

BUSCA POR EXOLUAS NAS CURVAS DE LUZ DE TRÂNSITOS PLANETÁRIOS

Davi Martins Figueiredo (IC) e Adriana Benetti Marques Valio (Orientadora)

Apoio: PIBIC CNPq

RESUMO

A análise de trânsitos exoplanetários tem se tornado uma ferramenta crucial na busca por exoplanetas e na investigação de possíveis exoluas. Esta técnica utiliza dados obtidos através de curvas de luz, que são representações da variação de brilho de uma estrela ao longo do tempo. Quando um exoplaneta passa diante de sua estrela, ele causa uma diminuição temporária no brilho observado, o que é registrado como um trânsito. Caso este planeta possua uma exolua em órbita, esta também poderá transitar em frente à estrela e seu diminuto sinal pode ser detectado. Para analisar esses trânsitos, é fundamental preparar e limpar os dados, removendo registros de baixa qualidade e valores ausentes, e aplicar técnicas de normalização para ajustar as medições ao padrão da mediana. Além disso, o filtro Savitzky-Golay é utilizado para suavizar a curva de luz, reduzindo o ruído e melhorando a precisão da detecção dos trânsitos. A identificação dos trânsitos é feita através da comparação de dados de tempo central do primeiro trânsito e período orbital com os valores ajustados na curva de luz. Buscamos o sinal de trânsito da exolua, como pequenas quedas do fluxo, logo antes ou logo após o trânsito do planeta nas curvas de luz de 6 planetas observados pelo telescópio espacial Kepler. O processo envolve o ajuste do tempo para corresponder ao período do trânsito e a visualização detalhada dos trânsitos individuais. No entanto, apesar da eficácia desse método, a detecção de exoluas, ou luas de exoplanetas, ainda é um desafio significativo. Isso se deve à necessidade de um nível de detalhe muito fino e à complexidade das análises necessárias para distinguir pequenas variações no brilho causadas por exoluas em comparação com o ruído dos dados. Portanto, embora a técnica de análise de trânsitos seja um passo fundamental na exploração de exoplanetas e suas possíveis luas, é evidente que telescópios espaciais mais precisos e metodologias mais avançadas são necessários para obter uma compreensão mais completa e precisa desses corpos celestes.

Palavras-chave: Exoplanetas, Exoluas, Curva de Luz



ABSTRACT

Exoplanet transit analysis has become a crucial tool in the search for exoplanets and in the investigation of potential exomoons. This technique utilizes data obtained through light curves, which are representations of a star's brightness variation over time. When an exoplanet passes in front of its star, it causes a temporary decrease in observed brightness, recorded as a transit. If this planet hosts an exomoon, this moon may also transit in front of the star and produce a dimune detectable signal. To analyze these transits, it is essential to prepare and clean the data by removing low-quality records and missing values and apply normalization techniques to adjust the measurements to the median standard. Additionally, the SavitzkyGolay filter is used to smooth the light curve, reducing noise, and improving the accuracy of transit detection. Identifying transits involves comparing the first mid transit time and orbital period data with adjusted values in the light curve. We searched for the signal of exomoons, that is, small flux dips just before and after the planet transit in the light curve of 6 exoplanets observed by the Kepler space telescope. The process includes adjusting the timing to match the transit period and detailed visualization of individual transits. However, despite the effectiveness of this method, detecting exomoons, or moons of exoplanets, remains a significant challenge. This is due to the need for very fine detail and the complexity of analyses required to distinguish small variations in brightness caused by exomoons from the noise in the data. Therefore, while transit analysis is a fundamental step in the exploration of exoplanets and their potential moons, it is evident that higher precision space telescopes and advanced methodologies are needed to gain a more comprehensive and accurate understanding of these celestial bodies.

Keywords: Exoplanets, Exomoons, Light Curves

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a descoberta de exoplanetas — planetas que orbitam estrelas fora do nosso Sistema Solar — tem revolucionado a astronomia e ampliado nossa compreensão sobre a formação e evolução planetária. Desde a primeira detecção confirmada de um exoplaneta em 1992, milhares de outros têm sido identificados, revelando uma diversidade impressionante de mundos. Um dos métodos mais eficazes para a descoberta de exoplanetas

é a análise de suas curvas de luz, que são variações no brilho de uma estrela causadas pela passagem de um planeta em frente a ela, no que chamamos de trânsito planetário.

Embora a detecção de exoplanetas tenha se tornado relativamente comum, a busca por exoluas — luas que orbitam esses exoplanetas — ainda apresenta desafios significativos. As exoluas são de extremo interesse científico, pois podem fornecer pistas valiosas sobre a formação e desenvolvimento de sistemas planetários. No entanto, a identificação de exoluas é uma tarefa complexa, devido às pequenas alterações que causam nas curvas de luz dos exoplanetas que orbitam.

A literatura científica já apresenta alguns avanços notáveis nessa área, com diversos estudos sugerindo métodos para a identificação de exoluas por meio de variações anômalas nas curvas de luz. No entanto, muitos desses trabalhos enfrentam limitações quanto à sensibilidade dos dados ou à complexidade das análises necessárias para diferenciar sinais reais de exoluas de ruídos ou outros fenômenos astrofísicos.

1.1 Objetivo

Neste artigo, o objetivo principal é investigar a presença de exoluas em curvas de luz de exoplanetas utilizando técnicas de análise de dados. Ao aplicar métodos de filtragem e análise estatística, buscamos identificar possíveis sinais de exoluas e contribuir para a ampliação do conhecimento sobre esses corpos celestes. Espera-se que este estudo possa fornecer novas perspectivas e análises para a detecção de exoluas, aproximando-nos ainda mais da compreensão da diversidade e complexidade dos sistemas planetários além do nosso.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Telescópio Espacial Kepler

Com o objetivo de identificar e analisar exoplanetas com características semelhantes à Terra, o satélite Kepler (Boruki et al. 2010) da NASA, mostrado na Figura 1, foi lançado em 2009 e teve seu funcionamento encerrado em outubro de 2018, devido à falta de combustível. Abrigava um fotômetro com abertura de 95 cm, espelhos de reflexão de cerca de 85% da luz incidente, um detector de aproximadamente 2200 x 1024 pixels e tinha a massa de cerca de 1 tonelada. Durante sua quase uma década de funcionamento, o telescópio observou mais de 500 mil estrelas e confirmou mais de 2600 exoplanetas, com o método de trânsito, sendo vários desses com características habitáveis.

Figura 1: Representação artística do telescópio Kepler

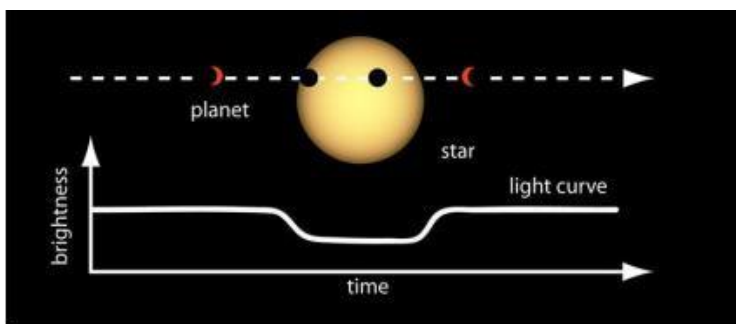


Fonte: NASA/Ames/JPL-Caltech/T Pyle

2.2 Método de Trânsito e Curva de Luz

O trânsito de um exoplaneta ocorre quando o planeta passa na frente da estrela que orbita, em relação a um observador na Terra, causando uma pequena variação no brilho da estrela. Estas sutis variações de brilho são detectadas por instrumentos na forma de curvas de luz, que são gráficos que mostram a variação do brilho estelar em função do tempo.

Figura 2: Ilustração representativa do Trânsito e da Curva de Luz

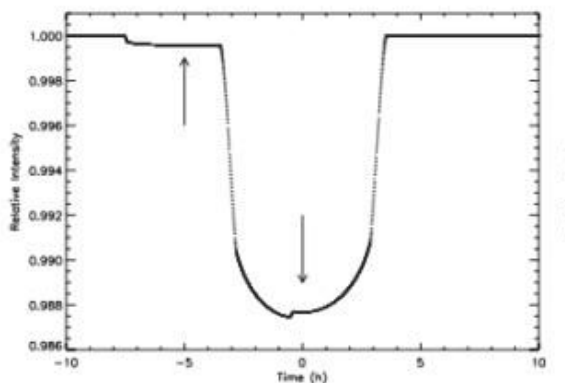


Fonte: NASA Ames

Monitorando o brilho da estrela por um determinado período, é possível observar o trânsito do exoplaneta. Como podemos ver na Figura 2, quando o planeta passa na frente da estrela, o brilho diminui, como mostrado no gráfico. A partir das características das quedas de brilho nas curvas de luz é possível inferir o raio do planeta e propriedades orbitais como período, semieixo maior e ângulo de inclinação. Caso o planeta seja orbitado por uma lua, ela também pode transitar em frente à estrela, causando diminutas variações extras na curva de luz (indicadas pelas setas), como pode ser visto na Figura 3. Esta figura é o resultado da

simulação de uma curva de luz de uma estrela como o Sol que é orbitada por um planeta Júpiter quente (com raio $1 R_J$ e período orbital de 45 dias) que possui uma exolua de tamanho de 2 raios terrestres e um período orbital de 5 dias em torno do planeta (Tusnski e Valio, 2011).

Figura 3: Modelo de curva de luz de um exoplaneta com uma exolua em sua órbita



Fonte: Adaptada de Tusnski e Valio (2011)

3. METODOLOGIA

Para a busca de sinais de exoluas em observações de curvas de luz das estrelas como os identificados na simulação da Figura 3, utilizamos um código desenvolvido por Silva (2003). Este código, aprimorado pelo grupo de pesquisa e disponível publicamente, foi desenvolvido para análise de possíveis alterações nas curvas de luz, além da filtragem de possíveis planetas candidatos.

3.1 ECLIPSE

Todo o trabalho foi feito em Python e o código utilizado nas análises foi o ECLIPSE, que está disponível em <https://GitHub.com/Transit-Model-CRAAM/pipelineMCMC>. O código ECLIPSE, desenvolvido em Python, é um projeto de programação para calcular a curva de luz de uma estrela com possíveis exoplanetas em sua órbita. Este código permite a inclusão de exoluas orbitando o exoplaneta. Os trânsitos com possíveis anomalias foram comparados com a curva de luz teórica produzida pelo ECLIPSE.

3.2 Seleção dos melhores candidatos

Nesta pesquisa, iniciamos com um conjunto de dados extenso contendo informações de 9.563 exoplanetas e candidatos da base de dados da NASA. Os dados foram obtidos de catálogos de exoplanetas disponíveis publicamente em: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>. O foco principal do estudo foi identificar exoplanetas com períodos orbitais curtos e trânsitos profundos, ou seja, a razão entre o raio do planeta e raio da estrela é alta, pois essas características são indicativas de exoplanetas que podem apresentar uma maior probabilidade de detecção de exoluas, além de apresentarem trânsitos com menor sinal-ruído.

Portanto, para refinar o conjunto de dados, aplicamos dois filtros principais: Período Orbital e Profundidade do Trânsito. Selecionamos planetas com períodos orbitais menores que 10 dias. Planetas com órbitas curtas passam com mais frequência na frente de suas estrelas, o que aumenta a quantidade de dados de trânsito disponíveis. Além disso, escolhemos exoplanetas com profundidade de trânsito entre 61.500.000 e 369.000.000 ppm. Trânsitos profundos indicam planetas maiores, facilitando a observação de potenciais exoluas.

Após a aplicação desses filtros, selecionamos 6 exoplanetas que apresentavam as características desejadas. Os planetas selecionados foram: Kepler-423 b, Kepler-8 b, Kepler-12 b, Kepler-41 b, Kepler-412 b e Kepler-7 b. As características dos planetas como raio e massa, assim como os parâmetros de suas órbitas estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos exoplanetas e suas órbitas

Planeta	Período (dias)	Ângulo de Inclinação	Raio (R _J)	Massa (M _J)	T0 (dias)
Kepler-423 b	2,684	87,82	1,192	0,595	353,46971
Kepler-12 b	4,4379629	88,796	1,754	0,432	171,0091259
Kepler-8 b	3,5224991	83,978	1,416	0,59	121,1194228
Kepler-41 b	1,8555582	82,51	1,29	0,56	137,1810280
Kepler-412 b	1,7208604	80,559	1,341	0,941	133,0209998
Kepler-7 b	4,8854892	85,161	1,622	0,441	134,2768785

Iniciamos a pesquisa utilizando o exoplaneta Kepler-423 b como referência. Kepler-423 b possui um Período Orbital de 2,6843285 ($\pm 8.2e-08$) dias, Raio de 1,192 R_J , Massa de 0,595 M_J , Semi-eixo de 0,03585 UA e ângulo de Inclinação de 87,828 graus. Este planeta foi escolhido por possuir um trânsito profundo e um período orbital curto, o que o torna ideal para testes preliminares de metodologia e calibração dos parâmetros de análise. As características deste planeta forneceram uma base sólida para o desenvolvimento das técnicas que foram aplicadas posteriormente aos outros exoplanetas selecionados.

3.3 Download das Curvas de Luz

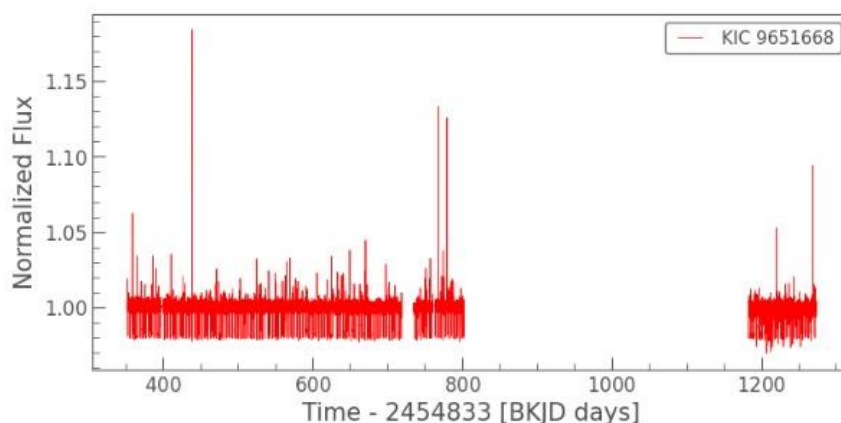
Após a seleção dos exoplanetas de interesse, procedemos à análise das curvas de luz, com foco inicial no planeta Kepler-423 b. A análise das curvas de luz é crucial para detectar trânsitos planetários e possíveis sinais de exoluas. Utilizamos a ferramenta Jupyter Notebook para o desenvolvimento do código. O código está disponível em: <https://github.com/DavizeraK/Cortes-dos-Tr-nsitos>

Para obter os dados de curvas de luz, utilizamos a biblioteca *lightkurve*. Primeiramente, realizamos uma busca pelos dados do exoplaneta Kepler-423 b, especificando o autor "Kepler" para garantir que os dados utilizados fossem provenientes da missão Kepler, e selecionando a cadência curta, que fornece observações com alta cadência temporal (58,9 s). Os dados do satélite Kepler foram coletados em *Quarters* (ou trimestres), produzindo um arquivo para cada *Quarter*, com máximo de 17 arquivos definido pelo final da missão.

Os dados de curvas de luz recuperados para cada *Quarter* foram então baixados e combinados em uma única curva de luz contínua. Esse processo, conhecido como "*stitching*", permite unir diferentes segmentos de dados em uma sequência temporal ininterrupta, essencial para uma análise detalhada e precisa dos eventos de trânsito.

Após a "costura" dos dados, geramos um gráfico da curva de luz combinada para visualização e inspeção inicial. O gráfico (Figura 4) gerado permite a observação direta das variações de brilho da estrela ao longo do tempo, onde quedas de luminosidade indicam a ocorrência de trânsitos planetários.

Figura 4: Gráfico da Curva de Luz do planeta Kepler-423 b



Fonte: o Autor

3.4 Corte dos Trânsitos

Após a combinação da curva de luz, definimos os parâmetros específicos dos trânsitos do exoplaneta Kepler-423 b para analisar e visualizar trânsitos individuais. Os parâmetros utilizados foram:

- T_0 : 353,46971 dias, representando o tempo do meio do primeiro trânsito observado.
- Per : 2,6843285 dias, correspondente ao período orbital do planeta.
- Duração do Trânsito: 0,5 dias, definindo a duração aproximada de cada trânsito.

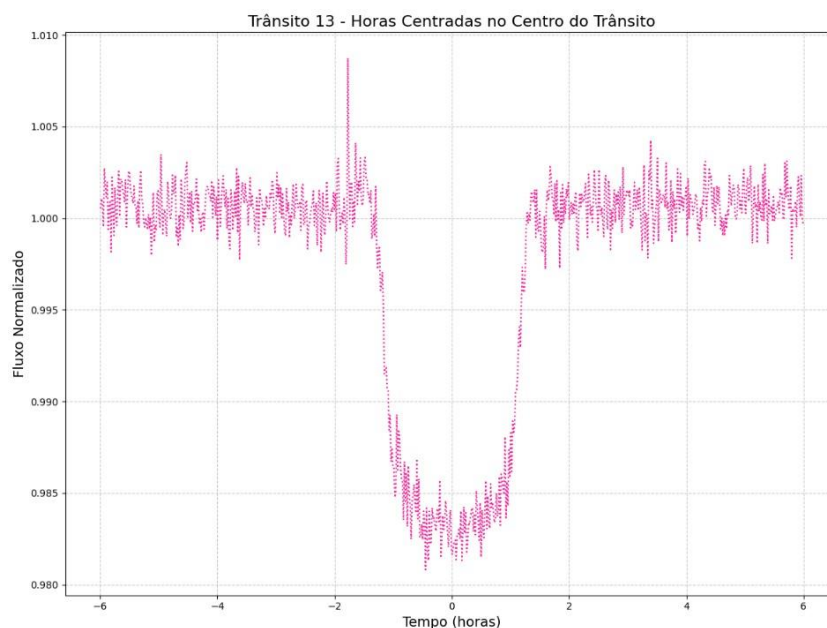
Com estes parâmetros, é possível extrair um único trânsito e plotar sua curva de luz. Para focar em um trânsito específico, selecionamos o 13º trânsito observado ($transito_escolhido = 13$). Com base nos parâmetros ' T_0 ' e ' Per ' definidos, identificamos os pontos da curva de luz que correspondem ao intervalo de tempo em que esse trânsito ocorreu.

Os dados de tempo ($transit_time$) e fluxo normalizado ($flux_norm$) foram filtrados para isolar o período exato do trânsito escolhido. Para isso, utilizamos uma máscara lógica para selecionar os pontos da curva de luz que caem dentro do intervalo correspondente ao trânsito, considerando a duração definida.

Em seguida, o tempo foi convertido de dias para horas e centralizado em torno do meio do trânsito, permitindo uma análise mais detalhada do evento. Essa conversão e centralização são essenciais para visualizar as variações de fluxo em torno do trânsito com maior precisão temporal.

A visualização do trânsito foi realizada plotando-se o tempo em horas, centrado no meio do trânsito, contra o fluxo normalizado. Para essa visualização, utilizamos uma linha pontilhada rosa, permitindo uma clara distinção do evento de trânsito. O gráfico foi

complementado com uma grade (com estilo tracejado e opacidade ajustada) para facilitar a interpretação dos dados, e o título e rótulos dos eixos foram adequadamente configurados para clareza. Na Figura 5, a curva de luz resultante fornece uma visão detalhada do trânsito selecionado, mostrando como o fluxo da estrela varia em torno do evento, o que é crucial para a identificação de possíveis sinais de exoluas ou outras características astrofísicas. **Figura 5:** Corte do 13º Trânsito de Kepler-423 b



Fonte: o Autor

3.5 Normalização e Remoção de Outliers

Para garantir a qualidade e precisão dos dados utilizados na análise dos trânsitos do exoplaneta Kepler-423 b, realizamos uma série de etapas de pré-processamento e filtragem dos dados de curvas de luz.

Inicialmente, os dados brutos das curvas de luz foram limpos com a remoção de valores inválidos e outliers. Para isso, aplicamos a função `remove_nans()` da biblioteca `lightkurve`, que eliminou quaisquer valores NaN (Not a Number) presentes na curva de luz. Posteriormente, utilizamos a função `remove_outliers` com um critério de 6 desvios padrão para remover pontos de dados considerados outliers. Esses passos foram essenciais para minimizar o impacto de ruídos e garantir que a análise subsequente fosse baseada em dados de alta qualidade.

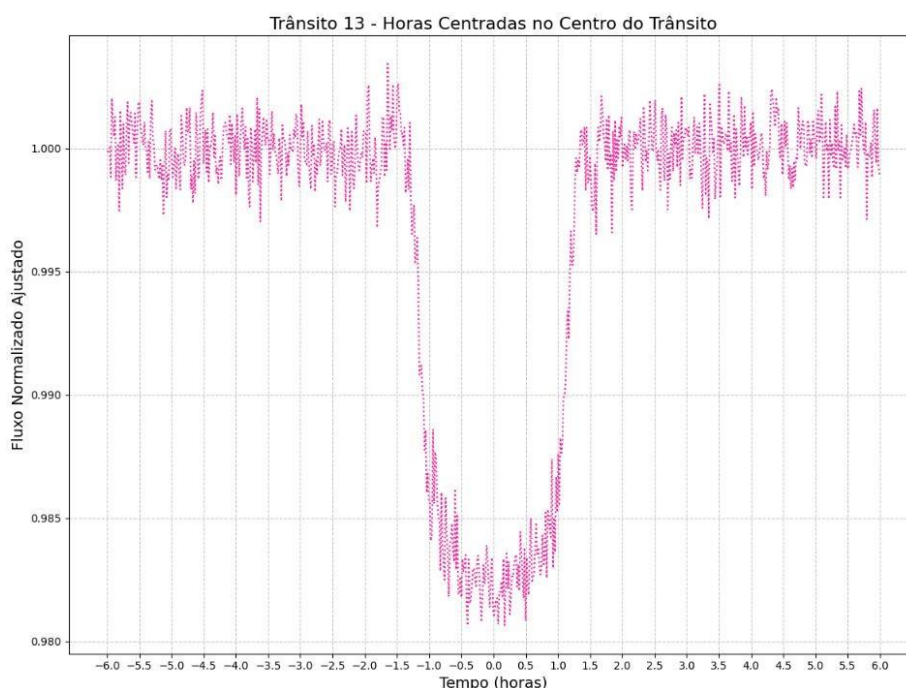
Após essa limpeza inicial, aplicamos um filtro de qualidade utilizando uma máscara que retém apenas os dados com qualidade zero (`quality == 0`), garantindo assim a utilização apenas de dados confiáveis. O fluxo da curva de luz, após a limpeza, foi normalizado dividindo-

se cada valor pela mediana do fluxo, removendo assim variações de longo prazo no brilho da estrela e facilitando a comparação direta dos dados ao longo do tempo.

Na sequência, focamos no 13º trânsito observado (Figura 5). Isolamos os pontos de dados correspondentes a esse trânsito, convertendo o tempo de dias para horas e centralizando-o em torno do meio do trânsito, o que proporcionou uma visualização mais precisa do evento.

Adicionalmente, calculamos a média dos fluxos no intervalo de tempo entre -6 e -3 horas em relação ao centro do trânsito, e utilizamos essa média para realizar um ajuste adicional no fluxo normalizado. Esse ajuste foi implementado para refinar a análise, focando nas variações mais relevantes próximas ao evento de trânsito. Finalmente, o trânsito selecionado é mostrado na Figura 6 com o tempo centrado em horas e fluxo normalizado ajustado.

Figura 5: 13º Trânsito “limpo” e normalizado



Fonte: o Autor

3.6 APLICAÇÃO DO FILTRO SAVGOL

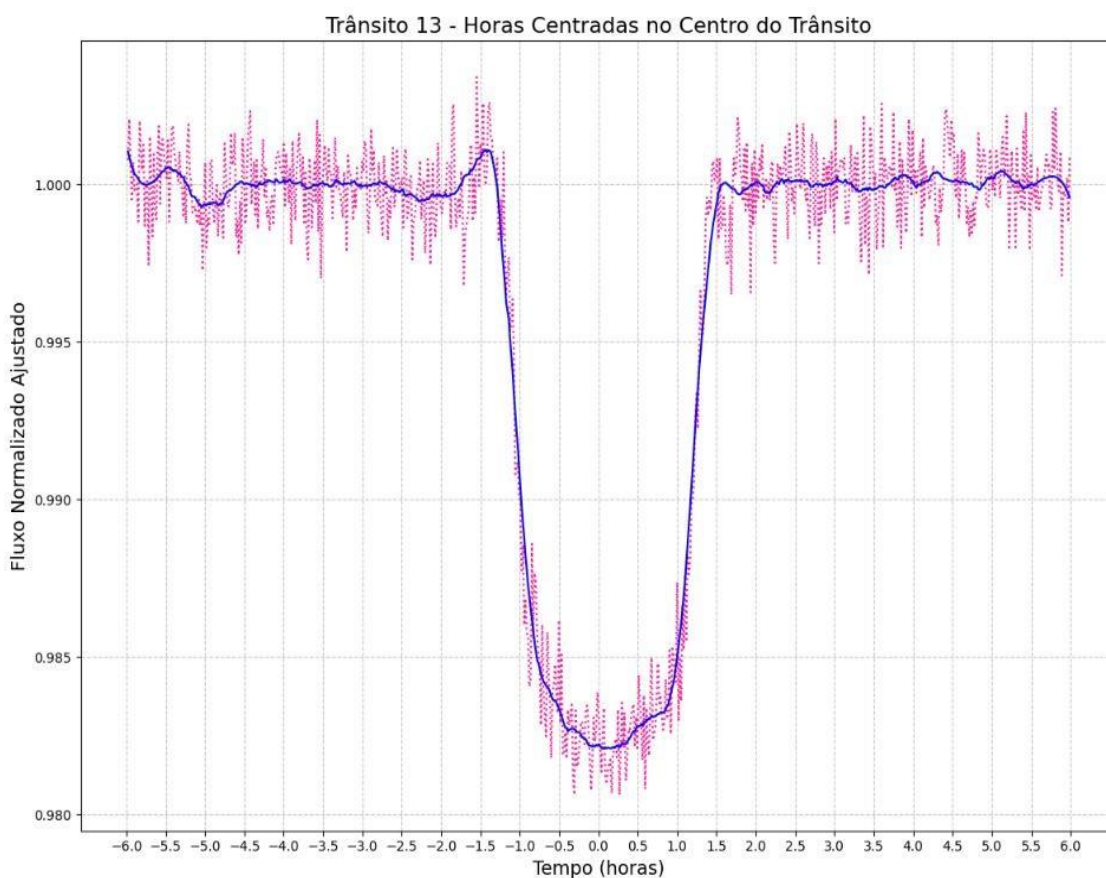
Na metodologia adotada para analisar os trânsitos exoplanetários, após a normalização dos dados e a seleção dos pontos relevantes para o trânsito escolhido, foi aplicado o filtro Savitzky-Golay para suavizar a curva de luz resultante. Este filtro é amplamente utilizado em

análise de dados por sua capacidade de preservar características importantes dos sinais, como largura e altura de picos, enquanto reduz o ruído.

O filtro Savitzky-Golay opera ajustando polinômios de baixa ordem aos segmentos dos dados em uma janela deslizante ao longo da série temporal. No código, foi utilizada uma janela de comprimento 51, o que significa que para cada ponto de dados, o filtro considera um total de 51 pontos adjacentes (25 antes e 25 depois do ponto atual) para calcular um valor suavizado. A ordem do polinômio foi definida como 3, indicando que um polinômio cúbico foi ajustado a cada segmento de 51 pontos.

Ao aplicar o filtro Savitzky-Golay, o fluxo normalizado do trânsito foi suavizado, resultando em uma curva de luz mais limpa, que facilita a identificação e análise de características como a profundidade e a forma do trânsito. Esse processo de suavização é crucial para melhorar a qualidade visual dos gráficos, tornando mais claras as tendências e padrões subjacentes, especialmente em dados astronômicos onde o ruído pode obscurecer detalhes finos. A curva suavizada, em azul, após a utilização do filtro é mostrada na Figura 6.

Figura 6: Aplicação do Filtro Savitzky-Golay no 13 ° Trânsito



Fonte: o Autor

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Busca por assinaturas de exoluas

Após o tratamento das curvas de luz, detalhado na Seção 3, assim como a aplicação do filtro Savitzky-Golay para suavizar os dados da curva de luz, realizamos uma análise comparativa entre fluxos em diferentes intervalos de tempo para identificar trânsitos com características específicas. O fluxo suavizado foi dividido em segmentos correspondentes a cada trânsito individual, com o tempo convertido de dias para horas e centralizado em torno do meio do trânsito.

Para cada trânsito, a média do fluxo suavizado foi calculada em dois intervalos: um intervalo fixo de referência, definido entre -6 e -3 horas em relação ao meio do trânsito, e um intervalo especificado pelo usuário, esse intervalo se refere ao início ou fim de cada trânsito, e foi obtido através da curva teórica gerada pelo ECLIPSE (Tabela 2). Além disso, foi calculado o desvio padrão do fluxo no intervalo fixo. A comparação entre a média do fluxo no intervalo do usuário e no intervalo fixo (entre -6 e -3 horas) foi então utilizada como critério de seleção. Caso o trânsito de uma exolua estiver presente na curva de luz, poderia ser identificado como uma queda no fluxo logo antes ou logo depois do trânsito do exoplaneta, como exemplificado na Figura 3. Para tanto, como critério de seleção dos candidatos a exoluas, consideramos quedas maiores que 1 desvio padrão do fluxo.

Trânsitos cuja média do fluxo no intervalo especificado pelo usuário fosse inferior à média do intervalo fixo menos o desvio padrão foram destacados como eventos de interesse. Esses trânsitos foram registrados e exibidos para análise posterior. Este método permitiu a identificação de trânsitos com fluxos significativamente reduzidos em intervalos específicos, potencialmente revelando características atípicas ou transitórias no comportamento do exoplaneta estudado.

Tabela 2: Intervalo especificado para busca de exoluas para cada exoplaneta

Planeta	Intervalo
Kepler-423 b	[-1.7, -1.37]
Kepler-12 b	[2.4, 3]
Kepler-8 b	[1.8, 2.8]



Kepler-41 b	[1.3, 1.4]
Kepler-412 b	[1.3, 2.3]
Kepler-7 b	[2.7, 3.7]

4.2 Trânsitos com variações

Após a aplicação do código nas diferentes curvas de luz dos seis planetas, foram identificadas variações em alguns dos trânsitos analisados (Tabela 3). Essas variações maiores do que um desvio padrão sugerem comportamentos distintos nos fluxos de luz, indicando a possível presença de fenômenos astronômicos, possíveis evidências de exoluas ou ruídos nos dados que merecem investigação mais detalhada. Essas observações reforçam a importância de uma análise minuciosa para capturar e interpretar corretamente as características dos trânsitos em diferentes exoplanetas.

Tabela 3: Trânsitos com variações atípicas

Planeta	Trânsitos com Variações
Kepler-423 b	[5, 14, 28, 32, 33, 39, 40, 42, 47, 54, 66, 67, 71, 82, 86, 87, 90, 98]
Kepler-12 b	[4, 5, 41, 46, 86, 88, 92, 97]
Kepler-8 b	[3, 8, 42, 75, 86]
Kepler-41 b	[10, 19, 57, 64, 73, 79, 84]
Kepler-412 b	[1, 4, 5, 9, 15, 18, 24, 32, 40, 46, 50, 54, 55, 58, 60, 66, 67, 70, 73, 85, 89]]
Kepler-7 b	[8, 14, 18, 28, 39, 52, 56, 75]

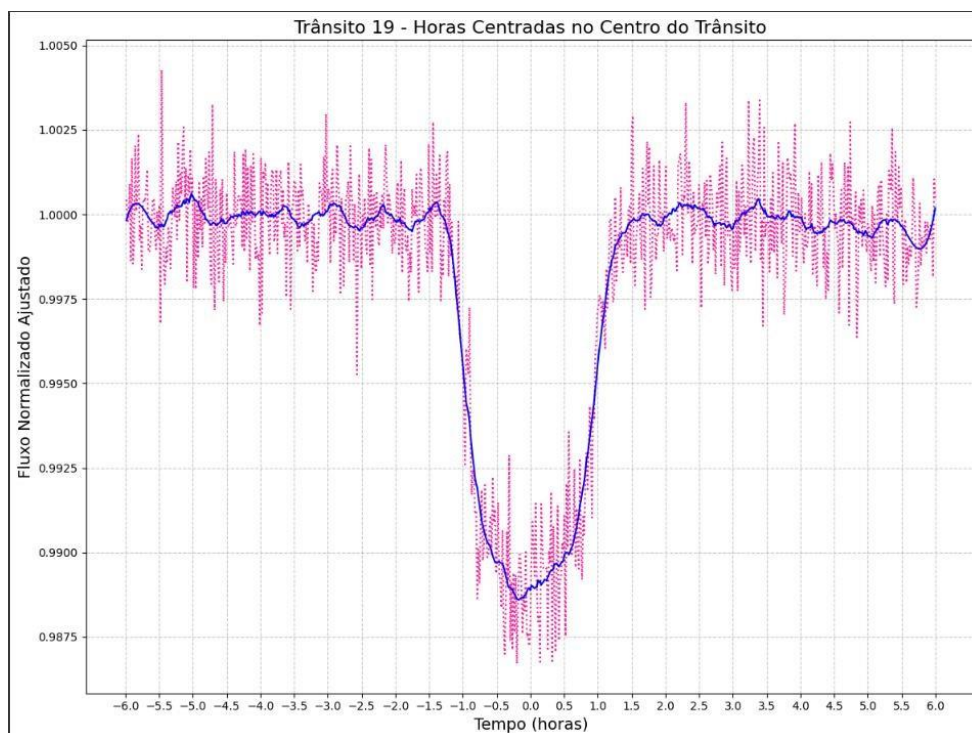
A fim de encontrar resultados mais precisos, também obtivemos os seguintes resultados considerando que a variação do sinal deveria ser superior ao desvio-padrão (σ) multiplicado por 2. Os resultados estão mostrados na Tabela 4. Como pode-se notar, o número de trânsitos com sinais de exoluas diminuiu consideravelmente. Inclusive, apenas 4 dos exoplanetas tiveram nenhum trânsito com variações atípicas abaixo de 2σ .

Tabela 4: Trânsitos com variações atípicas

Planeta	Trânsitos com Variações
Kepler-423 b	[14, 32, 40, 42, 47, 54, 66, 71, 98]
Kepler-12 b	[46]
Kepler-8 b	Não houve trânsitos com variações
Kepler-41 b	[19]
Kepler-412 b	[25, 55, 60, 89]
Kepler-7 b	Não houve trânsitos com variações

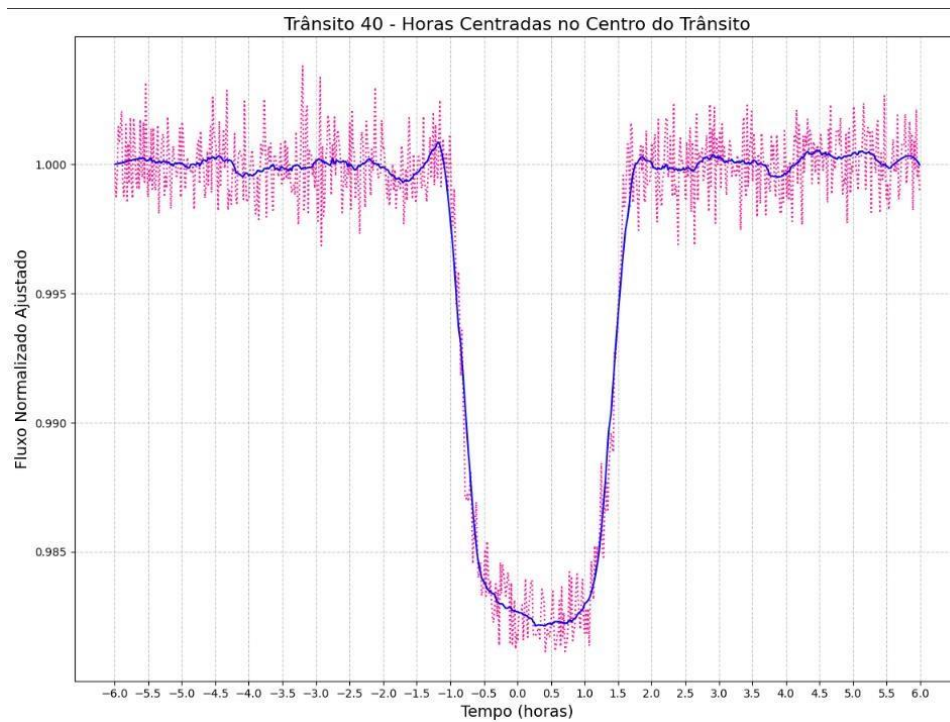
Aqui estão alguns exemplos desses trânsitos:

Trânsito 19 - Kepler-41 b



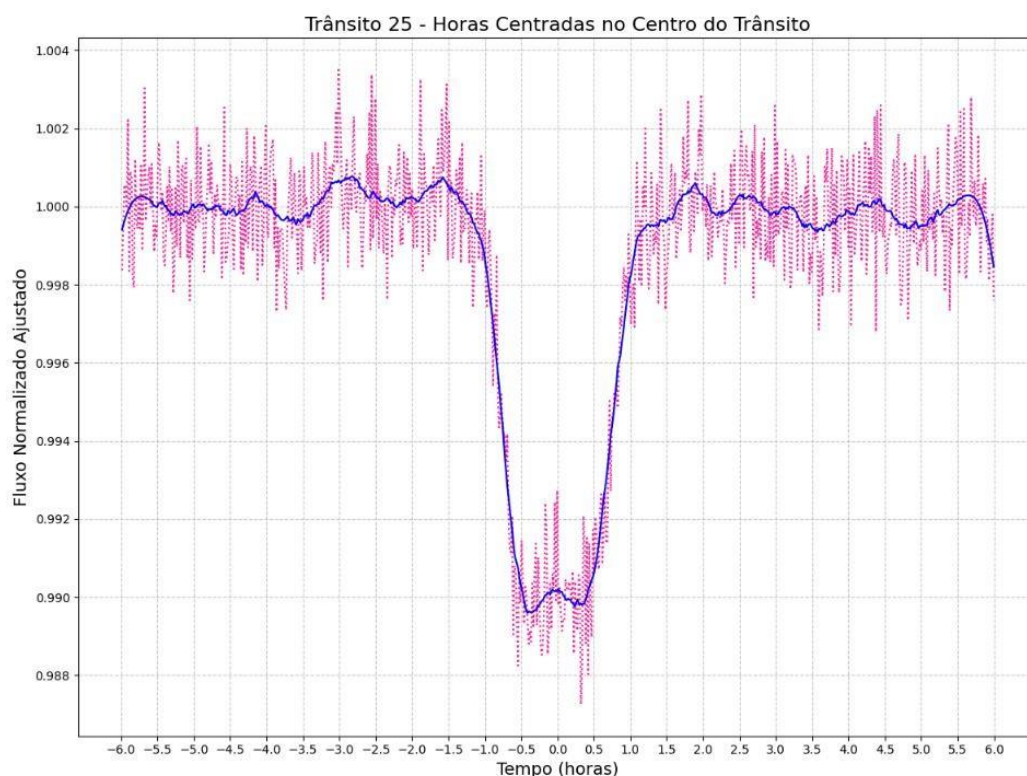
Fonte: o Autor

Trânsito 40 – Kepler-423 b



Fonte: o Autor

Trânsito 25 – Kepler-412 b



Fonte: o Autor

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a análise realizada tenha identificado diversos trânsitos com variações, esses achados, por si só, não são conclusivos para determinar a presença de exoluas. A detecção de exoluas é um desafio complexo que requer não apenas a observação de variações sutis em trânsitos, mas também a aplicação de modelos rigorosos e a consideração de diversos fatores que podem influenciar os dados, como a atividade estelar e o ruído instrumental. Portanto, é necessário realizar pesquisas adicionais e análises mais aprofundadas para confirmar a presença desses corpos celestes. Isso pode envolver a coleta de mais dados, o uso de diferentes métodos de análise e a comparação dos resultados com modelos teóricos robustos que possam fornecer uma base sólida para a detecção de exoluas.



6. REFERÊNCIAS

Borucki, W. J., Koch, D., Basri, G. et al. **Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results**. *Science*, 327, 997, 2010.

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1185402>

Huang, Q.Y., Banks, T., Budding, E. et al. **Transit modelling of selected *Kepler* systems**. *Astrophys Space Sci* 364, 33 (2019).

<https://doi.org/10.1007/s10509-019-3525-0>

Silva, A. V. R. Method for Spot Detection on Solar-like Stars. *Astrophys. J. Letters*, 585, L147, 2003. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/374324>

Sun, Lunan. **The detection and habitability of extrasolar moons**. Disponível em: https://www.academia.edu/6949157/THE_DETECTION_AND_HABITABILITY_OF_EXTRASOLAR_MOONS?email_work_card=title.

Tusnski, L. R. M. e Valio, A. Transit model of planets with moon and ring systems. *The Astrophysical Journal*, v. 743, 97-105, 2011. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/1/97>

Contatos:

e-mail aluno: 10374878@mackenzista.com.br

e-mail orientadora: avalio@craam.mackenzie.br