

PROPRIEDADES FÍSICAS DE MANCHAS ESTELARES

André Seiji Matsushita Assayag e Adriana Benetti Marques Valio

Apoio: PIBIC Mackpesquisa

RESUMO

Atualmente já são mais de 5000 exoplanetas (planetas fora do nosso Sistema Solar) detectados. O método de trânsito para detectar planetas é o responsável pela maioria dos planetas detectados, graças aos telescópios espaciais, como o Kepler e o TESS. Ao observar os trânsitos das curvas de luz da estrela hospedeira do exoplaneta, certos parâmetros do planeta podem ser determinados, como o raio do planeta, inclinação e semieixo orbital. No entanto manchas na superfície da estrela podem ser ocultadas por um planeta durante seu trânsito, causando pequenas alterações na curva de luz. Estas variações podem ser modeladas e os parâmetros físicos das manchas determinados. Estimamos o raio, intensidade, temperatura e campo magnético de quase 2000 manchas detectadas na superfície de estrelas do tipo solar Kepler-17, Kepler-63, Kepler-71, Kepler-210, Kepler-411 e da estrela anã M Kepler-45. Os raios médios das manchas variaram entre 17 e 60 Mm, enquanto a temperatura das manchas variou entre 3400 e 5000 K. O campo magnético máximo das manchas, calculado conforme dados de manchas solares, foi estimado entre 2200 e 3400 Gauss, bem mais intenso que os campos de manchas solares. Buscamos correlações entre os parâmetros das manchas e os das suas estrelas. Porém apenas uma correlação óbvia foi encontrada entre a temperatura das manchas e a temperatura efetiva da estrela.

Palavras-chave: Manchas estelares, Exoplanetas, Curva de luz.

ABSTRACT

There are currently more than 5000 exoplanets (planets outside our Solar System) detected. The transit method for detecting planets is responsible for most planets detected, thanks to space telescopes such as Kepler and TESS. By observing the transits of the exoplanet in the host star light curves, certain parameters of the planet can be determined, such as orbital inclination, and semi-major axis, as well as planetary radius. Moreover, spots on the stellar surface can be occulted by a planet during its transit, causing small changes in the light curve. These variations can be modeled and the physical parameters of the starspots determined. We estimated the radius, intensity, temperature, and magnetic field of nearly 2000 spots detected on the surface of solar-type stars: Kepler-17, Kepler-63, Kepler-71, Kepler-210, Kepler-411 and the M dwarf star Kepler-45. The average radii of the spots varied between 17 and 60 Mm, whereas the temperature of the spots varied between 3400 and 5000 K. The maximum magnetic field of the spots, calculated according to sunspot data, was estimated

between 2200 and 3400 Gauss, much more intense than the sunspot fields. We searched for correlations between the parameters of the spots and those of their stars. However, an obvious correlation was found only between the temperature of the spots and the effective temperature of the star.

Keywords: Star spots, Exoplanets, Light curve

1. INTRODUÇÃO

A estrela mais próxima da Terra, o Sol, possui manchas escuras em sua superfície. Desde 1610, quando foram observadas através de um telescópio pela primeira vez por Galileo Galilei, engenheiro, físico e astrônomo italiano conhecido dentre vários títulos como o “pai da ciência moderna”, e seus contemporâneos, as manchas solares têm sido monitoradas diariamente. Atualmente sabe-se que tais manchas são locais de grande concentração de campo magnético na superfície do Sol, chamada de Fotosfera. Nestas regiões, o forte campo magnético impede o transporte de energia do interior do Sol, fazendo prevalecer plasmas com temperaturas mais baixas (entre 500 e 2000 K mais frias) que produzem menos radiação e, portanto, são regiões mais escuras que o plasma ao redor. Por estarem associadas a arcos magnéticos, as manchas são locais de intensa atividade solar onde ocorrem as explosões solares.

As observações deste fenômeno solar durante séculos mostraram que a quantidade de manchas na superfície do Sol varia ao longo do tempo. Em 1844, Schwabe mostrou que esta variação era cíclica com um período médio de 11 anos (Hathaway 2010). Em períodos de máxima atividade, muitas manchas podem ser detectadas na superfície solar enquanto em épocas de mínima atividade nenhuma mancha é observada. A variação do número de manchas decorre de uma mudança gradual do campo magnético do Sol.

Outras estrelas, assim como o Sol, compartilham do fenômeno de manchas, também apresentando regiões escuras em sua superfície. Acredita-se que as manchas estelares também estejam associadas à atividade estelar manifestada na forma de grandes explosões, além de poderem identificar ciclos de atividades em outras estrelas.

1.1 Justificativa

Assim como as manchas solares, temos também suas semelhantes as manchas estelares, foco dessa pesquisa, que são uma das principais manifestações da atividade de outras estrelas além do Sol. A evolução das manchas estelares em várias escalas de tempo nos permite investigar a rotação da estrela, os ciclos de atividade e campos magnéticos globais. Juntos, estes constituem a base para a nossa compreensão dos dínamos estelares e solares e fornecem condições de contorno valiosas para modelos teóricos. O mecanismo de dínamo é o principal causador da atividade magnética e pode ser estudado a partir da ocorrência e comportamento das manchas. Dado isso, compreenderemos melhor o dínamo magnético, responsável também pela atividade solar, estudando estrelas de diferentes tipos.

1.2 Objetivo

Essa pesquisa tem como objetivo estudar a atividade de estrelas que se manifesta na forma de manchas estelares. Isto será feito estimando as propriedades físicas das manchas, tais como raio, intensidade ou temperatura, além de intensidade do campo magnético. Também buscaremos correlações entre estes parâmetros, assim como relacionaremos os atributos físicos das manchas de estrelas de diversas massas (ou tipo espectral). E por fim, estudaremos a relação das manchas com as características das estrelas tais como idade e período de rotação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Assim como o Sol apresenta manchas escuras em sua superfície, estrelas semelhantes ao Sol e de menor massa também apresentam manchas. No Sol, a área superficial coberta por manchas não chega a 1%, entretanto em outras estrelas, principalmente as conhecidas como ativas, essa porcentagem pode facilmente atingir 20% da superfície estelar (Berdyugina, 2005). Um exemplo de mancha solar é mostrado na Figura 1. Como pode ser visto, as manchas solares geralmente são maiores que o nosso planeta Terra.

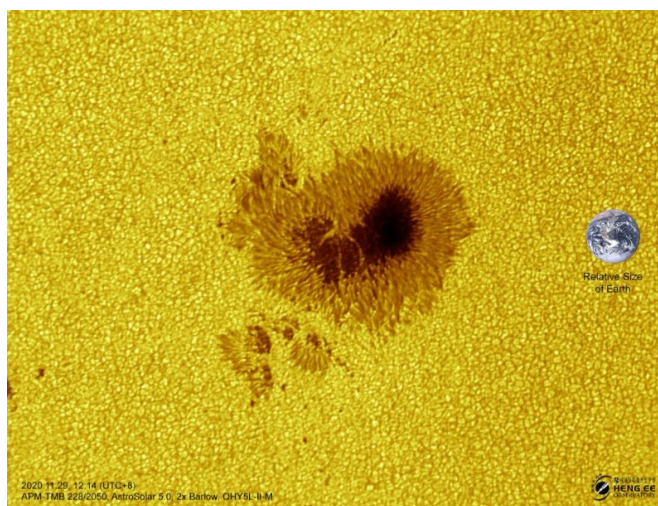


Figura 1: Exemplo de mancha solar observada no dia 29/11/2020 por Michael Teoh no Heng Ee Observatório, Penang, Malaysia. (Fonte: <https://earthsky.org/space/nso-predicts-large-sunspot-thanksgiving-nov2020>)

Atualmente compreendemos que a atividade estelar, manifesta por manchas e explosões, está relacionada a campos magnéticos. Estes campos magnéticos são gerados por um mecanismo de dínamo no interior da estrela, proposto por Parker em 1955 (Parker,

1955). O dínamo é um mecanismo onde um corpo celeste, como o Sol, gera campo magnético em seu interior através de correntes elétricas em um fluido condutor de eletricidade em rotação, durante um certo período.

Outras estrelas, mais ativas que o Sol, possuem campos magnéticos bem mais intensos. A idade da estrela também influencia no campo magnético, quanto mais jovem a estrela, mais forte este campo é. Estrelas mais jovens possuem maior rotação, com períodos menores da ordem de alguns dias. Nosso Sol atualmente gira em torno do seu eixo com um período médio de 27 dias, porém acredita-se que no passado este período já foi bem menor. A rotação da estrela é um parâmetro importante para o dínamo magnético. Por serem esferas gasosas, as estrelas não giram de maneira uniforme, mas apresentam rotação diferencial, girando mais rápido no equador do que nos polos. A rotação diferencial é mais um parâmetro crucial na geração do campo magnético das estrelas.

Propriedades das manchas estelares como área e intensidade, assim como seu tempo de vida, também fornecem informações preciosas sobre o dínamo em ação no interior da estrela. O ciclo de atividade magnética, que pode ser medido pelo número de manchas que aparecem e desaparecem na superfície da estrela ao longo dos anos, é outro fator para melhor conhecermos o dínamo magnético.

Como com a tecnologia atual, ainda não é possível imagear a superfície de outras estrelas, portanto a presença de manchas escuras é obtida indiretamente. Atualmente existem 3 métodos de detecção de manchas, que são descritos a seguir.

2.1 Imageamento Doppler

Esse método utiliza a deformação produzida em linhas espectrais da atmosfera de estrelas observadas pela técnica de espectroscopia. As imagens, utilizando técnicas semelhantes às usadas em medicina para reconstrução de imagens em tomografia, delineiam a distribuição da temperatura da superfície estelar (Berdyugina, 2005). Porém este método depende fortemente na velocidade de rotação estelar e, portanto, só pode ser empregado em estrelas com rápida rotação.

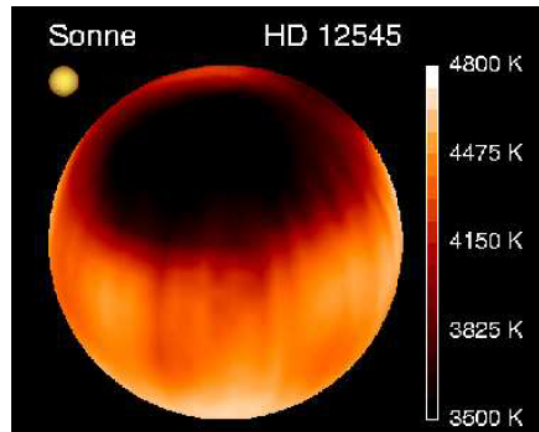


Figura 2: Imagem Doppler da estrela HD 12545 mostrando uma mancha gigante próxima do seu polo Norte. No canto superior à esquerda o Sol (“Sonne”) é mostrado para comparação de tamanho. Fonte Strassmeier (1999)

2.2 Modulação fotométrica

Fotometria é um processo que mede a luz que atinge um CCD, utilizado bastante em câmeras fotográficas. Sensores CCDs muito sensíveis são parte fundamental de telescópios e medem de forma muito precisa o brilho de uma estrela. A missão espacial Kepler, responsável pela descoberta de mais de dois mil planetas fora do Sistema Solar, mediu continuamente o brilho de 150.000 estrelas ao longo de 4 anos com precisão nominal de 20 ppm (parte por milhão, Borucki et al. 2010). A medida do brilho de um objeto em função do tempo é conhecida como a curva de luz.

A presença de manchas na superfície da estrela produzirá modulações na curva de luz de uma estrela conforme a mesma gira em torno do seu eixo (Figura 3). Análise das curvas de luz destas estrelas fornecem informações sobre sua rotação visto que manchas escuras na superfície das estrelas induzem variabilidade fotométrica periódica no brilho total da estrela. Essa modulação fotométrica da curva de luz estelar pode ser ajustada por modelos que inferem as características destas manchas (Lanza et al. 2009)

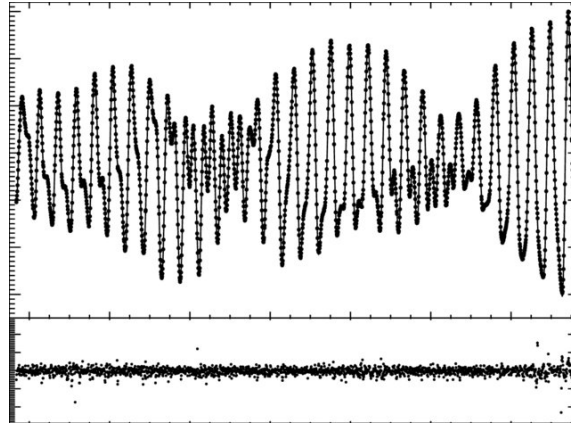


Figura 3: Curva de luz da estrela CoRoT-2 ao longo de 6 meses. Fonte Lanza et al. (2009)

2.3 Mapeamento por trânsito de exoplanetas

O mapeamento via trânsito foi proposto pela primeira vez em 2003 (Silva 2003) e aplicado na estrela HD 102458. Atualmente 76% dos planetas descobertos, graças ao satélite Kepler, transitam em frente à sua estrela hospedeira. Quando o planeta eclipsa a estrela, pode ocorrer de ocultar uma mancha na superfície da estrela ao longo do seu trânsito. Esta ocultação da mancha, que dura apenas alguns minutos até no máximo meia hora, causa pequenas variações de brilho na curva de luz do brilho que podem ser identificadas e assim fornecer informações sobre as propriedades da mancha ocultada (ver Figura 4).

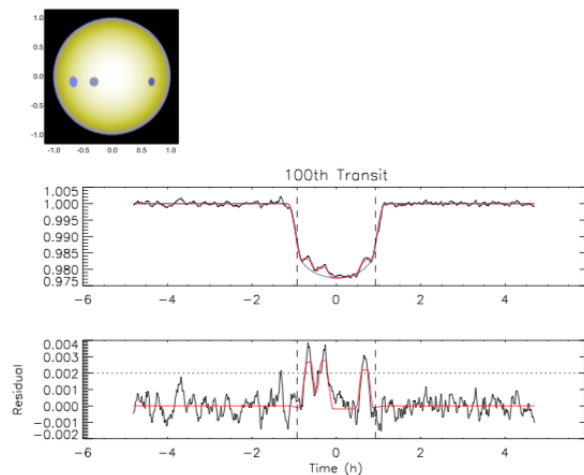


Figura 4: Exemplo do efeito da presença das manchas na superfície da estrela Kepler-17 que são ocultadas pelo exoplaneta durante seu trânsito. Fonte: Valio et al. (2017)

O método de mapeamento por trânsito consiste em uma simulação bidimensional da estrela como um disco com obscurecimento de limbo. Este modelo permite a inserção de fenômenos escuros (manchas) ou brilhantes (fáculas) na superfície da estrela, sendo cada

mancha modelada com um determinado tamanho e intensidade em um dado local (longitude e latitude) no disco estelar. Deste modo, o ajuste da curva de luz de trânsito a este modelo de uma estrela com manchas proporciona a caracterização dos parâmetros físicos das manchas.

O mapeamento das manchas por trânsito já foi empregado às seguintes estrelas: HD 209458 (Silva 2003), CoRoT-2 (Silva-Valio et al. 2010), Kepler-17 (Valio et al. 2017), Kepler-71 (Zaleski et al. 2019), Kepler-63 (Netto & Valio, 2020), Kepler-45 (Zaleski et al. 2020), Kepler-411 (Araujo & Valio 2021) e Kepler-210 (Valio & Araújo 2022). Para cada uma destas estrelas as propriedades de raio, intensidade e temperatura das manchas foram estimadas.

3. METODOLOGIA

Utilizaremos o método de mapeamento de manchas por trânsitos desenvolvido pela primeira vez por Silva (2003). Conforme descrito acima, este método já foi aplicado a estrelas do tipo solar Kepler-17, Kepler-63, Kepler-71, Kepler-210 e Kepler-411 e também a uma estrela anã M, Kepler-45. Estas estrelas possuem diferentes idades e, portanto, diferentes períodos de rotação.

Inicialmente estudaremos estatisticamente as propriedades das centenas de manchas já identificadas nestas estrelas, como seu raio e intensidade. Buscaremos correlações entre estas propriedades para investigar se seguem as propriedades de manchas solares (Valio et al. 2020) ou se diferem, conforme a massa e idade das estrelas.

A temperatura de uma mancha pode ser estimada supondo que tanto a mancha quanto a fotosfera ao redor irradiem como um corpo negro:

$$\frac{I_{mancha}}{I_{estrela}} = fi = \frac{\exp\left(\frac{hc}{\lambda K_B T_{ef}}\right) - 1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda K_B T_{mancha}}\right) - 1} \quad (1)$$

onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz, λ é o comprimento de onda de observação do satélite Kepler, K_B é a constante de Boltzmann e T_{ef} e T_{mancha} são as temperaturas da fotosfera, ou temperatura efetiva, e da mancha respectivamente. A faixa de comprimentos de onda de observação do telescópio Kepler varia de 420 a 900 nm, com resposta maximizada em 600 nm.

Podemos inverter a Equação 1 e assim obter a temperatura da mancha, T_{mancha} :

$$T_{mancha} = \frac{K_b}{h\nu \ln \left(f_i \left(e^{\frac{h\nu}{kT_{ef}}} - 1 \right) + 1 \right)} \quad (2)$$

onde ν é a frequência associada ao comprimento de onda de 600 nm, e f_i é a fração da intensidade da mancha, I_{mancha} , em relação à intensidade estelar central $I_{estrela}$ obtida do ajuste.

O campo magnético das manchas também pode ser estimado fazendo-se uma analogia com o campo magnético de manchas solares. Um estudo de mais de 32.000 manchas solares observadas durante o Ciclo de Atividade Solar 23 (Valio et al. 2020) mostrou haver uma correlação entre campo magnético, B_{mag} , e a intensidade das manchas, I_{mancha} :

$$B_{mag} = (4848 \pm 15) - (4008 \pm 20) \frac{I_{mancha}}{I_{estrela}} \quad (3)$$

onde o campo magnético é a intensidade máxima medida em Gauss.

O modelo utilizado, ECLIPSE, para a modelagem das manchas é um programa em Python, disponível no Github: <https://github.com/biaduque/astronomy>.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Analizamos as manchas detectadas a partir de trânsitos planetários de 6 estrelas: Kepler-17, Kepler-45, Kepler-63, Kepler-71, Kepler-210 e Kepler-411. As propriedades físicas das manchas estudadas foram: raio, intensidade, temperatura e campo magnético. A temperatura das manchas foi estimada a partir da Eq. 2, enquanto o campo magnético foi obtido a partir da Eq. 3. A seguir apresentamos os resultados das manchas analisadas, para cada uma das estrelas.

4.1 Manchas da estrela Kepler-17

A partir da modelagem de mais de mil manchas detectadas nos trânsitos do exoplaneta Kepler-17 foi possível estimar os valores médios do raio, intensidade, temperatura e campo magnético máximo das manchas na superfície da estrela do tipo solar, Kepler-17. Estes valores estão listados na Tabela 1.

Kepler-17	Média	Desvio Padrão
Raio (Mm)	60	30
Intensidade	0,55	0,2
Temperatura (K)	5000	600
Campo Magnético (G)	2600	800

Tabela 1: Valores médios dos parâmetros das manchas da estrela Kepler-17.

As distribuições dos parâmetros físicos das manchas detectadas na superfície da estrela Kepler-17 são mostradas nos painéis da Figura 5: raio (em amarelo), intensidade (verde), temperatura (azul) e campo magnético (vermelho).

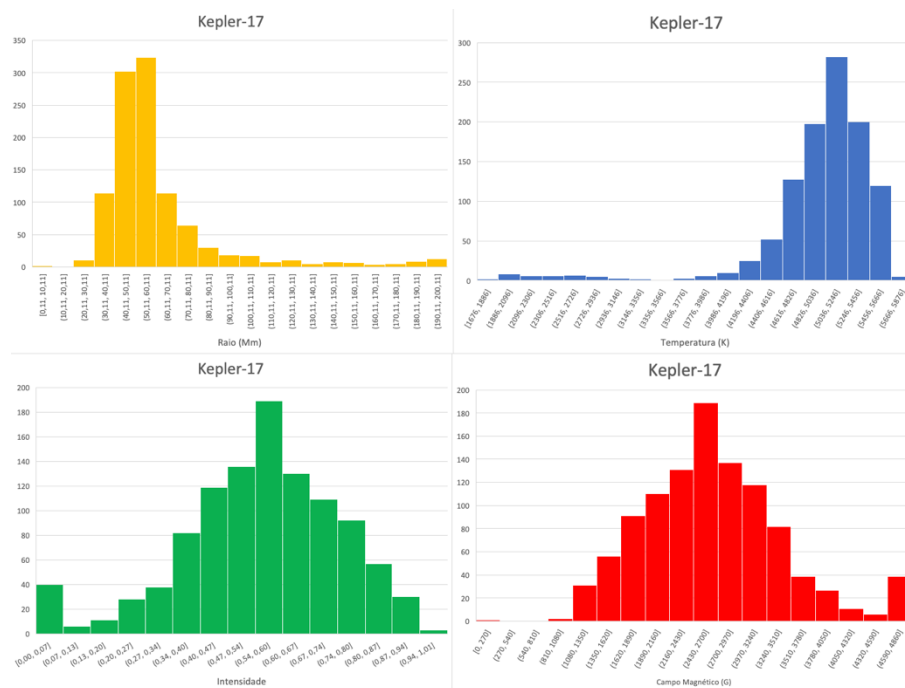


Figura 5: Gráfico dos parâmetros de raio (Mm), temperatura (K), intensidade e campo magnético das manchas da Kepler-17.

4.2 Manchas da estrela Kepler-45

Os resultados da modelagem de 34 manchas na superfície da estrela anã Kepler-45 estão listados na Tabela 2 (valores médios e desvio padrão), e as distribuições são mostradas na Figura 6.

Kepler-45	Média	Desvio Padrão
Raio (Mm)	41	18
Intensidade	0,572	0,224
Temperatura (K)	3500	250
Campo Magnético (G)	2600	900

Tabela 2: Valores médios dos parâmetros físicos da estrela Kepler-45.

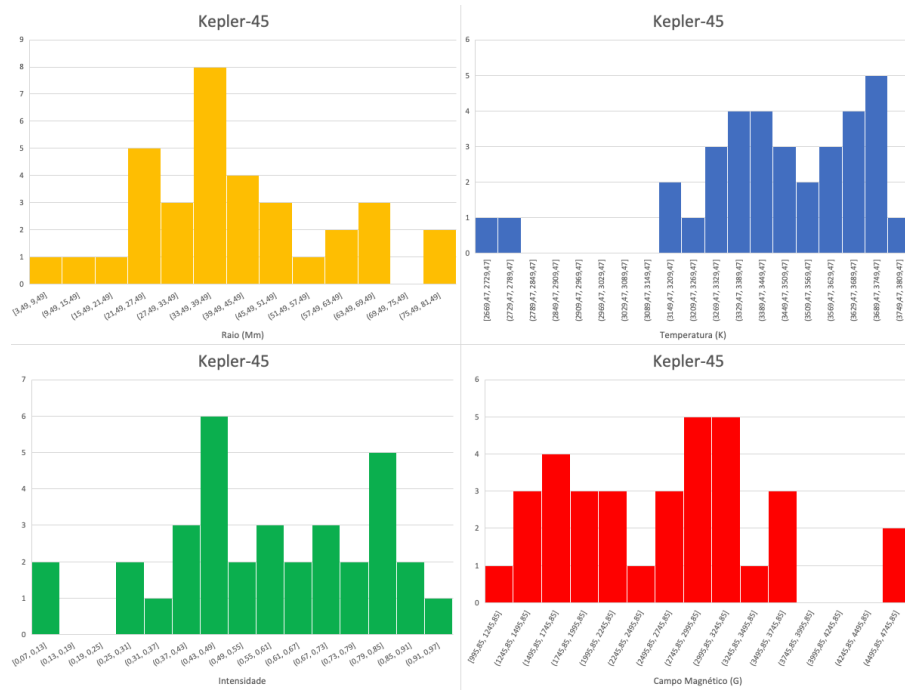


Figura 6: Gráfico dos parâmetros de raio (Mm), temperatura (K), intensidade e campo magnético (Gauss) das manchas da Kepler-45.

4.3 Manchas da estrela Kepler-63

Os resultados da modelagem de quase 300 manchas na superfície da estrela jovem do tipo solar Kepler-63 estão listados na Tabela 3 (valores médios e desvio padrão), e as distribuições de raio, intensidade, temperatura e campo magnético são mostradas na Figura 7.

Kepler-63	Média	Desvio Padrão
Raio (Mm)	32	14
Intensidade	0,47	0,16
Temperatura (K)	4700	400
Campo Magnético (G)	2900	600

Tabela 3: Valores médios para os parâmetros físicos das manchas da estrela Kepler-63.

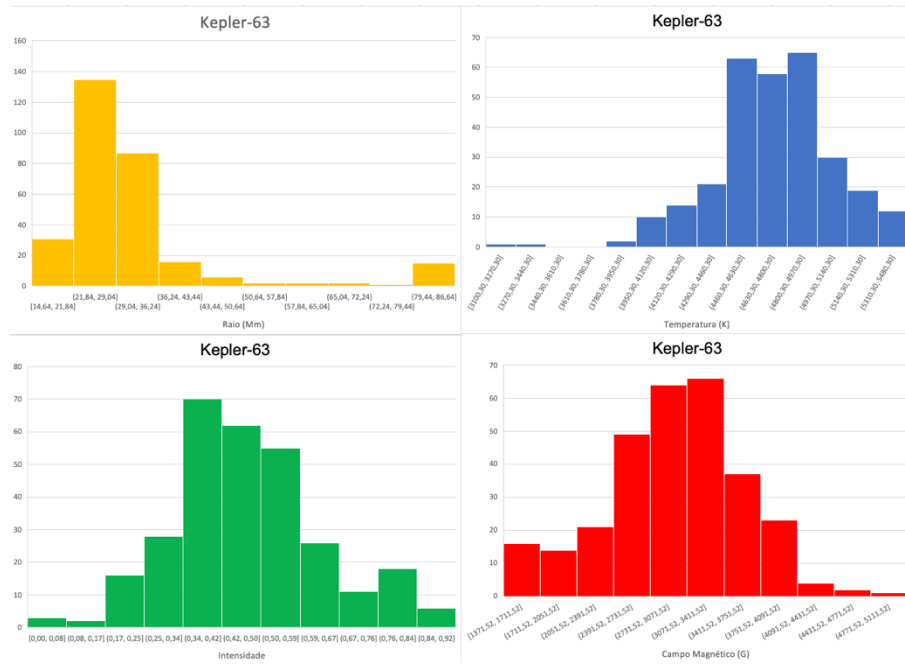


Figura 7: Gráfico dos parâmetros de raio (Mm), temperatura (K), intensidade e campo magnético (Guass) das manchas da Kepler-63.

4.4 Manchas da estrela Kepler-71

Os resultados da modelagem de 76 manchas na superfície da estrela Kepler-71 estão listados na Tabela 4 (valores médios e desvio padrão), e as distribuições são mostradas na Figura 8.

Kepler-71	Média	Desvio Padrão
Raio (Mm)	49	25
Intensidade	0,55	0,23
Temperatura (K)	4800	520
Campo Magnético (G)	2600	900

Tabela 4: Valores médios os parâmetros físicos das manchas da estrela Kepler-71.

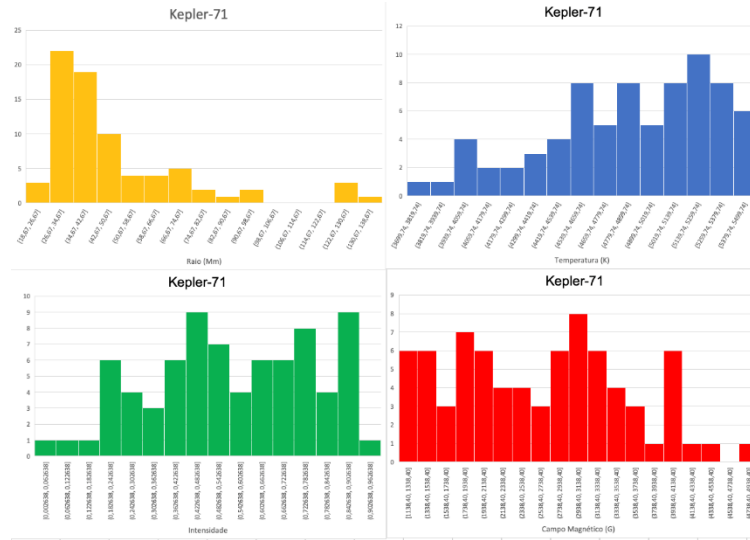


Figura 8: Gráfico dos parâmetros de raio (Mm), temperatura (K), intensidade e campo magnético das manchas da Kepler-71.

4.5 Manchas da estrela Kepler-210

As propriedades físicas das mais de 100 manchas na superfície da estrela Kepler-210 estão mostradas na Tabela 5 e suas respectivas distribuições na Figura 9.

Kepler-210	Média	Desvio Padrão
Raio (Mm)	60	25
Intensidade	0,64	0,15
Temperatura (K)	4200	230
Campo Magnético (G)	2300	600

Tabela 5: Valores médios para cada parâmetro das manchas da estrela Kepler-210.

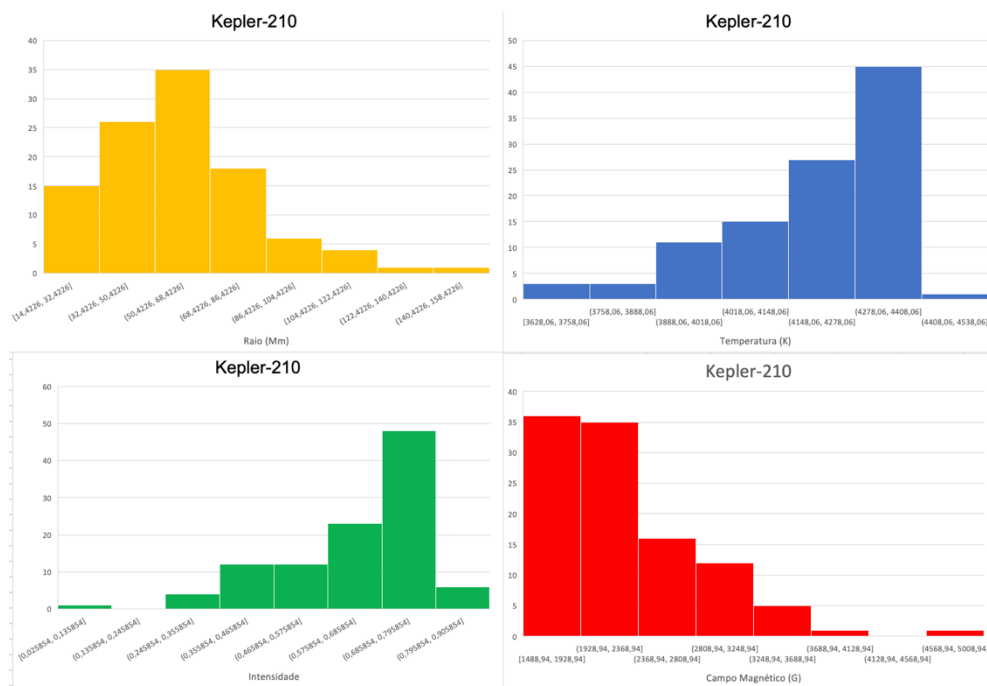


Figura 9: Gráfico dos parâmetros de raio (Mm), temperatura (K), intensidade e campo magnético (Gauss) das manchas da Kepler-210.

4.6 Manchas da estrela Kepler-411

As propriedades físicas das quase 200 manchas na superfície da estrela Kepler-411 estão mostradas na Tabela 6 e suas respectivas distribuições na Figura 10.

Kepler-411	Média	Desvio Padrão
Raio (Mm)	17	7
Intensidade	0,36	0,24
Temperatura (K)	3900	720
Campo Magnético (G)	3400	960

Tabela 6: Valores médios para cada parâmetro físico das manchas da estrela Kepler-411.

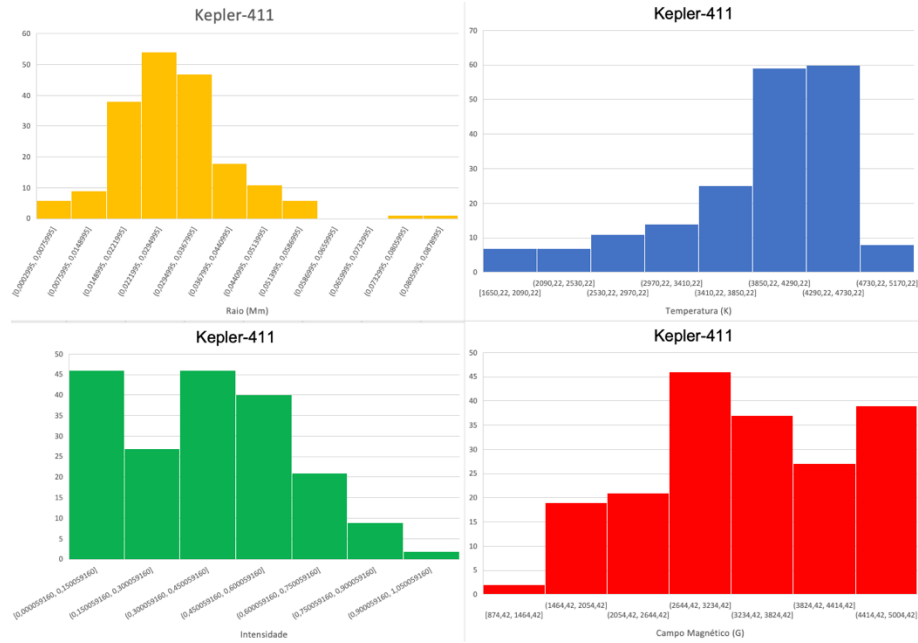


Figura10: Gráfico dos parâmetros de raio (Mm), temperatura (K), intensidade e campo magnético (Guass) das manchas da Kepler-411.

4.7 Relações entre os parâmetros das manchas e as propriedades das estrelas

As propriedades físicas das 6 estrelas analisadas, como massa, raio, idade e temperatura efetiva, estão listadas na Tabela 7. Na mesma tabela estão as características físicas das manchas encontradas nos trânsitos dos exoplanetas e modeladas.

Nome:	Kepler-17	Kepler-45	Kepler-63	Kepler-71	Kepler-210	Kepler-411
Massa (Msol)	1.16 (± 0,06)	0.59 (± 0,06)	0.98 (± 0,04)	0.95 (± 0,079)	0.63	0.87 (± 0,04)
Raio (Rsol)	1.05 (± 0,03)	0.55 (± 0,11)	0.9 (± 0,02)	0.86 (± 0,389)	0.65 (± 0,03)	0.82 (± 0,02)
Idade (Ganos)	< 1.78	0.5	0.21 (± 0,045)	3.2	0.35	0.212 (± 0,031)
Temperatura Efetiva (K)	5781 (± 85)	3820 (± 90)	5576 (± 50)	5545 (± 150)	4559 (± 100)	4974 (± 48)
N° total de manchas	1069	34	297	76	106	191
Período de rotação (dias)	12.4	15.8	5.4	19.8	12.3	10.5
Valores medios						
Raio (Mm)	60 (± 30)	41 (± 18)	32 (± 14)	49 (± 25)	60 (± 25)	17 (± 7)
Intensidade	0.55 (± 0,20)	0.572 (± 0,224)	0.47 (± 0,16)	0.55 (± 0,23)	0.64 (± 0,15)	0.36 (± 0,24)
Temperatura (K)	5000 (± 600)	3500 (± 250)	4700 (± 400)	4800 (± 520)	4200 (± 230)	3900 (± 720)
Campo magnético (G)	2600 (± 800)	2600 (± 900)	2900 (± 600)	2600 (± 900)	2300 (± 600)	3400 (± 960)

Tabela 7: Tabela com alguns parâmetros utilizados para obtermos relações, sendo a parte superior os dados da estrela e os de baixo das manchas.

A seguir buscamos correlações entre os parâmetros físicos das manchas e as características das seis estrelas. A primeira correlação encontrada foi entre a temperatura da mancha e a temperatura efetiva, ou da fotosfera, da estrela, que pode ser vista na Figura 11.

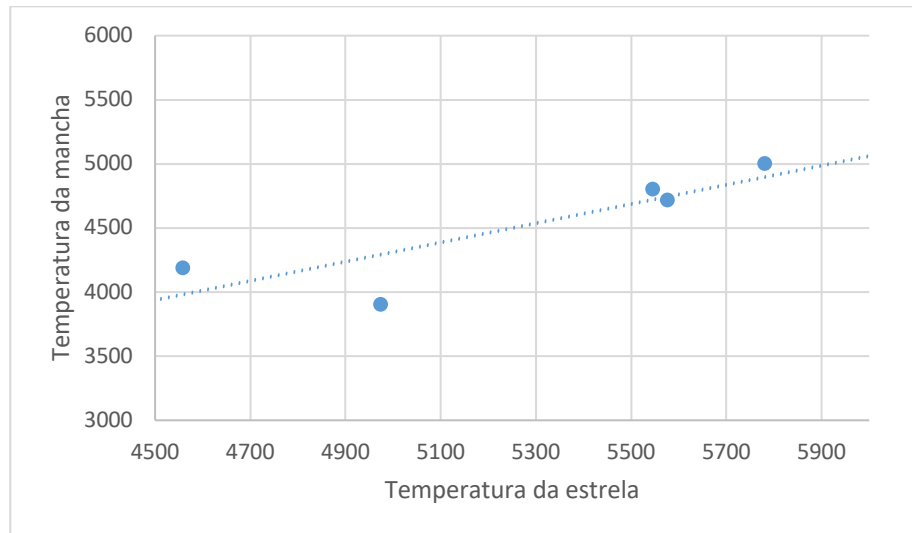


Figura 11: Gráfico da temperatura da mancha (eixo y) pela temperatura efetiva da estrela (eixo x).

Conforme o gráfico da Figura 11, podemos concluir que quanto maior a temperatura da estrela maior será a temperatura da mancha em sua superfície. Esta mesma correlação foi encontrada anteriormente por Herbst et al. (2020).

É esperado que o campo magnético da estrela, produzido por um mecanismo de dínamo, diminua conforme a idade da estrela aumenta, assim como o seu período de rotação. Porém, no gráfico da Figura 12 não observamos uma correlação. A falta de correlação entre o campo magnético e a idade da estrela pode ser devido à grande incerteza no cálculo das idades estelares.

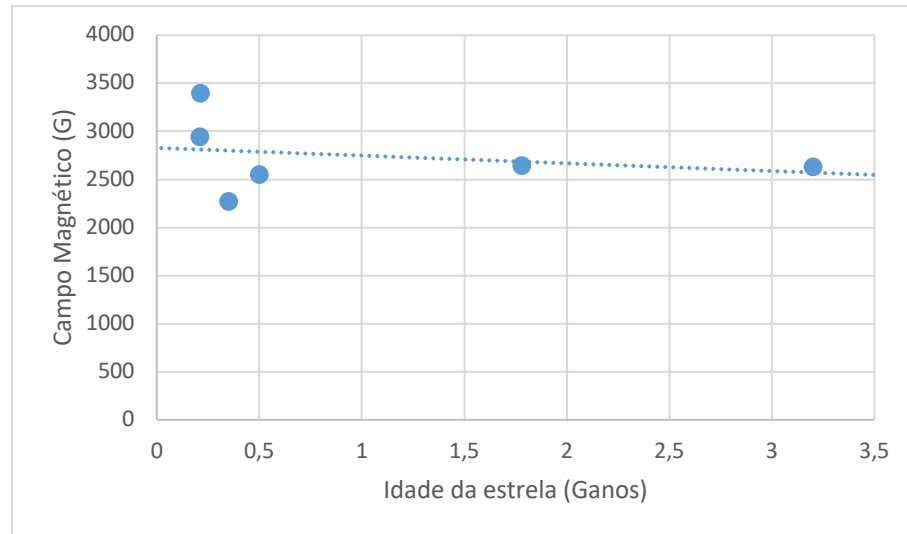


Figura 12: Gráfico do campo magnético das manchas na superfície da estrela pela idade da estrela.

Comparando a temperatura da mancha com seu raio, é possível observar uma leve correlação. Na Figura 13, pode-se notar que quanto maior o raio da mancha, maior é sua temperatura também. Entretanto, este resultado pode resultar de um viés da modelagem.

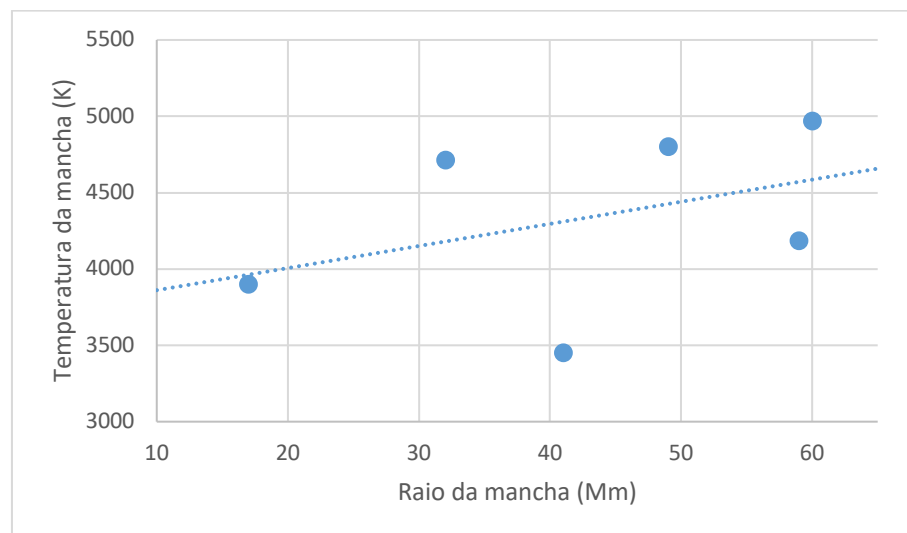


Figura 13: Gráfico da temperatura da mancha em K (eixo y) pelo raio da mancha em 10^6 m (eixo x).

Entretanto outras correlações não obtiveram o mesmo resultado, não possuindo relação aparente, esses resultados podem futuramente mudar com o aumento das amostras para análise. As não correlações foram calculadas seus coeficientes de correlação e houve um baixo grau de afinidade. Dentre as associações feitas todas que observamos com o

período de rotação não houve uma correlação aparente, nem mesmo seus coeficientes eram relevantes.

O resultado do raio da mancha em relação ao raio da estrela mostra que não há uma correlação aparente entre ambos os raios, conforme pode ser visto na Figura 14.

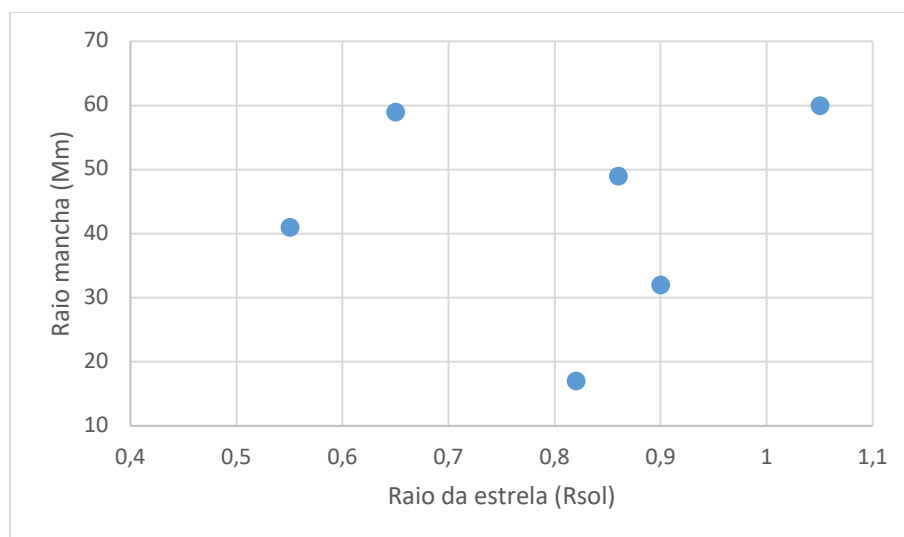


Figura 14: Gráfico do raio da mancha em Mm (eixo y) pelo raio da estrela em raios do Sol (eixo x).

Tampouco parece haver uma correlação entre o campo magnético máximo da mancha na superfície de uma estrela e o raio da estrela (ver Figura 15), ou entre o raio da mancha e a temperatura efetiva da estrela (ver Figura 16). Portanto, parece não haver correlação com o tamanho das manchas na superfície das estrelas e as propriedades das estrelas como raio ou temperatura efetiva, que é uma função da massa da estrela.

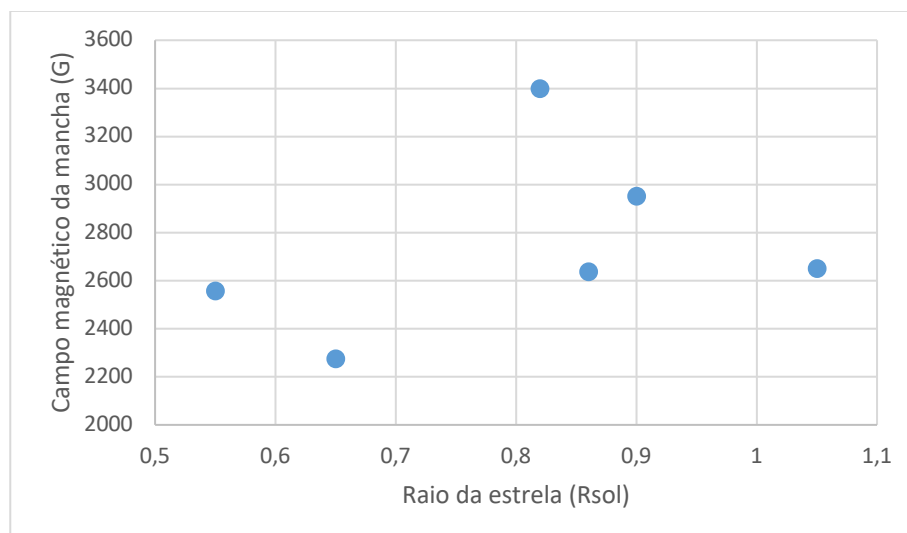


Figura 15: Gráfico do campo magnético da mancha em Gauss (eixo y) pelo raio da estrela em raios do Sol (eixo x).

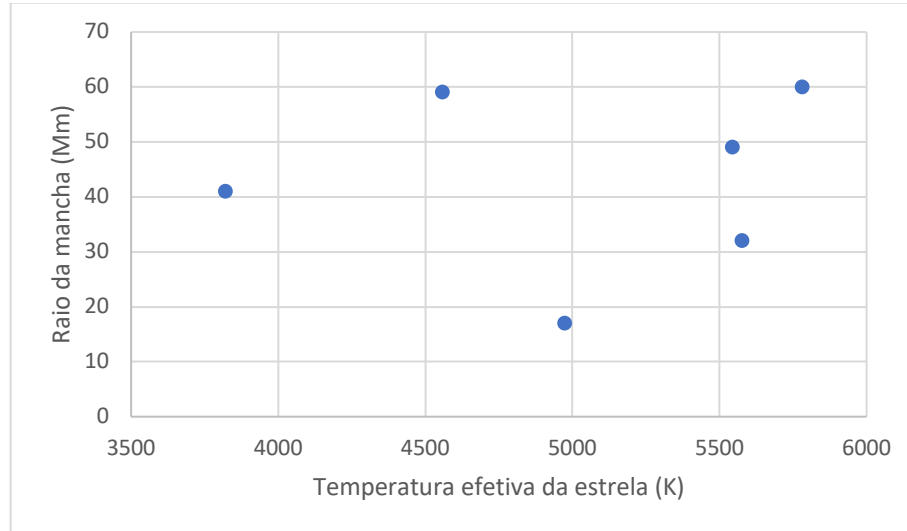


Figura 16: Gráfico do raio da mancha em Mm (eixo y) pela temperatura efetiva da estrela K (eixo x).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho analisamos as propriedades das manchas na superfície de 6 estrelas previamente modeladas: Kepler-17 (Valio et al. 2017), Kepler-45 (Zaleski et al. 2020), Kepler-63 (Netto e Valio 2020), Kepler-71 (Zaleski et al. 2019), Kepler-210 (Valio e Araújo 2022) e Kepler-411 (Araújo e Valio 2021). Todas estas estrelas possuem exoplanetas em órbita que variam de tamanho de Júpiter a mini-Netuno.

Foram quase 2000 manchas analisadas e suas principais propriedades extraídas pelo método de mapeamento de manchas a partir de trânsitos de exoplanetas utilizando o código ECLIPSE. As características principais são raio e intensidade das manchas. A temperatura da mancha foi estimada usando-se a Eq. 2, supondo emissão de corpo negro tanto para a mancha quanto para a fotosfera da estrela. Já o campo máximo da mancha foi calculado a partir de um ajuste obtido para manchas solares conforme a Eq. 3 (Valio et al. 2020). Os resultados das propriedades físicas das manchas foram mostrados nas Figuras 5 a 10.

Buscamos correlações entre os parâmetros das manchas e as propriedades das estrelas. Uma correlação clara foi encontrada apenas entre a temperatura das manchas e a temperatura efetiva da estrela. Porém o número de estrelas analisadas ainda é pequeno,

apenas 6. Para um melhor resultados será necessário analisar e modelar as manchas de mais estrelas de diferentes massas e raios.

6. REFERÊNCIAS

- Araujo, A. e Valio, A. Kepler-411 differential rotation from three transit planets. *The Astrophys. J. Lett.*, **907**, L5, 2021
- Berdyugina, S. V. Starspots: a Key to the Stellar Dynamo, *Living Rev. Solar Phys.*, **2**, 8, 2005
- Borucki, W.J. et al. Kepler planet detection mission: Introduction and first results. *Science*, **327**, 977, 2010
- Estrela, R. e Valio, A. Stellar magnetic cycles in the solar-like stars Kepler-17 and Kepler-63. *The Astrophys. J.*, **831**, 57, 2016
- Hathaway, D. H. The Solar Cycle. *Living Rev. Solar Phys.*, **7**, 1, 2010
- Herbst, K., Papaioannou, A., Airapetian, V., Atri, D. *The Astrophys. J.*, **907**, 89, 2021
- Lanza, A.F. et al. Magnetic activity in the photosphere of CoRoT-Exo-2a. Active longitudes and short-term spot cycle in a Young Sun-like star. *Astron. & Astrophys.* **492**, 193, 2009
- Netto, Y. e Valio, A. Stellar magnetic activity and the butterfly diagram of Kepler-63. *Astron. & Astrophys.* **635**, 78, 2020
- Parker, E. N. Hydromagnetic Dynamo Models. *The Astrophys. J.*, **122**, 293, 1955
- Silva, A.V.R. Method for Spot Detection on Solar-like Stars. *The Astrophys. J. Lett.*, **585**, L147, 2003
- Silva-Valio, A., Lanza, A.F., Alonso, R., Barge, P. Properties of starspots on CoRoT-2. *Astron. & Astrophys.* **510**, 25, 2010
- Strassmeier, K.G. Doppler imaging of stellar surface structure. XI. The super starspots on the KO giant HD 12545: larger than the entire Sun. *Astron. & Astrophys.* **347**, 225, 1999
- Valio A., Araújo, A. Stellar obliquity from spot transit mapping of Kepler-210, *The Astrophys. J.* 2022 (submetido)
- Valio, A., Estrela, R., Netto, Y., Bravo, J.P., de Medeiros, J.R. Activity and rotation of Kepler-17. *The Astrophys. J.*, **835**, 294, 2017
- Valio, A. Spagiari, E., Marengoni, M., Selhorst, C.L. Correlations of Sunspot physical characteristics during Solar Cycle 23. *Sol. Phys.*, **295**, 120, 2020
- Zaleski, S.M., Valio, A., Marsden, S.C., Carter, B.D. Differential rotation of Kepler-71 via transit photometry mapping of faculae and starspots. *MNRAS*, **484**, 618, 2019
- Zaleski, S.M., Valio, A., Carter, B.D., Marsden, S.C. Activity and differential rotation of the early M dwarf Kepler-45 from transit mapping. *MNRAS*, **492**, 5141, 2020