cansativo e praticamente inviável devido à enorme quantidade de imagens. Uma extensa série de imagens é essencial para estudos de manchas solares de longo prazo, e alinhá-las manualmente exigiria muitas horas de trabalho e também poderia levar a muitos erros e imprecisões, o que prejudicaria a eficiência do trabalho. Com todos esses problemas em mente, desenvolvemos um código na linguagem de programação Python para centralizar e alinhar automaticamente nossas imagens. As etapas deste código serão detalhadas na seção a seguir.

3 Processamento e alinhamento de imagens utilizando o PySDIA

Devido à simplicidade do nosso telescópio portátil e ao movimento aparente do Sol ao longo dos meses, as imagens recolhidas mostrarão diferentes posições do disco solar. Por conta disso, nosso código utiliza uma imagem base com o disco solar centralizado e alinhado como referência, estabelecendo um padrão uniforme para todas as demais imagens gravadas. A Figura 4 mostra um exemplo do processo automatizado de alinhamento do

disco solar usando PySDIA em nossa própria imagem datada de 12/04/2023, em comparação com a imagem SDO correspondente. Vale ressaltar que todo o procedimento de centralização e alinhamento das imagens é feita através de um processo automatizado, conforme detalharemos na sequência.

3.1 Centralizando o disco solar

Iniciamos o processamento das imagens removendo inicialmente o fundo delas para evitar erros nessa fase. A seguir, convertemos a imagem obtida de RGB para escala de cinza, em 8 bits de representação, e criamos uma cópia binarizada de ambas as imagens, de modo que todos os *pixels* com valor de intensidade abaixo de um limite igual a 10 recebam um valor zero, e todos os *pixels* com valores acima recebam um valor máximo de nível de cinza. Este procedimento resulta em imagens cópia com um disco claro (valor de intensidade 255) sobre fundo escuro (valor de intensidade 0), conforme mostrado na Figura 4 (A).

A binarização é definida de acordo com a documentação do OpenCV [16], como:

$$dst(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{se } src(x, y) < thresh ; \\ Max & \text{se outra forma} \end{cases} \quad (1)$$

Etapas do procedimento de alinhamento

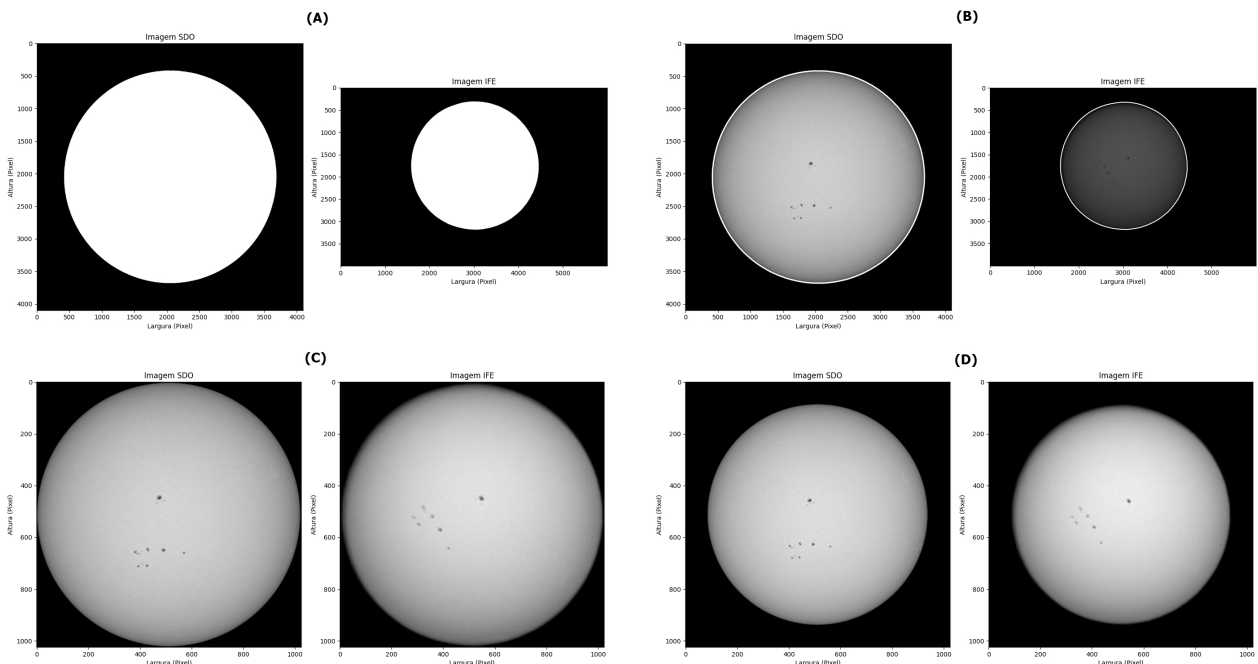


Figura 4: Etapas do processo automatizado de alinhamento do disco solar em uma de nossas próprias imagens datada de 12/04/2023, comparada com a imagem SDO correspondente: (A) binarização, (B) disco solar contornado, (C) imagem recortada de acordo com o coordenadas máximas e mínimas do contorno e (D) redimensionamento da imagem.

onde $dst(x, y)$ é a intensidade resultante, $src(x, y)$ é a intensidade a ser binarizada, $thresh$ é o valor limite definido (no nosso caso 10) e Max é o valor máximo do nível de cinza (no nosso caso 255). O valor escolhido para o limiar de binarização foi definido através da análise da intensidade dos *pixels* na região de borda do disco solar, onde se constatou que eles estão em média com valor de intensidade 10.

Após a etapa de binarização, criamos um contorno nas regiões onde a diferença entre as intensidades dos *pixels* é maior que 255, como a imagem binarizada possui um disco claro sobre fundo escuro, este procedimento contorna o disco solar binarizado conforme mostrado na Figura 4 (B). Assim, obtemos as coordenadas mínimas e máximas nos respectivos eixos x e y em *pixels* que correspondem ao início e ao final dos contornos da imagem. Utilizando essas coordenadas, redefinimos as imagens originais para que tenhamos os limites da imagem tangenciais às coordenadas mínimas e máximas do disco solar em ambos os eixos, conforme mostrado na Figura 4 (C).

A seguir, adicionamos uma borda de 110 *pixels* (tamanho em *pixels* da borda nas imagens

SDO) às duas imagens e estabelecemos a mesma dimensão, de 1024x1024 *pixels*, obtendo assim duas imagens centralizadas com discos solares de mesma escala, conforme mostrado na Figura 4 (D). Este procedimento é necessário para que o centro do disco solar em nossos registros coincida exatamente com o centro da imagem de referência, etapa essencial para o procedimento de alinhamento por rotação. Este procedimento é repetido automaticamente para todas as imagens capturadas no mesmo dia para que possamos passar à etapa de empilhamento.

3.2 Empilhamento de imagens

Após o procedimento de alinhamento, passamos para a fase de empilhamento das imagens capturadas naquele dia. Para esta etapa é necessário que todas as imagens estejam centralizadas, caso contrário, diferentes *pixels* seriam sobrepostos, gerando uma imagem distorcida. A técnica de empilhamento de imagens é uma abordagem comum no processamento de imagens e visa melhorar a qualidade visual de uma cena composta por diversas imagens. É constantemente utilizado em situações onde há variabilidade de ilumina-

ção, ruídos ou artefatos que podem dificultar a captura de uma boa imagem [17].

Para o nosso caso, consideramos como empilhamento simplesmente o cálculo da intensidade média de *pixels* em todas as imagens capturadas durante um dia de observação, ou seja, a intensidade de *pixels* na posição (i, j) na imagem resultante, que podemos representar por $I(i, j)$, é a soma dos valores de intensidade de pixel na posição (i, j) em cada imagem, dividida pelo número de imagens na série, que pode ser descrita como:

$$I(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I_k(i, j) \quad (2)$$

onde $I(i, j)$ representa o valor de intensidade de pixel resultante na posição (i, j) , n representa o número de imagens e $I_k(i, j)$ representa o valor do pixel na posição (i, j) da k -ésima imagem. Após o procedimento de empilhamento, obtemos uma nova imagem resultante.

3.3 Alinhamento rotacional

Concluídos os processos de centralização e empilhamento da imagem, passamos à fase de alinhamento, que consiste em girar a imagem de forma que as coordenadas dos pontos da imagem por nós obtida fiquem alinhadas com as coordenadas desses mesmos pontos na imagem de referência SDO do mesmo dia e horário aproximado. Em geral, uma imagem digital é uma matriz, de modo que cada elemento da matriz determina a intensidade do pixel correspondente. Assim, alinhar uma imagem com base numa imagem de referência significa alterar o sistema de coordenadas dessa imagem (por translação ou rotação) para uma configuração que seja a mais próxima possível da imagem de referência. Considerando que nesta fase temos os discos solares na mesma posição, precisamos portanto, modificar o sistema de coordenadas dos *pixels* através de rotação.

Como as imagens digitais são representações em duas dimensões, a rotação pode ser definida por um único ângulo θ com o eixo Z como eixo de rotação. Para fazer isso, usamos uma matriz de mudança de base para girar qualquer vetor $\vec{v}_{(x,y)}$ por um ângulo θ em torno da origem para obter $\vec{v}_{(x',y')}$, esta matriz é definida matematicamente como:

$$M_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen} \theta \\ \text{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

de forma que:

$$\vec{v}_{(x',y')} = M_\theta \times \vec{v}_{(x,y)} \quad (4)$$

Para realizar o processo de alinhamento é necessário determinar o ângulo correto para a transformação de coordenadas. Em um processo automatizado e considerando um grande número de imagens, diversas medidas angulares devem ser levadas em consideração. Nosso objetivo é alinhar automaticamente a imagem de interesse com a imagem de referência, caso em que uma abordagem ideal para atingir esse objetivo é comparar suas matrizes de intensidade de *pixels*.

Para isso, nosso código foi estruturado nesta etapa com a seguinte sequência: girar a imagem em intervalos de 1° , tomando como origem o centro da imagem e consequentemente do disco solar, e então comparar cada rotação com os dados de referência. Essa comparação é feita medindo a diferença relativa entre as duas observações. Considerando a matriz A como a imagem referencial e a matriz B como a rotacionada, a diferença absoluta entre A e B, denotada *Diff* é definida como:

$$Diff = A - B \quad (5)$$

e a diferença relativa $Diff_r$ entre as matrizes A e B é definida como:

$$Diff_r = \frac{\sum Diff_i}{\sum B_i} \times 100 \quad (6)$$

Então criamos uma lista de 360 imagens com passos de 1° e realizamos uma comparação automática de cada uma das matrizes com base na observação utilizada como referência. A orientação que resulta na menor diferença relativa quando comparada com a imagem de referência é o ângulo que procuramos para o alinhamento. Na Figura 5, apresentamos um gráfico da diferença relativa em função do ângulo de rotação para duas imagens separadas por um ano. As imagens que utilizamos como referência para o processo de rotação foram obtidas por instrumentos diferentes dos nossos. Portanto, mesmo que a imagem esteja corretamente alinhada, a diferença relativa não chega a zero devido às diferenças na qualidade dos dados utilizados na comparação, uma

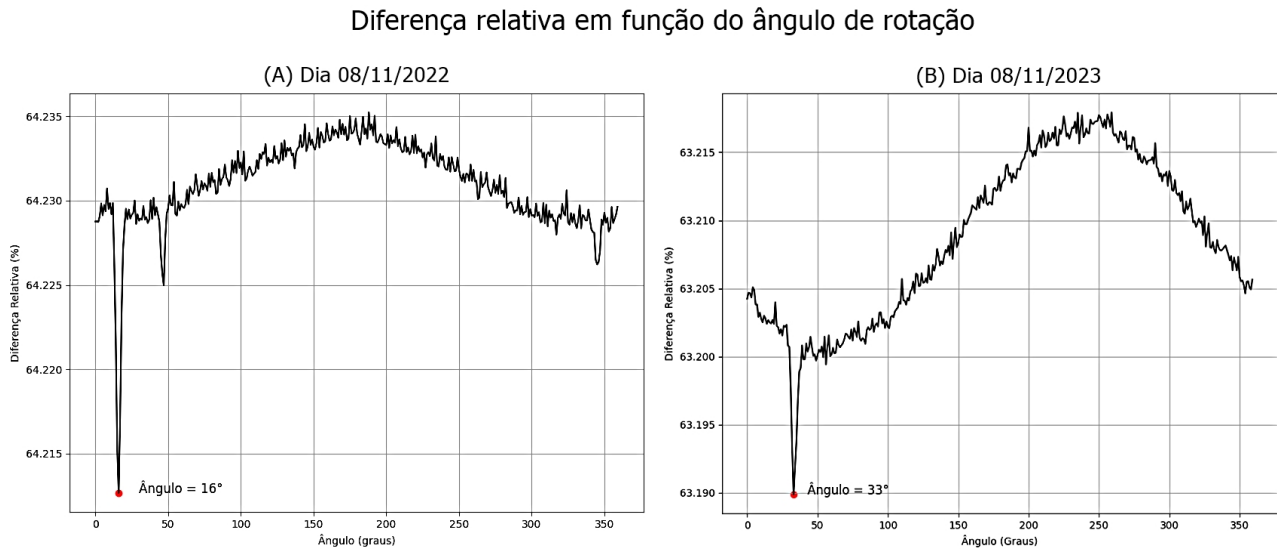


Figura 5: Diferença relativa entre a imagem de referência e a imagem alinhada em função do ângulo de rotação para 11/08/2022 (A) e um ano depois, 11/08/2023 (B), destacando seus respectivos ângulos de rotação.

vez que as imagens SDO possuem maior qualidade.

Na Figura 5 (A), traçamos a diferença relativa em função do ângulo de rotação entre as imagens do dia 11/08/2022, primeira observação feita pelo nosso grupo, e para esta imagem, descobrimos que o ângulo de rotação para a menor diferença relativa foi de 16° . Na Figura 5 (B), representamos a relação para a observação que fizemos um ano depois, ou seja, em 11/08/2023, e observamos a menor diferença relativa quando o ângulo de rotação é 33° . A diferença de ângulos demonstra a variabilidade de perspectivas obtidas ao registrar imagens do disco solar com equipamentos que são montados e desmontados diariamente.

3.4 Sistema de coordenadas heliográficas

Concluído o processo de alinhamento, temos uma imagem pronta para extrair as coordenadas heliográficas das manchas solares. Obter a posição de um elemento no disco solar significa definir um sistema de coordenadas para que possamos determinar sua posição dentro da imagem com relativa precisão. Qualquer estudo do movimento das manchas solares em relação à fotosfera requer um sistema de coordenadas absolutas, porém, este pode ser um trabalho bastante complicado, uma vez que a Terra está continuamente em órbita ao redor do Sol, criando diferentes perspectivas do disco.

De acordo com os trabalhos de [6, 7], para determinar o sistema de coordenadas heliográficas de um elemento do disco solar é necessário conhecer três parâmetros solares durante a data e hora da observação. São elas a inclinação que os polos tiveram durante a órbita anual da Terra, que determina a latitude heliográfica do equador solar, também chamada de B_0 , o deslocamento que o eixo de rotação do Sol tem em relação ao eixo de rotação da Terra, chamado P_0 e o meridiano central L_0 , que é uma linha imaginária traçada entre o polo solar norte e o polo solar sul. Os três parâmetros estão representados na Figura 6. Estas informações podem ser obtidas das Efemérides Solares, fornecido por diversas fontes, incluindo o *The Astronomical Almanac*.³

Após alinhar e rotacionar a imagem, o deslocamento do eixo de rotação e do meridiano central coincide com a linha imaginária que corta verticalmente o centro da imagem, de forma que para obter a latitude e longitude basta definir a quantidade B_0 de acordo com a data e hora da observação, para a qual utilizamos as bibliotecas Python Astropy [18] e Sunpy [19]. Utilizando Astropy, definimos a posição do Sol em relação ao observador criando um objeto *skycoord*, cujos pa-

³É uma publicação conjunta da *U.S. Nautical Almanac Office* nos *EUA Naval Observatory* e de *Her Majesty's Nautical Almanac Office* no Reino Unido e contém dados fornecidos por muitos cientistas e instituições de todo o mundo.

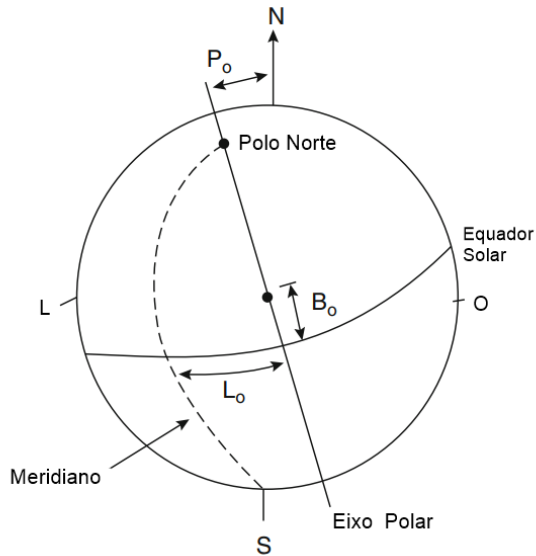


Figura 6: Sistema de coordenadas heliográficas definido com base em três parâmetros: oscilação dos polos durante a órbita anual da Terra (B_0), deslocamento que o eixo de rotação do Sol tem em relação ao eixo de rotação da Terra (P_0) e Meridiano Central (L_0) (imagem adaptada de [7]).

râmetros são a data e hora da observação, o observador (no nosso caso a Terra) e o sistema de coordenadas.

Em seguida, utilizamos a biblioteca Sunpy para criar um mapa do disco solar, determinando o sistema de coordenadas heliográficas na imagem, o que, entre outras coisas, nos permite desenhar um disco de Stonyhurst, uma grade circular com linhas de latitude e longitude sobrepostas a imagem para fazer referência às posições das manchas solares. Os parâmetros do Sunpy Map são a imagem e o cabeçalho FIT , obtido da função `sunpy.map.make_fitswcs_header`, esta função por sua vez tem como parâmetros a imagem, o objeto `skycoord` e a escala do disco solar em segundos de arco por pixel (fixado por nós em $2,4 \times 2,4$ segundos de arco/pix, correspondendo à escala do disco solar em imagens SDO). Desta forma, qualquer posição dentro do disco solar pode ser determinada em termos de latitude e longitude heliográfica.

3.5 Coordenadas heliográficas das manchas solares no disco

Com as imagens alinhadas e estabelecido o sistema de coordenadas, podemos finalmente obter as coordenadas heliográficas de cada man-

cha solar utilizando a função `ginput` da biblioteca Matplotlib [20]. Com esta função podemos clicar na imagem para obter as coordenadas daquele ponto em *pixels* e utilizar a função `pixel_to_world` do mapa Sunpy criado, para convertê-las de coordenadas de pixel para coordenadas no Sistema de Coordenadas Mundiais (*World Coordinate Systems - WCS*) de acordo com a documentação da Astropy ⁴, o Sistema de Coordenadas Mundial descreve transformações geométricas entre dois conjuntos de coordenadas e uma aplicação comum é mapear os *pixels* de uma imagem para a esfera celeste. Então, usando o objeto `skycoord` criado anteriormente, convertemos essas coordenadas em coordenadas heliográficas de `stonyhurst` usando a função `transform_to(frames.HeliographicStonyhurst)`.

Podemos, portanto, determinar as coordenadas heliográficas de qualquer elemento dentro do disco solar a partir de imagens obtidas por observatórios profissionais ou telescópios de pequena abertura.

Utilizando o procedimento descrito no último parágrafo, podemos extrair as coordenadas das manchas solares nas imagens clicando no centro da umbra (aumentando o zoom naquela região). Para melhorar a precisão da captura, definimos uma região quadrada com dimensões de 25 pixels quadrados, tomando o pixel clicado como centro desta região e selecionando aleatoriamente 10 pixels dentro desta região. Uma vez obtidas as coordenadas desses *pixels*, calculamos a média de suas coordenadas e a partir dessa média consideramos o centro do ponto. O erro padrão associado à medição foi calculado tomando-se a razão entre o desvio padrão das coordenadas dos *pixels* obtidos aleatoriamente e a raiz quadrada do número desses mesmos *pixels*, procedimento descrito por [21] em seu trabalho como:

$$E_p = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

onde σ é o desvio padrão entre os elementos analisados e n é o número desses mesmos elementos. As fases operacionais do código são descritas em detalhes no Apêndice B.

⁴<https://docs.astropy.org/en/stable/wcs/>

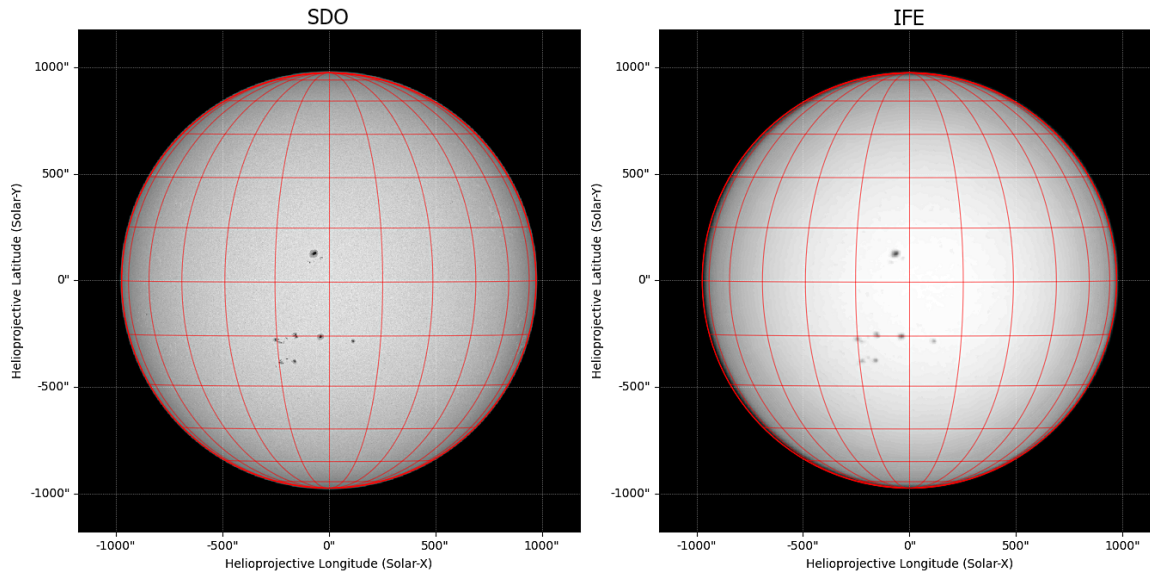


Figura 7: Comparação entre uma imagem de 4 de dezembro de 2023 processada pelo PySDIA (direita) e a imagem de referência SDO (esquerda). Ambas as imagens mostram o disco *Stonyhurst* e estão no sistema de coordenadas mundiais (segundos de arco).

4 Resultados

Com base nos procedimentos realizados, processamos e analisamos com sucesso nossas 101 imagens do disco solar, correspondendo a 250 dados de manchas solares durante os primeiros 12 meses de observações, conforme mostrado no Apêndice C. Essas imagens são preparadas para uma análise detalhada das características físicas das manchas (em preparação) e também seu comportamento dinâmico e evolutivo durante a fase atual do ciclo 25. A Figura 7 mostra uma comparação entre o resultado final do nosso processo de alinhamento para 4 de dezembro de 2023 e a referência do SDO. Ambas as imagens mostram o disco *Stonyhurst* sobreposto e em um sistema de coordenadas mundial (segundos de arco). Apesar das diferenças de qualidade devido às características dos nossos instrumentos e às influências atmosféricas, as imagens processadas possuem um sistema de coordenadas que nos permite obter latitudes e longitudes heliográficas com relativa precisão.

Para avaliar a eficácia do nosso código, analisamos 101 imagens do disco solar que passaram pelos processos de alinhamento e rotação. Obtivemos com sucesso as coordenadas heliográficas das 250 manchas solares presentes no disco e comparamos essas coordenadas com as das mesmas manchas presentes nas imagens SDO. O conjunto

de imagens utilizadas para esta análise abrangem o período de 08/11/2022 a 04/12/2023 e foram obtidas a partir de observações em nosso Instituto, levando em consideração os métodos acima mencionados. É importante notar que durante esta fase, consideramos apenas as manchas solares no disco que tinham umbra e penumbra claramente definidas visualmente.

Para calibrar e verificar nosso código, utilizamos o software *Helio Viewer v2.2* nas imagens de referência SDO para extrair de forma independente as respectivas coordenadas heliográficas das manchas solares. O software *Helio Viewer* foi desenvolvido por [22] e está disponível em seu website⁵. Com ele você pode carregar imagens do disco solar e adicionando os parâmetros de data e hora de observação, o software nos permite determinar as coordenadas das manchas solares clicando sobre elas, procedimento semelhante ao adotado pelo nosso código. Para melhor visualização dos resultados, distribuimos as coordenadas do IFE em função das coordenadas do SDO e também calculamos a diferença entre as coordenadas heliográficas das imagens SDO e IFE, subtraindo os valores das coordenadas de latitude e longitude entre essas imagens respectivamente, para obter o resíduo entre a diferença de

⁵<https://www.petermeadows.com/html/software.html>

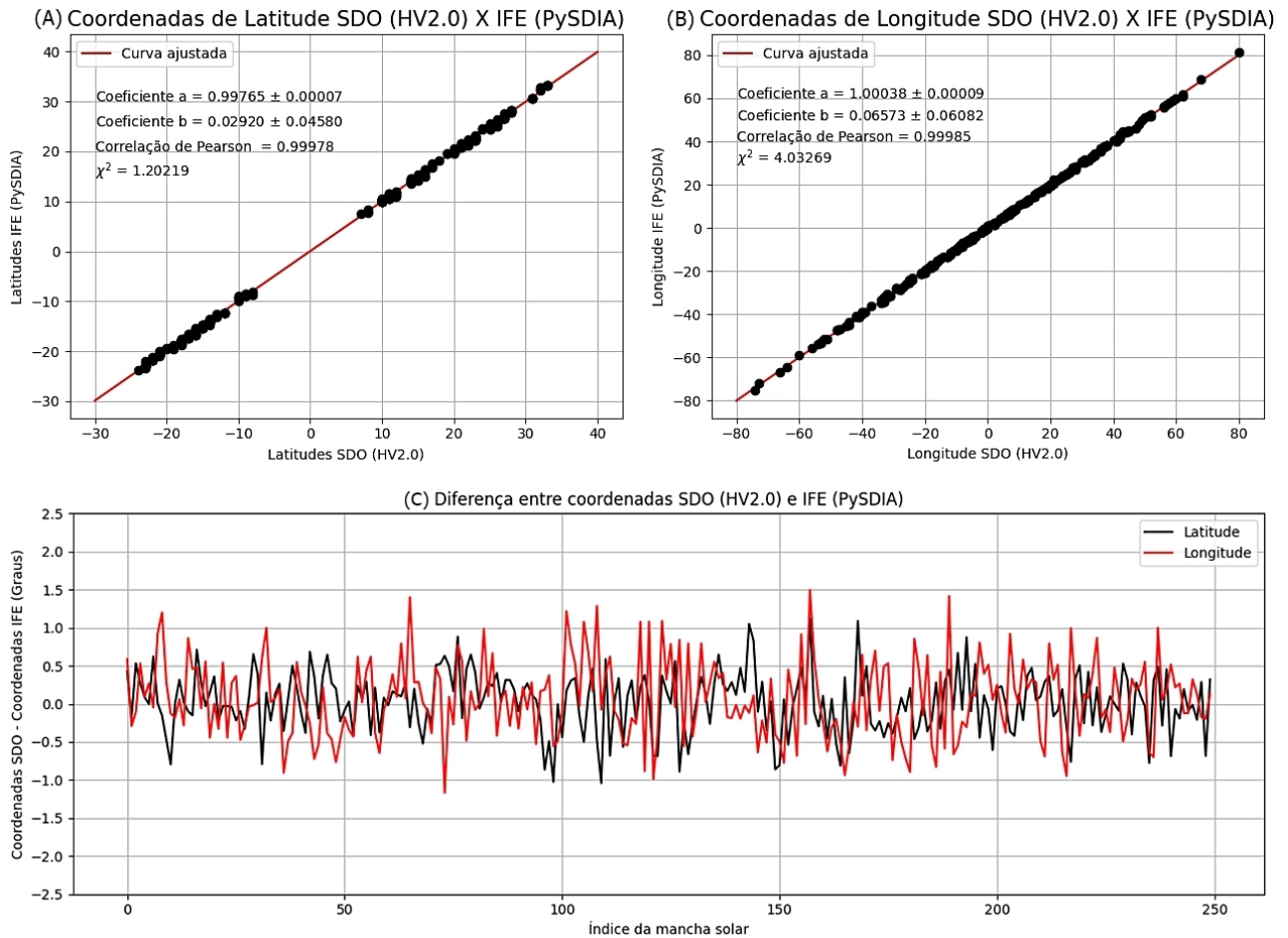


Figura 8: Análise de 250 manchas solares. Gráfico (A): Latitudes IFE em função das latitudes SDO, após os processos automatizados de alinhamento e rotação, a linha vermelha mostra o ajuste de linha. Gráfico (B): Longitudes IFE em função das longitudes SDO e também com ajuste de linha em vermelho. Gráfico (C) residual da diferença entre as coordenadas de latitude e longitude entre as imagens IFE e SDO.

coordenadas. Os resultados da análise são mostrados na Figura 8.

Na Figura 8 (A), os pontos pretos representam a distribuição das coordenadas de latitude IFE em função das coordenadas de latitude SDO. Observa-se também a falta de dados para latitudes entre -10° e 10° , o que é esperado na atual fase do ciclo solar 25, caracterizada pela fase anterior à atividade máxima. Nesta fase, não são observadas manchas solares próximas ao equador solar, comportamento comum na fase final do ciclo correspondente. Na Figura 8 (B), apresentamos a distribuição das longitudes IFE em relação às longitudes SDO. É observada uma representação abrangente das longitudes do disco solar, refletindo a análise de um número significativo de manchas solares e a mecânica da observação semanal. Este procedimento permite registrar as

manchas solares longitudinalmente à medida que evoluem ao longo do tempo.

Para avaliar o grau de precisão entre nossas coordenadas heliográficas e as do SDO, aplicamos um ajuste de linha por mínimos quadrados a ambos os conjuntos de dados, bem como calculamos a correlação de Pearson e realizamos um teste qui-quadrado. Para as latitudes, o coeficiente angular a foi estimado em 0,99765 com erro de $\pm 0,00007$, enquanto o coeficiente linear b foi 0,02920 com erro de $\pm 0,04580$. O valor do coeficiente a indica uma taxa de variação em torno de $0,99^\circ$ para cada 1° entre as latitudes IFE e SDO respectivamente, indicando uma forte correlação entre as variáveis. Já o coeficiente b , próximo de zero, denota um deslocamento vertical praticamente insignificante na relação entre as variáveis.

O coeficiente de correlação de Pearson é uma

medida de força e direção que reflete o grau de correlação linear entre duas variáveis [23]. Para as latitudes, registramos um coeficiente de 0,99978, indicando forte correlação positiva entre as variáveis. O teste qui-quadrado, por sua vez, é uma medida estatística que compara a distribuição observada e esperada dos dados [24], e para nossa análise obtivemos o valor de 1,20219, indicando um ajuste favorável do modelo aos dados.

No que diz respeito às longitudes, observamos um padrão semelhante ao das latitudes, com coeficiente angular $a = 1,00038$ com erro de $\pm 0,00009$ e coeficiente $b = 0,06573$ com erro de $\pm 0,06082$. Assim como acontece com as latitudes, há uma variação de aproximadamente 1° para cada 1° entre as longitudes IFE e SDO, respectivamente. Tal como acontece com as latitudes, o deslocamento vertical também é praticamente inexistente. A correlação de Pearson foi de 0,99985, indicando uma forte correlação positiva, enquanto o teste qui-quadrado foi de 4,03269, sugerindo uma distribuição um pouco mais dispersa entre os dados obtidos e os esperados.

Na Figura 8 (C), apresentamos o resíduo entre as coordenadas de latitude (linha preta) e longitude (linha vermelha) calculado a partir da diferença entre as coordenadas (latitude e longitude) do SDO e do IFE. Percebe-se que a maior parte do resíduo se limita à região entre 0° e $0,5^\circ$, com algumas medidas se aproximando de 1° e raramente ultrapassando $1,5^\circ$, mostrando mais uma vez que as medidas obtidas em nosso estudo estão de acordo com os dados das imagens SDO.

Apesar dos resultados promissores para uma observação com um telescópio simples e de pequena abertura, é importante notar que nossas imagens possuem qualidade limitada. Isso se traduz em dificuldade de análise das manchas solares menores, pois em nossas imagens elas aparecem desfocadas no disco solar, dificultando a distinção entre a intensidade dos *pixels* dentro e fora delas, inviabilizando sua análise. Esta limitação pode contribuir para os erros observados na rotação de algumas imagens. A obtenção de imagens com melhor qualidade poderia ajudar a minimizar esses problemas, uma vez que a nitidez das manchas solares é crucial para o correto funcionamento do código. Além disso, a presença de nuvens cobrindo o disco solar afeta tanto a observação quanto a extração dos parâmetros físicos

dessas manchas. Nestas circunstâncias, o código não consegue corrigir adequadamente a rotação, de forma que observações em dias nublados não poderão ser consideradas para validação do método.

5 Conclusão

As observações do disco solar utilizando telescópios simples e de pequena abertura têm um potencial significativo para contribuir para os estudos das manchas solares e do ciclo solar, uma vez que as observações da fotosfera solar podem ser feitas com equipamentos acessíveis, sem a necessidade de grandes áreas ou estruturas observacionais para registrar diversas imagens diárias. Isto torna possível desenvolver um catálogo próprio de manchas solares, com a possibilidade de suprimir dados faltantes de programas observacionais e auxiliar em análises comparativas com observatórios solares.

Neste estudo apresentamos os resultados obtidos em nosso primeiro ano de observação solar do IFE/UFCA, abrangendo o período de novembro de 2022 a dezembro de 2023, totalizando 101 imagens do disco solar e 250 registros de manchas solares. Além disso, introduzimos o algoritmo *Python Solar Disc Image Alignment (PySDIA)*, desenvolvido em linguagem Python, capaz de centralizar e alinhar automaticamente imagens do disco solar para determinar as coordenadas heliográficas precisas das manchas solares.

Nossos testes mostraram que o código foi altamente preciso no alinhamento de todas as imagens submetidas a ele. Ao comparar as coordenadas de latitude e longitude das 250 manchas solares analisadas pelo PySDIA com as mesmas manchas solares presentes nas imagens SDO, obtidas através do software *HelioViewer 2.2* de Peter Meadows, observamos uma variação de menos de 1° para ambas as latitudes e longitudes, com exceção de algumas imagens isoladas. Este resultado mostra uma taxa de variação de aproximadamente $0,99^\circ$ para cada 1° entre latitudes e longitudes nas duas fontes de dados analisadas. Além disso, foi observado um deslocamento vertical de apenas $0,05$, indicando uma relação linear robusta entre as variáveis e validando a precisão da nossa análise.

A utilização de telescópios de pequena abertura equipados com filtros solares, aliados a dispositivos de captação de imagens como câmaras, *webcams* ou mesmo câmaras de *smartphones*, permite aos astrônomos monitorizar e registar diariamente a fotosfera solar, possibilitando o estudo das manchas solares a partir da sua localização. Além da observação, a utilização de algoritmos como o PySDIA, por exemplo, para tratar as imagens, resultará em dados capazes de fornecer com maior precisão as coordenadas heliográficas das manchas solares, permitindo a exploração inicial deste estudo principalmente por astrônomos independentes, uma vez que eles podem desempenhar um papel crucial ao contribuir com as suas próprias observações para programas colaborativos e pesquisas sobre manchas solares e física solar.

Agradecimentos

Os autores, C. D. Grangeiro e T. S. S. Duarte, agradecem às seguintes instituições: Universidade Federal do Cariri – Instituto de à Formação de Educadores (IFE/UFCA) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) pelo apoio financeiro; e o autor H. R. Coelho agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Sobre os autores

Cicero Dário Grangeiro (dario.grangeiro@aluno.ufca.edu.br), aluno do curso de graduação Licenciatura Interdisciplinar em Ciências Naturais e Matemática pelo Instituto de Formação de Educadores (IFE), campus da Universidade Federal do Cariri (UFCA) em Brejo Santo, Ceará. Atualmente é bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica financiado pela própria instituição UFCA, sob a orientação do professor Dr. Tharcísyo Sá e Sousa Duarte.

Tharcísyo Sá e Sousa Duarte (tharcisyo.duarte@ufca.edu.br), Professor do Instituto de Formação de Educadores da Universidade Federal do Cariri (IFE-UFCA) é bacharel em Física pela Universidade Federal da Paraíba

(2010), Mestre (2012) e Doutor (2016) em Física/Astrofísica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tem experiência na área de Astronomia, com ênfase em Astrofísica Estelar e Solar, atuando principalmente nos seguintes temas: magnetismo estelar, espectroscopia, espectropolarimetria, abundâncias químicas, estrelas análogas solares e gêmeas solares. Atualmente também atua na parte de divulgação científica e é coordenador do projeto itinerante Planetarium Kariri.

Jefferson Soares da Costa (jefferson.dacosta@ect.ufrn.br), Possui graduação em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2006), mestrado e doutorado em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pós-doutorado na Université Toulouse III, Paul Sabatier. Têm experiência em astrofísica estelar, com ênfase em no estudo de rotação estelar, abundâncias químicas e magnetismo estelar. Atualmente é professor adjunto da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e Coordenador do Mestrado Nacional em Ensino de Física - Polo 51.

Hugo Rodrigues Coelho (hugo.pesquisa@gmail.com) bacharel em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2011), mestrado em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2013) e doutorado em Stellar Astrophysics - University of Birmingham (UK - 2017). Tem experiência na área de astronomia, com ênfase em asterosismologia, estrutura e evolução estelar.

Referências

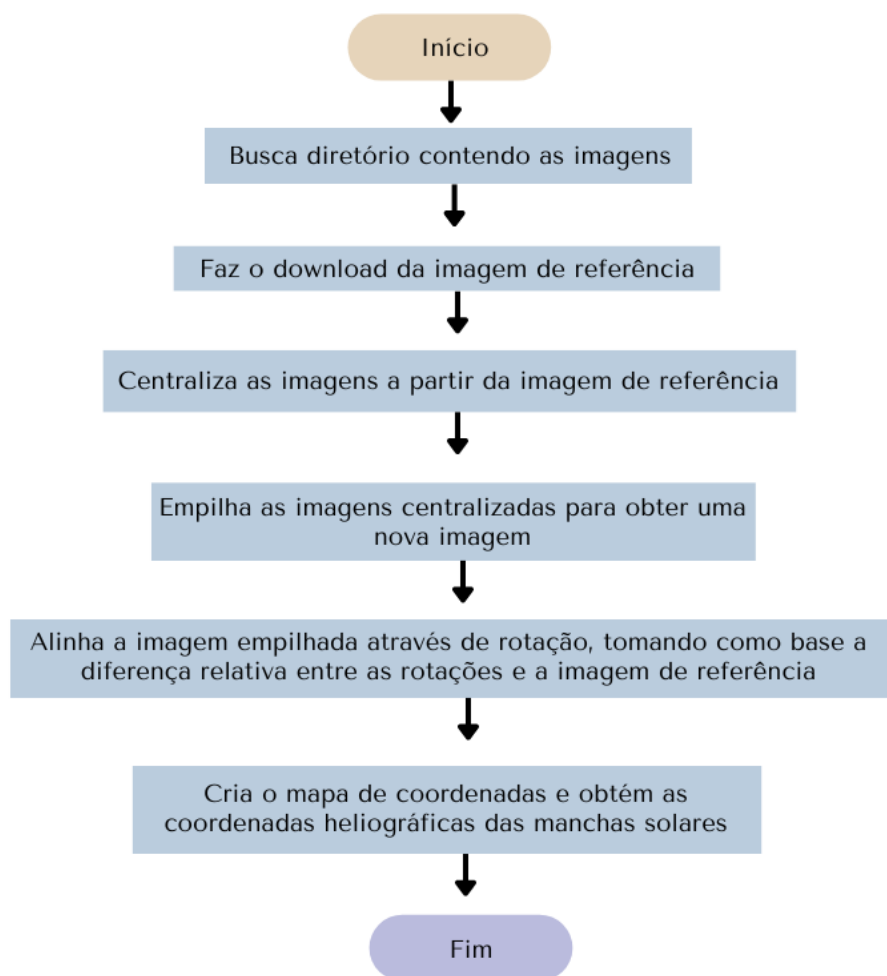
- [1] X. Zhentao, *Solar observations in ancient China and solar variability*, [Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences](#) **330**(1615), 513 (1990).
- [2] J. M. Vaquero e M. Vázquez, *The Sun recorded through history*, vol. 361 (Springer Science & Business Media, 2009).
- [3] D. V. Hoyt e K. H. Schatten, *The role of the sun in climate change* (Oxford University Press on Demand, 1997).

- [4] H. Schwabe, *Sonnenbeobachtungen im jahre 1843. von herrn hofrath schwabe in dessau*, *Astronomische Nachrichten* **21**, 233 (1844).
- [5] R. C. Carrington, *Observations of the spots on the Sun: from November 9, 1853, to March 24, 1861, made at Redhill* (Williams and Norgate, 1863).
- [6] J. L. Jenkins, *The Sun and How to Observe It* (Springer, 2009).
- [7] J. Wilkinson, *New Eyes on the Sun: A Guide to Satellite Images and Amateur Observation* (Springer, 2012).
- [8] L. Macdonald, *How to observe the Sun safely* (Springer Science & Business Media, 2012).
- [9] E. W. Maunder, *Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874-1902*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 64, p. 747-761 **64**, 747 (1904).
- [10] R. Arlt, *The sunspot observations by Samuel Heinrich Schwabe*, *Astronomische Nachrichten* **332**(8), 805 (2011).
- [11] D. H. Hathaway, *The Solar Cycle*, *Living Reviews in Solar Physics* **12**(1), 1 (2015).
- [12] S. Mandal et al., *Kodaikanal digitized white-light data archive (1921-2011): Analysis of various solar cycle features*, *Astronomy & Astrophysics* **601**, A106 (2017).
- [13] L. van Driel-Gesztelyi e M. J. Owens, *Solar Cycle*, *Oxford Research Encyclopedia Of Physics*. (2020).
- [14] J. Curto, M. Blanca e E. Martínez, *Automatic sunspots detection on full-disk solar images using mathematical morphology*, *Solar Physics* **250**, 411 (2008).
- [15] T. Barreto e G. Almeida, *Astrofotografia: técnicas e aplicações*, *Scientia Plena* **5**(11) (2009). Disponível em <https://scientiaplena.org.br/sp/article/view/737>, acesso em ago. 2024.
- [16] G. Bradski, *The OpenCV Library*, Dr. Dobb's Journal of Software Tools (2000).
- [17] D. Ratledge, *Digital Astrophotography: The State of the Art* (Springer Science & Business Media, 2006).
- [18] A. M. Price-Whelan et al., *The Astropy Project: Building an open-science project and status of the v2.0 core package*, *The Astronomical Journal* **156**(3), 123 (2018).
- [19] The SunPy Community et al., *The SunPy Project: Open Source Development and Status of the Version 1.0 Core Package*, *The Astrophysical Journal* **890**, 68 (2020).
- [20] J. D. Hunter, *Matplotlib: A 2D graphics environment*, *Computing in Science & Engineering* **9**(3), 90 (2007).
- [21] R. Pucha, K. Hiremath e S. R. Gurumath, *Development of a code to analyze the solar white-light images from the Kodaikanal observatory: Detection of sunspots, computation of heliographic coordinates and area*, *Journal of Astrophysics and Astronomy* **37**, 1 (2016).
- [22] P. Meadows, *Helio Viewer v2.2 User Guide* (2023). Disponível em <https://www.petermeadows.com/html/software.html>, acesso em ago. 2024.
- [23] M. E. G. Martins e J. Rodrigues, *Coefficiente de correlação amostral*, *Revista de Ciência Elementar* **2**(2), 34 (2014).
- [24] M. R. Spiegel, *Estatística* (Makron, São Paulo, 1993), 3ª ed.

Apêndice A: Repositório, Versão Python e principais pacotes utilizados no PySDIA

O PySDIA pode ser encontrado em nosso repositório Github pelo link: <https://github.com/grangeirodario/PySDIA>. A versão Python utilizada para os procedimentos descritos nesse trabalho foi a versão 3.11.5. Dentre os pacotes Python utilizados no processamento das imagens, os principais deles foram: `hcpy`⁶ para download das imagens do banco de dados do helioviewer, `Matplotlib`⁷ para abertura e visualização das imagens, `Rembg`⁸ para remoção de fundo das imagens, `OpenCV`⁹ para leitura das imagens próprias, conversão de escala de cores e aplicação das transformações morfológicas, `Sunpy`¹⁰ para criação de mapas e manipulação de coordenadas, `Astropy`¹¹ para mapeamento e conversão de coordenadas e `SciPy`¹² para manipulação de matrizes.

Apêndice B: Fluxograma do funcionamento do PySDIA



⁶<https://hcpy.readthedocs.io/en/latest/>

⁷<https://matplotlib.org/3.5.0/index.html>

⁸<https://github.com/danielgatis/rembg>

⁹<https://docs.opencv.org/4.x/index.html>

¹⁰<https://docs.sunpy.org/en/stable/>

¹¹<https://docs.astropy.org/en/stable/>

¹²<https://scipy.org/>

Apêndice C: Coordenadas heliográficas de 250 manchas solares em comparação com os dados do SDO obtidos através do Software Helioviewer v2.2

Data	Mancha	Latitude (IFE)	Longitude (IFE)	Latitude (SDO)	Longitude (SDO)
08/11/22	3140	26,428 ± 0,0736	-17,413 ± 0,080	26	-18
08/11/22	3141	13,813 ± 0,0858	-24,291 ± 0,089	14	-24
08/11/22	3141b	14,533 ± 0,0770	-25,106 ± 0,092	14	-25
08/11/22	NaN	15,276 ± 0,0963	-33,469 ± 0,120	15	-34
10/11/22	3140	26,088 ± 0,0736	9,090 ± 0,080	26	9
10/11/22	3141	13,996 ± 0,0737	2,270 ± 0,071	14	2
10/11/22	3141b	14,623 ± 0,0808	-0,047 ± 0,082	14	0
10/11/22	NaN	16,007 ± 0,0774	-7,078 ± 0,064	16	-8
11/11/22	3140	25,849 ± 0,0904	22,199 ± 0,097	26	21
11/11/22	3141	13,529 ± 0,0817	16,280 ± 0,079	14	16
11/11/22	3141b	14,206 ± 0,0889	12,873 ± 0,075	15	13
11/11/22	NaN	16,005 ± 0,0796	5,821 ± 0,062	16	6
06/12/22	3156	25,316 ± 0,0697	-15,936 ± 0,082	25	-16
06/12/22	3157	17,019 ± 0,0922	-31,283 ± 0,131	17	-31
06/12/22	3153	-16,097 ± 0,0770	-4,137 ± 0,077	-16	-5
06/12/22	NaN	-18,151 ± 0,0734	-17,543 ± 0,091	-18	-18
07/12/22	3156	25,712 ± 0,0840	-3,527 ± 0,081	25	-4
07/12/22	3157	17,280 ± 0,0773	-18,059 ± 0,091	17	-18
07/12/22	3153	-16,031 ± 0,0802	8,557 ± 0,077	-16	8
07/12/22	NaN	-17,851 ± 0,0828	-5,444 ± 0,088	-18	-5
08/12/22	3158	25,360 ± 0,0799	9,000 ± 0,088	25	9
08/12/22	3159	16,778 ± 0,0799	-4,328 ± 0,086	17	-4
08/12/22	3155	-16,029 ± 0,0891	21,541 ± 0,102	-16	21
08/12/22	NaN	-18,031 ± 0,0752	7,556 ± 0,081	-18	8
14/12/22	3160	22,962 ± 0,0750	25,274 ± 0,095	23	25
14/12/22	3167	19,782 ± 0,0818	11,367 ± 0,074	20	11
14/12/22	3162	-13,094 ± 0,0739	6,527 ± 0,079	-13	7
14/12/22	3163	-18,332 ± 0,0849	-13,282 ± 0,091	-18	-13
15/12/22	3160	23,094 ± 0,0978	37,966 ± 0,119	23	38
15/12/22	3167	19,653 ± 0,0867	23,982 ± 0,103	19	24
15/12/22	3162	-13,609 ± 0,0846	20,016 ± 0,082	-14	20
15/12/22	3163	-18,792 ± 0,0827	-0,402 ± 0,082	-18	-1
16/12/22	3160	23,147 ± 0,0857	50,998 ± 0,109	23	50
16/12/22	3167	19,781 ± 0,0888	37,022 ± 0,137	20	37
16/12/22	3162	-13,874 ± 0,0974	33,072 ± 0,142	-14	33
16/12/22	3163	-18,736 ± 0,0806	12,197 ± 0,082	-19	12
19/12/22	3169	19,645 ± 0,0977	-44,905 ± 0,270	20	-44
19/12/22	3168	-15,937 ± 0,0638	-6,491 ± 0,074	-16	-6
20/12/22	3169	19,502 ± 0,0850	-31,385 ± 0,103	19	-31
20/12/22	3168	-15,778 ± 0,0753	6,548 ± 0,065	-16	6
21/12/22	3169	19,881 ± 0,0801	-17,846 ± 0,075	20	-18
21/12/22	3168	-15,381 ± 0,0859	19,976 ± 0,090	-15	20
03/01/23	3180	21,683 ± 0,0778	-21,261 ± 0,092	21	-21
03/01/23	3180b	16,360 ± 0,0849	-17,724 ± 0,098	16	-17
04/01/23	3180	21,807 ± 0,0774	-8,533 ± 0,084	22	-8
04/01/23	3180b	16,377 ± 0,0750	-4,779 ± 0,080	16	-5
05/01/23	3180	21,646 ± 0,0776	4,613 ± 0,089	21	5
05/01/23	3180b	16,271 ± 0,0693	8,536 ± 0,084	16	9
09/01/23	3184	-13,799 ± 0,0769	-66,765 ± 0,085	-14	-66

Continua na próxima página

Tabela 1 – *Continuação da tabela*

Data	Mancha	Latitude (IFE)	Longitude (IFE)	Latitude (SDO)	Longitude (SDO)
09/01/23	3182	-16,233 ± 0,0845	-18,461 ± 0,087	-16	-18
09/01/23	3181	-23,083 ± 0,0971	23,828 ± 0,092	-23	24
10/01/23	3184	-13,970 ± 0,0822	-53,340 ± 0,083	-14	-53
10/01/23	3182	-16,419 ± 0,0674	-5,431 ± 0,074	-16	-5
10/01/23	3181	-23,763 ± 0,0939	36,619 ± 0,116	-24	36
11/01/23	3184	-13,932 ± 0,1012	-39,979 ± 0,221	-14	-40
11/01/23	3182	-16,707 ± 0,0791	7,435 ± 0,073	-17	7
11/01/23	3181	-23,410 ± 0,0826	49,619 ± 0,094	-23	49
12/01/23	3184	-13,787 ± 0,0861	-27,382 ± 0,115	-14	-27
12/01/23	3182	-17,379 ± 0,0871	19,354 ± 0,083	-17	20
12/01/23	3181	-22,919 ± 0,0818	61,918 ± 0,081	-23	62
23/01/23	3198	24,981 ± 0,0765	-5,913 ± 0,079	25	-6
23/01/23	3190	-14,834 ± 0,0786	56,388 ± 0,077	-15	56
24/01/23	3198	25,124 ± 0,0808	6,091 ± 0,074	25	6
24/01/23	3190	-14,901 ± 0,0780	68,794 ± 0,081	-15	68
25/01/23	3198	25,274 ± 0,0752	19,070 ± 0,088	25	19
25/01/23	3190	-15,307 ± 0,0773	81,400 ± 0,084	-15	80
08/02/23	3213	32,199 ± 0,0795	4,280 ± 0,080	32	4
08/02/23	3109	27,745 ± 0,0791	13,289 ± 0,072	28	13
08/02/23	3216	24,479 ± 0,0937	-46,989 ± 0,291	25	-47
08/02/23	3214	10,934 ± 0,0777	-6,086 ± 0,084	11	-6
08/02/23	3214b	10,744 ± 0,0737	-13,384 ± 0,081	11	-13
09/02/23	3213	32,511 ± 0,0753	16,475 ± 0,095	32	16
09/02/23	3109	27,525 ± 0,0877	27,323 ± 0,083	27	27
09/02/23	3216	24,632 ± 0,0815	-34,169 ± 0,127	24	-33
09/02/23	3214	11,494 ± 0,0805	7,092 ± 0,078	11	7
09/02/23	3214b	11,165 ± 0,0777	-0,270 ± 0,076	11	0
10/02/23	3213	32,883 ± 0,0831	27,774 ± 0,093	32	27
10/02/23	3109	27,812 ± 0,1072	40,556 ± 0,135	28	40
10/02/23	3216	24,459 ± 0,0889	-21,485 ± 0,087	24	-21
10/02/23	3214	11,647 ± 0,0798	20,165 ± 0,089	11	20
10/02/23	3214b	11,419 ± 0,0779	12,920 ± 0,079	11	13
27/02/23	3234	22,937 ± 0,0862	23,004 ± 0,081	23	23
28/02/23	3234	23,085 ± 0,0930	36,986 ± 0,116	23	36
06/03/23	3239	33,281 ± 0,0862	5,101 ± 0,076	33	5
06/03/23	3241	28,232 ± 0,0774	-8,335 ± 0,087	28	-9
06/03/23	3242	10,405 ± 0,0818	-10,418 ± 0,097	10	-10
06/03/23	3245	-22,969 ± 0,0981	-38,940 ± 0,178	-23	-39
07/03/23	3239	33,313 ± 0,0812	18,173 ± 0,085	33	18
07/03/23	3241	28,312 ± 0,0746	4,711 ± 0,078	28	5
07/03/23	3242	10,186 ± 0,0850	4,132 ± 0,084	10	4
07/03/23	3245	-23,098 ± 0,0923	-25,325 ± 0,101	-23	-25
08/03/23	3239	33,156 ± 0,0890	30,222 ± 0,108	33	30
08/03/23	3241	28,270 ± 0,0852	16,927 ± 0,074	28	17
08/03/23	3242	10,123 ± 0,0735	17,281 ± 0,081	10	17
08/03/23	3245	-22,944 ± 0,0794	-12,528 ± 0,090	-23	-12
18/04/23	3282	11,802 ± 0,0860	7,167 ± 0,081	12	7
18/04/23	3282b	11,137 ± 0,0730	-6,814 ± 0,073	12	-7
19/04/23	3282	11,509 ± 0,0913	21,375 ± 0,097	12	21
19/04/23	3282b	10,975 ± 0,0810	7,442 ± 0,079	12	8
20/04/23	3282	11,994 ± 0,1009	33,511 ± 0,137	12	34
20/04/23	3282b	10,562 ± 0,0815	19,896 ± 0,091	11	20

Continua na próxima página

Tabela 1 – *Continuação da tabela*

Data	Mancha	Latitude (IFE)	Longitude (IFE)	Latitude (SDO)	Longitude (SDO)
24/04/23	3285	-17,825 ± 0,0981	-30,783 ± 0,141	-18	-32
25/04/23	3285	-17,697 ± 0,0833	-17,215 ± 0,089	-18	-18
26/04/23	3285	-17,660 ± 0,0755	-4,473 ± 0,089	-18	-5
27/04/23	3285	-17,158 ± 0,0895	7,970 ± 0,067	-17	8
22/05/23	3313	22,500 ± 0,1078	-40,922 ± 0,185	23	-42
22/05/23	3314	15,100 ± 0,1001	-15,315 ± 0,067	15	-16
22/05/23	3310	-20,536 ± 0,0807	-11,836 ± 0,086	-21	-12
23/05/23	3313	22,517 ± 0,0893	-27,714 ± 0,104	23	-29
23/05/23	3314	14,958 ± 0,0862	-0,076 ± 0,079	16	0
23/05/23	3310	-20,413 ± 0,0843	1,393 ± 0,081	-21	1
25/05/23	3313	22,319 ± 0,0862	-1,380 ± 0,081	23	-2
25/05/23	3314	15,024 ± 0,0953	27,907 ± 0,098	15	28
25/05/23	3310	-20,663 ± 0,0882	27,794 ± 0,105	-21	28
26/05/23	3313	22,435 ± 0,0802	11,482 ± 0,081	23	12
26/05/23	3314	15,104 ± 0,1103	41,455 ± 0,234	15	42
26/05/23	3310	-20,693 ± 0,1017	40,812 ± 0,184	-21	41
30/05/23	3315	-17,236 ± 0,0843	47,738 ± 0,090	-17	48
30/05/23	3320	-15,780 ± 0,0861	-71,922 ± 0,077	-16	-73
31/05/23	3315	-16,621 ± 0,1325	61,115 ± 0,074	-17	62
31/05/23	3320	-15,970 ± 0,0901	-58,920 ± 0,674	-16	-60
01/06/23	3323	-16,686 ± 0,0886	-74,987 ± 0,159	-16	-74
01/06/23	3321	-19,686 ± 0,1004	-45,374 ± 0,402	-19	-45
02/06/23	3323	-15,628 ± 0,0998	-31,911 ± 0,122	-16	-33
02/06/23	3321	-17,833 ± 0,1048	57,317 ± 0,159	-18	57
05/06/23	3326	25,006 ± 0,1099	-41,215 ± 0,196	25	-42
05/06/23	3321	-15,437 ± 0,0783	7,957 ± 0,074	-16	8
06/06/23	3326	25,111 ± 0,0974	-28,161 ± 0,090	26	-29
06/06/23	3321	-15,238 ± 0,0777	20,440 ± 0,104	-15	21
07/06/23	3326	25,339 ± 0,0901	-15,206 ± 0,078	26	-16
07/06/23	3321	-15,268 ± 0,0915	33,567 ± 0,110	-15	34
19/06/23	3335	-14,942 ± 0,0861	4,968 ± 0,077	-15	5
19/06/23	3339	-19,646 ± 0,1325	-47,206 ± 0,674	-20	-48
21/06/23	3335	-14,871 ± 0,0835	31,023 ± 0,131	-15	31
21/06/23	3339	-19,262 ± 0,0876	-19,723 ± 0,095	-19	-20
22/06/23	3335	-14,725 ± 0,1054	44,555 ± 0,468	-15	44
22/06/23	3339	-19,354 ± 0,0828	-5,665 ± 0,085	-20	-6
05/07/23	3359	-20,715 ± 0,0745	-1,187 ± 0,075	-21	-1
05/07/23	3359	-21,882 ± 0,0763	-8,015 ± 0,081	-22	-8
06/07/23	3359	-20,528 ± 0,0829	11,805 ± 0,082	-21	12
06/07/23	3359	-21,842 ± 0,0924	4,977 ± 0,076	-22	5
07/07/23	3359	-19,951 ± 0,0770	24,882 ± 0,111	-21	25
07/07/23	3359	-21,169 ± 0,0822	19,110 ± 0,089	-22	19
12/07/23	3372	21,897 ± 0,0815	-64,638 ± 0,084	22	-64
12/07/23	3363	-20,710 ± 0,0808	4,782 ± 0,080	-21	5
13/07/23	3372	22,653 ± 0,0772	-51,509 ± 0,085	23	-51
13/07/23	3363	-20,969 ± 0,0736	17,330 ± 0,091	-21	17
17/07/23	3372	22,139 ± 0,0830	1,598 ± 0,076	23	2
18/07/23	3372	22,195 ± 0,0776	14,503 ± 0,086	23	15
20/07/23	3372	22,059 ± 0,0788	40,224 ± 0,168	22	41
24/07/23	3379	14,464 ± 0,0793	-6,550 ± 0,088	15	-7
24/07/23	3377	-8,041 ± 0,0892	18,079 ± 0,095	-8	18
25/07/23	3379	14,204 ± 0,0795	6,318 ± 0,080	14	7

Continua na próxima página

Tabela 1 – *Continuação da tabela*

Data	Mancha	Latitude (IFE)	Longitude (IFE)	Latitude (SDO)	Longitude (SDO)
25/07/23	3377	-8,522 ± 0,0857	30,913 ± 0,134	-9	30
26/07/23	3379	14,027 ± 0,0898	19,735 ± 0,095	14	20
26/07/23	3377	-8,880 ± 0,0826	44,496 ± 0,706	-10	43
31/07/23	3387	20,891 ± 0,0776	-19,423 ± 0,085	21	-20
31/07/23	3386	10,702 ± 0,0856	6,063 ± 0,077	11	6
01/08/23	3387	21,105 ± 0,0775	-6,235 ± 0,093	21	-6
01/08/23	3386	10,541 ± 0,0861	19,376 ± 0,107	11	20
02/08/23	3387	21,065 ± 0,0674	6,693 ± 0,081	21	7
02/08/23	3386	10,484 ± 0,0937	32,801 ± 0,123	11	33
03/08/23	3387	21,187 ± 0,0828	19,484 ± 0,086	22	20
03/08/23	3386	10,348 ± 0,0805	46,063 ± 0,104	10	47
04/08/23	3387	21,353 ± 0,0782	32,461 ± 0,122	22	33
04/08/23	3386	10,783 ± 0,0783	59,024 ± 0,105	11	59
07/08/23	3394	-21,913 ± 0,0783	-13,301 ± 0,089	-23	-13
08/08/23	3394	-21,895 ± 0,0740	-0,354 ± 0,080	-22	-1
09/08/23	3394	-22,503 ± 0,0751	12,655 ± 0,086	-23	13
14/08/23	3403	25,739 ± 0,0959	-18,675 ± 0,083	26	-19
14/08/23	3403b	26,650 ± 0,0962	-24,303 ± 0,094	27	-25
15/08/23	3403	25,773 ± 0,0788	-5,093 ± 0,086	26	-5
15/08/23	3403b	26,561 ± 0,0912	-11,507 ± 0,081	27	-12
16/08/23	3403	25,747 ± 0,0746	8,532 ± 0,083	26	8
16/08/23	3403b	26,608 ± 0,0794	1,260 ± 0,082	27	2
17/08/23	3403	25,825 ± 0,0889	21,859 ± 0,099	26	22
17/08/23	3403b	27,080 ± 0,0862	14,502 ± 0,083	27	15
18/08/23	3403	25,902 ± 0,0831	35,286 ± 0,148	26	36
18/08/23	3403b	27,207 ± 0,0970	27,106 ± 0,111	27	28
21/08/23	3412	30,538 ± 0,0921	-36,144 ± 0,079	31	-37
21/08/23	3411	13,694 ± 0,0922	-0,535 ± 0,079	14	-1
21/08/23	3405	10,025 ± 0,0799	16,851 ± 0,072	10	17
22/08/23	3412	30,637 ± 0,0910	-23,362 ± 0,084	31	-24
22/08/23	3411	13,782 ± 0,0913	12,463 ± 0,087	14	13
22/08/23	3405	10,280 ± 0,0864	30,172 ± 0,138	10	31
23/08/23	3412	30,671 ± 0,0808	-10,580 ± 0,077	31	-11
23/08/23	3411	14,291 ± 0,0877	25,413 ± 0,103	14	26
23/08/23	3405	10,449 ± 0,0827	43,416 ± 0,418	10	42
28/08/23	3413	9,922 ± 0,0806	20,338 ± 0,103	10	21
28/08/23	3415	-9,332 ± 0,0758	1,452 ± 0,073	-10	2
29/08/23	3413	9,922 ± 0,1006	33,766 ± 0,150	10	34
29/08/23	3415	-9,125 ± 0,0786	14,694 ± 0,097	-10	15
31/08/23	3413	9,901 ± 0,0753	60,127 ± 0,186	10	60
31/08/23	3415	-8,476 ± 0,0719	41,102 ± 0,276	-9	41
30/10/23	3474	-17,444 ± 0,071	0,805 ± 0,059	-17	0
31/10/23	3474	-16,887 ± 0,056	15,396 ± 0,076	-17	15
01/11/23	3474	-18,071 ± 0,071	28,512 ± 0,063	-18	28
02/11/23	3474	-18,606 ± 0,068	42,052 ± 0,06	-18	42
02/11/23	3477	-12,798 ± 0,05	-53,749 ± 0,111	-13	-54
03/11/23	3474	-17,767 ± 0,056	55,876 ± 0,128	-18	56
03/11/23	3477	-14,003 ± 0,073	-41,377 ± 0,079	-14	-41
07/11/23	3477	-14,362 ± 0,068	10,92 ± 0,062	-14	10
08/11/23	3477	-14,419 ± 0,063	24,202 ± 0,065	-14	24
09/11/23	3477	-13,872 ± 0,062	37,993 ± 0,067	-14	38
10/11/23	3477	-14,212 ± 0,058	51,581 ± 0,077	-14	51

Continua na próxima página

Tabela 1 – *Continuação da tabela*

Data	Mancha	Latitude (IFE)	Longitude (IFE)	Latitude (SDO)	Longitude (SDO)
10/11/23	3483	8.37 ± 0.06	38.197 ± 0.08	8	38
13/11/23	3485	-9.528 ± 0.052	21.323 ± 0.065	-10	21
13/11/23	3485	-9.953 ± 0.045	34.283 ± 0.075	-10	34
22/11/23	3490	22.097 ± 0.069	-28.488 ± 0.072	22	-28
22/11/23	3492	20.29 ± 0.058	-34.69 ± 0.076	20	-34
22/11/23	3493	-12.635 ± 0.067	-47.205 ± 0.097	-13	-48
22/11/23	3494	-17.162 ± 0.057	-51.684 ± 0.114	-17	-52
23/11/23	3490	21.913 ± 0.062	-14.486 ± 0.061	22	-15
23/11/23	3492	20.194 ± 0.068	-20.636 ± 0.071	20	-20
23/11/23	3493	-12.313 ± 0.056	-33.948 ± 0.056	-12	-33
23/11/23	3494	-16.762 ± 0.064	-39.006 ± 0.075	-16	-40
24/11/23	3490	22.323 ± 0.069	-1.831 ± 0.066	22	-2
24/11/23	3492	20.508 ± 0.069	-8.418 ± 0.066	20	-8
24/11/23	3493	-12.257 ± 0.062	-20.875 ± 0.073	-12	-21
24/11/23	3494	-16.58 ± 0.071	-25.923 ± 0.077	-17	-26
28/11/23	3492	20.718 ± 0.066	44.403 ± 0.095	21	44
28/11/23	3502	18.218 ± 0.061	37.868 ± 0.068	18	37
28/11/23	3493	-12.369 ± 0.062	31.818 ± 0.07	-12	32
28/11/23	3494	-17.146 ± 0.068	25.93 ± 0.053	-17	26
28/11/23	3500	-16.902 ± 0.072	2.631 ± 0.054	-17	3
28/11/23	3501	-8.998 ± 0.066	-8.525 ± 0.055	-9	-9
29/11/23	3492	19.909 ± 0.07	58.111 ± 0.11	20	58
29/11/23	3502	17.529 ± 0.061	51.51 ± 0.112	17	52
29/11/23	3493	-12.684 ± 0.064	44.788 ± 0.092	-13	45
29/11/23	3494	-17.401 ± 0.046	38.329 ± 0.084	-17	38
29/11/23	3500	-16.722 ± 0.067	17.18 ± 0.064	-17	17
29/11/23	3501	-8.894 ± 0.065	4.258 ± 0.055	-9	4
30/11/23	3494	-17.029 ± 0.063	52.551 ± 0.111	-17	52
30/11/23	3500	-16.776 ± 0.061	31.359 ± 0.067	-16	32
30/11/23	3501	-8.691 ± 0.058	18.3 ± 0.053	-9	19
30/11/23	3505	-17.506 ± 0.061	43.998 ± 0.087	-18	43
30/11/23	3508	-15.285 ± 0.047	-52.945 ± 0.081	-15	-53
30/11/23	3507	7.455 ± 0.051	-55.815 ± 0.117	7	-56
01/12/23	3500	-8.687 ± 0.052	31.517 ± 0.047	-8	31
01/12/23	3501	-17.068 ± 0.066	45.217 ± 0.084	-17	45
01/12/23	3507	7.807 ± 0.055	-43.734 ± 0.082	8	-44
01/12/23	3508	-14.806 ± 0.057	-41.123 ± 0.100	-15	-41
01/12/23	3505	-17.091 ± 0.055	-32.121 ± 0.067	-17	-32
04/12/23	3507	7.987 ± 0.059	-3.678 ± 0.062	8	-4
04/12/23	3505	-16.210 ± 0.064	7.125 ± 0.064	-16	7
04/12/23	3508	-14.713 ± 0.063	-2.176 ± 0.067	-15	-2
04/12/23	3510	-14.684 ± 0.056	-9.197 ± 0.064	-14	-9
04/12/23	3511	-21.679 ± 0.070	-9.867 ± 0.055	-22	-10