

Universidad de Oviedo



TÍTULO

---

**ESTRELLAS VARIABLES EN LA CAMPAÑA 18 DEL  
TELESCOPIO ESPACIAL KEPLER EN SU MISIÓN  
EXTENDIDA K2**

**VARIABLE STARS IN THE 18TH CAMPAIGN OF THE  
KEPLER SPACE TELESCOPE, EXTENDED MISSION K2**

---

*Trabajo Fin de Máster*

**Master of Science in Advanced Physics:  
Astrophysics, Particle Physics, Nanophysics and Quantum Materials**

---

AUTOR:

**David Canal Vallina**

TUTORES:

**Enrique Díez Alonso**

**Francisco Javier de Cos Juez**



---

# Contenidos

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducción teórica</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación . . . . .  | 1         |
| 1.2. Conceptos fundamentales en astrofísica estelar . . . . .                        | 3         |
| 1.3. Estrellas variables . . . . .   | 5         |
| 1.3.1. Estrellas pulsantes . . . . .   | 5         |
| 1.3.2. Rotación estelar . . . . .  | 11        |
| 1.3.3. Sistemas binarios . . . . .   | 13        |
| 1.4. Telescopio espacial Kepler . . . . .  | 16        |
| 1.4.1. Características fundamentales . . . . .                                       | 17        |
| 1.4.2. Misión extendida K2 . . . . .   | 17        |
| 1.4.3. Campaña 18 . . . . .  | 19        |
| <b>2. Metodología</b>  | <b>21</b> |
| 2.1. Clasificación preliminar . . . . .  | 21        |
| 2.1.1. Estrellas variables catalogadas por la colaboración Pro-Am “K2OjOS” . . . . . | 21        |
| 2.1.2. Curvas de luz en K2 . . . . .   | 23        |
| 2.2. Tratamiento de datos . . . . .  | 25        |
| 2.2.1. <i>Everest-pipeline</i> . . . . .   | 26        |
| 2.2.2. Curvas de luz . . . . .   | 26        |
| 2.2.3. Periodogramas . . . . .   | 29        |
| 2.2.4. Curva en fase . . . . .   | 30        |
| <b>3. Resultados</b>   | <b>35</b> |
| 3.1. Estrellas pulsantes . . . . .   | 35        |
| 3.2. Sistemas estelares EB . . . . .   | 37        |
| 3.3. Variabilidad debida a rotaciones estelares . . . . .                            | 38        |
| 3.4. Posibles estrellas tipo Gamma-Doradus y otras señales variables . . . . .       | 39        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4. Discusión</b>   | <b>43</b> |
| 4.1. Comparación entre diferentes catálogos . . . . .   | 43        |
| 4.1.1. Clasificación morfológica de EBs en diferentes publicaciones . . . . .                 | 43        |
| 4.1.2. Clasificación de las estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti y Gamma-Doradus . . . . .    | 45        |
| 4.1.3. Interpretación de las estrellas en rotación . . . . .                                  | 47        |
| 4.2. Cúmulos abiertos M44 y M67 . . . . .   | 48        |
| 4.2.1. Determinación de estrellas candidatas del cúmulo M44 (Pesebre) . . . . .               | 51        |
| 4.2.2. Determinación de estrellas candidatas del cúmulo M67 . . . . .                         | 52        |
| 4.3. Relación de período-luminosidad para estrellas pulsantes . . . . .                       | 53        |
| 4.3.1. Relación período-luminosidad en Cefeidas y RR-Lyrae . . . . .                          | 53        |
| 4.3.2. Relación período-luminosidad en estrellas Delta-Scuti . . . . .                        | 54        |
| <b>5. Conclusiones</b>  | <b>59</b> |
| 5.1. Clasificación y elaboración del catálogo . . . . .                                       | 60        |
| 5.1.1. Clasificación . . . . .  | 60        |
| 5.1.2. Reducción de datos . . . . .   | 61        |
| 5.2. Conclusiones elaboradas en la discusión . . . . .  | 63        |
| 5.2.1. Comparación de resultados . . . . .  | 63        |
| 5.2.2. Candidatos a los cúmulos abiertos M44 y M67 . . . . .                                  | 63        |
| 5.2.3. Relaciones período-luminosidad en pulsantes . . . . .                                  | 64        |
| 5.3. Posibles ampliaciones en la investigación . . . . .                                      | 65        |
| <b>Agradecimientos</b>  | <b>67</b> |
| <b>A. Catálogo de estrellas variables</b>   | <b>69</b> |
| A.1. Catálogo de estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti obtenidas en la investigación . . . . . | 69        |
| A.2. Catálogo de sistemas binarias eclipsantes obtenidos en la investigación . . . . .        | 70        |
| A.3. Catálogo de estrellas variables por rotación . . . . .                                   | 70        |
| A.4. Estrellas catalogadas como Gamma-Doradus . . . . .                                       | 72        |
| A.5. Estrellas con variabilidad confirmada pero ambigua . . . . .                             | 72        |
| A.6. Estrellas con variabilidad indeterminada o sin variabilidad . . . . .                    | 72        |
| <b>B. Estrellas candidatas de los cúmulos abiertos M44 y M67</b>                              | <b>77</b> |
| B.1. Candidatos para el cúmulo M44 . . . . .  | 77        |
| B.2. Candidatos para el cúmulo M67 . . . . .  | 79        |
| B.3. Distribuciones de movimientos propios para los cúmulos M44 y M67 . . . . .               | 80        |

## Resumen

La asociación astronómica Omega participó en el proyecto de colaboración científica profesional-amateur (Pro-AM) K2OjOS con el fin de identificar estrellas variables de un conjunto de más de 20.000 curvas de luz obtenidos en la campaña 18 de la misión extendida K2 del telescopio espacial Kepler. Estos datos fotométricos serán cruzados con publicaciones previas para su posterior estudio físico. De esta forma se creará un catálogo con estrellas variables aún sin catalogar junto a la determinación de sus períodos característicos de variabilidad. Se presentarán nuevas estrellas candidatas a formar parte de los cúmulos abiertos M44 y M67 además de ofrecer candidatos ya publicados en investigaciones previas. Se finalizará con el estudio de una relación período luminosidad en estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti con respecto al modo fundamental de oscilación de éstas.

La estructura de este trabajo se dividirá en un total de cinco capítulos, el primero será dedicado a una introducción teórica relativa a los conceptos y terminología propios de las estrellas variables, en el segundo se mostrará el procedimiento seguido en la investigación mientras que en el tercero se mostrarán los resultados, en el cuarto se hará una discusión de los resultados aportando una crítica a los mismos así como la presentación de los candidatos de pertenencia a M44 y M67 además de la relación período-luminosidad de estrellas Delta-Scuti para los modos fundamentales de oscilación. Por último en el quinto capítulo se discutirán las conclusiones a las que se llega tras la realización de la investigación.

## Abstract

The astronomical association Omega has been involved into the Professional-Amateur (Pro-Am) scientific collaboration K2OjOS with the aim of finding variable stars from more than 20,000 light curves collected during the 18th campaign of the K2 extended mission within the Kepler Space Telescope. These photometric data will be compared with previous articles in order to get physical information from them. Consequently, a variable stellar catalogue will be created with the physical information of each variable period. New star candidates will be also proposed to form part of the open clusters M44 and M64 as well as providing some other candidates which have been published in some previous articles. Finally, it will be explored whether a period-luminosity relationship can be considered in  $\delta$  Sct stars if the fundamental oscillation mode is considered.

This project has a total of five chapters where the first one is performed in order to give a brief theoretical introduction in the variable stars field, the second one is focused on data collection whereas the third one will be dedicated to the main results. Fourth chapter has the aim of giving a proper discussion of the results, trying to be as critical as possible with them, a candidate star catalogue will be also performed for M44 and M67 open clusters as well as a period-luminosity relationship for  $\delta$  Sct main oscillation modes. Lastly, fifth chapter will be focused on the summary and conclusions of this project.

# Capítulo 1

## Introducción teórica

### 1.1. Motivación

La fascinación e intriga por las estrellas que vemos en el firmamento es innata de toda civilización que se haya desarrollado a lo largo de la historia. Desde sus orígenes, la humanidad ha encontrado en éstas un mecanismo de orientación bajo el cual las civilizaciones han podido desarrollar actividades como la navegación, además de ofrecer un buen calendario astronómico en aras de planificar cosechas adelantándose a los periodos de sequía o inundaciones. Sin embargo, el estudio físico de una estrella no llegó hasta el desarrollo de los primeros telescopios, como es el caso del famoso telescopio de Galileo, o el desarrollo de las técnicas espectroscópicas. Hasta entonces las estrellas no habían sido nada más que puntos en el cielo sin nada más que ofrecernos que un buen mecanismo de orientación.

No obstante el desarrollo del telescopio óptico permitió por un lado encontrar nuevas estrellas que no eran visibles a simple vista, tarea que hoy en día aún continúa, y por otro lado a clasificarlas en grupos en función de los distintos tipos de fuentes luminosas, entre las que podemos encontrar las estrellas variables. A su vez el desarrollo de la espectroscopía permitió realizar otro tipo de clasificación basada en la temperatura superficial de las estrellas además de ofrecer una información valiosa acerca de la composición química de las mismas. La tecnología en lo que a observación astronómica se refiere fue avanzando progresivamente hasta nuestros días donde no es descabellado poder encontrar telescopios tanto en la superficie terrestre como orbitando nuestro planeta. Algunos de estos son por ejemplo el famoso Telescopio Espacial Hubble lanzado el 24 de abril de 1990 o el Telescopio Espacial Kepler lanzado el 7 de marzo de 2009 el cual ostenta el récord en detección de exoplanetas. Aunque no sea este el tema principal de nuestro trabajo será éste el telescopio del que se obtendrán los datos fotométricos necesarios para llevar a cabo la investigación y elaboración de un catálogo de estrellas variables.

La tarea de catalogar nuevas estrellas variables o nuevos exoplanetas requiere un esfuerzo a nivel de infraestructura y personal por parte de los diferentes centros e instituciones dedicadas a la astrofísica observacional. Generalmente suele ser frecuente la cooperación entre estas instituciones y las diferentes asociaciones de astrónomos aficionados que de buena gana acceden a realizar una clasificación previa de la gran cantidad de datos que llegan a los institutos de investigación. Con una formación previa en lo que se refiere a la clasificación estelar de estrellas variables y exoplanetas, las asociaciones de astrónomos aficionados ven recompensada esta aportación ya que en muchas ocasiones su trabajo llega a formar parte de una investigación a nivel técnico digna de ser publicada.

En este marco se encuentra el proyecto Pro-Am (Profesional-Amateur) K2-OjOS (*K2-Ojmetro Survey*), promovido por el Instituto Universitario de Ciencias y Tecnologías Espaciales de Asturias (ICTEA) en colaboración con miembros de la SAA Omega, con el fin de hacer partícipes a los miembros de dicha asociación en la catalogación de curvas de luz obtenidas por el telescopio espacial Kepler en la campaña 18 de la misión extendida K2. Por ello el objetivo principal de este trabajo de investigación es el de cotejar las más de 1800 estrellas clasificadas en la colaboración K2-OjOS con las estrellas que ya han sido catalogadas en diversos artículos y publicaciones, para finalmente poder catalogar y estudiar las propiedades más relevantes de las estrellas que aún no estén catalogadas. Principalmente las estrellas que se van a tratar corresponden a señales fotométricas de estrellas variables ya sean pulsantes, binarias y rotaciones aunque también se encontrarán estrellas cuya clasificación sea imprecisa o bien no presenten variabilidades relevantes.

Por otro lado es de especial interés el estudio de estrellas candidatas a formar parte de cúmulos estelares. Como se verá en la sección 1.4 relativa al telescopio Kepler, la campaña 18, de la cual provienen las estrellas a catalogar, contiene en su dominio dos cúmulos abiertos M44 o cúmulo del Pesebre y M67. Es por ello que en este trabajo se prestará atención a posibles candidatos a formar parte de sendos cúmulos abiertos, aplicando para este fin las condiciones generales que debe reunir cualquier estrella candidata a pertenecer a un cúmulo. Es también de interés estudiar relaciones período-luminosidad en estrellas pulsantes ya que son estas relaciones las que permiten una posible consideración de candela estándar, como es el caso de las estrellas cefeidas. Algunos otros aspectos de interés son también la discusión de la distribución de los períodos de rotación en estrellas en rotación con la edad de las mismas, lo cual sienta las bases de disciplinas como la girocronología además de proponer un sistema binario eclipsante con al menos una estrella pulsante.

Todos estos conceptos se irán detallando a lo largo del presente trabajo, no obstante como comienzo se hará un repaso en lo que se refiere a conceptos básicos de astrofísica estelar además de ofrecer una descripción de las estrellas variables más importantes junto a sus características más relevantes.



## 1.2. Conceptos fundamentales en astrofísica estelar

Toda investigación en la cual uno de sus objetivos es la creación de un catálogo de estrellas variables demanda de una introducción teórica a ciertos conceptos fundamentales en astrofísica estelar. En primer lugar se debe dar una definición física de lo que es una estrella ya que en base a esto es posible generar todo un conjunto de criterios de clasificación. En astrofísica una estrella se podría definir como un sistema físico con luminosidad y gravedad propias en el cual su existencia, además de su energía irradiada, se debe a un balance existente entre la presión gravitatoria ejercida por la masa de la propia estrella y la presión termonuclear generada en los procesos de fusión de la propia estrella. La presión gravitatoria tiende a compactificar la estrella lo que genera una mayor fricción entre los constituyentes de la misma, principalmente H y He. Esta mayor fricción aumenta la probabilidad de procesos termonucleares de fusión ya que la temperatura aumenta por la mayor fricción de sus constituyentes, lo que trae consigo una expansión de la estrella. Al expandirse la temperatura vuelve a descender volviendo a la situación anterior. Durante la sucesión de estos procesos la estrella mantendrá el equilibrio termonuclear, dicho equilibrio se mantendrá mientras la estrella pueda seguir extrayendo energía de la fusión de sus elementos.

En función de la luminosidad, el color y la masa de una estrella es posible sacar ciertas conclusiones relevantes. Por ejemplo podemos hacer el mismo ejercicio que en su día hicieron Ejnar Hertzsprung y Henry Norris Russell a principios del siglo pasado. Si representamos en un diagrama la luminosidad de cada estrella frente a la temperatura<sup>1</sup> obtenemos el famoso diagrama de Hertzsprung-Russell (diagrama HR en adelante, véase un ejemplo del diagrama en la **Figura 1.1**). En este diagrama se concluye que las estrellas se agrupan en distintos grupos estelares, por ejemplo tenemos las estrellas de la secuencia principal, las gigantes, las supergigantes o las enanas blancas quedando desiertas otras regiones del diagrama lo cual hace pensar que son regiones de inestabilidad estelar. En función del grupo al que pertenezca una determinada estrella nos podemos esperar un mecanismo físico estelar diferente. No obstante esto no significa que existan esta serie de grupos estelares de manera aislada sino que estos grupos son diferentes etapas de la vida de una estrella, los cuales dependen de las características físicas de éstas. El principal período de vida de una estrella, además de ser el más duradero, es la fase de secuencia principal.

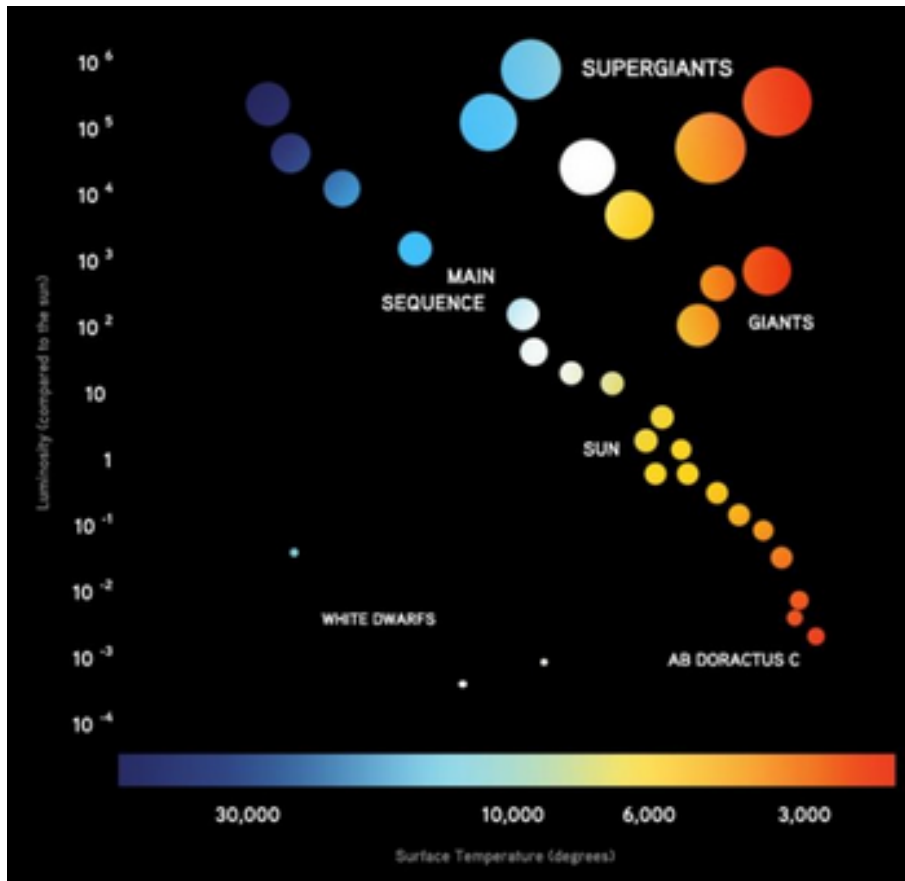
---

<sup>1</sup>En este contexto la temperatura se entiende como la temperatura efectiva que se tendría si suponemos que la estrella se aproxima a una descripción de cuerpo negro perfecto; esta temperatura se puede obtener a partir de la ley de Wien

$$\lambda_{\max} T \simeq 0,29 \text{ cm} \cdot \text{K}, \quad (1.1)$$

que a su vez está completamente relacionada con la luminosidad y radio de la estrella por la relación de cuerpo negro

$$L = 4\pi\sigma T_{\text{eff}}^4 R^2 \quad \text{con } \sigma \approx 5,671 \times 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}. \quad (1.2)$$



**Figura 1.1:** Imagen que muestra de manera pictórica un diagrama HR con diferentes grupos de estrellas, eje vertical luminosidad en  $L_{\odot}$  y eje horizontal temperatura en K.

Durante esta fase las estrellas fusionan el H a partir de dos ciclos diferentes, los ciclos protón-protón (o  $pp$ ) predominantes en estrellas con poca masa  $M \lesssim 1,5 - 2M_{\odot}$  y el ciclo CNO predominante en estrellas de alta masa  $M \gtrsim 2,5M_{\odot}$ , obteniendo así la energía necesaria para permanecer en equilibrio con su presión gravitatoria. Estos ciclos generan elementos ligeros como el He y otra serie de elementos poco pesados como el Be, Li, C, N u O. A medida que el H se va agotando la fusión termonuclear dominante deja de ser la del H para empezar a ser la del He y más tarde la de los diferentes elementos generados en la fusión del He. Este cambio modifica las condiciones de equilibrio de la estrella en lo que a temperatura y radio se refiere lo que las hace abandonar la región de secuencia principal hacia el grupo de las gigantes o supergigantes. El proceso de transición de fase desde la secuencia principal hasta el grupo de las gigantes o supergigantes depende de la masa inicial de la estrella en cuestión. En función de esa masa inicial también depende la forma en que la estrella termina su vida ya que para estrellas con  $M > 8M_{\odot}$  los diferentes ciclos termonucleares consiguen llegar hasta el Fe, además de avanzar a la fase de supergigante roja en el proceso, momento en el cual la estrella no es capaz de extraer energía de fusión y la propia estrella implosiona en una supernova de tipo II. Para estrellas con  $M < 2,3M_{\odot}$  esto no llega a suceder ya que pasan a la región de enanas blancas antes de llegar a producirse una supernova, no obstante en este caso las estrellas pasan por la fase de gigante

roja al igual que las estrellas de masa  $M > 8M_{\odot}$ .

### 1.3. Estrellas variables

El objetivo principal de este trabajo es la caracterización de las estrellas variables analizadas en K2OjOS. La capacidad que tienen ciertos sistemas estelares para generar esta variabilidad puede depender de diversos fenómenos físicos, estadios de inestabilidad estelar en los cuales una estrella joven aún está evolucionando hasta pasar a formar parte de la secuencia principal o al contrario estrellas que estén saliendo de la secuencia principal hacia una fase de gigante, variabilidades debidas a eclipses producidos por sistemas binarios eclipsantes o incluso variabilidades producidas por la rotación de una estrella como consecuencia de su actividad magnética intrínseca. Estas son las causas físicas más importantes de cara a la variabilidad estelar, se pueden clasificar en la pulsación de estrellas (**estrellas pulsantes**) para el primer caso, **binarias eclipsantes** para el segundo y simplemente variabilidad debida a **rotación estelar** para el tercero, siendo incluso posible que se den fenómenos de variabilidad asociados a combinaciones entre rotación, binaria eclipsante y estrella pulsante.

#### 1.3.1. Estrellas pulsantes

Dentro del apartado de estrellas pulsantes entraría todo tipo de estrella que se encuentre en un momento de inestabilidad debido a la transición desde o hacia la secuencia principal. La variedad de este tipo de estrellas es amplia y depende principalmente de la masa de la estrella y su período de oscilación, las más masivas son denominadas Cefeidas en honor a la primera estrella en la cual se descubrió este fenómeno ( $\delta$ -Cephei) subclasificadas en dos tipos las de tipo I (Cefeidas clásicas) y las de tipo II (W Virginis), las pulsantes de una masa intermedia son las RR-Lyrae y las de menor masa y período son las estrellas Delta-Scuti debido a la estrella prototipo de este tipo ( $\delta$ -Scuti) aunque es posible encontrar más de este último tipo .

#### Estrellas Cefeidas

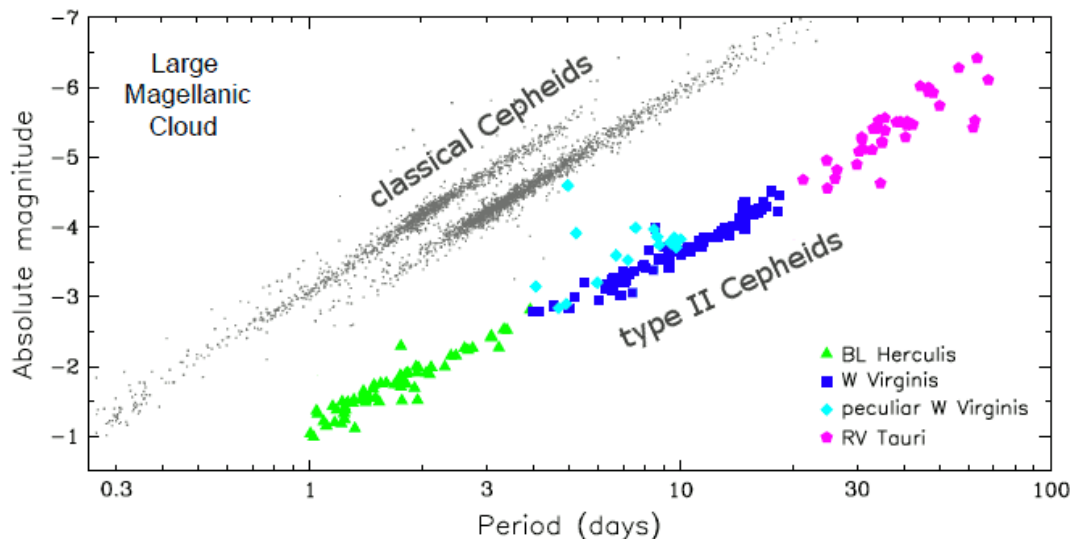
Dentro de esta categoría de estrellas pulsantes se encuentran aquellas estrellas supergigantes o gigantes amarillas de clase espectral G-F con masas en el rango de  $4M_{\odot}$  a  $20M_{\odot}$ . Durante la etapa de Cefeida estas estrellas realizan una serie de contracciones y expansiones causadas por procesos de ionización y recombinación en la estrella, modificando la opacidad de la misma y generando oscilaciones periódicas y radiales. Estas oscilaciones permanecerán periódicas en el tiempo mientras dure esta etapa estelar. Es posible caracterizar las oscilaciones de las Cefeidas a partir de análisis tanto fotométricos como espectroscópicos ya que este vaivén en su tamaño genera la aparición de un efecto Doppler oscilante observable en sus líneas espectrales además de variaciones en su luminosidad.

Los máximos de brillo corresponden a los momentos de máxima velocidad de expansión mientras que los mínimos a los momentos de máxima velocidad de contracción. La propiedad más interesante desde un punto de vista astronómico es la relación existente entre el período de oscilación y luminosidad, fenómeno descubierto por Henrietta Leavitt en 1912, ya que permite que las Cefeidas sean consideradas como candelas estándar. La determinación de esta relación se ha estudiado durante gran parte del siglo XX encontrando finalmente la relación empírica

$$M_V = (-2,43 \pm 0,12) \cdot (\log P - 1) - (4,05 \pm 0,02), \quad (1.3)$$

establecida a partir de las observaciones del telescopio Hubble ([Benedict et al. 2002, \[5\]](#)), siendo  $M_V$  la magnitud absoluta de la estrella en la banda  $V$  y  $P$  su período de variabilidad.

Esta sería la principal definición de una estrella Cefeida clásica (de tipo I), no obstante debido a la detección de cierto grupo de estrellas que presentan una distinta relación período de oscilación-luminosidad pero que aún así conservan el mismo comportamiento físico que las Cefeidas clásicas, se optó por ampliar la categoría de Cefeidas con el grupo de Cefeidas de tipo II o W Virginis. La principal diferencia con las anteriores es su menor masa,  $0,4M_\odot$  a  $0,6M_\odot$ , razón por la cual su luminosidad es inferior para un mismo valor de período de oscilación como se muestra en la [Figura 1.2](#).



**Figura 1.2:** Relación entre el período de oscilación y la magnitud absoluta para estrellas Cefeidas de tipo I (en gris) y de tipo II (a escala de colores para cada subtipo). La menor masa de las Cefeidas de tipo II con respecto a las de tipo I está detrás de esta diferencia en las relaciones período-luminosidad. Imagen tomada de los resultados del proyecto OGLE en [http://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/type\\_II\\_Cepheids.html](http://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/type_II_Cepheids.html) ([Soszyński et al. 2008, \[24\]](#)), véase también [Groenewegen et al. 2017, \[9\]](#).

El último grupo de Cefeidas serían las denominadas Cefeidas anómalas. Éstas deben este nombre debido a que no siguen ninguno de los patrones anteriormente mencionados en lo que a relación período-luminosidad se refiere. Presentan una masa en torno a  $1M_{\odot} - 2M_{\odot}$  con escasa concentración de metales<sup>2</sup>. Se encuentran en una posición intermedia en el diagrama período-luminosidad y principalmente se clasifican en dos tipos en función de sus pulsaciones: pulsaciones en primer modo excitado (*first-overtone pulsators*) con períodos del orden de 0,5 – 2 días y curvas en fase similares a las Cefeidas clásicas o RR-Lyrae, y pulsaciones en modos fundamentales (*fundamental-mode pulsators*) con períodos de oscilación de 0,3 – 1 días y curvas en fase con aspecto más suave en los máximos y mínimos si se comparan con las anteriores.

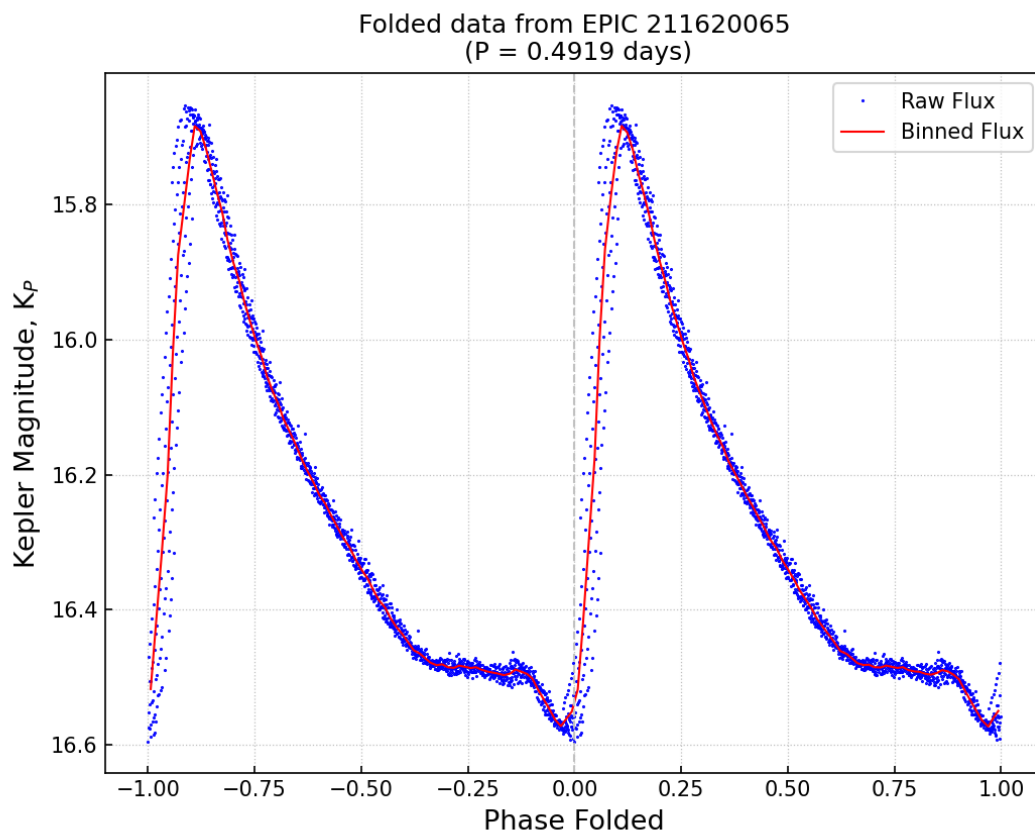
### Estrellas RR-Lyrae

Este tipo de estrellas variables son abundantes en cúmulos globulares. La diferencia que éstas mantienen con sus compañeras Cefeidas son varias; por ejemplo, mientras que las Cefeidas tienen un período de oscilación del orden de 2 a 6 días (en el caso de las de tipo I) las estrellas RR-Lyrae tienen un período comprendido entre 0,2 a 1 días; por otro lado las variaciones de luminosidad que se producen en las RR-Lyrae son menores si se comparan con las variaciones de las Cefeidas. Esta serie de discrepancias se deben principalmente a la diferencia en masa entre estos grupos, estamos hablando de valores que pueden ir desde  $0,4M_{\odot}$  a  $1M_{\odot}$  para el caso de las RR-Lyrae, razón por la cual su clasificación espectral oscila entre los tipos A y F con temperaturas de aproximadamente 6500 K a 9000 K.

No obstante existen algunas similitudes con las estrellas Cefeidas, por ejemplo su relación período-luminosidad permite que sean usadas como candelas estándar para la determinación de distancias a nivel galáctico, de hecho la forma de determinar las distancias a los cúmulos globulares suele hacerse a partir de este tipo de estrellas pulsantes. Además también ofrecen una oportunidad para estudiar la dinámica y la naturaleza química de estrellas pertenecientes a poblaciones más antiguas<sup>3</sup> determinando la presencia de metales en ellas. Del mismo modo que en el caso de las Cefeidas, las estrellas de tipo RR-Lyrae presentan diferentes subtipos clasificados como RRab (modo fundamental), RRc (*first overtone pulsations*), RRd (*Double-mode pulsators*) e incluso estrellas clasificadas como pseudo-RR-Lyrae que generalmente pertenecen a sistemas binarios o incluso Cefeidas anómalas. En la **Figura 1.3** se muestra un caso típico de estrella RR-Lyrae de tipo RRab clasificado por K2OjOS.

<sup>2</sup>En este contexto se define la metalicidad como la concentración de elementos  $\frac{Z}{X}$  tales que  $Z \geq 3$ .

<sup>3</sup>Las poblaciones estelares son grupos extensos de estrellas que comparten un grado de metalicidad común y por tanto implica que su formación se llevó a cabo en épocas diferentes del Universo ya que la concentración en metales depende de este factor. Por lo general se distinguen tres grupos diferentes: la población I a la que pertenecen estrellas de baja metalicidad, la población II con estrellas de alta metalicidad (serían las estrellas de la época actual) y por último una población III considerada todavía como hipotética cuya metalicidad sería nula lo que las convierte en la primera población estelar.



**Figura 1.3:** Curva en fase de la estrella variable de tipo RR Lyrae EPIC 211620065,  $K_p = 16,395$ , localizada por la colaboración K2OJOS en la campaña 18 de K2.

### Estrellas Delta-Scuti

El siguiente grupo de estrellas pulsantes son las conocidas como Delta-Scuti, éstas deben su nombre a la estrella  $\delta$ -Scuti ya que es un claro ejemplo en el cual se manifiesta este tipo de pulsación. Del mismo modo que ocurre con las estrellas Cefeidas, las Delta-Scuti tienen un período de oscilación característico que generalmente va desde los aproximadamente 0,02 días a 0,3 días, lo cual las convierte en uno de los tipos de estrellas pulsantes con el período de oscilación más corto. Sin embargo, no es esto lo que más caracteriza las pulsantes de este tipo sino la posibilidad de una coexistencia entre diferentes modos de oscilación acoplados. Con respecto a esto se pueden encontrar estrellas Delta-Scuti con solo un modo de oscilación o con varios modos de oscilación. El primer tipo suele ser el más difícil de catalogar si solo se dispone de observaciones fotométricas ya que puede ser confundido con facilidad con variabilidades de otra naturaleza como Cefeidas anómalas o variabilidades debidas a una rotación estelar. En ambos tipos se distinguen los modos radiales y los no radiales, los primeros corresponden a oscilaciones de la estrella en la dirección perpendicular a la superficie lo que comúnmente se conoce como dirección radial mientras que los segundos son oscilaciones en las direcciones no radiales. Algunos de ellos son los modos  $p$  debidos a gradientes de presión en la

superficie de la estrella y los modos  $g$  que son producidos por gradientes en la gravedad relativa a la superficie de la estrella.

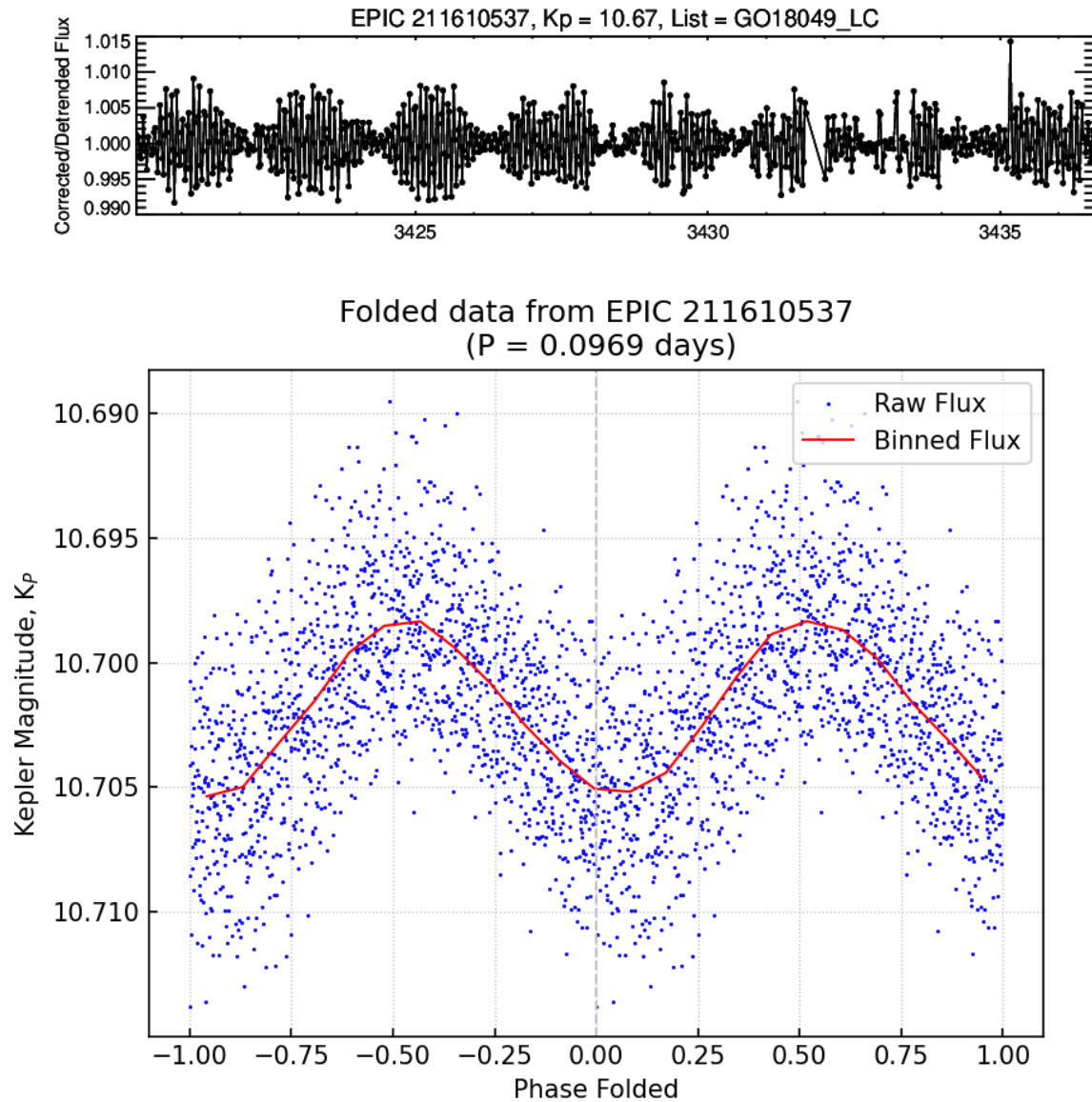
La identificación de las estrellas Delta-Scuti con varios modos de oscilación acoplados es sencilla desde un punto de vista puramente visual ya que en una curva de luz debidamente corregida se observarán los diferentes modos de oscilación tanto radiales como no radiales. La sucesión de estos diferentes modos también tiene sus efectos en las curvas en fase de este tipo de estrellas, hablaremos más en detalle de lo que es una curva en fase en el próximo capítulo pero para resumir, sepan que este tipo de curvas muestran la dependencia del brillo de la estrella a lo largo de un período completo de oscilación, generalmente expresado en unidades relativas de tiempo entre 0 y 1. Estos efectos se manifiestan con una amplitud de fase característicamente amplia en la propia curva ya que al existir una variación en la amplitud de oscilación del modo principal, la magnitud aparente de la estrella será diferente para el mismo momento en distintos intervalos de oscilación. En la **Figura 1.4** se muestra un ejemplo de una curva de luz sacada de la base de datos creada por Andrew Vanderburg (Vanderburg en adelante) del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*)<sup>4</sup> y su correspondiente curva en fase para una Delta-Scuti perteneciente a nuestro catálogo.

Al contrario que las Cefeidas o las RR-Lyrae las estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti no pertenecen a un grupo concreto en cuanto a evolución estelar se refiere ya que podemos encontrar estrellas con estas características desde sistemas estelares tempranos que aún están evolucionando hacia la secuencia principal en el diagrama HR a estrellas gigantes y subgigantes que están abandonando la secuencia principal, no obstante el primero de ellos suele ser el más abundante ya que la mayoría de estrellas de tipo Delta-Scuti tienen una masa comprendida entre  $1,2M_{\odot}$  y  $2,2M_{\odot}$ . El rango de masas sitúa a estas estrellas en la región A y F de la clasificación espectral con temperaturas efectivas de 6500 K a 9000 K.

A pesar de su particular curva de luz las estrellas Delta-Scuti no son las únicas que tienen un comportamiento de ese tipo, por ejemplo las llamadas Gamma-Doradus pueden presentar varios modos de oscilación acoplados, y los períodos de oscilación del modo primario van de 0,3 a 3 días, por lo que resulta sencillo confundirlas con pulsantes Delta-Scuti de período más amplio. Por esta razón cuando se afronte la clasificación de las estrellas pulsantes con períodos de oscilación dentro de estos órdenes de magnitud, diremos que esa estrella es pulsante de tipo Delta-Scuti sabiendo que cabe la posibilidad de que dicha clasificación no sea realmente adecuada. Se ha mencionado las estrellas pulsantes Gamma-Dor pero existen otra serie de pulsantes que pueden ser confundidas con estrellas Delta-Scuti en un análisis fotométrico, por ejemplo las pulsantes AI-Velorum con períodos

---

<sup>4</sup><https://lweb.cfa.harvard.edu/~avanderb/k2.html>



**Figura 1.4:** Panel superior: curva corregida correspondiente a la estrella EPIC 211610537 de magnitud media aparente  $K_P = 10,67$  y período de oscilación  $P = 0,0926$  días sacada de la base de datos Vanderburg, panel inferior: su correspondiente curva en fase. En el panel superior se observa como aparecen al menos dos modos de oscilación. En el panel inferior se aprecia como la curva en fase tiene una amplitud considerable debido a la variación de esta magnitud causada por el segundo modo de oscilación respecto al primero. La primera de las figuras muestra un período de observación de unos 16 días en lugar de los 73 días de la campaña 18.



de oscilación del orden de 0,04 – 0,13 días y variación en luminosidad del orden de 1 magnitud aparente. También las pulsantes SX-Phoenicis que tienen unos períodos de 0,03 – 0,08 días pero una masa inferior a la solar pueden llegar a ser clasificadas como Delta-Scuti. Más allá de la señal fotométrica, las estrellas pulsantes de este grupo poseen aspectos físicos que las hace distinguibles, por ejemplo a diferencia de las Delta-Scuti, las estrellas Gamma-Doradus presentan modos  $g$  de alto orden radial<sup>5</sup> y temperaturas que van desde los 6900 K 7500 K (en las Delta-Scuti predominan los modos  $p$  de bajo orden radial).

### 1.3.2. Rotación estelar

Otra forma de variabilidad en el brillo estelar que aún se podría considerar como una variabilidad de tipo intrínseca<sup>6</sup> es el fenómeno que existe entre la rotación de las estrellas y la dinámica propia de sus manchas y fulguraciones (*flares*) a causa de la actividad magnética de la estrella. Debido a los procesos físicos responsables en la formación de estrellas, éstas deben tener un cierto momento angular intrínseco distinto de cero por lo que el nombre de estrellas en rotación se podría aplicar a cualquier estrella aislada. Sin embargo, en este trabajo nos referiremos por estrellas en rotación a aquellas que además de rotar presentan una dinámica en cuanto a la aparición y desaparición de manchas, fulguraciones o cualquier proceso físico superficial sin simetría esférica que altere significativamente el brillo de la estrella en su proceso de rotación.

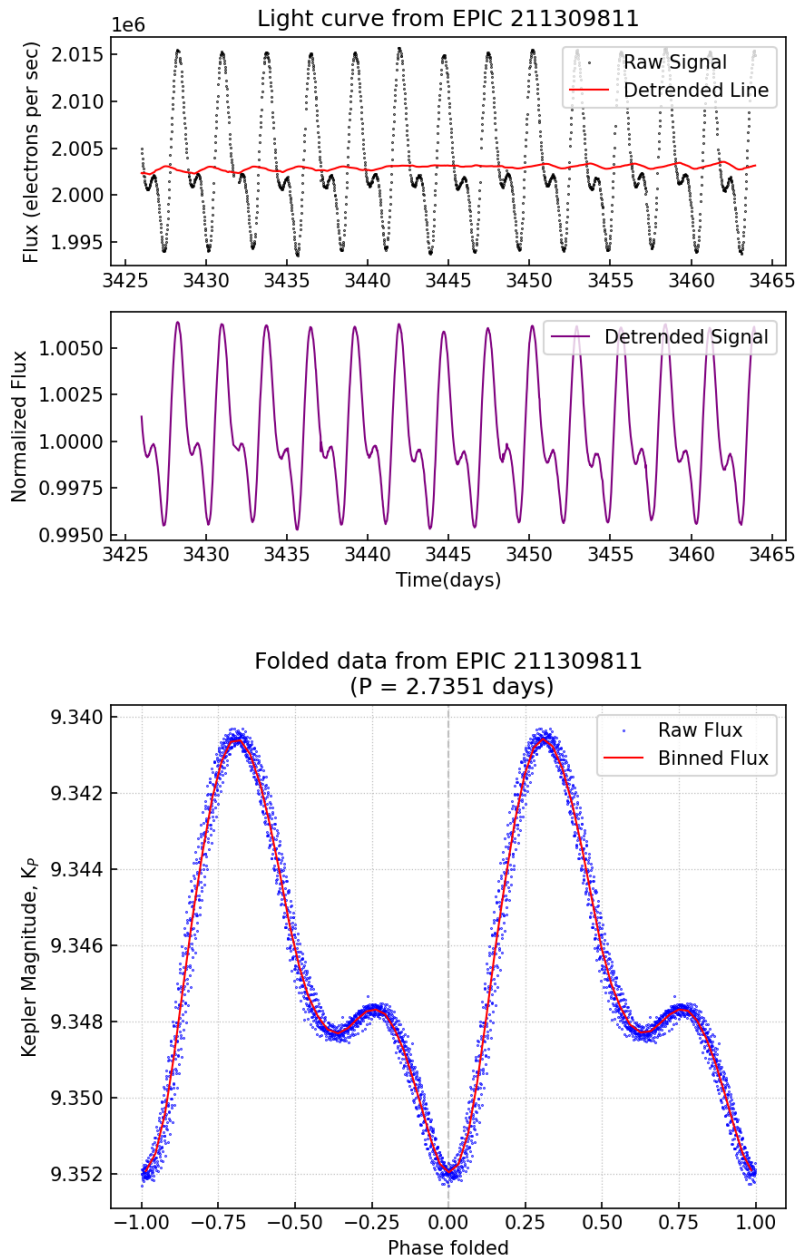
La aparición de manchas es debida a la concentración de una intensidad de campo magnético significativa, comparada con el promedio total de la estrella, que dificulta el movimiento convectivo en la superficie, razón por la cual estas zonas tienen una temperatura menor que la temperatura global de la superficie haciendo que su emisión lumínica sea menos intensa. Las manchas (*starspots*) son eventos pasajeros dentro de la estrella ya que tienen un comienzo, un desarrollo y posteriormente un fin. Este ciclo depende de las características físicas de cada estrella, entre otros factores se destaca por ejemplo el ciclo de orientación del campo magnético estelar que en el Sol es de 11 años. Véase la **Figura 1.5** como ejemplo de una estrella de este tipo.

Algunas estrellas pueden llegar a tener una actividad magnética tal que provocan un grado apreciable de variabilidad en su fotometría. La principal característica medible en este tipo de estrellas es su curva de luz periódica con ligeras irregularidades ya que la sucesión de estos fenómenos no sigue una dependencia fuertemente periódica. Este tipo de irregularidades pueden ser tratadas con

<sup>5</sup>En astrosismología los modos normales de oscilación de estrellas pulsantes similares a las Delta-Scuti pueden ser descritos por productos de funciones radiales, caracterizadas por un índice  $n = 1, 2, 3, \dots$ , y funciones angulares proporcionales a armónicos esféricos  $Y_{lm}(\theta, \phi)$  de índices  $l = n - 1, \dots, 0$  y  $m = \pm l, \dots, 0$ .

<sup>6</sup>En este contexto una variabilidad de tipo intrínseca es la variación en la luminosidad de una estrella por procesos físicos que suceden en ésta, el otro caso sería una variabilidad de origen extrínseco a la estrella como sería el caso de los sistemas binarios eclipsantes que serán tratados en el siguiente apartado.

métodos estadísticos de análisis como por ejemplo el método gaussiano implementado en [Gordon et al. 2021, \[8\]](#). El estudio de estas estrellas variables representa una oportunidad para realizar estudios de girocronología, mediante la cual es posible estimar la edad de una estrella a partir de su actividad estelar ya que generalmente la obtención de la edad de una estrella es una variable complicada de determinar por otros métodos.



**Figura 1.5:** Panel superior: curva de luz correspondiente a la estrella en rotación EPIC 211309811, panel inferior: su correspondiente curva en fase. Esta variable tiene una magnitud aparente media  $K_P = 9,51$ .

### 1.3.3. Sistemas binarios

Los sistemas binarios son agrupaciones formadas por dos estrellas ligadas gravitacionalmente. Este tipo de sistemas no se enmarcan de manera general dentro de las estrellas variables extrínsecas, no obstante existen ciertos sistemas binarios que exhiben una variabilidad fotométrica, en este caso una variabilidad extrínseca ya que no depende de la física de las estrellas que lo forman<sup>7</sup>. Uno de estos casos lo representan los sistemas binarios eclipsantes en los que la orientación del plano de la órbita coincide con el de nuestra visual desde el Sistema Solar por lo que las estrellas de estos sistemas binarios son capaces de producir eclipses a lo largo de la órbita de sus estrellas, haciendo que el sistema sufra disminuciones periódicas en su brillo o *dips*.

Si la masa de una de las estrellas  $M_1$  es mayor que la de su compañera  $M_2$  entonces se espera que la estrella 1 sea la estrella principal del sistema y la estrella 2 una estrella en órbita con respecto a la primera, aunque esto es una simplificación ya que bien podríamos argumentar lo contrario. No obstante, sabemos que en un sistema de estas características la estrella 2 es la que posee la órbita más excéntrica. Estos sistemas de binarias eclipsantes (EB en adelante) son fácilmente reconocibles ya que los eclipses se observan en la curva de luz como disminuciones de brillo repentinas y periódicas con dos profundidades diferentes (*dips*), cuanto mayor sea la diferencia entre las masas mayor será la diferencia en la profundidad de los *dips*<sup>8</sup>. Esto nos brinda una oportunidad para poder obtener las masas de los sistemas binarios simplemente conociendo su orientación respecto a la línea de visión con la Tierra ya que la proyección de la trayectoria de la estrella 2 sobre la bóveda celeste realmente no se corresponde con la órbita verdadera. En este contexto se puede definir la función de masa para cada una de las estrellas  $f_1(M)$  y  $f_2(M)$  en la forma

$$f_1(M) = \frac{(M_2 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{4\pi^2 (a_1 \sin i)^3}{G P^2}, \quad (1.4)$$

para  $f_2(M)$  se intercambian los índices 1 por 2 y viceversa, donde  $i$  es el ángulo de inclinación del plano orbital,  $a_1$  y  $a_2$  los correspondiente semiejes mayores de las órbitas de 1 y 2,  $G$  la constante de la gravitación universal de Newton y  $P$  el período orbital. Esta expresión suele usarse para obtener el valor de las masas de las estrellas del sistema binario simplemente conociendo su período orbital y el valor del semieje mayor.

---

<sup>7</sup>Aunque estos sistemas presenten variabilidad extrínseca es importante mencionar que existen casos en los cuales la interacción gravitatoria y la proximidad de las estrellas son tales que generan variaciones en la forma de las estrellas. Este efecto trae consigo una variabilidad lumínica cuya clasificación entre extrínseca o intrínseca puede llegar a ser arduo desde un punto de vista físico.

<sup>8</sup>Aunque aquí no se mencione es necesario recordar que la temperatura superficial de las estrellas también juega un papel en la profundidad de los *dips*.

La clasificación de las EBs suele hacerse en función de la forma que adopta su curva en fase, ya que características tales como la proximidad mínima existente entre la pareja de estrellas o la diferencia de masas que éstas tengan modifican la curva en fase del sistema binario. Atendiendo a la clasificación hecha en [Andrej et al. 2011, \[21\]](#) podemos distinguir entre las binarias separadas (*detached binaries* o *Algol binaries*, D), binarias semiseparadas (*semi-detached binaries*, SD), binarias en contacto (*overcontact*, OC) y binarias con variación elipsoidal (*elipsoidal variation binaries*, ELV).

Las binarias separadas (D) se caracterizan por tener una separación mínima entre ambas estrellas grande comparada con el radio medio de las estrellas,  $d \gg R_1, R_2$ , siendo  $d$  la distancia de máxima aproximación entre ambas estrellas. Debido a esta disposición la interacción gravitatoria que sufre cada una de las estrellas debido a su compañera no es tan intensa como para que se produzcan deformaciones en las capas externas de ambas estrellas, conservando cada una de ellas su simetría esférica. Como consecuencia de su amplia separación los períodos orbitales en estos sistemas de EBs suelen oscilar entre 1,5 a 40 días lo cual se refleja en sus curvas de luz y en fase.

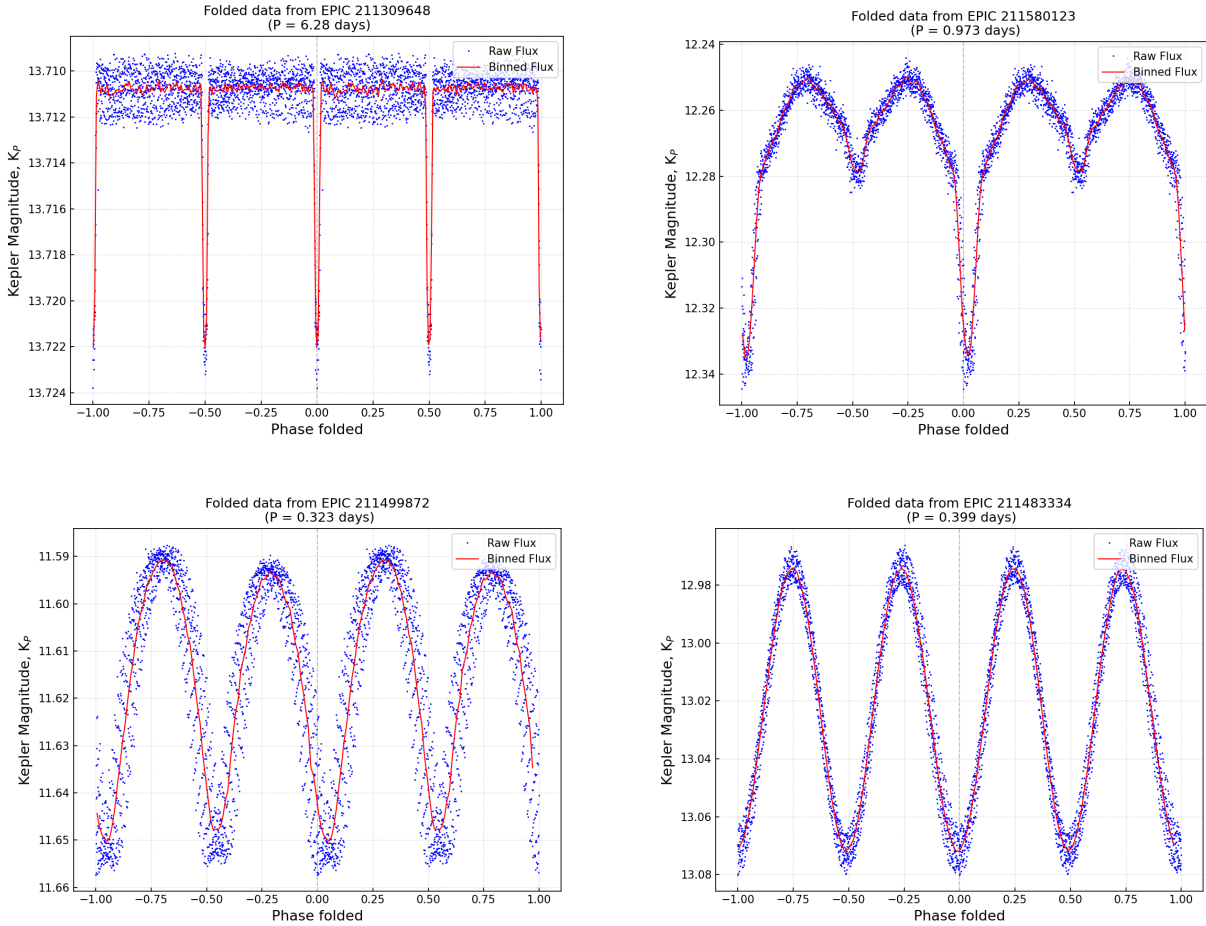
Las binarias semiseparadas (SD) son similares a las anteriores con la salvedad de que en este caso la distancia mínima entre ellas es tal que permite a la más masiva sobrepasar el límite de Roche<sup>9</sup>. Esto suele ser debido a que la estrella más masiva ha comenzado a fusionar He y por tanto ha sufrido un aumento en su radio. Sobrepasar este límite implica la aparición de una deformidad en la estrella más masiva llegando incluso a producirse intercambio de masa entre ésta y su compañera, sin que esto ponga en riesgo la integridad de ambas estrellas. En este caso los períodos orbitales se acortan con respecto a las primeras, hablamos de períodos del orden de 0,5 días a 5 días. El hecho de que la estrella más masiva empiece a fusionar He convierte a este grupo de EBs en el más probable para encontrar estrellas pulsantes formando parte de estos sistemas.

El tercer grupo son las binarias en contacto (OC), dentro de este grupo se encuentran todo tipo de sistemas EB en los cuales ambas estrellas han sobrepasado sus respectivos límites de Roche por lo que el intercambio de materia se vuelve más intenso que en el caso anterior. No obstante, se espera que el sistema permanezca en equilibrio en un tiempo grande comparado con el período orbital del sistema. Estos períodos orbitales son del orden de 0,2 a 0,7 días.

El último grupo serían las binarias con variaciones elipsoidales (ELV). En este grupo se encuentran sistemas estelares en los que la distancia entre estrellas es tan próxima comparada con los radios de cada estrella que resulta difícil determinar la posición de cada estrella. En su lugar la deformación

---

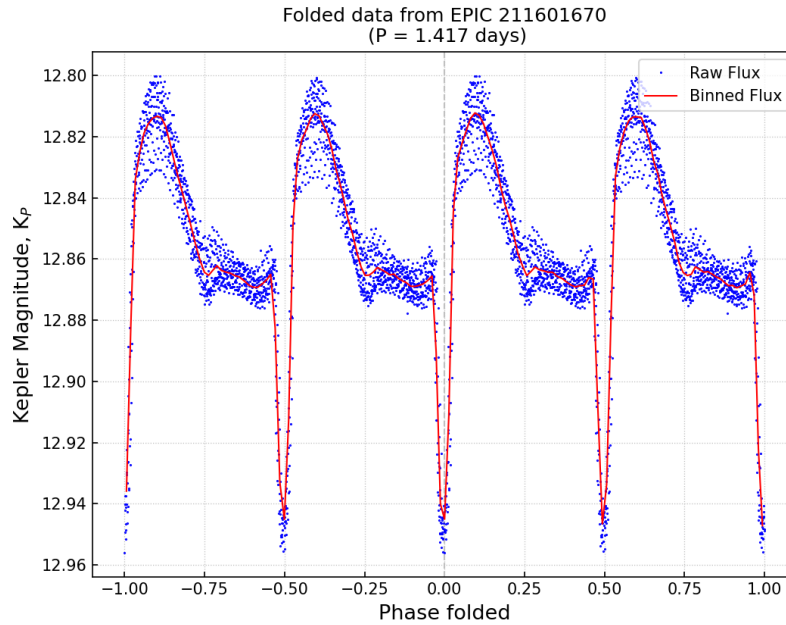
<sup>9</sup>El límite de Roche está definido a partir del lóbulo de su mismo nombre que a su vez se define como la superficie equipotencial que intersecta al punto de Lagrange L1 (punto en el cual la atracción gravitatoria entre las dos estrellas se iguala).



**Figura 1.6:** Ejemplo de curvas en fase de los cuatro diferentes grupos de EBs que se van a tratar, de arriba a abajo y de izquierda a derecha se tiene una EB de tipo separada (EPIC 211309648,  $K_P = 13,848$ ,  $P = 6,272$  días) una de tipo semiseparada (EPIC 211580123,  $K_P = 12,668$ ,  $P = 0,973$  días) otra en contacto (EPIC 211499872,  $K_P = 11,901$ ,  $P = 0,323$  días) y finalmente una binaria con variación elipsoidal (EPIC 211483334,  $K_P = 13,23$ ,  $P = 0,399$  días). Estas estrellas pertenecen al catálogo de sistemas EBs propuesto en este trabajo.

debida a la interacción gravitatoria muestra un sistema estelar extrapolable a una única estrella que sufre deformaciones elipsoidales armónicas. Como analogía podemos imaginar un balón de *rugby* tumbado que gira con una velocidad angular constante, si el balón presenta su eje principal apuntando a nosotros observaremos un sección circular mientras que si el eje presenta una orientación perpendicular respecto a nuestra posición se observará una sección elipsoidal con mayor área que la anterior. La sucesión periódica de estas secciones se traducen en curvas de luz que varían de manera sinusoidal con el tiempo. En estos sistemas los períodos de oscilación rondan los 0,2-1,2 días. En la **Figura 1.6** se muestran cuatro curvas en fase de cuatro sistemas binarios, cada uno para cada tipo de EB.

En los sistemas EBs cabe la posibilidad que las estrellas que lo formen tengan una actividad magnética relevante, convirtiendo al sistema EB en un híbrido entre EB y sistema en rotación. Es-



**Figura 1.7:** En la imagen se muestran un ejemplo de EB donde una (o ambas) estrellas tiene una actividad magnética relevante, haciendo que sean visibles efectos debidos a un sistema EB y en rotación. Esta estrella corresponde al EPIC 211601670 en nuestro catálogo con período orbital  $P = 1,417$  días y magnitud aparente media  $K_P = 13,104$

to amplía aún más el número de posibles EBs ya que las curvas de luz y las curvas en fase mostrarán sendos comportamientos característicos en ambos tipos de variabilidad tal y como se muestra en la **Figura 1.7**.

## 1.4. Telescopio espacial Kepler

Como parte final de esta introducción teórica se prestará una especial atención al telescopio espacial Kepler ya que de él se obtuvieron los datos fotométrico necesarios para este trabajo. El telescopio espacial Kepler fue lanzado en el año 2009 como un proyecto innovador de la agencia espacial estadounidense NASA para la detección de exoplanetas usando el método del tránsito, principalmente aquellos que compartían características similares a la Tierra en cuanto a tamaño y zona de habitabilidad. Su tecnología puntera y el hecho de ser un telescopio espacial en el cual no existen efectos de distorsión de imagen a causa de la atmósfera terrestre, convirtieron a esta misión en una de las más exitosas en su campo.

Posiblemente menos mediáticos son otro tipo de descubrimientos relativos a variabilidades en estrellas provocadas por sistemas EB, estrellas pulsantes o variabilidades debidas a actividad solar como es el caso de las manchas solares. Los datos obtenidos en esta primera misión fueron recopilados en una región de la bóveda celeste situada en el plano galáctico, concretamente en las constelaciones

del Cisne y Lira situadas en el triángulo estival y el Dragón (*Cygni*, *Lyræ* y *Draco* en latín). La duración de la primera misión abarca desde su lanzamiento hasta la pérdida de dos de sus motores de propulsión en el año 2013 momento en el cual se decidió renovar el proyecto en una nueva misión extendida denominada K2.

#### 1.4.1. Características fundamentales

El telescopio espacial Kepler tiene un diseño de tipo Schmidt con una apertura de 95 cm y un campo de visión que ronda los  $110^\circ$  cuadrados, lo que significa una resolución de imagen de 4 segundos de arco por píxel ya que su cámara CCD contaba con un total de 95 millones de píxeles ([Howell et al. 2014, \[11\]](#)). Estos datos son característicos únicamente del telescopio en sí pero el sistema completo es más extenso que este par de magnitudes. Por ejemplo el tamaño del satélite rondaba los 4,7 m de alto y 2.7 de diámetro con una masa de unos 1050 kg entre el telescopio, la carcasa, los motores y el combustible. Aunque esta estructura no deja de ser un satélite, éste no está orbitando la Tierra sino que sigue una órbita heliocéntrica con una excentricidad de 0,036 en una órbita próxima a la Tierra, de hecho su afelio y perihelio están situados a 1,050 UA y 0,977 UA (en la órbita terrestre estos valores son 1,017 UA y 0,983 UA respectivamente) con un período orbital de 372 días.

Aunque la misión Kepler, tanto la principal como K2, fueron un proyecto de la NASA, realmente correspondió a las empresas *LAST* y *Ball Aerospace & Technologies Corp* el cometido de comandar y dirigir este proyecto desde la base de operaciones de la Universidad de Colorado. Desde esta base se comandaron las maniobras relativas al problema de la pérdida de los dos motores de propulsión en 2013 y la ampliación de la misión a K2 a partir del 2014.

#### 1.4.2. Misión extendida K2

La misión extendida K2 nace de un infortunio debido a la pérdida de dos motores o ruedas de propulsión. En total el satélite que cargaba con el sistema experimental tenía cuatro motores de este tipo numerados del 1 al 4. En julio de 2012 el motor número 2 comenzó a fallar. Aunque esta pérdida no es para nada una buena noticia, en este estado el satélite podría seguir realizando sus tareas con absoluta normalidad ya que la falta de una de sus ruedas de propulsión permitía una correcta orientación. No obstante, la peor noticia se confirmó el 13 de mayo de 2013 cuando se encontró que la rueda número 4 empezaba a fallar. Desde ese momento hasta julio de 2013 el telescopio quedó sin funcionamiento ya que la falta de dos motores de propulsión impedían un apuntado preciso y estable a cualquier estrella u objeto astronómico. En ese mismo mes se probaron las ruedas que habían fallado con resultados no satisfactorios. Tras varios intentos de reutilizar estos dos motores con el fin de ser aprovechados para la continuidad de la misión, la NASA decidió poner el telescopio

en un estado de hibernación con el fin de ahorrar combustible y estudiar propuestas para futuros usos del telescopio.

En noviembre de 2013 se presenta un plan para seguir usando el telescopio con el mismo fin que fue lanzado, dicha misión denominada misión extendida K2 sería capaz de seguir descubriendo variabilidades en estrellas debidas a exoplanetas, sistemas EB o estrellas pulsantes además de supernovas o cometas. En la propuesta presentada se indicaba que el telescopio podría seguir manteniendo una orientación adecuada, aunque no exacta, de un campo de visión concreto. Para ello se hacía uso del viento solar como fenómeno físico de equilibrio, el principal problema era la falta de control sobre este fenómeno lo cual introduce oscilaciones en el campo de visión del telescopio que impiden la obtención de una curva de luz de cualquier objeto astronómico con continuidad. Por suerte estas discontinuidades pueden ser corregidas a partir de algoritmos de corrección, en la **Figura 2.1** se muestra este efecto sobre la fotometría de una estrella captada por el telescopio.

El uso del viento solar como ventaja, trae consigo una orientación que depende de la posición que ocupa el telescopio en su órbita. Durante la misión primaria el telescopio apuntaba en una región del plano galáctico en la dirección de Lyra, Cisne y el Dragón. Sin embargo, en su misión extendida el telescopio dejó de apuntar en esa dirección particular para realizar un barrido a lo largo de las constelaciones situadas sobre la eclíptica, en la **Figura 1.9** se muestra este barrido. Durante su órbita el telescopio sufre períodos regulares en los que la incidencia lumínica del Sol no permite una correcta observación, seguidos de períodos en los que la observación es favorable. Cada uno de estos períodos define una campaña cuyo tiempo de acción son 83 días de los cuales solamente 75 son dedicados a la observación. Por esa razón cada campaña recoge información de diferentes zonas del cielo centradas en la eclíptica, lo cual permite hacer estudios sobre la posición de determinados sistemas estelares como EB o estrellas pulsantes en función de la latitud y longitud galácticas ya que el plano eclíptico y el galáctico no son coincidentes. En total la misión extendida K2 concluyó un total de 20 campañas desde la campaña 0, que sirvió como prueba hasta la 19.

Durante el transcurso de estas campañas se llegaron a captar del orden de 7.000 a 25.000 objetos astronómicos por campaña entre los cuales se encuentran exoplanetas, supernovas, observaciones de cúmulos abiertos, fuentes variables e incluso variabilidad debida a efectos de microlente. Dentro de los exoplanetas, se puede distinguir entre los que fueron detectados orbitando estrellas de baja masa, por supuesto nos referimos a estrellas enanas de tipo espectral M, como aquellos que fueron detectados en estrellas de una masa similar a la de nuestro Sol. Los cúmulos abiertos muestran una oportunidad para poder estudiar la abundancia de exoplanetas y compararla con la abundancia en estrellas fuera de estos cúmulos. También se destaca la detección de estrellas variables en forma de



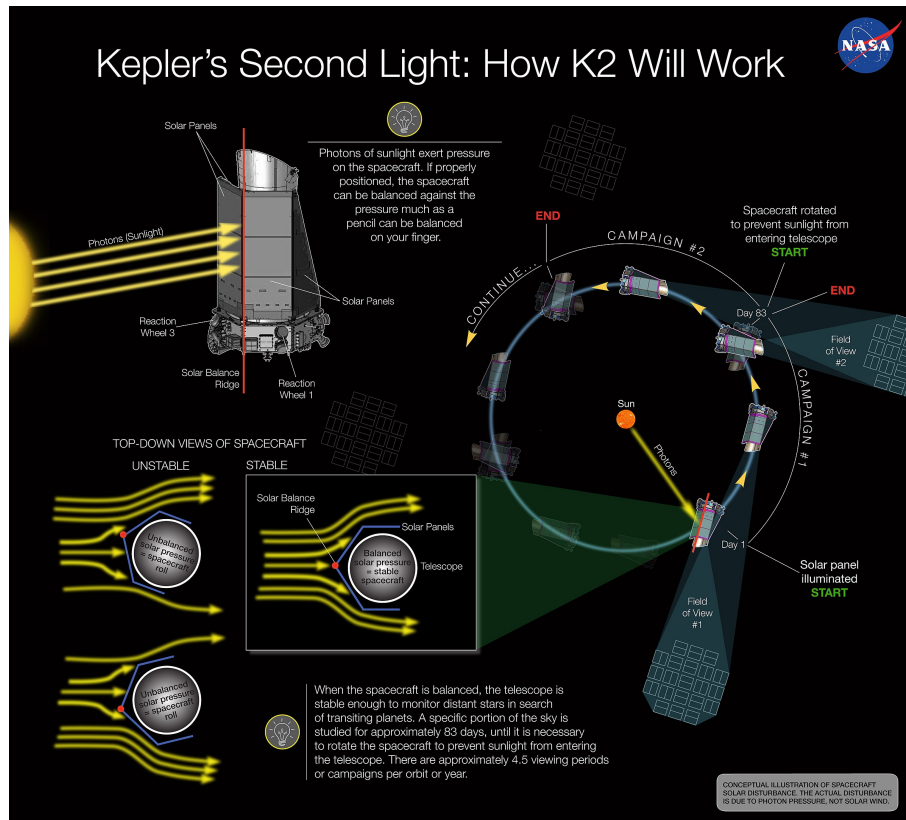


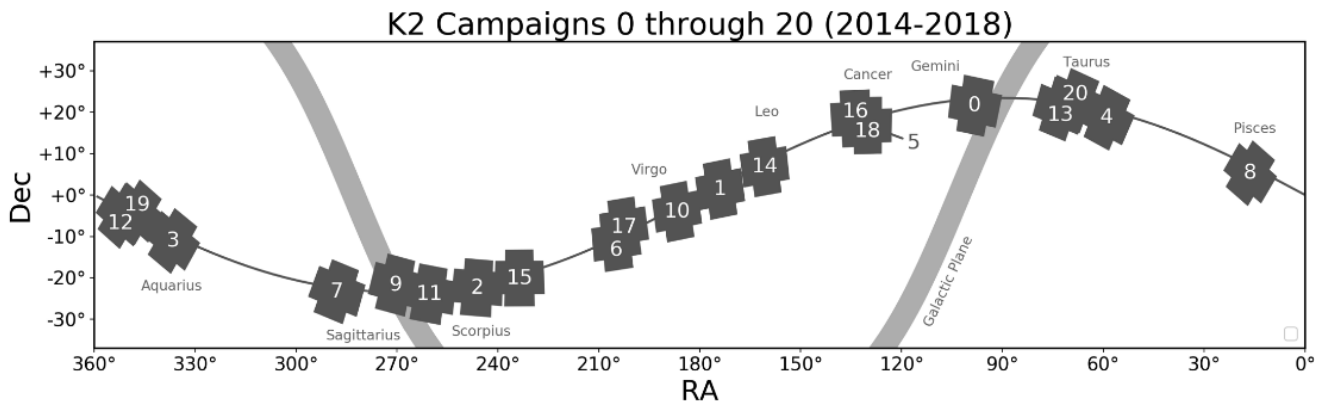
Figura 1.8: Esquema que resume la misión K2 aprobada por la NASA en noviembre de 2013.

sistemas EB o estrellas de tipo pulsante. Por su parte la observación de eventos variables de naturaleza extragaláctica permite el estudio, en un tiempo no superior al tiempo de observación del telescopio, de AGNs<sup>10</sup> además de la detección de supernovas de tipo Ia, comprobando el ratio de producción de estos sucesos que ronda los 0,7 supernovas/siglo/galaxia.

### 1.4.3. Campaña 18

Entre las veinte campañas que la misión extendida K2 realizó durante sus cuatro años de vida, en este trabajo nos vamos a interesar por la campaña 18 ya que los datos fotométrico que se analizarán en esta investigación provienen de ella. No obstante, existen ciertos solapamientos con las campañas 5 y 16 ya que la región del cielo a la que apuntaba el telescopio durante el desarrollo de esta campaña era una zona centrada en la constelación de Cáncer (*Cancer* en latín) **Figura 1.9**. En esta constelación se encuentran dos cúmulos abiertos interesantes desde el punto de vista astrofísico, M44 o cúmulo del Pesebre y M67. El primero de ellos es el más cercano a la Tierra de los dos con apenas 182 pc de distancia (594 años luz) y una magnitud aparente de 3,7 por lo que es visible a simple vista en zonas con poca contaminación lumínica. Una característica que lo distingue del resto de cúmulos abiertos

<sup>10</sup>AGN viene de las siglas en inglés *Active Galactic Nuclei*, Núcleos Galácticos Activos. Dentro de este grupo se engloban todas aquellas galaxias en las que existe un agujero negro supermasivo central con un fuerte proceso de acreción del material que compone dicha galaxia. Este fenómeno permite que estos objetos astrofísicos tengan actividad física en forma de emisión de rayos X y gamma. Dependiendo de la orientación del jet relativista del agujero negro existen diferentes clasificaciones de un AGN: los *Quasars*, los *Blazars* o las galaxias *Seyfert*.



**Figura 1.9:** Relación de campañas de la misión extendida K2 en sus respectivas zonas de observación, en la imagen se pueden observar los solapamientos existentes entre ciertas campañas, por ejemplo el solapamiento de las campañas 18, 16 y 5.

es la población de estrellas que contiene ya que debido a su edad de unos  $6 - 7 \times 10^8$  años, coexisten en él estrellas en diferentes etapas de su evolución. Varios exoplanetas como K2-95b, K2-100b, K2-101b, K2-102b, K2-103b o K2-104b fueron descubiertos por la misión K2 en este cúmulo gracias a los datos suministrados en las campañas 5 y 16. Además de exoplanetas este cúmulo cuenta con un amplio número de estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti. Descubrimientos que fueron encontrados en las campañas 5 y 16 por lo que automáticamente se justifica una especial atención a este cúmulo ya que, como se verá en el capítulo 4, existen varias estrellas variables de nuestro catálogo que pertenecen a él. Por otro lado el cúmulo M67 se estima a una distancia de 890 pc (2900 años luz), cuenta con un conjunto de más de 500 objetos astrofísicos variados desde gigantes rojas hasta enanas blancas. La relevancia observacional de este cúmulo se justifica por la edad de las estrellas que lo componen ya que rondan los  $4 - 7 \times 10^9$  años lo cual significa que tienen una edad similar a nuestro sistema solar. Se dedicará un apartado a la búsqueda de candidatos, tanto en este cúmulo como en el anterior, en el capítulo 4 del trabajo.

## Capítulo 2

# Metodología

La metodología seguida en este trabajo contempla todo lo relevante a la determinación de los resultados propuestos en los objetivos, creación del catálogo de estrellas variables y determinación de sus períodos de variabilidad característicos. Esta metodología combinará por un lado un fuerte análisis computacional, principalmente mediante el uso de `python` como lenguaje de programación, y por otro lado una clasificación de estrellas variables desde un punto de vista puramente visual. La combinación de estas dos formas de trabajo hará que se consigan unos resultados satisfactorios con respecto a los objetivos marcados, no obstante existirán ciertas estrellas que demandarán un estudio adicional además del fotométrico, en todos estos casos no se aplicarán los procedimientos que van a ser relatados debido a esa falta inicial de certidumbre.

### 2.1. Clasificación preliminar

El primer paso para realizar un catálogo de estrellas variables junto a sus períodos de variabilidad característicos, es la implementación de una clasificación preliminar. Esta clasificación se hará de manera puramente visual usando las curvas de luz de la base de datos Vanderburg en base a una serie de criterios que se detallarán más adelante. Antes de esto conviene saber como se obtiene la lista de posibles candidatos que en este trabajo vamos a tratar.

#### 2.1.1. Estrellas variables catalogadas por la colaboración Pro-Am “K2OjOS”

La campaña 18 de la misión extendida K2 cuenta con más de 20.000 objetos astronómicos detectados, entre los que se incluyen los ya mencionados cúmulos abiertos M44 y M67, 42 exoplanetas confirmados en la campaña 5, 60 estrellas enanas rojas con fuerte actividad magnética, 59 enanas blancas variables, 13 estrellas de alta luminosidad, un sistema binario de dos agujeros negros supermasivos OJ 287, 37 sistemas similares al sistema solar y toda una cantidad de objetos aún no catalogados. Por ese motivo alrededor del mundo las instituciones científicas dedicadas a la observación astronómi-

ca participan en proyectos divulgativos y de colaboración Pro-Am (Profesionales-Amateurs) en las cuales astrónomos aficionados clasifican datos fotométricos de estrellas de diversa naturaleza, como es el caso de estrellas variables o exoplanetas, previamente asesorados respecto a la naturaleza de las diferentes curvas de luz así como una supervisión por parte de los astrónomos profesionales. En la colaboración K2OjOS se siguieron estas pautas: en primer lugar se ofrecía la información necesaria con respecto a la detección de exoplanetas y variabilidades estelares. Para ello los 10 miembros de la Sociedad Astronómica Asturiana Omega participantes en el proyecto estudiaron un conjunto de muestras fotométricas ya reducidas, con el fin de identificar los patrones más relevantes en cada uno de los diferentes grupos estelares de clasificación, exoplanetas, estrellas pulsantes, binarias eclipsantes etc. En segundo lugar se procedió con la adjudicación de las curvas de luz, la cual siguió los siguientes pasos: en primer lugar se seleccionaron conjuntos de 1000 curvas de luz de la campaña 18, un total de 20 más un conjunto adicional de 427 para completar la campaña 18. En segundo lugar se asignaban los diferentes lotes de estrellas a cada miembro para que fuesen analizándolos usando la base de datos Vanderburg, en total se detectaron 216 candidatos a exoplanetas, 427 a binarias eclipsantes, 374 a estrellas en rotación, 195 irregulares y 101 clasificadas como artefactos por no ser posible su determinación en ninguno de los grupos anteriores.

Finalmente se comprueba si los diferentes EPICs ya hubiesen sido clasificados en otras publicaciones ([Nardiolo et al. 2016, \[18\]](#), [Barros et al. 2016, \[4\]](#), [Libralato et al. 2016, \[16\]](#) o VSX<sup>1</sup>), ya que la campaña 18 está solapada con las campañas 5 y 16. En este punto comenzará la primera tarea de este trabajo. Esta tarea es desde un punto de vista temporal ineficiente debido a la cantidad de horas que se tendrían que dedicar en ella, sin embargo puede ser ejecutada en cuestión de minutos si se emplea un código de programación en formato `notebook` creado por el miembro del ICTEA Juan Menéndez Blanco, código que fue creado específicamente para este cruce en la colaboración K2OjOS. La función de este código será la de buscar coincidencias con artículos y publicaciones ya existentes por lo que una vez ejecutado será necesario la implementación de otro código adicional en `python` para cruzar los datos fotométricos publicados previamente con los datos de esta colaboración. El resultado será un total de 1177 curvas de luz<sup>2</sup> que aún no han sido citadas en ninguna publicación anterior, lo que supone algo más del 65 % de los datos catalogados por la colaboración K2OJOS asignados en este trabajo.

---

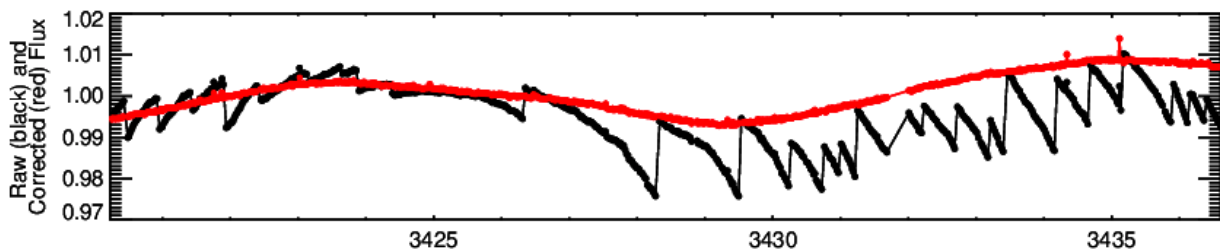
<sup>1</sup><https://www.aavso.org/vsx/index.php?view=search.top>

<sup>2</sup>La muestra de 1177 curvas de luz que aún no han sido catalogados, a excepción de la colaboración K2OjOS, pueden aún tener ciertos candidatos que se estén clasificando en el momento actual. De hecho, en esta lista se ha llegado a confirmar algún candidato a exoplaneta que el mismo instituto ICTEA tiene a día de hoy en mente para un futuro artículo. En otras ocasiones es posible que ciertos EPICs (*Ecliptic Plane Input Catalogue*) registrados en esta lista no tengan una curva de luz registrada en la base de datos Vanderburg, en estos casos se descartarán automáticamente.

### 2.1.2. Curvas de luz en K2

El siguiente paso será la clasificación visual usando la base de datos Vanderburg donde se guardan los datos fotométricos de cada una de las 20 campañas de la misión extendida K2. Nuestro interés está enfocado solamente a los datos de la campaña 18, que por otro lado es a la que pertenecen todos los objetos astronómicos de nuestra lista. No obstante, es posible buscar algunas estrellas en las campañas 5 y 16 gracias al solapamiento con la 18, esto resultará de utilidad en aquellos en los que la variabilidad de una estrella resulte confusa en la 18 pero no en la 5 ó 16, por ejemplo EB con períodos de rotación amplios  $\gtrsim 30$  días o rotaciones en las que cambie el perfil de la curva de luz, lo cual delate su rotación.

La base de datos Vanderburg tiene recogidas las diferentes curvas de luz implementadas con la propia fotometría del telescopio, a este conjunto se le llama curvas de luz brutas *raw flux*. El problema que existe con estas curvas es la propia oscilación del telescopio debido a la pérdida de uno de sus motores de propulsión. Es por esta razón que en la curva bruta se observarán discontinuidades de salto en la intensidad luminosa a lo largo del período de observación. Afortunadamente este efecto es corregido teniendo en cuenta la propia oscilación del telescopio con respecto a su campo visual, de esta manera se obtiene el flujo corregido *corrected flux*, como ejemplo se muestra una curva de luz de la campaña 18 en la **Figura 2.1**. La curva corregida será usada más adelante como curva de luz de la estrella a estudiar.



**Figura 2.1:** En color negro se muestra el *raw flux* de la estrella EPIC 211302193 con las discontinuidades en la fotometría extraída debidos a la propia oscilación del campo visual del telescopio. En color rojo se muestra el flujo corregido *corrected flux* tras la aplicación de los algoritmos de corrección. En la imagen solo se muestra un período de observación de 16 días (Vanderburg).

Además de las curvas *raw flux* y *corrected flux*, Vanderburg dispone de un tercer flujo denominado *detrended flux* en el cual se eliminan tendencias a medio y largo plazo. Esta curva pinta la dependencia de las desviaciones con respecto a la media en la señal *corrected flux* con el tiempo de observación. Esta curva será usada como primer indicio de la naturaleza fotométrica de la estrella, en principio la clasificación preliminar tendrá en cuenta si la curva *detrended flux* corresponde a un sistema con

cierta dependencia de variabilidad<sup>3</sup> en la cual se incluirían las EBs, las estrellas pulsantes (Cefeidas, Delta-Scuti, RR-Lyrae etc) y las estrellas en rotación. Por otro lado tendremos las estrellas que no presenten ningún tipo de variabilidad en su señal y por último las estrellas que tienen una variabilidad irregular.

Para realizar la clasificación nos apoyaremos en las líneas teóricas comentadas en el primer capítulo, no obstante dentro de las estrellas de tipo pulsantes se observarán un amplio número de estrellas con fotometría compatible con una Delta-Scuti sin tener esto porqué ser cierto ya que la clasificación de estrellas pulsantes con corto período de oscilación puede llegar a ser muy diversa y naturalmente en una clasificación preliminar de carácter puramente visual estas diferencias son inapreciables, es por ello que se clasificarán como Delta-Scuti todo tipo de fotometría con varios modos de oscilación y frecuencia de oscilación superior a 5 oscilaciones/día. En cuanto al grupo de los sistemas EBs se usará la consideración en la cual éstos tienen una luminosidad constante con sucesiones de *dips* equiespaciados y de profundidad similar (por pares). Es cierto que esto puede parecer una contradicción con los sistemas EBs con variabilidad debida a sistemas en rotación. No obstante, no se debe confundir la curva *detrended flux* de Vanderburg con una curva de luz ya que en este punto lo único que nos va interesar es la clasificación preliminar de las estrellas, lo cual no afectará a esta circunstancia.

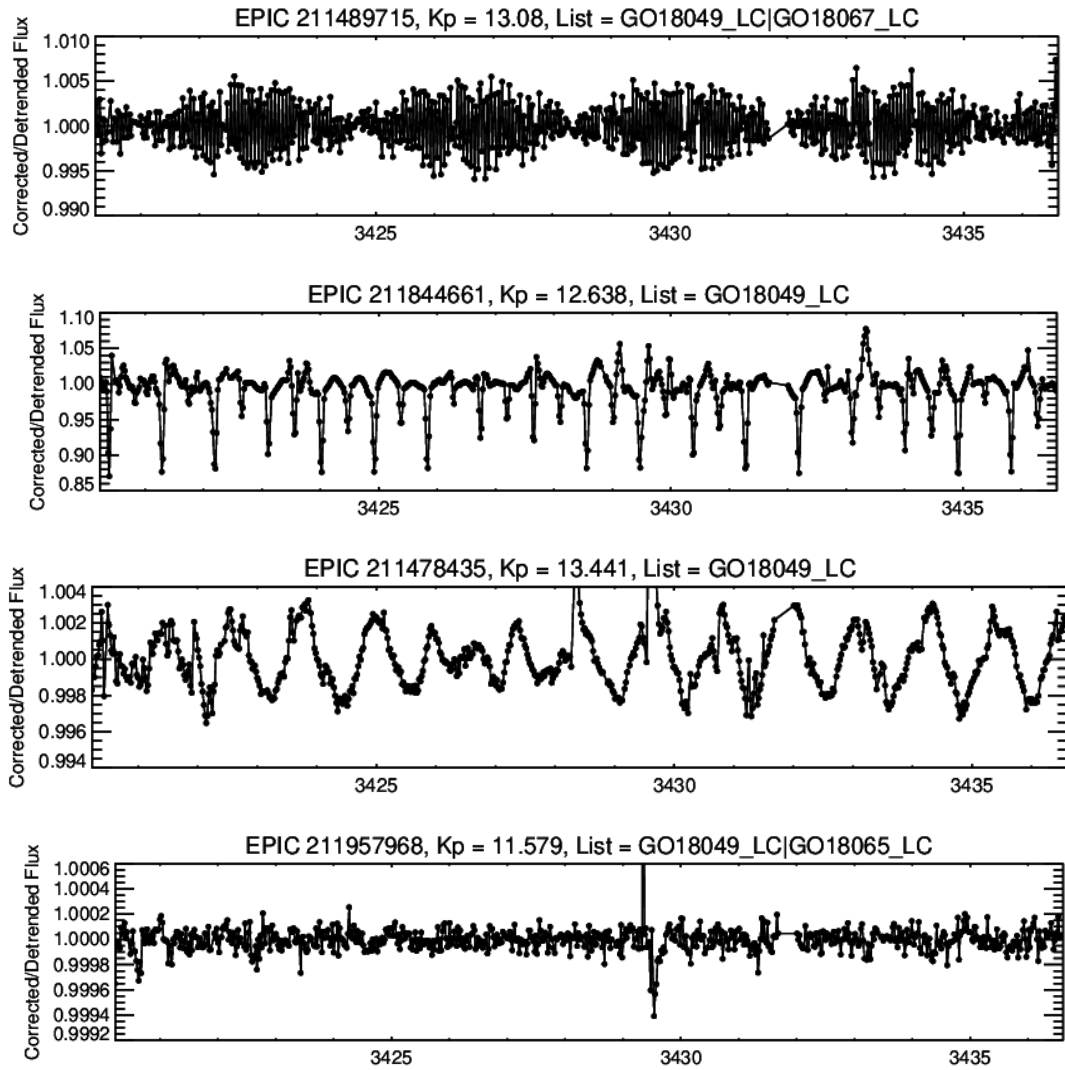
Todas aquellas curvas de tipo *detrended flux* en la base de datos Vanderburg que presenten oscilaciones periódicas de carácter sinusoidal con irregularidades en esta tendencia serán clasificadas como sistemas estelares en rotación<sup>4</sup>. Si estas irregularidades son tales que impiden discernir un período de oscilación o simplemente la curva es en general uniformemente irregular en todo el período de observación del telescopio, se clasificará como irregular. En caso de no existir ningún indicio de variabilidad o simplemente la fotometría tiene errores que hacen imposible dar una clasificación fiable se dirá que esta señal corresponde a una estrella no variable. En la **Figura 2.2** se muestran cuatro ejemplos en los que se aplican estos criterios preliminares de clasificación.

Finalmente del total de 1177 estrellas de la colaboración K2OjOS que aún no están publicadas en otros artículos habrá un total de 51 pulsantes tipo Delta-Scuti lo que supone un 4,33 % del total, 59 sistemas EBs un 5,01 % del total, 357 sistemas estelares en rotación, en torno a un 31,27 % del total y el resto presentan o bien pulsaciones irregulares o bien no presentan ninguna variabilidad apreciable,

---

<sup>3</sup>Realmente esto es una simplificación ya que para ser más rigurosos conviene tener en cuenta tanto la curva *detrended flux* como *corrected flux* debido a que en ciertas ocasiones es posible encontrar rotaciones o pulsaciones con un período largo comparado con el tiempo de observación, con lo cual la tendencia a largo plazo podría llegar a eliminar esta dependencia en la curva correspondiente al *detrended flux*.

<sup>4</sup>Además de una señal de carácter sinusoidal, la dinámica magnética en este tipo de estrellas genera distribuciones de manchas que no son constantes en el tiempo, lo que se traduce en una señal fotométrica oscilante con variaciones en la amplitud de oscilación. Esto será motivo de confusión entre estrellas en rotación y ciertas poblaciones de estrellas pulsantes como los Gamma-Doradus.



**Figura 2.2:** Conjunto de curvas de tipo *detrended flux* obtenidas de la base de datos Vanderburg. De arriba abajo, estrella tipo Delta-Scuti con EPIC 211489715 y  $K_P = 13,08$ , EB con EPIC 211844661 y  $K_P = 12,638$ , sistema en rotación EPIC 211478435 y  $K_P = 13,441$  y estrella con flujo irregular EPIC 211957968 y  $K_P = 11,579$ . El eje de abscisas representa el tiempo de observación, los primeros 16 días de la campaña 18.

suponiendo el restante 59,39%. Estos números son debidos únicamente a la clasificación preliminar hecha simplemente mediante un juicio visual por lo que es de esperar que una vez se comience con el tratamiento de datos sea necesario descartar algún candidato o incluso cambiar la clasificación ya que en general, como hemos visto, Delta Scutis, EBs y rotaciones, pueden llegar a confundirse.

## 2.2. Tratamiento de datos

Tras la clasificación preliminar se pasa al tratamiento de datos, en esta parte se comenzarán a usar recursos computacionales con el fin de obtener los resultados deseados. El objetivo en este punto es la creación de tres figuras para cada una de las estrellas: la curva de luz que no es más que la dependencia del brillo de una estrella en función del tiempo de observación de la misma, por otro

lado será necesario registrar los períodos característicos de variabilidad, para ello se hará uso de los periodogramas muy habituales en estudios de variabilidad estelar, y por último necesitaremos la curva en fase de cada estrella ya que nos ayudará a clasificar el tipo de variabilidad en función de su comportamiento con respecto a un período característico.

### 2.2.1. *Everest-pipeline*

La creación de todos estas figuras y resultados necesita la ayuda de códigos de programación en lenguaje `python`. La primera tarea es la descarga de los datos fotométricos con el fin de ser adecuadamente tratados. Aunque la base de datos Vanderburg contiene esta información, no será esta la que se usará, en su lugar se hará uso de la *everest-pipeline*<sup>5</sup> (proviene de las siglas en inglés *EPIC Variability Extraction and Removal for Exoplanet Science Targets*) en la cual se encuentran los datos fotométricos de cada una de las estrellas clasificadas preliminarmente. La razón de esta elección se basa en la facilidad que presenta el uso de esta *pipeline* en códigos en lenguaje *python*. No obstante, es conveniente mencionar que la *Everest-pipeline* y la base de datos Vanderburg consideran diferentes aperturas fotométricas por lo que en algunas ocasiones ocurrirá que una estrella clasificada con la base de datos Vanderburg en un grupo no se ajuste al mismo patrón de variabilidad en *Everest-pipeline* ya que pueden llegar a existir contaminaciones por parte de otros objetos astronómicos vecinos que en un sitio aparecen y en otro no.

### 2.2.2. Curvas de luz

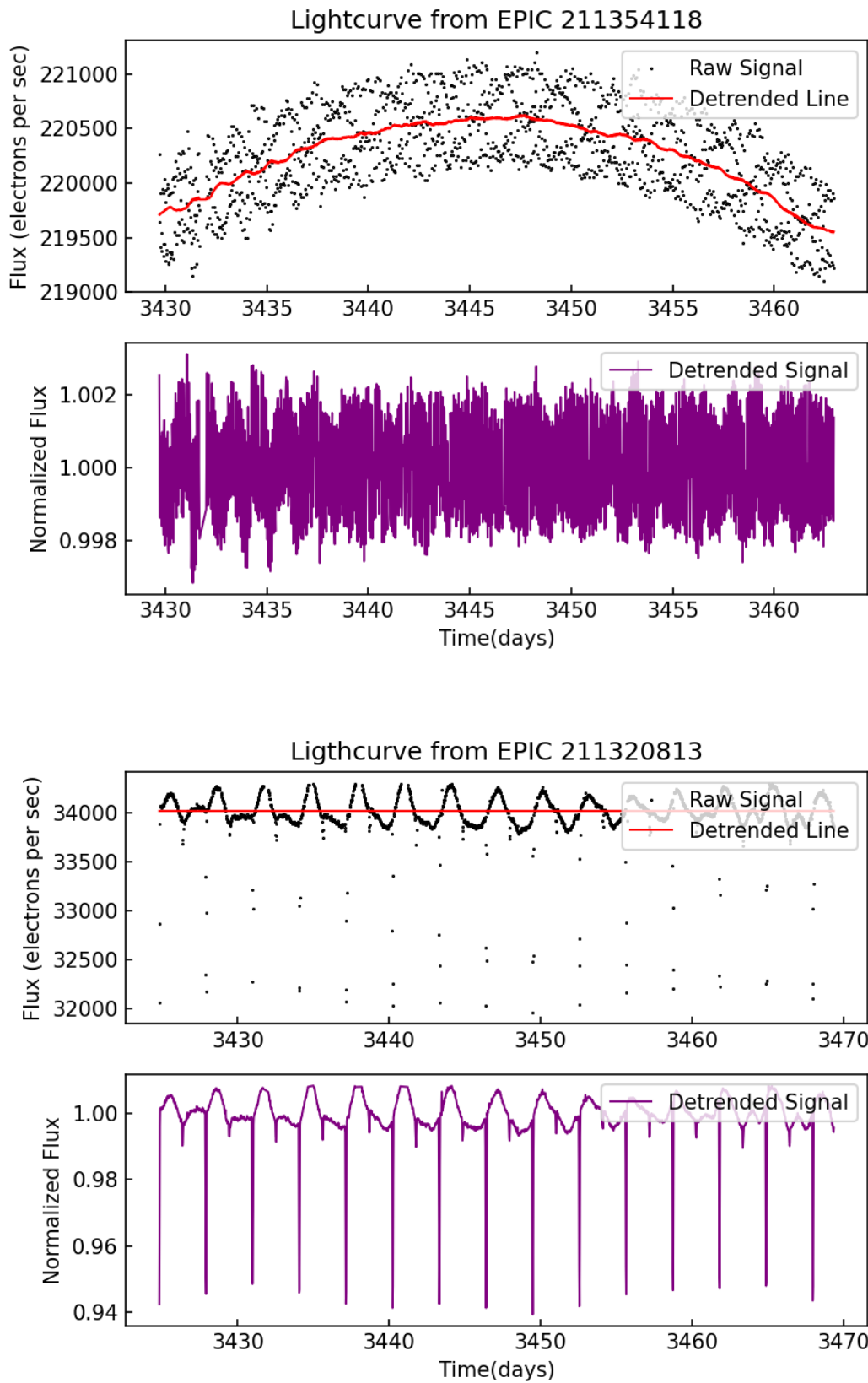
La creación de las curvas de luz es el primer paso para el análisis físico de una fotometría obtenida en un telescopio óptico. A pesar de la coincidencia en su nombre con las curvas de luz que ofrece la señal de la CCD del telescopio, en este caso la dependencia del brillo de la estrella con el tiempo de observación no tendrá en cuenta las oscilaciones producidas por la falta de dos motores de propulsión en la misión K2. Por ello se podrá establecer una coincidencia entre curvas de luz y las *corrected flux* de la sección anterior ya que en este caso solo nos vamos a prestar atención a la variabilidad intrínseca de cada estrella.

La creación de estas curvas de luz solo demanda de la representación gráfica de la intensidad de flujo frente al tiempo de observación, sin embargo para próximos análisis será necesario realizar una serie de ajustes. Uno lo encontramos en la escala temporal a largo plazo del brillo de la estrella. Este fenómeno sucede en varias estrellas variables en las cuales debido a factores externos a su comportamiento físico, como por ejemplo la variación en la orientación relativa del telescopio con dicha estrella, la intensidad puede llegar a modificarse de manera suave y global a lo largo del período

---

<sup>5</sup><https://pypi.org/project/everest-pipeline/>





**Figura 2.3:** Arriba curva de luz de la estrella Delta-Scuti EPIC 211354118 ( $K_P = 11,835$ ) como ejemplo de corrección de una tendencia a largo plazo. Abajo curva de luz para una EB con rotación (EPIC 211320813,  $K_P = 13,868$ ) en la cual la elección de un período de ventana  $\lesssim 10$  días supondría la eliminación del fenómeno debido a la variabilidad por rotación.

de observación. Ya que se está asumiendo que esta variación en brillo no es debida a ningún tipo de variabilidad estelar, es necesario eliminar esta tendencia no deseada de la curva de luz. Para ello se puede usar el paquete de `python` denominado `wotan`<sup>6</sup> del cual podemos importar el correspondiente subpaquete `flatten`. Este subpaquete ofrece la posibilidad de detectar tendencias globales en funciones con un período de ventana que podemos ajustar. Este período debe ser ajustado con cierta cautela ya que en caso contrario puede ocurrir que eliminemos tendencias que sí son responsables de la física de la estrella, esto sucede fácilmente por ejemplo en los sistemas EBs en los que se une una variabilidad debida a estrellas en rotación. Como ejemplo en la **Figura 2.3** se muestran dos curvas en fase correspondientes a dos estrellas del catálogo en las que ocurren estos efectos.

A pesar de que `flatten` corrija las tendencias globales de una curva de luz, no suele trabajar adecuadamente en los extremos de la misma curva ya que en los límites es posible que haya menor densidad de datos o mayor probabilidad de fallos en la fotometría de la CCD del telescopio. Esto nos va traer problemas de cara a la determinación de períodos característicos ya sean de oscilación para estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti, orbitales para sistemas EB o de rotación para las estrellas en rotación. La solución a este efecto es la eliminación controlada de los primeros y últimos días de observación ( $\sim 10$  días a cada lado). Esta acción puede ser llevada a cabo de manera general debido a que tanto los períodos de oscilación como de rotación u orbitales son pequeños comparados con el tiempo total de observación, por lo que la pérdida de esta información no va a trastocar las conclusiones a las que podamos llegar. No obstante existirán casos particulares, sobre todo en los sistemas EB ya que en ciertos casos en los que el período orbital sea  $P \lesssim 70$  días es posible eliminar algún *dip* de la fotometría. Por otro lado, en algunos casos existirán puntos aislados debidos a errores en la fotometría del telescopio. Aunque sean pocos puntos aislados, éstos pueden llegar a trastocar la obtención de un período característico de manera clara por lo que habrá que eliminarlos. Para ello se usarán los siguientes convenios generales, en estrellas pulsantes y variables por naturaleza rotatoria se despreciarán todo tipo de puntos que disten de la tendencia media más de  $4\sigma$ . Mientras que en el caso de los sistemas EB se despreciarán solamente los puntos que aparezcan por encima de la tendencia media a más de  $3\sigma$  ya que por debajo tenemos información relativa a los *dips* de la binaria.

El resultado final será por un lado una curva de luz con su correspondiente línea de tendencia y por otro la llamada curva tipo *detrended* que representa la variación del flujo de fotones que llegan a la CCD del telescopio con respecto a la línea de tendencia frente al tiempo de observación de la campaña. De esta forma se consigue eliminar tendencias indeseadas con el fin de pasar al siguiente punto relativo a la obtención de los períodos característicos de variabilidad.

---

<sup>6</sup><https://pypi.org/project/wotan/>

### 2.2.3. Periodogramas

El estudio de la variabilidad de una estrella requiere del uso de herramientas matemáticas de corte estadístico con el fin de encontrar patrones de periodicidad en las curvas de luz de una estrella determinada. Una de estas herramientas consiste en los periodogramas cuyo nombre dice bastante con respecto a su cometido. La función principal de esta herramienta es la búsqueda de patrones de repetición en funciones continuas de datos, asignando una probabilidad que es mayor cuanto más adecuado sea el ajuste en período. Por ejemplo si una señal variable tiene una periodicidad de 3 en unas unidades arbitrarias de tiempo, un periodograma de esta señal nos mostrará un máximo claro en la posición 3. Sin embargo, una señal de este tipo también tendrá periodicidad en 6, 9, 12 etc, es decir todos los múltiplos de 3 quedarán registrados en el periodograma. A estos picos se los conoce como armónicos ya que realmente no muestran períodos de diferente naturaleza sino el mismo período repetido de manera múltiple, afortunadamente la probabilidad en estos casos desciende a medida que aumentamos en esta escala, véase **Figura 2.4** donde el periodograma de abajo muestra este comportamiento.

En el caso que nos ocupa se usarán dos clases de periodogramas uno para las estrellas pulsantes y de variabilidad asociada a rotación y otro para los sistemas EB. El primero de ellos requiere del paquete `pyastronomy`<sup>7</sup> cuyo nombre es `GLS`<sup>8</sup> y el segundo requerirá del paquete `astropy`<sup>9</sup> y su nombre es `BLS`<sup>10</sup>. Es necesario implementar dos tipos de periodogramas debido a las diferentes características que existen entre las curvas de luz de estrellas pulsantes y de rotación respecto a las EBs. Para las primeras el periodograma `GLS` (*Global Lomb-Scargle*) funciona de manera adecuada para variaciones de señal continuas sin importar la frecuencia de éstas. Sin embargo, para procesos en los que aparecen *dips* debidos a EB o tránsitos de exoplanetas es más conveniente usar el periodograma `BLS` (*Box Least Squares*) ya que está pensado para la detección de estos fenómenos. Una explicación más detallada puede ser encontrada en [Kovács et al. 2002, \[13\]](#) para `BLS` y [Zechmeister et al. 2009, \[27\]](#) para `GLS`. En ambos casos se debe de usar la curva *detrended* y no la propia curva de luz ya que en caso contrario aparecerán reflejados en los periodogramas los periodos correspondientes a las tendencias extrínsecas a la física de las estrellas, pudiendo incluso llegar a contaminar el resultado final hasta tal punto de sacar conclusiones absurdas. Tanto en `GLS` como en `BLS` se requiere un rango de frecuencias y períodos adecuado para llevar a cabo la creación de sendos periodogramas. En el caso de las estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti se espera que las oscilaciones tengan una frecuencia alta, del orden de  $f \sim 4 - 15$  ciclos/día para el modo principal, es por ello que se impone la condición

---

<sup>7</sup><https://pyastronomy.readthedocs.io/en/latest/>

<sup>8</sup><https://pyastronomy.readthedocs.io/en/latest/pyTimingDoc/pyPeriodDoc/gls.html>

<sup>9</sup><https://www.astropy.org/>

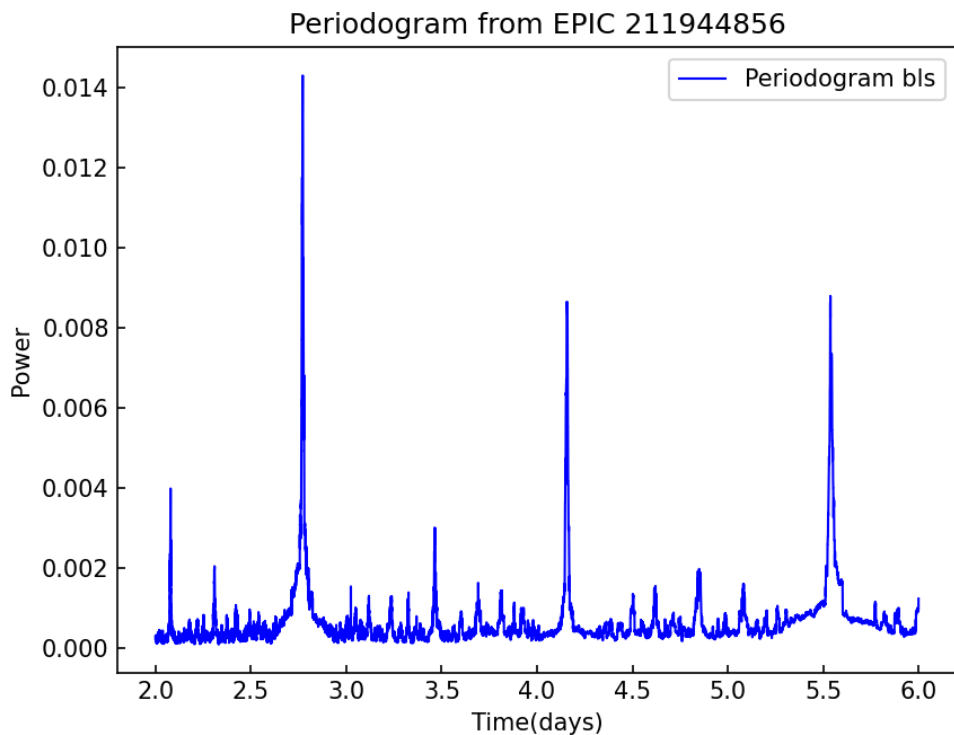
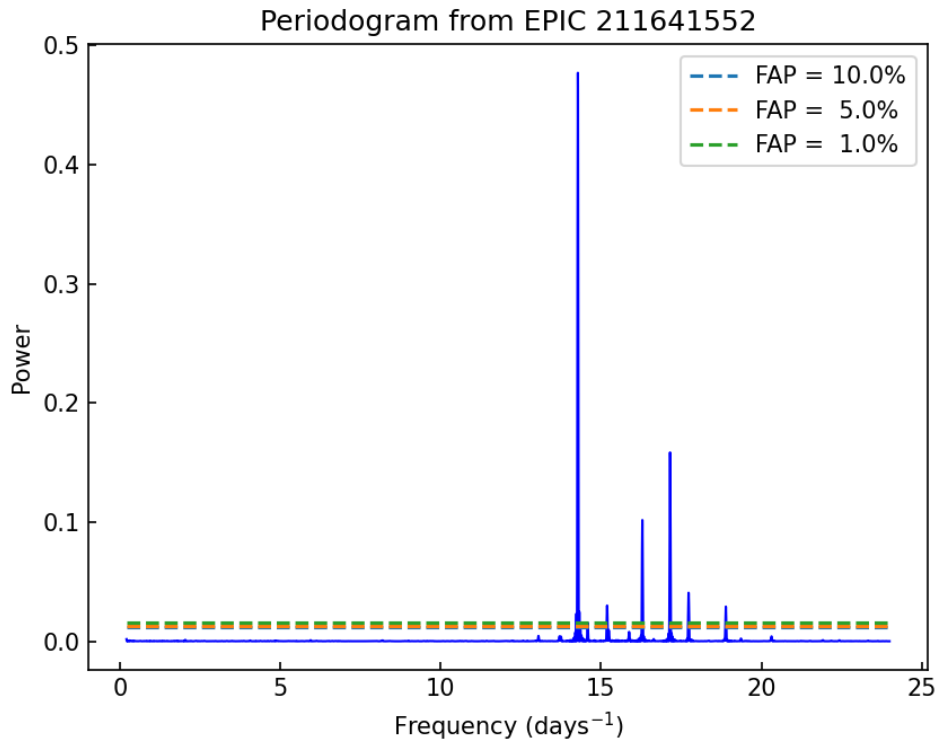
<sup>10</sup><https://docs.astropy.org/en/stable/timeseries/bls.html>

general de mínimo de frecuencia 0,1 ciclos/día y máximo de frecuencia 24 ciclos/día (períodos de oscilación de 0,04 días a 10 días) ya que se desean encontrar diferentes modos de oscilación. A pesar de este intervalo de frecuencias esperado no es descabellado pensar que alguna de las estrellas pulsantes de este tipo se salgan de estos requerimientos por lo que en esos casos habrá que hacer un estudio individual. Sucederá algo similar para el periodograma de las EBs, el BLS. En este caso el intervalo temporal no se define en forma de frecuencias sino en formato de períodos directamente. En los sistemas EBs existe un intervalo de períodos orbitales que depende del tipo de sistema EB que tengamos tal y como se explicó en el capítulo anterior, por ello se pondrá un intervalo amplio de 0,3 a 34 días con una resolución de muestreo de 0,15 de manera general. Sin embargo, en la mayoría de sistemas EBs existirán problemas a la hora de determinar el máximo pico en un periodograma BLS por lo que será necesario revisar dicha ventana temporal con el fin de solucionar este problema, hablaremos con más detalle de esto en la próxima sección. A modo de ejemplo se muestran dos periodogramas de cada uno de los dos tipos en la **Figura 2.4**.

#### 2.2.4. Curva en fase

La curva en fase de una fuente variable astronómica representa una poderosa herramienta para poder caracterizar y clasificar el tipo de variabilidad. La idea fundamental de este tipo de curvas es la siguiente: una vez obtenido el período característico de variabilidad se representa en un intervalo de tiempo normalizado, que generalmente va de 0 a 1, la evolución en brillo (ya sea en forma de magnitud aparente o flujo normalizado) de todos los distintos períodos producidos en un tiempo de observación dado. De esta forma se apilan en una misma gráfica la dependencia en brillo de todos los intervalos de período consiguiendo una dependencia general. Para poder llevar a cabo este método es necesario tener identificado de manera satisfactoria el período de variabilidad ya que de lo contrario la curva en fase no mostrará una variabilidad determinada, lo cual nos sirve como comprobación indirecta de la variabilidad estelar.

Aunque se ha mencionado que las curvas en fase se suelen representar en una escala normalizada de tiempos entre 0 y 1, en este caso se ha optado por hacer una representación entre -1 y 1 (dos intervalos de período) ya que estéticamente es conveniente y resulta más sencillo a la hora de observar el tipo de variabilidad, además de manera general se hará coincidir el mínimo de brillo con la fase 0. Por otro lado, es conveniente dibujar una línea de tendencia, de ahora en adelante *binning*, con el fin de determinar un comportamiento promedio entre todas las contribuciones de los diferentes intervalos temporales a lo largo del período de observación. La idea es la siguiente: para el intervalo temporal normalizado que va de -1 a 1 se discretiza el tiempo en un número entero de intervalos de los cuales se obtendrá la media de cada uno de ellos, valores que determinarán las coordenadas de las



**Figura 2.4:** Ejemplo de dos tipos de periodogramas para dos estrellas del catálogo creado en este trabajo. El de arriba corresponde a una estrella pulsante tipo Delta-Scuti (periodograma GLS) mientras que el de abajo corresponde a un sistema BE (periodograma BLS). En el primero de ellos se representan tres líneas discontinuas que representan una escala de probabilidades de falsa alarma al 10 %, 5 % y 1 %, en el segundo se puede apreciar un pico claro cercano a 2,8 días aproximadamente con un armónico en 5,6 días además de un pico en 4,2 días.

ordenadas de la curva del *binning*. Las coordenadas correspondientes a las abscisas se determinarán usando la media de todos valores comprendidos en cada uno de los intervalos de la discretización temporal. En el caso de las variables eclipsantes se deberá añadir una búsqueda de *dips* para obligar al *binning* a recogerlos lo mejor posible, esto traerá consigo un inconveniente en algunos casos ya que el *binning* pierde efectividad en los extremos de la gráfica, razón por la cual en esos casos no se hará coincidir el mínimo con la posición 0. En la **Figura 2.5** se muestran ejemplos obtenidos en nuestro catálogo.

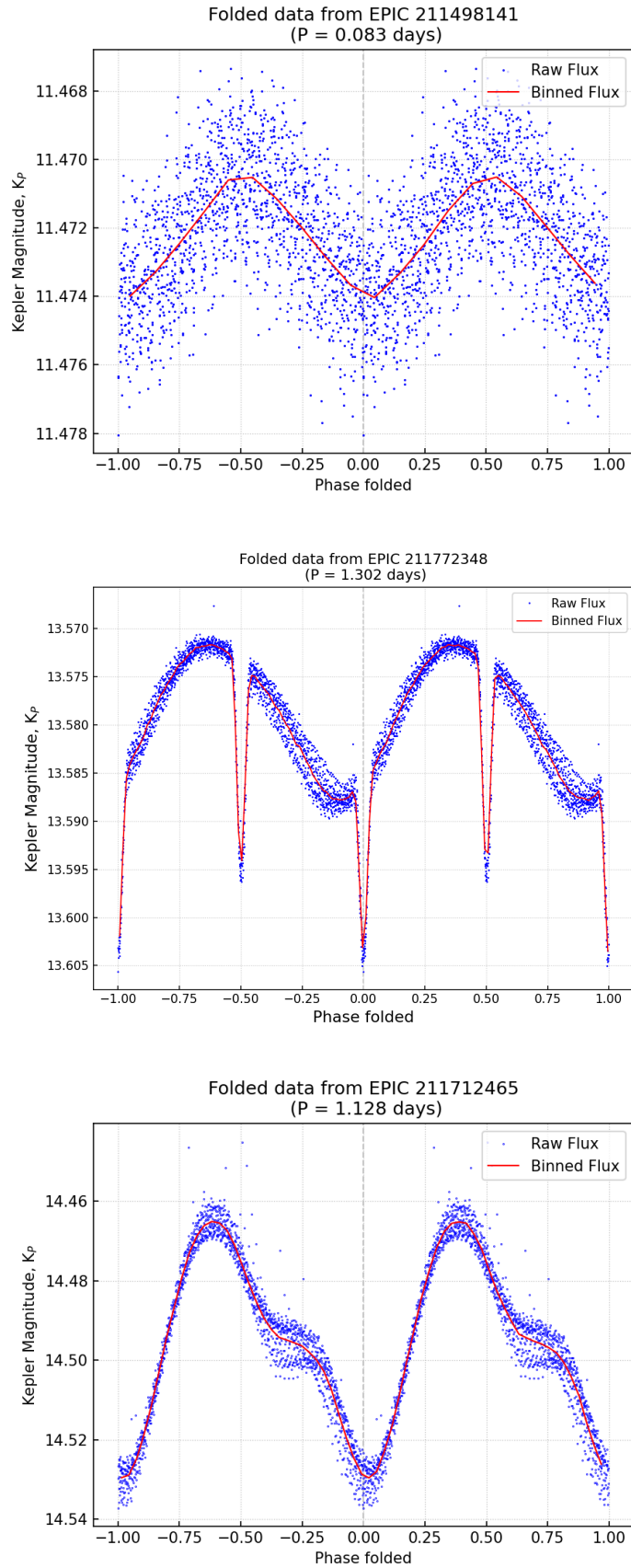
Las curvas en fase pueden representar flujos de brillo normalizados o bien las propias magnitudes aparentes de cada estrella, opción que suele ser más adecuada, razón por la que se optará por ella. La magnitud aparente medida en el telescopio Kepler,  $K_P$ , se relaciona con el flujo a través de la expresión<sup>11</sup>:

$$f_K = f_{12} \times 10^{-\frac{2}{5}(K_P-12)} \Leftrightarrow K_P = -\frac{5}{2} \left( \log f_K - \log f_{12} - \frac{24}{5} \right) \quad (2.1)$$

siendo  $f_K$  el flujo expresado en electrones/s y  $f_{12}$  el flujo correspondiente a una magnitud aparente de  $K_P = 12$  cuyo valor es  $f_{12} = 1,74 \times 10^5$  electrones/s. Aplicando esto y una inversión del eje de ordenadas, ya que las magnitudes aparentes (y absolutas) son escalas logarítmicas tales que más brillo implica magnitudes más negativas, obtenemos las curvas en fase expresadas en magnitudes  $K_P$ .

---

<sup>11</sup><https://astrobase.readthedocs.io/en/latest/astrobase.astrokep.html>



**Figura 2.5:** Ejemplo de tres curvas en fase para tres estrellas de nuestro catálogo, la primera una pulsante tipo Delta-Scuti (EPIC 211498141,  $K_P = 11,627$ ,  $P = 0,083$  días), la segunda una EB (EPIC 211772348,  $K_P = 13,731$ ,  $P = 1,308$  días) y la tercera una estrella con variabilidad debida a su rotación (EPIC 211712465,  $K_P = 14,803$ ,  $P = 1,128$  días). Los puntos azules representan la curva en fase y la línea roja el *binning*.





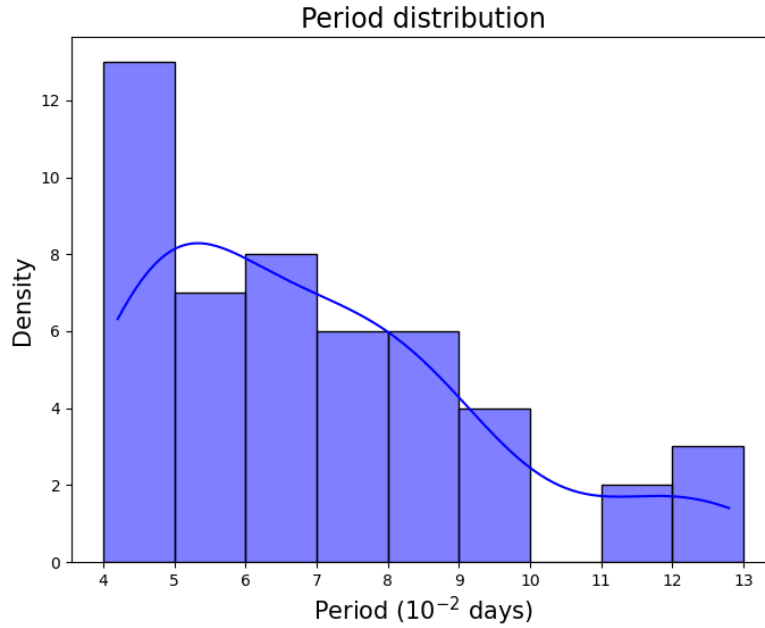
## Capítulo 3

# Resultados

Descrito el método empleado para obtener por un lado la clasificación de las variables inéditas descubiertas por la colaboración K2-OjOS y por otro la obtención del período de variabilidad de las mismas, es momento de presentar los resultados obtenidos. Durante esta sección se mostrará el catálogo final de estrellas previamente analizadas en la colaboración descubiertas por la colaboración K2-OjOS compatibles con alguna de las variabilidades descritas en el capítulo anterior, esta clasificación tenderá a ser lo más rigurosa posible en relación a los resultados obtenidos, pudiendo por ejemplo, llegar a catalogar los diferentes tipos de sistemas EB en función de la distancia mínima entre estrellas. No obstante, existirán ciertas limitaciones a la hora de clasificar estrellas pulsantes debido a la posibilidad de confusión entre unos tipo y otros como ya se mencionó en el primer capítulo. Por ello se insiste en la idea de que las estrellas que se van a presentar tienen una fotometría clara con uno de los diferentes tipos de variabilidad, no obstante esto no nos permite descartar posibles errores de clasificación.

### 3.1. Estrellas pulsantes

El primer tipo de estrellas clasificadas son aquellas con fotometría compatible con una estrella pulsante tipo Delta-Scuti. Como se comentó en el primer capítulo, la clasificación de una estrella pulsante de tipo Delta-Scuti puede llegar a ser incorrecta desde un punto de vista técnico. Sin embargo, en esta investigación solamente se tienen datos fotométricos del telescopio Kepler por lo que clasificar los distintos tipos de pulsaciones de estrellas con períodos de oscilación que rondan los 0,04 a 0,2 días es una tarea que requiere de una investigación adicional, por ejemplo estudios de tipo espectroscópico. Por ello cualquier estrella compatible con una variabilidad tipo Delta-Scuti será clasificada como tal.



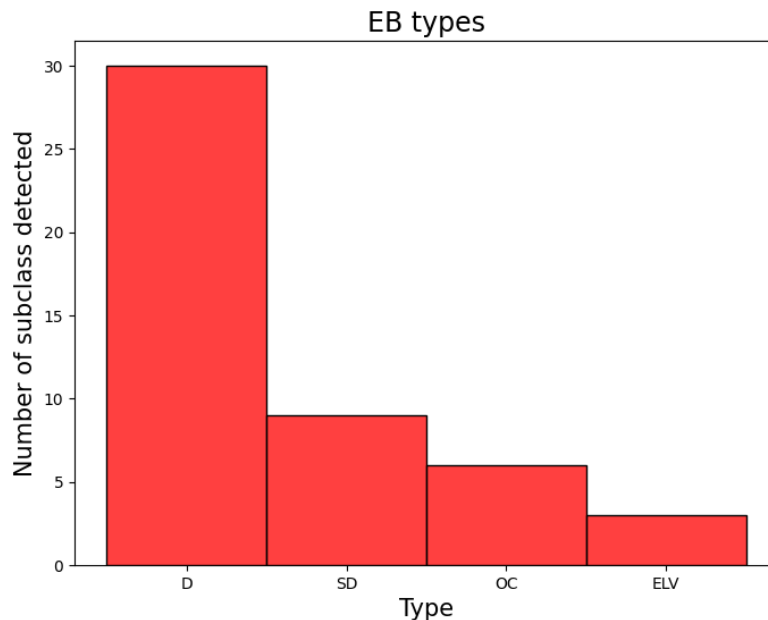
**Figura 3.1:** Histograma que muestran la distribución de períodos de oscilación del conjunto de estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti obtenidas en la colaboración K2OjOS y disponibles en el catálogo del Apéndice A.

Tenida en cuenta esta consideración, podemos pasar a comentar los resultados obtenidos con respecto a los períodos de oscilación. El análisis computacional de las estrellas previamente clasificadas como Delta-Scuti revelan un total de 50 estrellas de este tipo lo que significa que se ha detectado una estrella mal clasificada<sup>1</sup>. Aunque no es posible particularizar en diferentes clasificaciones alternativas a las estrellas Delta-Scuti, sí que es posible la determinación del período de oscilación principal de cada estrella, entendido éste como el valor más probable detectado por el periodograma GLS de cada una. El catálogo de este tipo de estrellas puede ser visualizado en [Tabla A.1](#). Se observa como los períodos de oscilación de cada estrella van desde  $P = 0,042$  días hasta los  $P = 0,126$  días lo cual está de acuerdo en orden de magnitud de los períodos de oscilación principales de este tipo de estrellas, véase el histograma [Figura 3.1](#) para observar la distribución de estos períodos. Hay que recordar que este período representa solamente la oscilación primaria de la estrella (la oscilación más rápida en tiempo y más probable en el periodograma) sin embargo, existen otra serie de oscilaciones acopladas con períodos mayores que los obtenidos anteriormente que pueden también ser obtenidos a partir de los respectivos periodogramas de cada estrella. Esta información resulta ser valiosa si lo que se desea es hacer estudios de astrosismología, de hecho estrellas de este tipo son muy codiciadas en lo que a esta línea de investigación se refiere. Bajo la astrosismología es posible estudiar el interior de las estrellas, la distribución en masa de la misma o incluso su metalicidad.

<sup>1</sup>Concretamente la estrella correspondiente al EPIC 211373830 que refleja una contaminación por parte de la estrella correspondiente al EPIC 211373778. La razón de esta consideración se resume en el mayor brillo de la segunda frente a la primera.

### 3.2. Sistemas estelares EB

El siguiente tipo de estrellas clasificadas son los sistemas estelares de tipo EB. La fotometría recogida por la CCD del telescopio Kepler junto al análisis computacional permiten la identificación de los candidatos compatibles con una variabilidad tipo EB además de clasificar cada sistema en uno de los cuatro tipos distintos de EB según la distancia mínima existente entre las estrellas del sistema. Tal y como se sigue en [Andrej et al. 2011, \[21\]](#) se hará la clasificación de los sistemas EB en *Detached* (D), *Semi-Detached* (SD), *Overcontact* (OC) y *Ellipsoidal variable class* (ELV). En la [Tabla A.2](#) se muestra el catálogo obtenido tras el análisis computacional de los datos fotométricos y en la [Figura 3.2](#) la distribución en población de los diferentes subgrupos de EB propuestos.



**Figura 3.2:** Histograma que muestra la distribución de los diferentes tipos de EB clasificados en el catálogo.

Los resultados muestran una amplia variedad de valores en cuanto a los períodos orbitales se refiere desde un período de  $P = 0,158$  días para el sistema EPIC 211306826 hasta  $P = 40,024$  días para EPIC 211496404, muestra de la diversidad existente en los sistemas EBs. Sin embargo, la diversidad no implica igualdad en las poblaciones de cada tipo de sistema, así pues se tiene un total de 30 EBs de tipo *Detached* de los cuales 15 presentan una variabilidad extra debido a la rotación de alguna o todas las estrellas del sistema. Por otro lado las EBs pertenecientes al grupo de las *Semi-Detached* ascienden a un total de 9 de las cuales 4 presentan variabilidad debido a rotación de alguna de sus estrellas. El grupo de *Overcontact* cuenta con un total de 6 mientras que las *Ellipsoidal variable class* ascienden a un total de 3. En total forman un conjunto de 48 estrellas de tipo EB. Si se consulta la clasificación

preliminar hecha en la sección 2.1 se observa que ahora hay once estrellas menos. Una de ellas, la correspondiente al EPIC 212012030, se catalogó visualmente en la base de datos Vanderburg con la mala suerte de que en la campaña 18 no se observan los dos *dips* característicos de los eclipses debido a un período orbital cercano al tiempo de observación<sup>2</sup>, por otro lado las 10 restantes presentaban indicios de estrellas pulsantes pero no demasiado sólidos como ser clasificadas como tal, por lo que se optó por agruparlas en la sección de estrellas ambiguas (Tabla A.5) de la cual hablaremos en la última sección del capítulo.

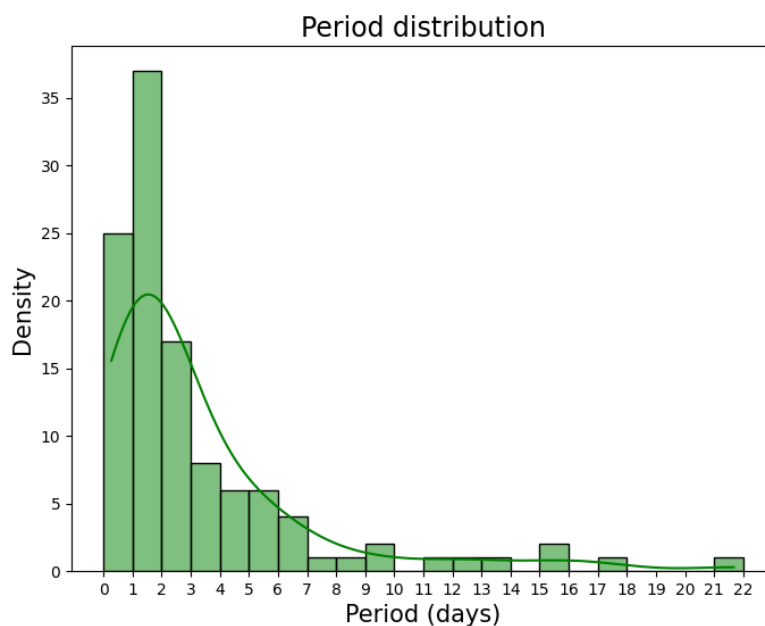
### 3.3. Variabilidad debida a rotaciones estelares

En lo que se refiere a las estrellas con variabilidad debida a fenómenos de rotación en la propia estrellas, la clasificación preliminar había determinado un total de 357 candidatos en este grupo. El criterio seguido para esta clasificación ya fue explicado en la sección anterior, no obstante es conveniente mencionar que dicho método trae consigo un cierto grado de ineficacia ya que cualquier tipo de variabilidad con ligera tendencia a presentar un comportamiento periódico será introducida en el grupo. Por ello el análisis computacional nos permitirá descartar todas aquellas estrellas que o bien son incompatibles con este tipo de variabilidad, o bien no podamos asegurar su pertenencia al grupo. Lo que se pretende explicar con esto es la consideración de una clasificación conservadora ya que debido al gran número de estrellas pertenecientes a este grupo (comparada con los otros grupos), el número final de estrellas en rotación seguirá suponiendo una cantidad relevante a efectos de discusión.

Para la determinación de los períodos típicos de variabilidad en estrellas de este grupo se empleará el periodograma usado para las pulsantes tipo Delta-Scuti, el GLS. Las variaciones periódicas en el brillo de estas estrellas puedan llegar a tener un amplio rango de valores, desde un par de horas hasta unos 150 días. Sin embargo, este período está restringido al tiempo de observación del propio telescopio que es del orden de 73 días por lo que para llegar a resolver una rotación en una curva de luz será necesario que el valor máximo del período no exceda la mitad del tiempo de observación, razón por la cual se ajustará una ventana para el *detrend* de  $wotan$  general del orden de 30 días. Una vez generadas las correspondientes gráficas para cada una de las 357 estrellas de este grupo se realiza una segunda inspección visual de las curvas de luz de nuestro catálogo. Se aplicará un criterio de selección en el cual si son observadas curvas con fuerte modulación sinusoidal, una amplitud que varíe en torno al 1 % de la magnitud aparente promedio de la estrella, se observen ciertas variaciones en la amplitud y/o se identifican fulguraciones (*flares*) en la curva de luz, se clasificarán como estrellas

---

<sup>2</sup>No obstante, se conoce que este sistema debe ser EB porque no solo aparece en la campaña 18 sino que también lo hace en la 5 donde en esta ocasión sí aparecen los dos *dips* necesarios para la determinación del período orbital.



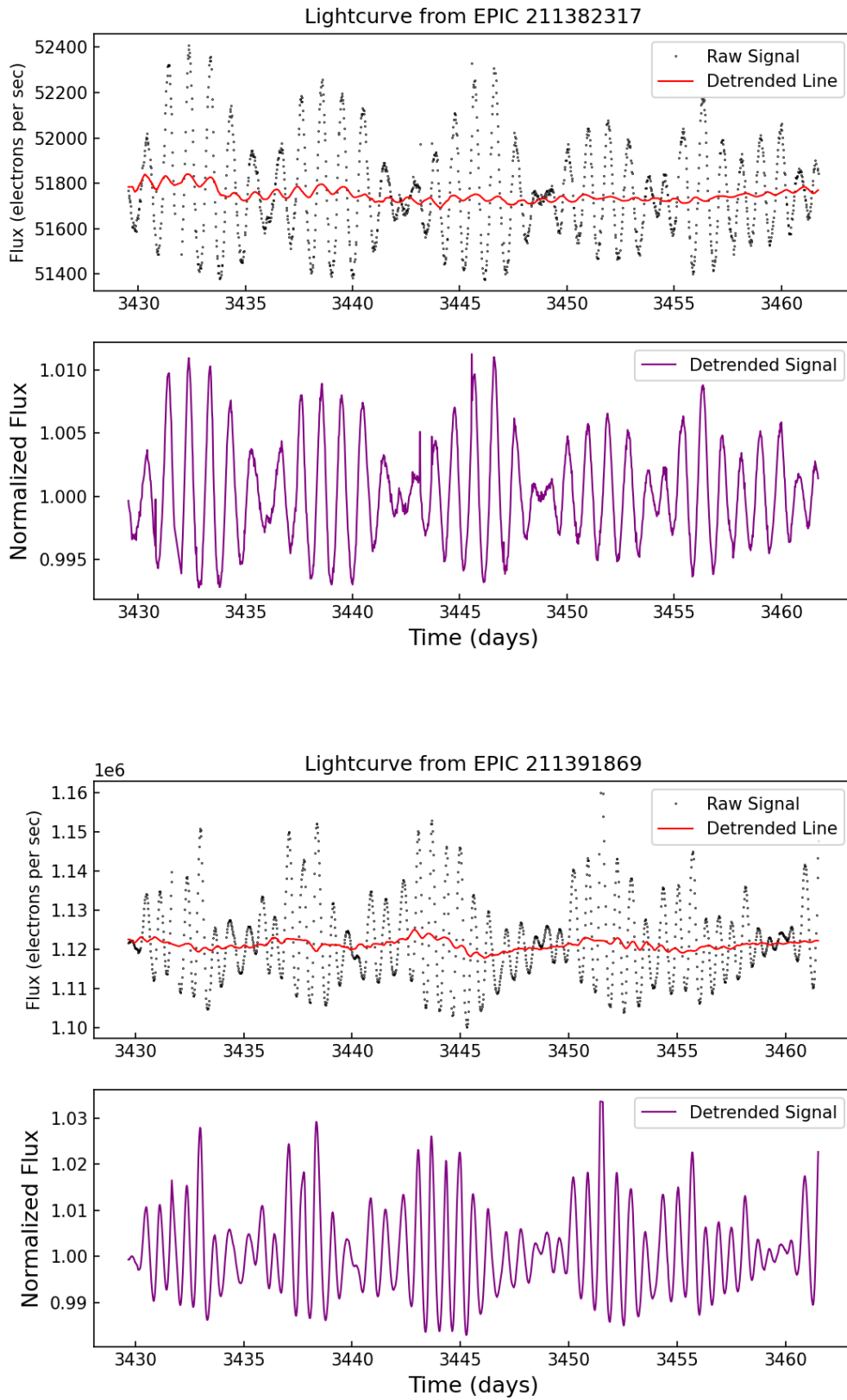
**Figura 3.3:** Distribución en períodos del conjunto de estrellas en rotación.

con variabilidad debida a la rotación estelar. De no observarse estas características, se descartarán como variaciones irregulares o incluso pulsaciones estelares ya que en este grupo se encontrarán más estrellas pulsantes de tipo Delta-Scuti.

Tras esta segunda inspección se reduce el número de estrellas compatibles con esta variabilidad a un total de 118 estrellas frente a las 357 que inicialmente se tenían lo que representa cerca del 33 % de éstas, véase [Tabla A.3](#) para consultar el catálogo. Además se lograron encontrar un total de 19 (poco más del 5 % del total) estrellas con variabilidad compatible con una estrella pulsante. Por otro lado se llegan a identificar un total de 24 estrellas que son compatibles con una rotación pero además con una pulsación y/o EB, sin poder discernir entre estos grupos, razón por la cual se clasificarán en el grupo de estrellas ambiguas de la [Tabla A.5](#). El resto de estrellas se clasificarán como irregulares debido a su propia irregularidad o a la imposibilidad de determinar un grado de confianza adecuado para poder ser clasificadas en alguno de los diferentes grupos de variabilidad estelar.

### 3.4. Posibles estrellas tipo Gamma-Doradus y otras señales variables

Las 19 estrellas compatibles con una variabilidad debida a estrellas pulsantes muestran un comportamiento similar al caso de las pulsantes de tipo Delta-Scuti, varios modos de oscilación seguidos de períodos de oscilación pequeños, del orden de  $4 - 12 \times 10^{-2}$  días. Sin embargo, en este caso la mayoría de estas estrellas poseen un período de oscilación superior a las Delta-Scuti, lo cual sugiere que en realidad pertenezcan a un grupo diferente de estrellas pulsantes conocido como Gamma-



**Figura 3.4:** Ejemplos de dos estrellas pulsantes que cumplen los requisitos de período de oscilación y presencia de múltiples modos de oscilación, EPIC 21138237 y EPIC 211391869 con  $K_P = 13,506$  y  $10,258$  respectivamente.

Doradus en honor a su estrella prototipo  $\gamma$ -Doradus en la constelación de su mismo nombre. El orden de períodos en este caso oscila entre 0,3-3 días por lo que si aplicamos el mismo procedimiento computacional que en el caso de las Delta-Scuti a estas 19 estrellas y se seleccionan aquéllas que sean compatibles con este rango de períodos se tiene un total de 15 pulsantes de este tipo. En la **Figura 3.4** se muestran dos curvas de luz como ejemplo y en la **Tabla A.4** los períodos de oscilación.



**Figura 3.5:** Resultados finales de la clasificación realizada en este trabajo.

En cuanto a las cuatro señales con variabilidad pulsante encontradas en la inspección de las estrellas en rotación se ha tomado la decisión de no realizar ninguna clasificación precipitada ya que en estos casos o bien el período de oscilación es muy cercano al límite superior de una pulsante Gamma-Doradus como es el caso de la estrella EPIC 211843702 con  $P = 0,301$  días o bien su propia curva de luz tiene visos de irregularidad como podría ser el caso de EPIC 211781646 con  $P \approx 0,477$  días.

Por último se tomó la decisión de crear un grupo de estrellas variables cuya clasificación resulta ambigua debido a la falta de existencia de factores determinantes en dicha clasificación y a la convivencia de factores comunes a varios grupos al mismo tiempo. Este grupo recibe el nombre de Estrellas Ambiguas, véase la **Tabla A.5**, y no debe confundirse con las estrellas clasificadas como Irregulares ya que éstas últimas son aquéllas en las que no existe variabilidad o bien la variabilidad resulta irregular y difícil de determinar para un estudio fotométrico como el que se presenta en este trabajo.





## Capítulo 4

# Discusión

En esta capítulo se hará una discusión relativa a los resultados obtenidos, principalmente se intentará comparar nuestros resultados con los resultados de otras investigaciones citadas en las Referencias además de proponer escenarios diferentes ante la ambigüedad existente en la clasificación de estrellas pulsantes. Por otro lado, se buscarán estrellas de nuestro catálogo pertenecientes a los cúmulos abiertos observados en las campañas 18, 16 y 5 de la misión extendida K2, M44 o cúmulo del Pesebre y M67. Esta búsqueda no solo se centrará en los candidatos de nuestro catálogo sino que se aplicará a todo el conjunto de estrellas de la colaboración K2OjOS, ya que existe la posibilidad de que estrellas catalogadas en publicaciones anteriores no hayan sido clasificadas como candidatas a estos cúmulos. Por último, será interesante explorar las relaciones período-luminosidad en estrellas pulsantes, ofreciendo una descripción de este fenómeno en Cefeidas y RR-Lyrae y comprobando si las estrellas Delta-Scuti de nuestro catálogo presentan alguna relación de este tipo.

### 4.1. Comparación entre diferentes catálogos

La reciente clasificación de los candidatos propuestos por K2OjOS aún no publicados además de la obtención de sus períodos característicos (de oscilación, orbitales o rotación), motiva una discusión de los mismos. En primer lugar se pueden comparar los resultados de este trabajo con resultados de otras publicaciones en las que se construye un catálogo similar al nuestro. Por otro lado es interesante ofrecer explicaciones a fenómenos observados en esta investigación, como la disminución en número de las estrellas en rotación conforme el período de rotación aumenta.

#### 4.1.1. Clasificación morfológica de EBs en diferentes publicaciones

Empezando por las EBs es posible hacer una comparación de los distintos tipos de poblaciones que se han obtenido en esta investigación con la publicación [Andrej et al. 2011, \[21\]](#). En nuestro caso los números en términos relativos son: 62,5% de sistemas D, 18,6% para los sistemas SD, 10,4% en

el caso de sistemas OC y por último un 6,3 % para el caso de ELV, véase [Tabla A.2](#). Mientras que en el catálogo hecho por [Andrej et al. 2011, \[21\]](#) (con un total de 1879 EBs) se obtienen unos valores relativos de: 52,3 % para D, 7,3 % para SD, 25,4 % para OC, 7,4 % para ELV y finalmente en torno a el 7,3 % del total no pudieron ser clasificadas en ninguno de los grupos.

Por otro lado, en el proyecto ASAS (*All Sky Automated Survey*) [[Paczynski et al. 2006, \[19\]](#)] se investigó la búsqueda y estudio de estrellas variables en una porción próxima a 3/4 partes del cielo observable desde la posición del Observatorio de Las Campanas (Chile). El proyecto ASAS consiguió detectar un total de 11.099 sistemas EBs cuyos comportamientos en sus respectivas curvas en fase permitía su clasificación en tres grupos *Eclipsing Contact Binaries* (EC, 5.384), *Eclipsing Semi Detached binaries* (ESD, 2.957) y *Eclipsing Detached binaries* (ED, 2.758) dando unas poblaciones relativas de 24,8 % para ED, 26,6 % para ESD y 48,6 % EC<sup>1</sup>.

También podemos poner como ejemplo la investigación de la Universidad de Nueva Gales del Sur (*University of New South Wales-UNSW*) [[Christiansen et al. 2008, \[7\]](#)] cuyo principal objetivo fue la detección de exoplanetas mediante el método del tránsito. En esta investigación no solo se tomó fotometría de tránsitos planetarios sino que varias estrellas variables fueron descubiertas, concretamente un total de 850 de las cuales 659 aún no habían sido catalogadas. En este conjunto de variables se detectaron 383 EBs con probabilidades del 37,1 % para sistemas tanto D como SD, 56,9 % para OC y un 6 % para ELV. Dado que la clasificación morfológica de una EB depende en buena medida de factores humanos, es totalmente posible una clasificación poco adecuada en este sentido. Aunque estemos convencidos de que confundir una Binaria Separada con una Binaria con Variaciones Elipsoidales resulta inconcebible desde un punto de vista visual, las fronteras entre una Binaria Separada y Semiseparada no están tan definidas, es cierto que no solo se dispone de la morfología de la curva en fase sino que el período orbital nos puede ayudar a realizar la clasificación, aún así esto no nos va a salvar de malinterpretar algunas de las señales fotométricas.

| Catálogo                                      | D (%) | SD (%) | OC (%) | ELV (%) | Sin Clasificar (%) |
|---|-------|--------|--------|---------|--------------------|
| En este catálogo                              | 62,5  | 18,6   | 10,4   | 6,3     | -                  |
| <a href="#">Andrej et al. 2011, [21]</a>      | 52,3  | 7,3    | 25,4   | 7,4     | 7,3                |
| <a href="#">Paczynski et al. 2006, [19]</a>   | 24,8  | 26,6   | 48,6   | -       | -                  |
| <a href="#">Christiansen et al. 2008, [7]</a> | 37,1* | -      | 56,9   | 6       | -                  |

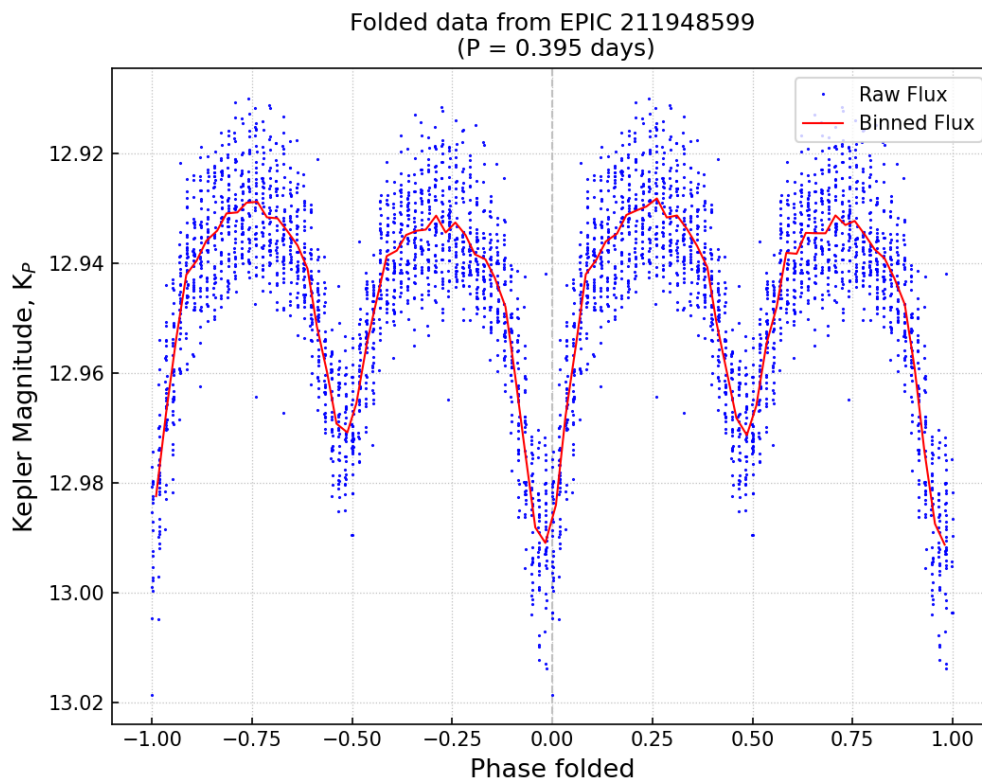
**Tabla 4.1:** Resumen numérico de las poblaciones relativas de cada artículo presentado en esta discusión junto a los resultados relativos a la colaboración K2oJOS. El símbolo \* significa que este valor también engloba el grupo SD.

<sup>1</sup>En este contexto los grupos de EBs obtenidos por [Paczynski et al. 2006](#) en el proyecto ASAS son totalmente análogos a los grupos Separadas (D), Semiseparadas (SD) y En contacto (OC) de nuestra clasificación.

Más allá de la simple comparación entre las clasificaciones realizadas por varias investigaciones, es interesante la determinación de combinaciones entre EBs y pulsaciones. De acuerdo a [J. Alfonso-Garzón et al. 2014, \[2\]](#) en torno al 70 % de la población estelar situada en nuestro vecindario galáctico se agrupa en sistemas binarios de los cuales una buena parte de ellos contienen estrellas pulsantes. Esta información suele pasar inadvertida a pesar de la influencia que puede ejercer la presencia de una estrella compañera en las pulsaciones de la pulsante. El descubrimiento de estos sistemas binarios es interesante desde el punto de vista de la astrosismología ya que permite la calibración de modelos basados en esta disciplina como se sugiere en el *preprint* [Joyce et al. 2021, \[10\]](#). Por otro lado la aplicación de la astrosismología en estos sistemas es una herramienta útil para determinar características fundamentales de un sistema binario como pueden ser los estudios de la excentricidad entre las órbitas del sistema o los intercambios de materia ([Liakos et al 2016, \[15\]](#)) ya que la aparición de estrellas pulsantes en sistemas binarios generalmente se observa en EBs de tipo Semiseparado o SD y en menor medida en OC o en Contacto. Una forma visual que sirve para detectar este tipo de EBs es observando la curva en fase del sistema, si en ella aparecen puntos ordenados de manera vertical a lo largo de la curva existe la posibilidad de que este efecto provenga de los modos de oscilación de la estrella o estrellas pulsantes. En nuestro catálogo se han detectado algunas EBs en las que aparece este patrón, en varios casos estos patrones pueden ser explicados por la baja magnitud aparente de la estrella ( $K_P > 13$ ) ya que en tal caso lo que puede estar sucediendo es la representación de un ruido, por ejemplo en EPIC 211496404 con  $P = 0,664$  días y  $K_P = 19,285$ . Sin embargo, en EPIC 211948599 con  $P = 0,395$  días y  $K_P = 12,945$ , cabría esta posibilidad, véase la [Figura 4.1](#).

#### 4.1.2. Clasificación de las estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti y Gamma-Doradus

En esta investigación se obtuvieron un total de 50 estrellas pulsantes de tipo Delta-Scuti y 15 de tipo Gamma-Doradus. La conveniencia de una clasificación de este tipo está justificada en la morfología de las curvas de luz ya que exhiben diferentes modos de oscilación y en el rango de períodos de oscilación encontrado para los modos principales, 0,04 – 0,15 días para pulsantes tipo Delta-Scuti y 0,3 – 3 días para las Gamma-Doradus. Así mismo en el capítulo de introducción teórica (capítulo 1) se comentó la posibilidad de confusión existente en la clasificación de estrellas pulsantes de tipo Delta-Scuti ya que el uso de fotometría no permite una clasificación totalmente eficaz entre los diferentes modelos de estrellas pulsantes existentes. La clasificación de las 15 Gamma-Doradus no está exenta de una serie de posibles confusiones, por ejemplo en [Balona et al. 2018, \[3\]](#) se sugiere que estrellas clasificadas como Gamma-Doradus pueden llegar a ser en realidad estrellas en rotación en las cuales se combinen modos de oscilación  $r$ , cuya naturaleza de simetría toroidal no debería generar variaciones de brillo, con una distribución esferoidal de la estrella debida a la aparición de fuerzas de Coriolis a causa de la propia rotación estelar. La combinación de estos factores genera perturbaciones



**Figura 4.1:** Curva en fase de un sistema EB (EPIC 211948599,  $K_P = 12,945$ ) con posibilidad de contener al menos una estrella pulsante.

en la temperatura superficial de la estrella lo que genera una variación en brillo compatible con la existencia de múltiples modos de oscilación.

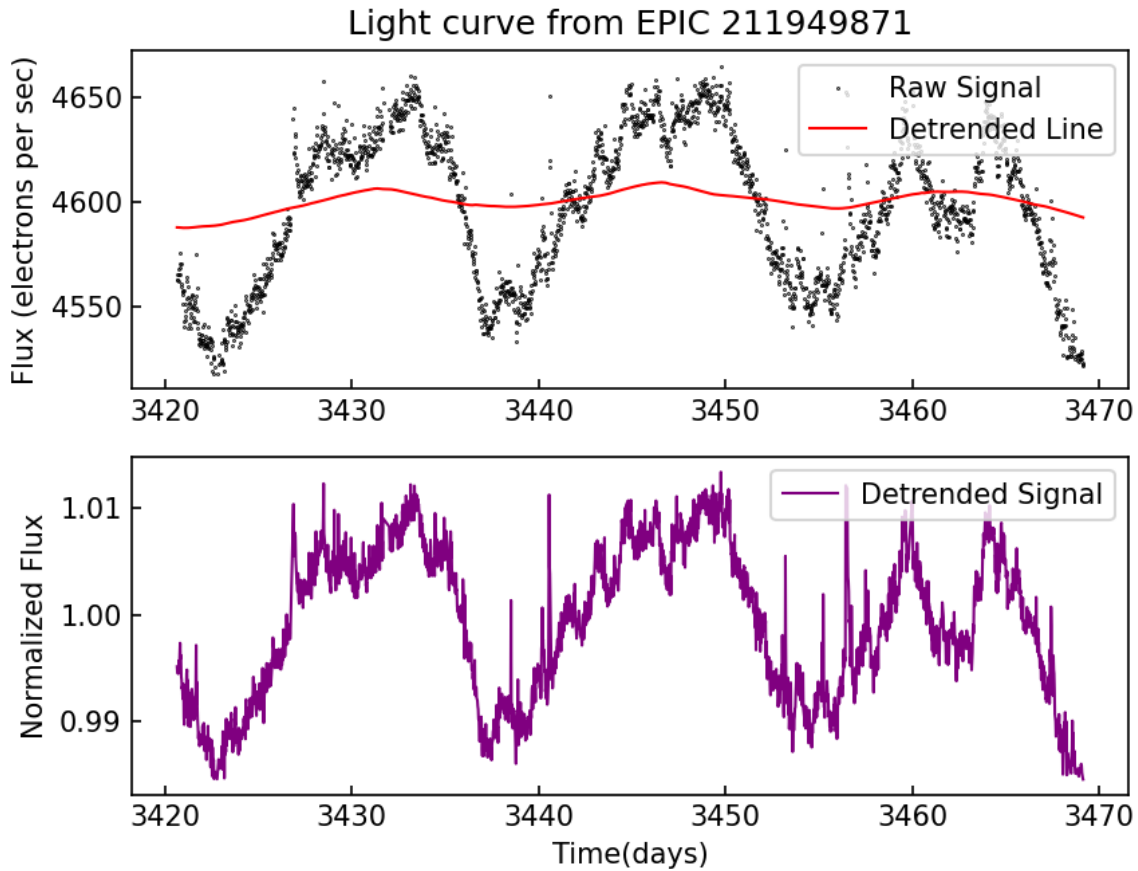
Por otro lado existe la posibilidad que estrellas con frecuencias altas de oscilación clasificadas como Delta-Scuti realmente sean sistemas híbridos entre este tipo de pulsación y la variedad Gamma-Doradus. Esta cuestión se discute también en [Balona et al. 2018, \[3\]](#) donde se explica la repentina aparición de este tipo de pulsantes híbridas tras la puesta en marcha de la misión Kepler. Generalmente la fotometría recopilada hasta la fecha procedía en su gran medida de observatorios situados en la superficie terrestre por lo que la atmósfera jugaba un papel fundamental en cuanto a la distorsión de estas señales. Es por ello que los primeros sistemas híbridos fueron descubiertos con características similares (en una región de inestabilidad estelar en el diagrama HR) en cuanto a la amplitud de sus oscilaciones. Con la puesta en marcha de la misión Kepler el número de estos sistemas comenzó a aumentar hasta el punto de convertirse en una norma más que en una excepción. En nuestro caso no se puede ofrecer un valor exacto del número de sistemas que presentan pulsaciones híbridas ya que sería necesario tener información espectroscópica para poder estudiar los diferentes modos de oscilación.

### 4.1.3. Interpretación de las estrellas en rotación

La distribución en períodos de la **Figura 3.3** muestra un claro predominio de los períodos de rotación comprendidos entre 0 y 2 días, tendiendo a disminuir en número conforme aumentamos el valor de esta magnitud. La principal discusión en este grupo de estrellas será entender si existe algún mecanismo físico o circunstancia que motive este comportamiento. En primer lugar se debe recordar que esta distribución no está mostrando todo el rango posible de períodos de rotación ya que el tiempo de observación de la campaña 18 fue de unos 73 días aproximadamente por lo que el máximo período alcanzable en la fotometría recogida por el Telescopio Espacial Kepler no puede sobrepasar la mitad de este tiempo. Por esta razón solo podemos sacar conclusiones relativas a esta distribución para un intervalo de períodos comprendido entre 0 y 30 días.

La disminución en la distribución de períodos puede ser explicada usando el concepto de bimodalidad. En [Reinhold et al. 2018, \[22\]](#) y [Reinhold et al. 2020, \[23\]](#) se comenta la existencia de dos poblaciones estelares diferentes detectadas en el Telescopio Espacial Kepler con períodos de rotación distintos. Por un lado las estrellas jóvenes con períodos de rotación cortos comparados con las estrellas de la población más vieja. Cuando hablamos en términos de estrellas jóvenes y viejas nos estamos refiriendo a estrellas que están transitando hacia la secuencia principal y que tienden a mostrar una mayor actividad magnética que las estrellas de este grupo, en el caso de estrellas viejas se entiende que éstas han abandonado la secuencia principal y están en una fase de gigante roja, lo cual explicaría la disminución en su período de giro simplemente acudiendo al principio de conservación del momento angular.

La forma en que la distribución disminuye en torno a un rango de períodos depende también de la clase espectral a la que pertenezca la estrella, por ejemplo estrellas frías como las de tipo M presentan este mínimo en torno a 25 días mientras que estrellas más calientes que éstas (de tipo K o G) presentan este mínimo en períodos algo más cortos entre 15 a 25 días. Este desplazamiento en el *gap* de períodos de rotación se puede explicar a través de la actividad magnética de las diferentes poblaciones estelares en función de su clase espectral ya que las enanas rojas, pertenecientes a la clase M, presentan mayor actividad magnética que estrellas pertenecientes a las clases K o G. Sobre este punto se apoya la girocronología como disciplina dentro de la astrofísica. La determinación de la edad de una estrella a partir de este método nos ayuda a comprender y estudiar la edad de cúmulos abiertos como M44 y M67 ya que una de las características que tienen en común las estrellas pertenecientes a cúmulos de este tipo es una distribución en edad común a todas ellas.



**Figura 4.2:** Curva de luz de la estrella en rotación EPIC 211949871 ( $K_P = 16,206$  y  $P = 2,161$  días) donde se observan aumentos súbitos en la luminosidad a lo largo del tiempo de observación de la campaña 18.

Relacionado con la rotación y actividad magnética de las estrellas podemos destacar no solo las manchas sino las fulguraciones más conocidas quizás por su nombre en inglés *flares*. Este fenómeno es producido cuando el propio campo magnético interior producido por el efecto dinamo en la rotación estelar interactúa con la atmósfera estelar. Esto trae consigo una emisión de energía en forma de radiación electromagnética de diferentes longitudes de onda desde rayos X, UV y visibles además de partículas aceleradas. Esta radiación puede llegar a tener una intensidad del mismo orden de magnitud que el propio brillo estelar por lo que es capaz de observarse en la fotometría de un telescopio de gran precisión como fue el Telescopio Espacial Kelper, véase en [Figura 4.2](#) y [Tabla A.3](#).

## 4.2. Cúmulos abiertos M44 y M67

Los cúmulos abiertos M44 y M67 fueron observados por la misión extendida K2 en las campañas 5, 16 y 18 de las cuales se han detectados nuevas estrellas variables en diferentes investigaciones, por poner algún ejemplo se considera [Nardiello et al. 2015, \[18\]](#) y [Nardiello et al. 2016 \(Paper III\), \[17\]](#)

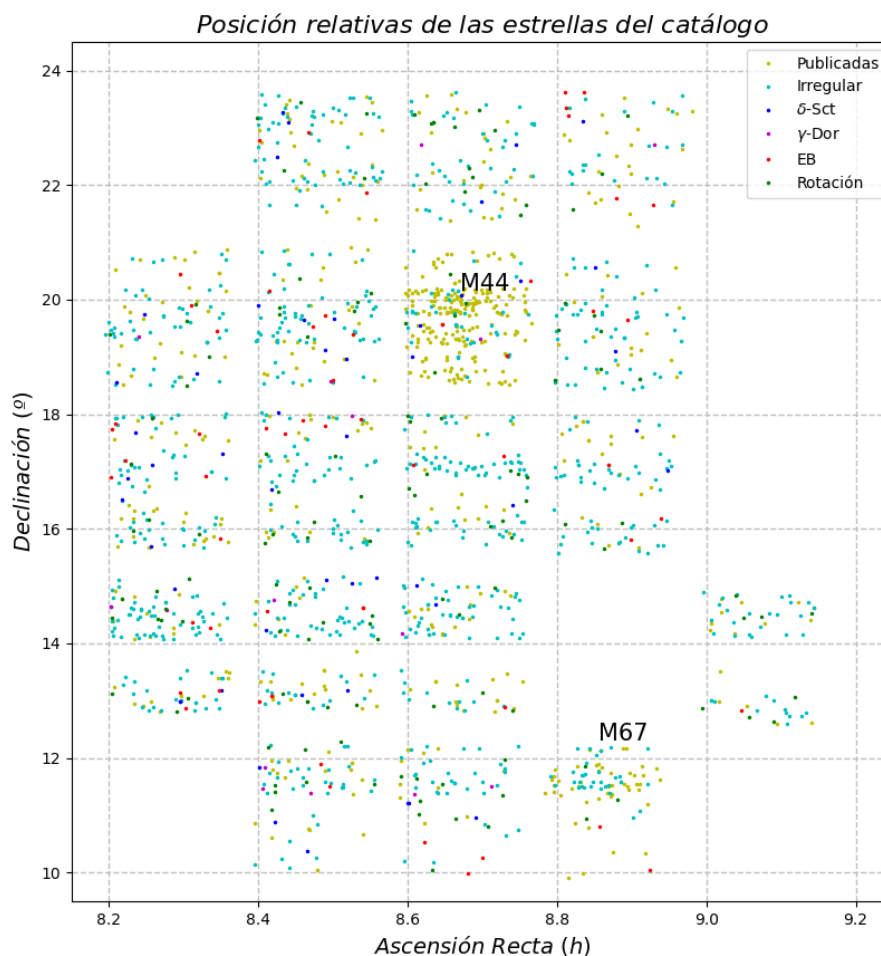
para el cúmulo M67 o [Libralato et al. 2016, \[16\]](#) para M44. La determinación de estrellas variables en cúmulos abiertos tiene una relevante implicación en lo que respecta al estudio de la edad, metalicidad y formación de dichos cúmulos. Los pasos a seguir para la identificación de nuevas estrellas pertenecientes a un cúmulo son tres.

El primero será una búsqueda aplicando un criterio de distancia. La misión *Gaia* usó el método del paralaje para la determinación de distancias a las diferentes estrellas obtenidas en cada campaña de la misión extendida K2. En lo que respecta a los cúmulos M44 y M67 es sabido que las distancias a las que se encuentran de la Tierra rondan los  $d \sim 173,5 \pm 14,5$  pc para el primero ([Khalaj et al. 2013, \[12\]](#), [Kraus et al. 2007, \[14\]](#) y [Pinfield et al. 2003, \[20\]](#)) y  $d \sim 890 \pm 90$  pc para el segundo ([Manan Agarwal et al. 2021, \[1\]](#) y [Yakut et al. 2009, \[26\]](#)), por lo que se deben buscar candidatos que entren dentro de estos respectivos rangos. El segundo criterio consiste simplemente en encontrar estrellas compatibles con la posición de cada cúmulo, en este caso M44 y M64 están situados en torno a  $8^h 40,1^{min}$  ( $8,668 h$ ) de ascensión recta y  $19^\circ 59'$  de declinación ( $19,983^\circ$ ) para el primero y  $8^h 51^{min}$  ( $8,855h$ ) de ascensión recta y  $11^\circ 48'$  de declinación ( $11,967^\circ$ ) para el segundo, usando para ello el sistema de coordenadas ecuatorial absoluto<sup>2</sup>.

El último criterio es el criterio de velocidad, los cúmulos abiertos son agrupaciones del orden de  $10^2 - 10^3$  estrellas gravitacionalmente ligadas. Esto no significa que posean una simetría esférica como sería el caso de los cúmulos globulares los cuales están mucho más poblados que los cúmulos abiertos (del orden de  $10^4 - 10^6$  estrellas). Debido a esta interacción gravitatoria, las estrellas de un cúmulo abierto mantienen una velocidad similar tanto en módulo como en dirección. La forma de medir esta velocidad requiere de la determinación de tres magnitudes. La primera de ellas es la componente de la velocidad de una estrella en la dirección radial Tierra-Estrella, habitualmente denotada por  $v_r$ . Esta componente se obtiene usando espectroscopía midiendo el grado de desplazamiento de las líneas espectrales de cada estrella. La misión *Gaia* solamente consiguió datos de esta variable para estrellas con  $K_p < 13$ , razón por la cual no disponemos de este valor para todas las estrellas de la colaboración K2OjOS. Por otro lado se tiene la componente de la velocidad tangente a la bóveda celeste, esta componente se expresa a su vez en dos componentes que dependerán de la base de vectores que estemos usando, si por ejemplo se emplea un sistema de coordenadas ecuatoriales, como es el caso, entonces tendremos una componente en la dirección de la ascensión recta y otra en la dirección de la declinación. Estas componentes son conocidas como movimientos propios,  $\mu_\alpha$  y  $\mu_\delta$  para la ascen-

---

<sup>2</sup>El sistema de coordenadas ecuatoriales absolutas se define a partir del ecuador celeste donde la coordenada denominada ascensión recta representa el ángulo formado sobre el ecuador entre una posición en la bóveda celeste y el punto vernal (posición de intersección entre la eclíptica y el ecuador celeste en el equinoccio de primavera), generalmente se suele medir en horas. La declinación sería el ángulo que forma una posición en la bóveda celeste con respecto al ecuador celeste, se mide en grados siendo  $0^\circ$  el propio ecuador y  $\pm 90^\circ$  el polo norte y sur celestes respectivamente.



**Figura 4.3:** Posición relativa de las estrellas analizadas por K2OjOS clasificadas en los distintos grupos de variabilidad: Pulsantes tipo Delta-Scuti y Gamma-Doradus, Binarias Eclipsantes, Rotaciones, Irregulares junto a las estrellas ya publicadas. Se observa una densidad de estrellas publicadas superior en las regiones de los cúmulos M44 y M67 por el interés que estas regiones presenta.

sión recta y la declinación respectivamente, y suelen expresarse en unidades de miliarcosegundos por año (mas/yr). Ya que no todas las estrellas del catálogo tendrán magnitudes compatibles con el conocimiento de la velocidad radial, no se usará esta componente para determinar si una estrella candidata pertenece o no al cúmulo. Aplicar el criterio de velocidades sin usar la componente radial no presenta graves problemas ya que la velocidad de las estrellas debe tener similar velocidad en módulo y dirección por lo que si ya se ha aplicado el primer y segundo criterio la probabilidad de que la velocidad de la estrella coincida con la velocidad del cúmulo pero su componente radial vaya en el sentido opuesto es muy baja, no obstante no podemos descartar que esto no pueda ocurrir.

Antes de comenzar con la determinación de las estrellas candidatas de los cúmulos M44 y M67 es interesante obtener la posición de todas las estrellas analizadas por K2OjOS en un diagrama de coor-



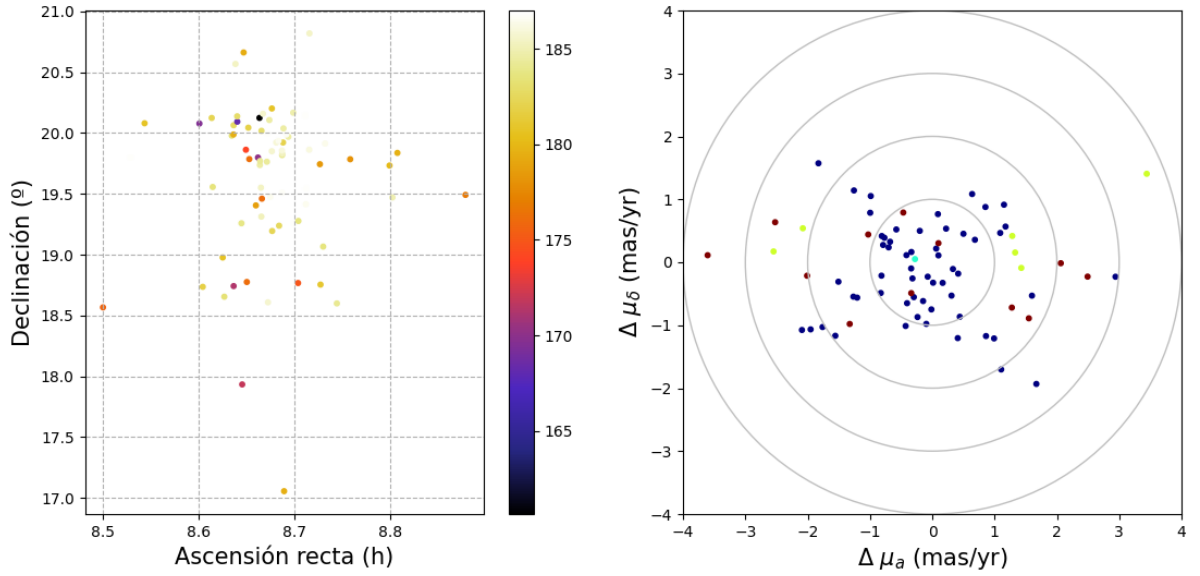
denadas ecuatoriales de la región observada durante la campaña 18 de la misión extendida K2, dicha representación puede ser observada en la **Figura 4.3** donde se han destacado por código de colores las estrellas variables descubiertas en esta investigación en función de los distintos tipo de variabilidad. Así mismo también se destacan los canales en los que se encuentran los cúmulos abiertos de nuestro interés.

#### 4.2.1. Determinación de estrellas candidatas del cúmulo M44 (Pesebre)

Los criterios de búsqueda de estrellas candidatas a pertenecer al cúmulo M44 son los siguientes, en primer lugar se usará la distancia estimada al cúmulo  $d = 173,5 \pm 14,5$  pc como criterio preliminar seguido de una búsqueda en torno a sus coordenadas,  $8^h 40,1^{min}$  ( $8,668 h$ ) de ascensión recta y  $19^\circ 59'$  de declinación ( $19,983^\circ$ ), con una apertura angular de  $3.5^\circ$  tal y como se sugiere en [Khalaj et al. 2013, \[12\]](#). El cúmulo M44 tiene unos movimientos propios de  $\mu_\alpha = -35,99 \pm 0,14$  mas/yr y  $\mu_\delta = -12,92 \pm 0,14$  mas/yr ([Wang et al. 2014, \[25\]](#)), por lo que la búsqueda se centrará en estos valores con una diferencia máxima entre ellos y los movimientos propios de las estrellas candidatas no superior al 15 %.

Al comienzo de este trabajo se comentó el proceso mediante el cual se seleccionaban estrellas analizadas por K2OjOS que aún no estuviesen catalogadas ni publicadas en ningún artículo, el principal motivo de esto era la creación de un catálogo de estrellas variables que represente una aportación innovadora al campo de la astrofísica observacional. Sin embargo, en este caso será interesante analizar no solo las estrellas pertenecientes a M44 de nuestro catálogo sino también las estrellas ya catalogadas previamente. La motivación de este hecho recae en la posibilidad de que alguna de estas estrellas haya sido estudiada pero no haya sido situada en este cúmulo con anterioridad. Con el fin de plasmar de manera gráfica las estrellas candidatas, usaremos modelos gráficos como en [Khalaj et al. 2013, \[12\]](#) para representar por un lado la distribución en posición de las diferentes estrellas que satisfacen los criterios de selección y por otro la distribución de los movimientos propios de cada estrella perteneciente al cúmulo.

Aplicando estas representaciones gráficas a las estrellas de K2OjOS se obtiene la **Figura 4.4** donde se ha optado por representar la distribución de momentos propios centrada en cero, esto significa que cuanto más se aproximen  $\Delta\mu_\alpha$  y  $\Delta\mu_\delta$  a la posición (0,0) más cercanos estarán los candidatos al movimiento propio del cúmulo. En este caso aplicando los criterios de búsqueda anteriormente citados se obtuvieron un total de 75 estrellas candidatas, [Tablas B.1, B.2 y B.3](#).

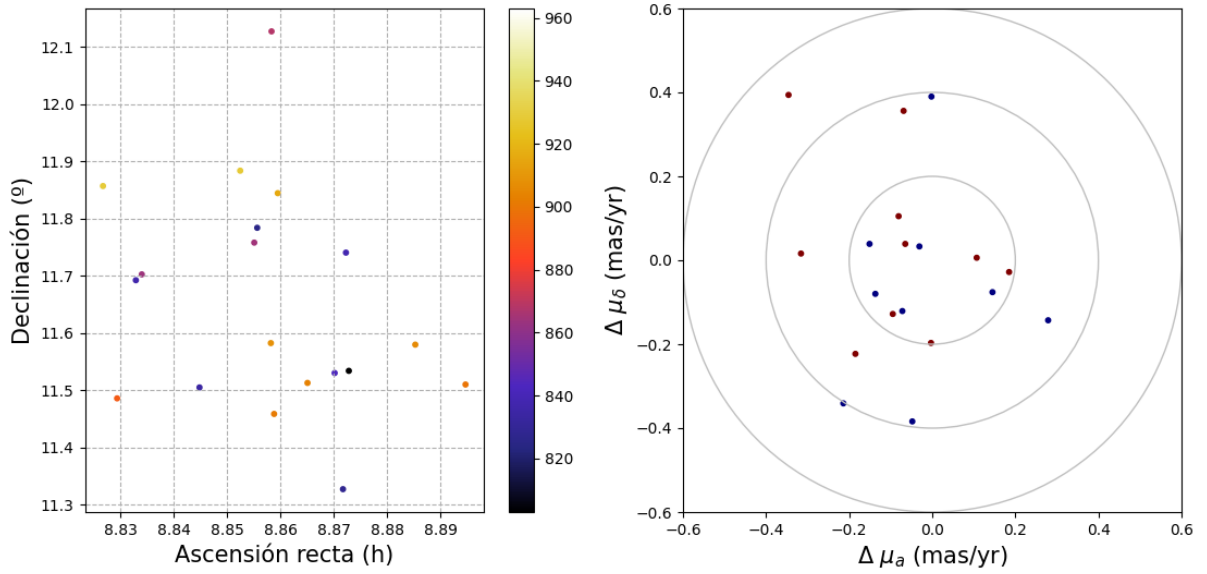


**Figura 4.4:** A la izquierda distribución en posición de las estrellas analizadas por K2OjOS pertenecientes a M44 junto a una representación de la distancia expresada en pársecs en código de colores. A la derecha la distribución en movimientos propios centrados en cero junto a líneas de idéntico valor de  $|\Delta\mu|$  (1, 2, 3 y 4 mas/yr).

#### 4.2.2. Determinación de estrellas candidatas del cúmulo M67

El cúmulo M67 se sitúa a una mayor distancia que M44, en torno a  $890 \pm 90$  pc, y en las coordenadas  $8^h 51^{min}$  ( $8,855 h$ ) de ascensión recta y  $11^\circ 48'$  de declinación ( $11,967^\circ$ ). El interés de este cúmulo es su concentración de estrellas que rondan las edades de  $4 - 7 \times 10^9$  años, intervalo de edad que cae dentro de las estimaciones actuales para nuestro sistema solar. Por esta razón la determinación de estrellas pertenecientes a este cúmulo ofrece una excelente oportunidad para el estudio de propiedades relativas a nuestro sistema solar en otros sistemas planetarios, como puede ser el caso de la determinación de una distribución planetaria en función de si estos planetas son gaseosos o rocosos además de la posición relativa que ocupan en estos sistemas.

Los criterios de búsqueda para estrellas candidatas a este cúmulo serán los siguientes: en primer lugar se ajusta una distancia en torno a  $d = 890 \pm 90$  pc, lo cual implica una diferencia con respecto a la distancia central en torno al 10%. En cuanto al segundo criterio, se va a usar la misma apertura angular que en el caso del cúmulo M44, en torno a  $3.5^\circ$ . Por último en cuanto al criterio de búsqueda debido a los movimientos propios de las estrellas candidatas se usarán como referencia las empleadas en [Manan Agarwal et al. 2021, \[1\] \(preprint\)](#),  $\mu_\alpha = -10,913$  mas/yr y  $\mu_\delta = -2,801$  mas/yr. La ventana de intervalos que vamos a emplear en este caso será la misma que en el cúmulo M44, del 15% a ambos lados de cada uno de los movimientos propios centrales. Los criterios de búsqueda arrojan un total de 20 candidatos entre los que encontramos estrellas catalogadas en otras publicaciones y estrellas de



**Figura 4.5:** A la izquierda distribución en posición de las estrellas candidatas de M67 obtenidas por K2OjOS dispuestas en código de colores en función de su distancia en pársecs. A la derecha distribución en movimientos propios respecto a la posición central junto a líneas de igual valor de  $|\Delta\mu|$  (0,2; 0,4; 0,6 mas/yr).

nuestro catálogo, véase la **Figura 4.5** para comprobar las distribuciones de posición y movimientos propios de las 20 estrellas candidatas. Los resultados de todas las estrellas candidatas del cúmulo M67 están disponibles en las **Tablas B.4** y **B.5**.

### 4.3. Relación de período-luminosidad para estrellas pulsantes

Las relaciones período-luminosidad son habituales en estrellas pulsantes tales como Cefeidas y RR-Lyrae aunque también se baraja la idea de una relación similar para estrellas tipo Delta-Scuti como veremos más adelante. La determinación de estas relaciones es relevante para la astrofísica ya que permite usar una población de estrellas pulsantes como candelas estándar en la determinación de distancias.

#### 4.3.1. Relación período-luminosidad en Cefeidas y RR-Lyrae

Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) descubrió que las estrellas pulsantes Cefeidas mantenían una relación entre el tiempo de oscilación y su brillo o más correctamente su magnitud absoluta. Este hallazgo permitió la consideración de este tipo de estrellas como candelas estándar para la determinación de distancias a nivel galáctico y extragaláctico siempre y cuando estas galaxias estuviesen a una distancia tal que permitiesen observar con suficiente precisión el pulso de una Cefeida. La incorporación de las Cefeidas como candelas estándar permitió ampliar la capacidad que el méto-

do del paralaje ofrecía a la hora de caracterizar distancias únicamente a nivel galáctico. La relación período-luminosidad para las Cefeidas ha ido ajustándose a medida que las observaciones se volvían más sofisticadas, a día de hoy se considera la relación obtenida gracias a las medidas del Telescopio Espacial Hubble en la ecuación (1.3).

Por otro lado catálogos realizados por la colaboración OGLE [Soszyński et al. 2008, \[24\]](#) muestran relaciones de período-luminosidad en diferentes bandas de magnitud absoluta, bandas  $V$  y  $I^3$  además de la banda Wesenheit  $W_I = I - 1,55(V - I)$ .

$$\begin{aligned}
 M_V &= (-2,762 \pm 0,022) \log P + (17,530 \pm 0,015) \\
 M_I &= (-2,959 \pm 0,016) \log P + (16,879 \pm 0,010) \\
 M_{W_I} &= (-3,314 \pm 0,009) \log P + (15,893 \pm 0,006).
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Estas relaciones son válidas para estrellas Cefeidas clásicas, no obstante tanto las Cefeidas de tipo II o W Virginis y las Cefeidas anómalas tienen su propia relación período-luminosidad, véase [Figura 1.2](#).

Por otro lado tenemos las estrellas RR-Lyrae, estas pulsantes también satisfacen una relación de tipo período-luminosidad que normalmente es usada para la determinación de distancias a cúmulos globulares o abiertos ya que son sistemas con baja metalicidad en los que este tipo de estrellas son más abundantes. El alcance de estas estrellas a la hora de ser usadas como candelas estándar está restringido por su propio brillo ya que los telescopios espaciales más precisos construidos hasta la fecha como el Telescopio Espacial Hubble y el Telescopio Espacial Kepler o incluso la misión *Gaia* solo podían caracterizar estas pulsantes en cúmulos globulares próximos a la Vía Láctea.

#### 4.3.2. Relación período-luminosidad en estrellas Delta-Scuti

Debido a la ausencia de estrellas Cefeidas y RR-Lyrae en nuestro catálogo, resulta de especial interés prestar atención a una posible relación período-luminosidad en estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti. La diferencia fundamental entre éstas y sus compañeras Cefeidas y RR-Lyrae se basa en el mecanismo físico detrás de la oscilación de las Delta-Scuti, mecanismo  $\kappa$  ( $\kappa$ -mechanism). Más allá de este mecanismo, las estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti son además usadas en estudios de astrosismología ya que la existencia de varios modos de oscilación permite obtener información sobre

---

<sup>3</sup>La capacidad que el ser humano tiene para poder observar objetos astronómicos como estrellas o galaxias está restringida al rango espectral visible (380-750 nm de longitud de onda). Los dispositivos astronómicos de observación son capaces de estudiar señales electromagnéticas en rangos espectrales distintos al rango visible por lo que la magnitud absoluta de cualquier objeto astrofísico dependerá de este rango espectral. Por ello se definen los distintos tipo: U, B, V, R, I, K (Ultravioleta, Azul, Verde, Rojo, Infrarrojo y Radio).

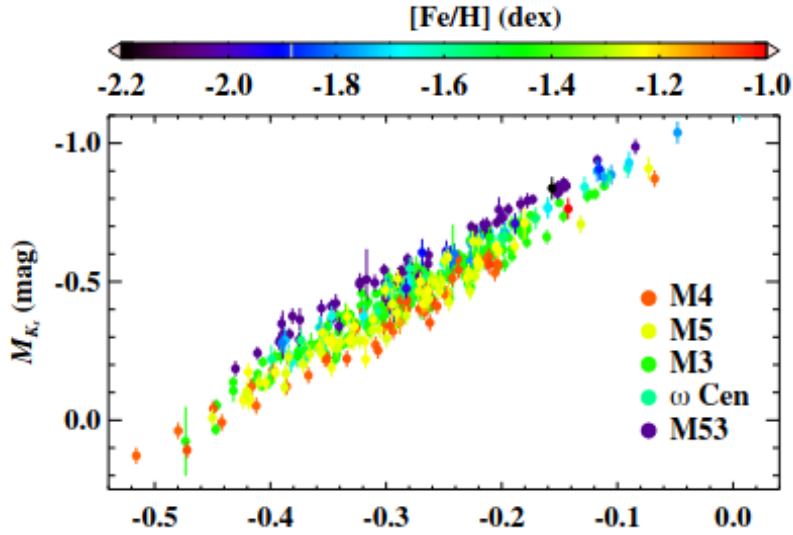
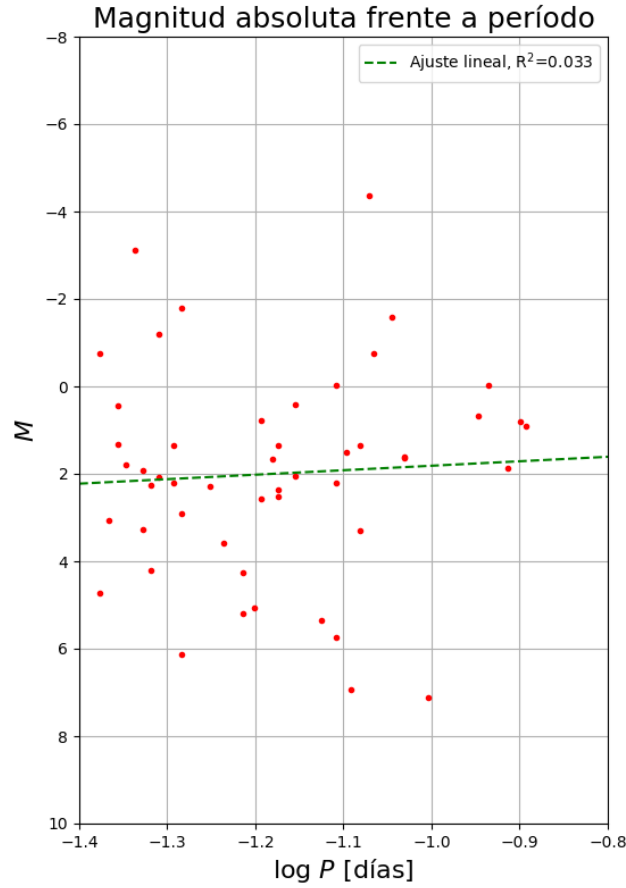


Figura 4.6: Relación empírica obtenida por [Bhardwaj A. et al. 2021, \[6\]](#) en el estudio de la relación entre período-luminosidad para estrellas RR-Lyrae en varios cúmulos globulares.

características internas de la propia estrella. Para ello es necesario ser capaz de interpretar estos modos de oscilación desde un punto de vista matemático. Si tomamos como ejemplo las oscilaciones estacionarias en una cuerda, es sabido que cualquier oscilación producida en este sistema puede ser comprendido a través de la adición de ciertas oscilaciones simples llamadas modos normales de oscilación. En el contexto de una estrella pulsante Delta-Scuti, estas funciones las desempeñan los armónicos esféricos  $Y_{lm}(\theta, \phi)$ , funciones que guardan una serie de simetrías sobre la esfera de dimensión dos  $\mathbb{S}^2$ , además de funciones radiales. Las primeras son responsables de las contribuciones no radiales en las oscilaciones de la estrella y son debidas a dos factores físicos, por un lado las variaciones de presión, modos  $p$ , y por otro lado las variaciones en la intensidad gravitatoria, modos  $g$ . Las segundas son las responsables de las oscilaciones radiales en la estrella. Combinando todo esto se puede entender la oscilación de una pulsante Delta-Scuti conociendo sus modos de oscilación con sus respectivas frecuencias, modos que pueden ser caracterizados a partir de los números  $n$ ,  $l$  y  $m$  relativos a las funciones radiales y los armónicos esféricos.

En cuanto a la determinación de una relación período-luminosidad se debe comentar la posibilidad de obtener diferentes de estas relaciones en función del modo de oscilación en el que nos estemos fijando. Generalmente se persigue la determinación de relaciones período-luminosidad para el modo fundamental, aquél en el que  $n = 1$  y  $l = m = 0$ . Esta estrategia es seguida en [Ziaali et al. 2019, \[28\]](#) para estudiar posibles relaciones período-luminosidad relativos a modos de oscilación fundamentales y radiales ( $n \neq 0$ ) usando los paralajes<sup>4</sup> obtenidos en la misión *Gaia* DR2. Con la información de los paralajes y las magnitudes aparentes de cada estrella es posible obtener las magnitudes absolutas

<sup>4</sup>A partir del paralaje de una estrella es posible obtener la distancia de ésta, siempre y cuando la instrumentación empleada tenga la suficiente resolución como para medir esta magnitud. En caso afirmativo la relación entre el ángulo de



**Figura 4.7:** Correlación obtenida entre el período de oscilación de las 51 estrellas tipo Delta-Scuti con las magnitudes absolutas obtenidas a partir de las magnitudes aparente y los paralajes observados por la misión *Gaia*.

$M_V$  en la banda  $V$  usando la expresión logarítmica

$$M_V = m_V - 5 \log d + 5 - A_V \quad (4.3)$$

donde  $m_V$  es la magnitud aparente en el filtro  $V$  y  $A_V$  un coeficiente de absorción debido a la existencia de polvo interestelar. Usando un catálogo de más de 1300 estrellas tipo Delta-Scuti obtenidas de otras publicaciones además del propio Telescopio Espacial Kepler, [Ziaali et al. 2019, \[28\]](#) concluye que los períodos correspondientes al máximo pico obtenido en el periodograma guardan una relación de correlación con el brillo de las estrellas analizadas. Esta relación período-luminosidad adoptaría

---

paralaje expresado en segundos de arco y la distancia de la estrella expresada en parsecs será

$$d[pc] = \frac{1}{\pi[\prime]} \quad (4.2)$$

siendo  $\pi$  el ángulo de paralaje.

la forma

$$M_V = (-2,94 \pm 0,06) \log P - (1,34 \pm 0,06). \quad (4.4)$$

El catálogo de estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti que se ofrece en este trabajo es más modesto, con un total de 50 estrellas clasificadas en esta categoría por lo que resultará poco concluyente cualquier relación período-luminosidad obtenida con ellos. Aplicando un test de correlación entre el  $\log P$  y la magnitud absoluta de cada estrella se arroja un valor de  $R^2 = 0,033$ , lo cual implica una correlación muy débil entre estas dos magnitudes. No obstante, es posible determinar esta correlación a través del método de mínimos cuadrados, obteniendo así los valores relativos a la pendiente y la ordenada en el origen de la recta de regresión:

$$M = (-1,022 \pm 0,494) \log P + 0,779 \pm 0,377 \quad (4.5)$$

véase **Figura 4.7**. Comparando las ecuaciones (4.4) y (4.5) se concluye que o bien no existe una correlación período-luminosidad en las estrellas Delta-Scuti de nuestro catálogo o bien la estadística no es suficientemente amplia como para llegar a resultados concluyentes. Por otro lado se debe mencionar que la información relativa a las magnitudes absolutas proviene de una relación tipo (4.3) donde  $d$  se obtiene debido al paralaje medido por la misión *Gaia* y en vez de usar una magnitud aparente en la banda  $V$  se usa la magnitud aparente observada por el Telescopio Espacial Kepler,  $K_P$ . Además, a diferencia de [Ziaali et al. 2019, \[28\]](#), en esta investigación se desconoce la distribución de polvo interestelar existente entre las estrellas obtenidas en el catálogo y la Tierra por lo que no es posible ofrecer un valor para el término de extinción  $A_V$ . Por lo tanto el valor de  $M$  puede llegar a verse afectado, siendo sustituido en tal caso por  $M_V$ .





## Capítulo 5

# Conclusiones

Aunque la misión extendida K2 tuvo que lidiar con el problema relativo a la falta de dos motores de propulsión, desde un punto de vista científico puede considerarse un éxito ya que fue capaz de registrar curvas fotométricas repartidas en diversas áreas de la bóveda celeste situadas a lo largo de la eclíptica. El volumen de información recabado por esta misión solamente en una de sus campañas, como es el caso de la campaña 18 de la cual se extrajeron las curvas de luz, justifica la participación de sociedades de astrónomos aficionados en proyectos Pro-Am, como es el caso de K2OjOS, en aras de involucrar de forma activa a sus miembros, además de la creación de catálogos de estrellas variables o exoplanetas aún por registrar. Es por ello que se considera esta colaboración como satisfactoria desde un punto de vista científico y práctico; por los numerosos candidatos a exoplanetas y estrellas variables aportados y por la relevancia que estos candidatos ofrecen de cara a posteriores investigaciones con el fin de obtener nuevas conclusiones en futuros proyectos científicos.

Por otro lado la aportación que hago con este trabajo es la de reducir parte de los datos clasificados previamente por K2OjOS con el fin de ofrecer una clasificación de estrellas variables desde dos puntos de vista, el visual con la inspección de las curvas de luz de la base de datos Vanderburg, como computacional mediante la creación de las curvas de luz, periódogramas y curvas en fase. En este punto no solo se realiza dicha clasificación sino que se obtiene una de las magnitudes fundamentales que caracteriza a toda estrella variable, su período de variación. Por otro lado no podemos olvidar la aportación de candidatos a los cúmulos abiertos M44 y M67 que aún siendo modesta usa de las herramientas propias de una búsqueda de este tipo. También se ha optado por tratar de encontrar una relación período-luminosidad para las estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti de nuestro catálogo, siguiendo para ello la idea mostrada en [Ziaali et al. 2019, \[28\]](#) con respecto a los períodos correspondientes a los modos fundamentales de estas estrellas. A continuación trataremos de elaborar un recopilatorio con las conclusiones más interesantes que podemos obtener en cada uno de los puntos de este trabajo empezando por la propia clasificación de las estrellas.

## 5.1. Clasificación y elaboración del catálogo

El primer objetivo marcado en este trabajo fue el de realizar una primera clasificación de un total de 1807 curvas de luz obtenidas por el Telescopio Espacial Kepler previamente analizadas por el proyecto K2OjOS. No obstante, debido al solapamiento entre las campañas 5, 16 y 18 es de esperar que varias de estas estrellas ya hayan sido investigadas anteriormente en otras publicaciones por lo que se eliminaron todas estas seleccionando solamente un total de 1177 estrellas aún por catalogar. Para ello se usó un programa en formato *notebook* de *Google Colab* creado por el miembro de ICTEA Juan Menéndez Blanco similar al que se usó en el proyecto K2OjOS con alguna pequeña modificación de carácter funcional. El procedimiento de visualización a clasificación es similar al que realizaron los miembros de Omega, usando la base de datos Vanderburg se seleccionan los EPICs correspondientes a estrellas con variabilidad o sin variabilidad (sin clasificación), dentro de las estrellas que presentaron variabilidad significativa se seleccionan tres grupos inicialmente, las pulsantes tipo Delta-Scuti ya que en esta fase no se encontró otro tipo de pulsación, las EBs y las estrellas en rotación.

### 5.1.1. Clasificación

La principal conclusión que se obtiene en lo que al proceso de clasificación se refiere es la fuerte dependencia de un criterio subjetivo de clasificación ya que es posible que haya ciertas señales fotométricas que puedan ser confundidas entre pulsantes, EBs o rotaciones. Esto sucede mayoritariamente en EBs en las que su período orbital es del orden de  $P \sim 0,1 - 0,3$  días. Una alternativa interesante sería la aplicación de técnicas de *Machine Learning* en las que se ofrece una serie de directrices de clasificación con el fin de seleccionar y clasificar señales fotométricas de estrellas variables en cada uno de los grupos deseados. No obstante, no se debe pasar por alto uno de los objetivos de una colaboración de tipo Pro-Am como K2OjOS o un Trabajo Fin de Máster como el que les presento que es la familiarización e instrucción en la clasificación e identificación de señales fotométricas de carácter variable.

Los resultados obtenidos en la clasificación preliminar fueron 51 estrellas pulsantes de tipo Delta-Scuti, 59 sistemas EBs, 357 estrellas en rotación y el resto fueron estrellas sin variabilidad apreciable o variabilidad irregular o confusa. Como se aprecia en estos resultados no se ha podido detectar ninguna estrella pulsante de tipo Cefeida o RR-Lyrae lo cual habría sido interesante desde el punto de vista empírico ya que el descubrimiento de estrellas de este tipo supone una oportunidad para precisar aún más las relaciones período-luminosidad existentes en estas estrellas. Sin embargo, en este punto se obtiene una conclusión relevante respecto a las estrellas pulsantes, y es que son más habituales estrellas pulsantes de tipo Delta-Scuti que estrellas Cefeidas y RR-Lyrae. Por otro lado, se concluye que el uso de una señal fotométrica sin otro tipo de información como podría ser la espec-

troscopía, implica una dificultad a la hora de clasificar las diferentes señales de estrellas pulsantes con varios modos de oscilación en los diversos grupos compatibles con estas características. En lo que respecta a los sistemas de EBs la clasificación visual no ofrece ningún inconveniente a excepción de la posible confusión entre EBs de bajo período y pulsantes. Por otro lado en lo que respecta a las estrellas en rotación será indispensable la clasificación usando herramientas computacionales debido a la gran cantidad de señales confusas que han sido mal clasificadas en esta etapa.

### 5.1.2. Reducción de datos

Tras clasificar visualmente las estrellas de la colaboración K2OjOS se procedió a mostrar los resultados obtenidos en forma de: curvas de luz, periódogramas para determinar los períodos característicos de variabilidad de cada estrella y curvas en fase para analizar la dependencia de la variabilidad de la estrella en un período completo de variación. En este punto se realizó una segunda clasificación definitiva ya que aunque la clasificación visual resultó ser casi acertada para el caso de las pulsantes tipo Delta-Scuti (eliminación de la estrella EPIC 211273830 por tratarse de una contaminación) y los sistemas EB (a excepción de la estrella EPIC 212012030 clasificada como EB pero no visible en la campaña 18 sino en la 5 y las 10 estrellas con características compatibles con otras variabilidades), no fue este el caso en la mayoría de las estrellas en rotación ya que se eliminaron cerca de 2/3 partes de las estrellas previamente clasificadas como tal (24 estrellas con variabilidad ambigua y 200 con variabilidad irregular) además de descubrir un conjunto de 15 pulsantes compatibles con una variabilidad tipo Gamma-Doradus en este grupo.

La primera conclusión que se extrae en este proceso es la imposibilidad de aplicar criterios generales a la hora de representar los periódogramas GLS para pulsantes y rotaciones y BLS en sistemas EBs. Cuando se habla de criterios generales nos estamos refiriendo a la selección de períodos o frecuencias máximos y mínimos de búsqueda además de la resolución de estas variables en la generación de sendos periódogramas, aunque también podríamos incluir variables tales como la eliminación de puntos en los extremos de las curvas de luz, el tiempo de ventana del *detrend* o el criterio seguido para la eliminación de puntos considerados como errores en la fotometría. Este tipo de problemas sucedieron con mayor frecuencia en el análisis de los sistemas EBs ya que debido a una capacidad de computo en cierta manera limitada y a la amplia variedad de períodos orbitales, resultó imposible escribir un código de programación general para todas las EBs clasificadas visualmente. Por tanto se optó por generar un código general con intervalos de períodos de búsqueda de 0,2 a 34 días con un muestreo de 0,1 días para todas las estrellas y particularizar de manera independiente todas aquellas que necesiten un tratamiento diferente. En el caso de las estrellas clasificadas como pulsantes tipo Delta-Scuti y rotaciones este tipo de problemas aparecieron con menor frecuencia, los más destaca-

dos fueron problemas relativos a la ventana seleccionada del *detrend* o problemas derivados de la diferencia en apertura fotométrica de la *pipeline* de Everest y Vanderburg, en estos casos se usaron los propios datos fotométricos ofrecidos en la base de datos Vanderburg.

La segunda conclusión obtenida en este proceso es la facilidad de realizar clasificaciones inadecuadas con respecto a estrellas en rotación como demuestra la diferencia en el número de estrellas en este grupo tras la clasificación visual y la clasificación computacional (118 candidatas frente a 357 por inspección visual). Es en este proceso se detectaron un total de 15 señales correspondientes a una fotometría compatible con una pulsación de varios modos de oscilación. Sin embargo, en este caso los períodos de oscilación (períodos relativos al modo fundamental) estaban comprendidos entre 0,3 a 3 días lo cual descartaba la opción de Delta-Scuti. En su lugar se optó por clasificarlas como candidatas a estrellas pulsantes de tipo Gamma-Doradus. Nótese que estamos hablando en términos de “candidatos a...” ya que aunque existen casos donde el simple estudio fotométrico nos podría asegurar una buena clasificación como por ejemplo los sistemas de EBs de tipo Separadas o Semiseparadas, en muchos otros, como es el caso de las estrellas pulsantes Delta-Scuti y Gamma-Doradus, la conclusión final debería ir respaldada por estudios adicionales que tengan en cuenta no solo la fotometría sino análisis espectroscópicos ya que podrían dilucidar la composición y dinámica de los modos de oscilación, lo que ayudaría en precisar aún mejor el tipo de pulsación de la señal fotométrica.

La tercera conclusión que se extrae en este punto es relativa a las distribuciones en los períodos de variabilidad en cada grupo estelar. En el caso de las estrellas Delta-Scuti esta distribución no ofrece grandes discusiones más allá de una concentración en densidad en torno a  $4 - 13 \times 10^{-2}$  días con un máximo situado en torno a  $4 - 6 \times 10^{-2}$  días, véase **Figura 3.1**. Con respecto a la distribución en tipos de morfologías observados en las curvas en fase de los sistemas de EBs la conclusión que se obtiene es que no existe ninguna pauta por la cual se deban observar más EBs de un grupo que otro tal y como se menciona en la Discusión (capítulo 4).

Por último en cuanto a las estrellas en rotación no podemos dejar de lado la distribución en los períodos de rotación ya que de ahí se extrae la siguiente conclusión. A medida que aumenta el período de rotación el número de estrellas encontradas disminuye, véase **Figura 3.3**. Esta disminución en número conforme el período aumenta es lo que se llama el *gap* de los períodos en estrellas en rotación y representa la frontera entre una población de estrellas más jóvenes con períodos de rotación más cortos y la población de estrellas en fases más avanzadas de su evolución (gigantes o supergigantes), siendo en este caso mayores debido a la conservación del momento angular. Este comportamiento es conocido como bimodalidad en el período (*bimodality period*) y es la base de la girocronología. Desafortunadamente el tiempo de observación del telescopio no nos permitió observar

períodos mayores de 30 días aproximadamente por lo que no se logró ver la parte de la distribución en la que el número de estrellas debería volver a aumentar.

## 5.2. Conclusiones elaboradas en la discusión

### 5.2.1. Comparación de resultados

En el capítulo de Discusión se trataron por un lado comparaciones y críticas de los resultados con diferentes publicaciones citadas en las Referencias. En los resultados relativos a los sistemas de EBs se sugería la posibilidad de encontrar EBs en los cuales una o ambas estrellas presentaban una pulsación. La determinación de este tipo de sistemas requiere de la ejecución de herramientas computacionales adicionales que en este trabajo no han sido llevadas a cabo. Sin embargo, un primer paso es la identificación de sistemas en los que se produzca esta fenomenología. Por ello se concluye que la estrella con EPIC 211948599 es un sistema candidato a contener al menos una estrella pulsante, véase la **Figura 4.1**. Las cualidades que cumple este sistema EB respecto al resto de nuestro catálogo son dos: en primer lugar presencia de señales compatibles con pulsación en la propia curva en fase que se manifiestan como una sucesión de puntos alineados verticalmente sobre la línea del *binning*, en segundo lugar una magnitud aparente inferior a 13 ya que en caso contrario cabe la posibilidad que este efecto provenga de ruido en la señal y no de una pulsación. Sin embargo, se debe recalcar que esta conclusión no es definitiva sino una mera propuesta de candidato a EB con una o ambas estrellas en pulsación, en cualquier caso una investigación más detallada de este sistema podrá arrojar más luz sobre esta cuestión.

Por otro lado en la discusión relativa a las estrellas en rotación también se concluyó que este grupo de estrellas variables presentan fulguraciones o *flares* además de manchas debidas a la propia actividad magnética generada entre otros factores por la propia rotación. La presencia de estos fenómenos sirven para poder determinar el período de rotación y de ahí extraer conclusiones sobre la edad de la estrella mediante la girocronología, en la **Tabla A.3** se distinguen las estrellas con presencia de *flares*.

### 5.2.2. Candidatos a los cúmulos abiertos M44 y M67

Una de las aportaciones fundamentales de este trabajo, más allá de la elaboración de los catálogos de estrellas variables, es la presentación de candidatos a formar parte de los cúmulos abiertos situados en el campo de visión de la campaña 18, M44 o cúmulo del Pesebre y M67. En esta parte no solo se proponen candidatos de nuestro catálogo sino que se aplican los criterios de pertenencia a un cúmulo para todas las estrellas correspondientes al proyecto K2OjOS analizadas en este trabajo ya que cabe la posibilidad de que estrellas analizadas en publicaciones anteriores no hayan sido

introducidas en una lista de candidatas a estos cúmulos.

La conclusión a la que se llega en esta parte es por un lado la mayor abundancia de estrellas compatibles con las condiciones de pertenencia a un cúmulo de M44 frente a M67 (75 estrellas frente a 20 respectivamente). Esto no significa que M44 esté más poblado que M67 sino que en la lista inicial de estrellas analizada por K2OjOS aparecen más estrellas que reúnen las condiciones de pertenencia al cúmulo M44 que a M67. Otra conclusión que debe tenerse en cuenta relativa a estos criterios de búsqueda es la falta de información relativa a la componente radial de la velocidad de cada una de las estrellas. Es cierto que varias de ellas tienen una magnitud aparente  $K_P < 12$  por lo que un estudio espectroscópico puede medir esta magnitud, de hecho el proyecto K2OjOS contó con esta información para clasificar estrellas como candidatas a M44 y M67. Sin embargo, en este trabajo se ha optado por ignorar esa información ya que no es común a todas ellas y además la probabilidad de que coincidiendo todas las demás variables (posición, distancias y movimientos propios) se dé la circunstancia en la que  $v_r$  sea incompatible es baja. En cualquier caso esta circunstancia no deja de tener una validez únicamente cualitativa cuya veracidad podría ser ratificada o contradecida en una investigación posterior en la que se tenga en cuenta esta magnitud.

### 5.2.3. Relaciones período-luminosidad en pulsantes

En la última parte del capítulo dedicado a la Discusión se analizó por un lado las relaciones entre el período y la luminosidad en pulsantes de tipo Cefeida y RR-Lyrae. Este tipo de relaciones son significativas en un contexto de astrofísica general ya que permiten usar dichas familias de estrellas pulsantes como candelas estándar. Por otro lado se investigó la idea plasmada en [Ziaali et al. 2019, \[28\]](#) en lo referente a relaciones período-luminosidad en pulsantes tipo Delta-Scuti. En este caso los resultados no arrojan una conclusión firme ya que el catálogo de este tipo de pulsantes cuenta solamente con 50 miembros. No obstante se determinó una relación período-luminosidad de acuerdo a [\(4.5\)](#).

La justificación por la cual decimos que contar con 50 estrellas Delta-Scuti implica un resultado no concluyente se basa en la posibilidad de que existan varias estrellas donde el modo dominante no sea el modo fundamental ( $n = 1$  y  $m = l = 0$ ). Por lo que existirán estrellas del catálogo que realmente deberían ser eliminadas de esta relación de dispersión y ser consideradas en todo caso en otras posibles relaciones período-luminosidad que tengan en cuenta sus respectivos modos de oscilación dominantes. Por otro lado la incapacidad de determinar la verdadera clasificación en cuanto a estrellas Delta-Scuti hace que exista la posibilidad de que algunas estrellas del catálogo no sean Delta-Scuti sino otro tipo de pulsantes con varios modos de oscilación.

### 5.3. Posibles ampliaciones en la investigación

A lo largo del transcurso de esta investigación y la redacción del presente trabajo se han ido ofreciendo posibles ampliaciones a la investigación con el fin de mejorar las conclusiones obtenidas en el mismo. Una de las ampliaciones más significativa es la consideración de espectroscopía en las señales de las estrellas del catálogo. Esta consideración traería consigo una fuente de información más allá de la simple fotometría que aunque se ha demostrado exitosa en la creación del catálogo, no consigue afinar en la clasificación de estrellas pulsantes con varios modos de oscilación acoplados. Otro campo donde un análisis espectroscópico hubiese mejorado nuestros resultados lo encontramos en la elaboración de los catálogos correspondientes a los candidatos de los cúmulos M44 y M67. La determinación de la componente radial de la velocidad demanda de este estudio ya que su obtención se basa en el efecto Doppler.

Otra ampliación interesante es la determinación de las masas correspondientes a los sistemas EBs usando la expresión (1.4) con la información de los períodos orbitales obtenidos en este trabajo y la orientación de estos sistemas con respecto a la Tierra. El primer dato es conocido pero el segundo no lo es ya que aunque los sistemas EBs tienen que mantener una orientación adecuada para que se produzca un eclipse ( $\sin i \approx 1 \Leftrightarrow i \approx 90^\circ$ ) este ángulo no tiene porqué estar fijo en  $90^\circ$  además del desconocimiento de los semiejes mayores en las respectivas órbitas de cada estrella. Una investigación más exhaustiva podría recopilar esta información e inferir el valor de las masas de estos sistemas. Por otro lado existe la posibilidad de que los sistemas EBs sufran alteraciones de los períodos orbitales, esta investigación no fue realizada en este trabajo pero podría considerarse como ampliación del mismo.

Por último se proponen estudios de girocronología y astrosismología. El primero sería aplicado a las estrellas en rotación para la determinación de la edad de las mismas además del interés existente en determinar la edad de los cúmulos abiertos M44 y M67. Esto se fundamenta en una característica propia de los cúmulos abiertos, su homogeneidad en cuanto a la edad de las estrellas que lo componen. El segundo estudio se aplicaría a las estrellas pulsantes de tipo Delta-Scuti y Gamma-Doradus con el fin de obtener sus modos de oscilación más importantes y con ello la realización de clasificaciones más precisas de estas estrellas.





# Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar a Juan Menéndez Blanco su desinteresada participación en este trabajo, ofreciendo el código necesario para buscar las estrellas ya publicadas en la lista de 1807 estrellas analizadas por K2OjOS y clasificadas en los catálogos de este trabajo. Por supuesto también agradezco toda la ayuda y formación recibida durante la ejecución de este proyecto por parte de mis tutores: Enrique Díez Alonso y Francisco Javier de Cos Juez. Formación con la que concluyo los estudios relativos al Máster de Física Avanzada de la Universidad de Oviedo en la especialización de Astrofísica y Física de Partículas. Es también para mí un placer haber tomado parte, aunque sea parcialmente, en la investigación iniciada por el instituto ICTEA junto a la Asociación Astronómica Asturiana Omega en el proyecto K2OjOS.



## Apéndice A

# Catálogo de estrellas variables

En este apéndice se muestran los catálogos de las diferentes estrellas variables obtenidas en el trabajo junto a sus períodos característicos.

### A.1. Catálogo de estrellas pulsantes tipo Delta-Scuti obtenidas en la investigación

Relación de estrellas pulsantes compatibles con una fotometría de tipo Delta-Scuti donde se muestran los períodos de oscilación del modo fundamental.

| EPIC      | Período (días) | EPIC      | Período (días) | EPIC      | Período (días) |
|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
|           |                | 211644268 | 0.058          | 211925547 | 0.086          |
| 211326144 | 0.099          | 211684333 | 0.052          | 211926820 | 0.051          |
| 211354118 | 0.081          | 211699931 | 0.049          | 211955177 | 0.067          |
| 211358117 | 0.052          | 211735933 | 0.116          | 211961058 | 0.078          |
| 211373778 | 0.061          | 211743326 | 0.085          | 211962475 | 0.093          |
| 211413583 | 0.078          | 211769278 | 0.113          | 211967901 | 0.056          |
| 211489715 | 0.063          | 211779126 | 0.043          | 211978701 | 0.067          |
| 211498141 | 0.083          | 211786505 | 0.064          | 211989045 | 0.083          |
| 211503016 | 0.047          | 211798955 | 0.066          | 212005117 | 0.048          |
| 211503427 | 0.042          | 211821780 | 0.067          | 212018342 | 0.044          |
| 211578323 | 0.048          | 211825924 | 0.070          | 212083751 | 0.080          |
| 211610537 | 0.093          | 211828464 | 0.128          | 212123456 | 0.052          |
| 211610537 | 0.093          | 211851174 | 0.126          | 212134013 | 0.078          |
| 211629360 | 0.122          | 211888373 | 0.049          | 212153100 | 0.042          |
| 211634306 | 0.045          | 211898878 | 0.075          | 212153553 | 0.064          |
| 211637156 | 0.047          | 211916195 | 0.046          | 212161145 | 0.090          |
| 211641552 | 0.070          | 211918415 | 0.051          | 251811979 | 0.044          |

**Tabla A.1:** En esta tabla se muestran los períodos fundamentales de todas las estrellas compatibles con una fotometría de tipo Delta-Scuti.

## A.2. Catálogo de sistemas binarias eclipsantes obtenidos en la investigación

Relación de sistemas con fotometría compatible con sistemas binarios eclipsantes, obtenidos en esta investigación.

| EPIC      | Período (días) | Morfología | EPIC      | Período (días) | Morfología |
|-----------|----------------|------------|-----------|----------------|------------|
| 211309648 | 6.272          | D          | 211833449 | 0.535          | OC         |
| 211320813 | 3.081          | D*         | 211837063 | 4.927          | D          |
| 211334858 | 21.626         | D          | 211842895 | 3.184          | SD         |
| 211391507 | 2.206          | D          | 211844661 | 0.909          | SD         |
| 211417387 | 4.914          | D          | 211919528 | 9.480          | D          |
| 211480861 | 12.708         | D*         | 211921308 | 14.354         | D*         |
| 211483334 | 0.399          | ELV        | 211944856 | 2.771          | SD*        |
| 211489484 | 40.024         | D          | 211948599 | 0.395          | OC         |
| 211496404 | 0.664          | SD         | 211953866 | 1.789          | D*         |
| 211499872 | 0.323          | OC         | 211956128 | 10.896         | D          |
| 211502649 | 5.777          | D*         | 211962097 | 5.843          | D*         |
| 211580123 | 0.973          | OC         | 211966987 | 0.361          | ELV        |
| 211586814 | 14.066         | D*         | 211972086 | 6.014          | D*         |
| 211601670 | 1.417          | SD*        | 211978594 | 7.976          | D*         |
| 211692516 | 5.512          | D*         | 211972086 | 6.014          | D*         |
| 211693439 | 5.986          | D*         | 211993818 | 8.99           | D          |
| 211719918 | 0.476          | ELV        | 212004082 | 25.81          | D*         |
| 211770867 | 27.886         | D          | 212081198 | 2.298          | D*         |
| 211772348 | 1.302          | SD*        | 212087439 | 16.519         | D*         |
| 211786195 | 10.759         | D          | 212091774 | 2.537          | SD         |
| 211796503 | 0.267          | OC         | 212145065 | 0.315          | OC         |
| 211824968 | 2.425          | D*         | 212164051 | 0.372          | SD         |
| 211830266 | 7.743          | D          | 212175472 | 10.078         | D          |
| 211831378 | 6.981          | D*         | 251812049 | 0.453          | SD*        |

**Tabla A.2:** Relación de sistemas EB encontrados en el conjunto de estrellas de la campaña 18 de la misión K2 analizadas por K2OjOS con sus respectivos períodos orbitales y su correspondiente clasificación de acuerdo a los criterios mostrados en [Andrej et al. 2011, \[21\]](#). El símbolo \* adicional representa que dicha estrella presenta una variabilidad asociada a su rotación.

## A.3. Catálogo de estrellas variables por rotación

Relación de estrellas con variabilidad debida a su rotación obtenidas tras el análisis computacional de las 357 estrellas de este tipo inicialmente clasificadas, en total se conservaron 118.

| EPIC       | Período (días) | EPIC       | Período (días) | EPIC       | Período (días) |
|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|
| 211309811  | 2.735          | 211595340  | 9.521          | 211891774* | 1.200          |
| 211349910* | 1.247          | 211597259* | 8.144          | 211891898  | 2.774          |
| 211357359* | 0.813          | 211598816* | 12.226         | 211892168  | 0.595          |
| 211357501  | 0.795          | 211605304  | 4.537          | 211901010  | 0.472          |
| 211381577  | 1.262          | 211613276  | 2.854          | 211904163  | 1.227          |
| 211385332  | 0.726          | 211617059  | 1.417          | 211919173  | 0.930          |
| 211392098  | 2.054          | 211618105  | 3.378          | 211942532* | 6.677          |
| 211392098* | 2.054          | 211622285* | 1.546          | 211945418  | 2.231          |
| 211393879  | 3.712          | 211626689  | 1.600          | 211949114  | 5.039          |
| 211396246* | 5.381          | 211631310* | 0.917          | 211949871* | 15.784         |
| 211399779  | 2.851          | 211631397  | 1.720          | 211957616* | 1.184          |
| 211402632  | 1.906          | 211635543  | 4.509          | 211960228  | 6.811          |
| 211414329  | 6.291          | 211687545  | 2.738          | 211967421  | 1.461          |
| 211433501  | 0.974          | 211690734  | 1.756          | 211968261* | 0.874          |
| 211436265* | 3.317          | 211694924  | 0.898          | 211971354* | 4.304          |
| 211442801* | 1.542          | 211703642  | 2.264          | 211979026  | 0.463          |
| 211465852* | 2.365          | 211709792  | 1.317          | 211980019* | 21.675         |
| 211471269* | 15.661         | 211712465  | 1.128          | 211980450  | 1.025          |
| 211477491* | 1.980          | 211714300  | 0.553          | 211982190  | 2.561          |
| 211478435  | 1.167          | 211715414* | 1.036          | 212007527  | 9.581          |
| 211481191  | 2.626          | 211716610  | 1.482          | 212070332* | 2.290          |
| 211482777* | 5.163          | 211741792* | 0.721          | 212070886* | 0.579          |
| 211483708  | 2.033          | 211748754  | 0.547          | 212077095* | 1.134          |
| 211485979  | 1.989          | 211752612  | 1.173          | 212080687  | 4.915          |
| 211493628  | 1.567          | 211757772  | 0.849          | 212092668  | 1.499          |
| 211495396* | 1.182          | 211758096  | 0.169          | 212100611* | 1.340          |
| 211498922  | 5.461          | 211771406  | 0.933          | 212105128  | 1.868          |
| 211499370  | 0.442          | 211774926  | 1.901          | 212106280  | 1.234          |
| 211500033* | 2.161          | 211775403  | 0.541          | 212109260  | 1.920          |
| 211566255* | 1.185          | 211778044  | 0.480          | 212111862  | 1.618          |
| 211566403* | 7.686          | 211781646  | 1.317          | 212114333  | 0.898          |
| 211577090  | 13.456         | 212152087  | 0.307          | 212146514  | 0.946          |
| 211586175  | 4.547          | 211787594  | 0.684          | 212152564* | 6.168          |
| 211587730  | 5.891          | 211799108  | 1.109          | 212152628  | 3.953          |
| 211588322  | 3.674          | 211839847* | 1.246          | 212156607  | 2.397          |
| 211590970  | 3.522          | 211843786* | 0.703          | 212158267  | 3.224          |
| 211591861* | 17.440         | 211844661  | 0.454          | 212159113  | 0.696          |
| 211592766  | 2.051          | 211846954  | 0.903          | 212160166  | 0.769          |
| 211593145* | 2.302          | 211849657  | 11.939         |            |                |
| 211593996* | 1.470          | 211884783  | 1.489          |            |                |

**Tabla A.3:** En esta tabla se muestran los períodos característicos de todas las estrellas compatibles con una Rotación. El símbolo \* indica que la correspondiente estrella presenta *flares* en su curva de luz.

## A.4. Estrellas catalogadas como Gamma-Doradus

El conjunto de estrellas compatibles con una pulsante tipo Gamma-Doradus asciende a 15 donde sus respectivos períodos de oscilación se muestran en la siguiente tabla.

| EPIC      | Período (días) | EPIC      | Período (días) | EPIC      | Período (días) |
|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
| 211382317 | 0.889          | 211573671 | 0.620          | 211889294 | 0.572          |
| 211383755 | 1.032          | 211603738 | 0.962          | 211939034 | 0.772          |
| 211389347 | 0.426          | 211607703 | 0.553          | 211942626 | 0.638          |
| 211391861 | 0.661          | 211615947 | 1.167          | 212134557 | 0.724          |
| 211413093 | 0.900          | 211847386 | 0.554          | 212134862 | 0.598          |

**Tabla A.4:** Relación de estrellas catalogadas como Gamma-Doradus encontradas en la clasificación preliminar de las estrellas en rotación.

## A.5. Estrellas con variabilidad confirmada pero ambigua

Un total de 24 estrellas en rotación (de la clasificación visual, 357 estrellas) fueron eliminadas de este grupo por presentar características ambiguas entre los diferentes grupos de variabilidad mostrados anteriormente además de un grupo de 9 estrellas pertenecientes a la clasificación visual de 59 EBs.

| EPIC      | Período (días) | EPIC      | Período (días) | EPIC      | Período (días) |
|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
| 211361289 | 0.293          | 211642070 | 0.459          | 211748754 | 0.547          |
| 211372593 | 1.123          | 211681365 | 0.495          | 211787594 | 0.272          |
| 211375940 | 0.854          | 211695172 | 0.626          | 211796853 | 0.476          |
| 211393573 | 0.362          | 211699062 | 0.684          | 211966586 | 1.049          |
| 211421896 | 0.468          | 211700044 | 1.171          | 211975874 | 1.455          |
| 211488900 | 0.364          | 211718280 | 0.195          | 211991806 | 0.363          |
| 212012179 | 0.755          | 212149329 | 0.281          | 211366120 | 0.959          |
| 211376534 | 1.336          | 211747030 | 0.633          | 211844661 | 0.454          |
| 211306826 | 0.158          | 211349475 | 0.362          | 211478638 | 0.513          |
| 211606616 | 0.309          | 211785805 | 0.305          | 211790891 | 0.264          |
| 211841249 | 0.445          | 212158225 | 0.264          | 212175535 | 0.322          |

**Tabla A.5:** Estrellas cuya clasificación es imprecisa pero existen indicios sólidos de pertenecer a alguno de los anteriores grupos. Períodos obtenidos gracias al periodograma GLS parte superior y debidos al periodograma BLS en la inferior.

## A.6. Estrellas con variabilidad indeterminada o sin variabilidad

En este apartado se muestran todas aquellas estrellas que o bien no presentan una variabilidad en su señal o bien esta variabilidad no era lo suficientemente regular como para poder ser clasificada.

|           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 211487634 | 211488021 | 211488111 | 211434041 | 211435038 | 211606438 | 211606790 | 211607119 |
| 211607529 | 211607802 | 211607886 | 211609360 | 211609971 | 211610092 | 211610224 | 211610255 |
| 211611021 | 211612446 | 211612703 | 211612977 | 211613405 | 211613659 | 211614090 | 211616041 |
| 211616438 | 211619122 | 211619407 | 211619543 | 211619744 | 211619778 | 211620129 | 211620343 |
| 211620495 | 211621529 | 211622082 | 211622266 | 211622602 | 211622810 | 211623711 | 211623986 |
| 211624954 | 211626108 | 211627642 | 211627985 | 211628160 | 211628572 | 211629834 | 211631020 |
| 211632997 | 211633158 | 211633247 | 211633855 | 211635232 | 211636994 | 211639447 | 211640119 |
| 211641384 | 211644764 | 211675617 | 211675781 | 211678309 | 212150957 | 212150988 | 212151443 |
| 212152042 | 212152132 | 212152481 | 212153121 | 212156508 | 212156739 | 212157058 | 212157078 |
| 212157459 | 212157852 | 212158629 | 212158908 | 212158954 | 212159206 | 212159594 | 212159743 |
| 212160477 | 212161693 | 212161793 | 212161882 | 212161976 | 212162464 | 212163869 | 212164165 |
| 212164498 | 212164789 | 212165050 | 212166661 | 212166707 | 212168763 | 212168977 | 212170632 |
| 212171480 | 212172963 | 212173678 | 212174414 | 212175762 | 228682348 | 228682467 | 211485751 |
| 211486422 | 211488111 | 211489614 | 211489739 | 211489977 | 211490489 | 211490667 | 211490434 |
| 211490489 | 211491394 | 211492667 | 211492769 | 211492794 | 211493847 | 211496287 | 211497860 |
| 211497963 | 211498410 | 211499727 | 211500254 | 211500311 | 211500785 | 211503010 | 211503632 |
| 211509500 | 211512202 | 211513786 | 211514182 | 211514919 | 211517628 | 211518706 | 211518759 |
| 211519965 | 211522113 | 211520394 | 211523912 | 211698797 | 211699672 | 211699873 | 211699892 |
| 211700110 | 211700588 | 211701170 | 211702012 | 211703015 | 211704034 | 211704489 | 211704605 |
| 211704890 | 211705076 | 211705502 | 211705722 | 211705873 | 211706383 | 211707161 | 211707280 |
| 211707668 | 211707875 | 211708110 | 211708298 | 211708485 | 211709744 | 211710350 | 211710466 |
| 211710769 | 211710804 | 211711298 | 211711685 | 211712761 | 211714275 | 211714668 | 211714829 |
| 211714901 | 211714967 | 211714974 | 211715159 | 211715281 | 211715801 | 211715878 | 211716662 |
| 211716813 | 211717140 | 211717543 | 211718402 | 211718546 | 211719474 | 211424769 | 211432140 |
| 211434974 | 211435213 | 211435372 | 211435522 | 211436113 | 211436876 | 211436940 | 211437574 |
| 211437971 | 211439345 | 211462777 | 211471555 | 211471806 | 211476090 | 211476504 | 211478436 |
| 211478540 | 211478670 | 211479188 | 211479222 | 211479561 | 211480847 | 211481117 | 211481237 |
| 211482037 | 211482085 | 211482556 | 211484763 | 211416322 | 211418290 | 211418744 | 211420176 |
| 211420642 | 211838812 | 211838343 | 211839997 | 211840904 | 211840934 | 211841402 | 211841501 |
| 211843564 | 211843702 | 211843827 | 211844327 | 211844348 | 211844982 | 211845058 | 211845332 |
| 211845543 | 211845547 | 211845861 | 211845879 | 211846034 | 211847321 | 211847710 | 211848558 |
| 211848586 | 211848669 | 211849389 | 211851580 | 211880808 | 211881419 | 211882848 | 211882848 |
| 211884065 | 211885088 | 211885626 | 211885995 | 211886119 | 211886651 | 211888301 | 211888400 |
| 211888864 | 211889082 | 211889692 | 211890081 | 211891739 | 211892055 | 211892896 | 211894879 |
| 211895033 | 211895174 | 211895243 | 211895322 | 211899798 | 211900085 | 211900572 | 211900852 |
| 211901137 | 211903962 | 211904096 | 211904633 | 211904792 | 211759759 | 211760296 | 211763691 |
| 211764332 | 211765166 | 211765775 | 211766291 | 211766703 | 211767353 | 211767986 | 211768304 |
| 211769243 | 211769477 | 211769679 | 211769791 | 211770197 | 211770464 | 211770667 | 211771577 |
| 211773070 | 211773113 | 211773163 | 211773380 | 211773459 | 211773509 | 211773647 | 211773901 |
| 211774168 | 211774251 | 211775796 | 211775847 | 211776329 | 211776560 | 211776660 | 211778092 |
| 211778200 | 211778570 | 211778856 | 211779085 | 211779220 | 211779812 | 211779952 | 211780169 |
| 211780359 | 211780408 | 211781041 | 211781289 | 211781374 | 211781567 | 211781646 | 211781726 |
| 211781928 | 211781943 | 211782828 | 211783068 | 211783660 | 211783804 | 211783948 | 211784450 |

**Tabla A.6:** Relación de estrellas encontradas en esta investigación sin clasificar en algún tipo de variabilidad I.

|           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 211784461 | 211784657 | 211784760 | 211784767 | 211785417 | 211785744 | 211786516 | 211786535 |
| 211786766 | 211786773 | 211786983 | 211787179 | 211786535 | 211787971 | 211788746 | 211788770 |
| 211788820 | 211788980 | 211789693 | 211789701 | 211790531 | 211789309 | 211789644 | 211790939 |
| 211791237 | 211791239 | 211791258 | 211791313 | 211793462 | 211794996 | 211795325 | 211795467 |
| 211795547 | 211795569 | 211795951 | 211797013 | 211797100 | 211797598 | 211798643 | 211798730 |
| 211798998 | 211799255 | 211799301 | 212032094 | 212032504 | 212032571 | 212035207 | 212035609 |
| 212035632 | 212067999 | 212069781 | 212075663 | 212075682 | 212076659 | 212079605 | 212080434 |
| 212081001 | 212081118 | 212082092 | 212085291 | 212093008 | 211606027 | 211606790 | 211613659 |
| 211681838 | 211682103 | 211684390 | 211685398 | 211685572 | 211685798 | 211685831 | 211686083 |
| 211688980 | 211688874 | 211686645 | 211686973 | 211687747 | 211687852 | 211689870 | 211690002 |
| 211690143 | 211690228 | 211690329 | 211690385 | 211691631 | 211692432 | 211692504 | 211693102 |
| 211694279 | 211695488 | 211695537 | 211696164 | 211696557 | 211697293 | 211966682 | 211967082 |
| 211967157 | 211967374 | 211967613 | 211967812 | 211968082 | 211968415 | 211968531 | 211969078 |
| 211969198 | 211969471 | 211969772 | 211969853 | 211969970 | 211970036 | 211970463 | 211970537 |
| 211970567 | 211970766 | 211970861 | 211970884 | 211971943 | 211973540 | 211973688 | 211973696 |
| 211973760 | 211975485 | 211976700 | 211976838 | 211977009 | 211977390 | 211977407 | 211977987 |
| 211978243 | 211979593 | 211980375 | 211981119 | 211982810 | 211984234 | 211984869 | 211986534 |
| 211987186 | 211988627 | 211989185 | 211990480 | 211991618 | 211993215 | 211996306 | 211352051 |
| 211351144 | 211346742 | 211357745 | 211360828 | 211364538 | 211383712 | 211384219 | 211384348 |
| 211384441 | 211384514 | 211384551 | 211385456 | 212099100 | 212099156 | 212099519 | 212099787 |
| 212099852 | 212100113 | 212100385 | 212100544 | 212101360 | 212101812 | 212101911 | 212102279 |
| 212102461 | 212103052 | 212103211 | 212103723 | 212104314 | 212105099 | 212105172 | 212105216 |
| 212105534 | 212106660 | 212106811 | 212107152 | 212107694 | 212109256 | 212110060 | 212111203 |
| 212111382 | 212111535 | 212111690 | 212111796 | 212112039 | 212112700 | 212113947 | 212114917 |
| 212116215 | 212117085 | 212117377 | 212120820 | 212121121 | 212121239 | 212121477 | 212125681 |
| 212132034 | 212132195 | 212132538 | 212132725 | 212133350 | 212134547 | 212135941 | 212137985 |
| 212138308 | 212138325 | 212143612 | 212143835 | 212144032 | 212147511 | 211935695 | 211939692 |
| 211566266 | 211566654 | 211567175 | 211567552 | 211567727 | 211567819 | 211568131 | 211568798 |
| 211569580 | 211569756 | 211570282 | 211570415 | 211570523 | 211570780 | 211570903 | 211570919 |
| 211570984 | 211571082 | 211571712 | 211571772 | 211571821 | 211571871 | 211571891 | 211572265 |
| 211572370 | 211572480 | 211572587 | 211572685 | 211572742 | 211573032 | 211573047 | 211573185 |
| 211573418 | 211573467 | 211573713 | 211573718 | 211574773 | 211574854 | 211575521 | 211576910 |
| 211577136 | 211577357 | 211578084 | 211387132 | 211388452 | 211388801 | 211389052 | 211390135 |
| 211390158 | 211390221 | 211390587 | 211390677 | 211391297 | 211393988 | 211395085 | 211395594 |
| 211395575 | 211395668 | 211396155 | 211396093 | 211396074 | 211395971 | 211396313 | 211396255 |
| 211396228 | 211396162 | 211396963 | 211398813 | 211401317 | 211401787 | 211401704 | 211402436 |
| 211402641 | 211403356 | 211404031 | 211403975 | 211404853 | 211405799 | 211406236 | 211406404 |
| 211406619 | 211407665 | 211407666 | 211407755 | 211408505 | 211410106 | 211411594 | 211411704 |
| 211412188 | 211414200 | 211311380 | 211316704 | 211317649 | 211319617 | 211319779 | 211341389 |
| 211335816 | 211803949 | 211809171 | 211817229 | 211829300 | 211829372 | 211830693 | 211835688 |
| 211835966 | 211724246 | 211726372 | 211730267 | 211738345 | 211741678 | 211752909 | 211755197 |
| 211756885 | 211758096 | 211905259 | 211912350 | 211915017 | 211916836 | 211918762 | 211918855 |
| 211921220 | 211606670 | 211934172 | 211999823 | 212009815 | 212009882 | 212012290 | 212018863 |
| 212022763 | 212022790 | 212024371 | 212024437 | 212025456 | 212026310 | 212026416 | 212027371 |
| 212027482 | 212027750 | 228682550 | 228682592 | 228682608 | 228682609 | 228682611 | 228682763 |

**Tabla A.7:** Relación de estrellas encontradas en esta investigación sin clasificar en algún tipo de variabilidad II.



|           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 228682767 | 228683135 | 251809164 | 251809324 | 251809370 | 251812067 | 251812073 | 251812074 |
| 251813732 | 211935448 | 211935695 | 211935709 | 211935900 | 211935909 | 211936274 | 211936772 |
| 211936741 | 211937198 | 211937321 | 211578751 | 211578833 | 211579756 | 211580045 | 211580521 |
| 211580526 | 211580845 | 211581468 | 211581933 | 211582351 | 211582474 | 211582810 | 211583387 |
| 211584090 | 211585746 | 211937678 | 211938161 | 211938210 | 211938397 | 211939003 | 211939014 |
| 211939099 | 211588811 | 211588810 | 211588622 | 211587617 | 211587705 | 211587951 | 211589307 |
| 211580526 | 211580845 | 211581468 | 211581933 | 211582351 | 211582474 | 211582810 | 211583387 |
| 211584090 | 211585746 | 211937678 | 211938161 | 211938210 | 211938397 | 211939003 | 211939014 |
| 211939099 | 211588811 | 211588810 | 211588622 | 211587617 | 211587705 | 211587951 | 211589307 |
| 211589822 | 211590050 | 211590488 | 211939990 | 211940062 | 211940147 | 211940381 | 211940500 |
| 211940522 | 211941362 | 211941605 | 211941698 | 211943231 | 211944176 | 211944662 | 211945252 |
| 211945784 | 211946177 | 211946944 | 211591996 | 211592236 | 211592538 | 211592641 | 211592655 |
| 211592851 | 211593760 | 211593802 | 211593819 | 211593927 | 211594262 | 211594465 | 211594771 |
| 211595150 | 211596045 | 211596378 | 211596529 | 211596775 | 211597156 | 211597204 | 211597240 |
| 211597295 | 211598070 | 211598272 | 211598516 | 211598671 | 211598703 | 211947096 | 211947381 |
| 211947573 | 211947816 | 211948384 | 211948860 | 211949189 | 211949788 | 211950132 | 211950347 |
| 211950523 | 211951008 | 211951223 | 211599541 | 211599622 | 211600735 | 211601289 | 211601415 |
| 211603374 | 211603957 | 211604417 | 211604525 | 211952450 | 211952500 | 211952571 | 211953102 |

**Tabla A.8:** Relación de estrellas encontradas en esta investigación sin clasificar en algún tipo de variabilidad III.

Las gráficas correspondientes a las curvas de luz, los periodogramas y las curvas en fase de las estrellas variables clasificadas en alguno de los grupos de estrellas variables pueden ser consultadas en este [enlace](#). Las estrellas clasificadas como irregulares no aparecen en este enlace ya que carece de interés observar sus correspondientes gráficas si no presentan una variabilidad clara.



## Apéndice B

# Estrellas candidatas de los cúmulos abiertos M44 y M67

A lo largo de este apéndice se mostrarán el conjunto de candidatos a formar parte de los cúmulos abiertos captados en la campaña 18 de la misión extendida K2. Se ofrecerá el EPIC, las coordenadas, distancia, movimientos propios y el tipo de estrella en caso de que pertenezca a nuestro catálogo.

### B.1. Candidatos para el cúmulo M44

Se recuerdan los criterios de búsqueda para este cúmulo abierto: distancia  $d = 173,5 \pm 14,5$  pc, coordenadas pertenecientes al ángulo sólido de  $3,5^\circ$  de apertura centrado en  $8^h 40,1^{min}$  ( $8.668h$ ) de ascensión recta y  $19^\circ 59'$  de declinación (19.983) y movimientos propios  $\mu_\alpha = -35,990 \pm 5,399$  mas/yr,  $\mu_\delta = -12,920 \pm 1,938$ .

| EPIC      | $\alpha$ (h) | $\delta$ ( $^\circ$ ) | $d$ (pc) | $\mu_\alpha$ (mas/yr) | $\mu_\delta$ (mas/yr) | Tipo      |
|-----------|--------------|-----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| 211843786 | 8.645        | 17.9332               | 171.9661 | -34.66                | -12.765               | Rotación  |
| 211889082 | 8.4996       | 18.5667               | 175.6852 | -33.497               | -13.148               | Irregular |
| 211891359 | 8.7438       | 18.5992               | 184.1722 | -36.977               | -11.868               | -         |
| 211891774 | 8.7973       | 18.6054               | 186.9963 | -38.067               | -12.38                | Rotación  |
| 211891961 | 8.6718       | 18.6083               | 185.6665 | -37.247               | -11.779               | -         |
| 211895099 | 8.6263       | 18.6543               | 183.392  | -36.8                 | -12.503               | -         |
| 211900619 | 8.6038       | 18.7355               | 181.8083 | -35.658               | -13.027               | -         |
| 211901010 | 8.636        | 18.7417               | 171.2593 | -34.706               | -12.502               | Rotación  |
| 211901847 | 8.7267       | 18.7539               | 181.1135 | -36.567               | -12.399               | -         |
| 211902720 | 8.7033       | 18.7668               | 174.9169 | -36.404               | -12.807               | -         |
| 211903302 | 8.6498       | 18.7753               | 176.1463 | -35.927               | -12.703               | -         |
| 211781646 | 8.6887       | 17.0557               | 179.4881 | -36.455               | -12.13                | Irregular |
| 212033939 | 8.7152       | 20.8192               | 185.4599 | -37.546               | -14.088               | -         |

**Tabla B.1:** Candidatos obtenidos para el cúmulo M44 I, el símbolo - denota que la estrella no está en nuestro catálogo.

| EPIC      | $\alpha$ (h) | $\delta$ (°) | $d$ (pc) | $\mu_\alpha$ (mas/yr) | $\mu_\delta$ (mas/yr) | Tipo      |
|-----------|--------------|--------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| 211967157 | 8.7988       | 19.7328      | 180.1802 | -38.512               | -12.284               | Irregular |
| 211967421 | 8.6634       | 19.7368      | 184.5563 | -34.561               | -13.01                | Rotación  |
| 211967873 | 8.7261       | 19.7438      | 178.3739 | -37.942               | -13.986               | -         |
| 211969170 | 8.6707       | 19.7639      | 184.3726 | -36.69                | -12.683               | -         |
| 211970517 | 8.7577       | 19.7844      | 178.1071 | -35.548               | -13.786               | -         |
| 211970613 | 8.6524       | 19.7856      | 176.2208 | -35.137               | -12.042               | -         |
| 211971354 | 8.5283       | 19.7984      | 186.8146 | -32.548               | -11.514               | Rotación  |
| 211971356 | 8.6614       | 19.7984      | 170.1462 | -38.082               | -13.996               | -         |
| 211972086 | 8.8476       | 19.8101      | 186.9963 | -36.267               | -12.869               | EB        |
| 211972627 | 8.6866       | 19.8186      | 183.952  | -36.308               | -13.177               | -         |
| 211973314 | 8.6867       | 19.8295      | 185.2469 | -36.394               | -13.57                | -         |
| 211973760 | 8.807        | 19.8366      | 179.6881 | -37.999               | -13.134               | Irregular |
| 211974702 | 8.6759       | 19.8503      | 185.6907 | -34.899               | -12.454               | -         |
| 211975006 | 8.6864       | 19.8552      | 186.0431 | -36.417               | -13.932               | -         |
| 211975504 | 8.6488       | 19.8624      | 174.0008 | -35.581               | -14.125               | -         |
| 211975518 | 8.715        | 19.8626      | 186.1677 | -37.817               | -11.347               | -         |
| 211978779 | 8.7315       | 19.9136      | 186.3933 | -35.977               | -13.245               | -         |
| 211979334 | 8.6805       | 19.9219      | 185.8943 | -34.839               | -12.006               | -         |
| 211979345 | 8.6876       | 19.922       | 181.9638 | -36.816               | -13.408               | -         |
| 211980142 | 8.6829       | 19.9349      | 186.5463 | -35.823               | -13.247               | -         |
| 211982334 | 8.6932       | 19.9691      | 184.5938 | -36.226               | -13.79                | -         |
| 211982810 | 8.5483       | 19.9766      | 186.9963 | -34.44                | -13.81                | Irregular |
| 211982945 | 8.6341       | 19.9786      | 183.3046 | -35.305               | -12.563               | -         |
| 211983476 | 8.691        | 19.9876      | 186.703  | -37.256               | -13.466               | -         |
| 211983499 | 8.6359       | 19.9879      | 179.5203 | -35.574               | -13.101               | -         |
| 211983916 | 8.6714       | 19.9943      | 186.853  | -35.489               | -12.468               | -         |
| 211985346 | 8.6651       | 20.0181      | 183.0228 | -36.137               | -13.536               | -         |
| 211986537 | 8.688        | 20.0378      | 184.5359 | -36.667               | -12.594               | -         |
| 211986948 | 8.6513       | 20.0438      | 181.8645 | -37.751               | -13.949               | -         |
| 211988223 | 8.636        | 20.064       | 182.7686 | -36.325               | -12.757               | -         |
| 211989060 | 8.6003       | 20.0779      | 169.595  | -35.128               | -14.092               | -         |
| 211989185 | 8.543        | 20.0801      | 180.7305 | -34.713               | -13.64                | Irregular |
| 211990019 | 8.6398       | 20.0932      | 168.2369 | -36.986               | -12.134               | -         |
| 211990908 | 8.6733       | 20.1068      | 184.604  | -36.063               | -13.149               | -         |
| 211992034 | 8.6131       | 20.1239      | 182.2025 | -34.39                | -13.45                | -         |
| 211992053 | 8.663        | 20.1243      | 160.6529 | -34.319               | -14.853               | -         |
| 211992880 | 8.6397       | 20.1374      | 182.9224 | -34.884               | -14.623               | -         |
| 211993172 | 8.7107       | 20.1422      | 186.7972 | -36.329               | -13.018               | -         |
| 211994121 | 8.6666       | 20.1583      | 185.577  | -37.314               | -13.9                 | Irregular |
| 211994672 | 8.6982       | 20.167       | 184.7951 | -36.19                | -12.421               | -         |
| 211996831 | 8.6759       | 20.2017      | 180.7501 | -36.086               | -13.899               | -         |
| 211946007 | 8.7114       | 19.4144      | 186.5428 | -36.805               | -13.133               | -         |
| 211916756 | 8.6246       | 18.9767      | 180.6619 | -35.768               | -12.386               | -         |
| 211922849 | 8.7295       | 19.0663      | 183.6952 | -37.496               | -13.229               | -         |
| 211931309 | 8.6763       | 19.1943      | 182.3254 | -36.286               | -13.474               | -         |
| 211934172 | 8.6835       | 19.238       | 182.6017 | -33.927               | -12.935               | Irregular |

**Tabla B.2:** Candidatos obtenidos para el cúmulo M44 II, el símbolo - denota que la estrella no pertenece a nuestro catálogo.

| EPIC      | $\alpha$ (h) | $\delta$ (°) | $d$ (pc) | $\mu_\alpha$ (mas/yr) | $\mu_\delta$ (mas/yr) | Tipo      |
|-----------|--------------|--------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| 212018902 | 8.6379       | 20.5678      | 185.3568 | -34.998               | -14.13                | -         |
| 212024554 | 8.6465       | 20.6622      | 179.4656 | -35.681               | -13.45                | -         |
| 251809164 | 8.6635       | 19.77        | 184.2978 | -36.327               | -13.41                | Irregular |
| 211935518 | 8.6989       | 19.2574      | 186.8775 | -35.891               | -12.811               | -         |
| 211935558 | 8.6442       | 19.258       | 183.8168 | -36.779               | -12.645               | -         |
| 211936827 | 8.7036       | 19.277       | 183.6783 | -36.758               | -12.531               | -         |
| 211939206 | 8.665        | 19.3126      | 185.2263 | -36.004               | -13.669               | -         |
| 211945362 | 8.6593       | 19.4049      | 178.7598 | -34.814               | -12.353               | -         |
| 211949163 | 8.6655       | 19.4603      | 176.1277 | -37.195               | -13.482               | -         |
| 211949871 | 8.8018       | 19.4705      | 184.8497 | -38.537               | -12.748               | Rotación  |
| 211950227 | 8.6742       | 19.4758      | 186.5776 | -35.899               | -12.155               | -         |
| 211951223 | 8.8781       | 19.4913      | 176.7065 | -39.595               | -12.808               | Irregular |
| 211952381 | 8.6866       | 19.5089      | 186.7204 | -35.35                | -11.836               | -         |
| 211954593 | 8.7117       | 19.5432      | 186.8705 | -37.018               | -12.479               | Irregular |
| 211955036 | 8.6646       | 19.5506      | 185.4187 | -35.891               | -12.617               | Irregular |
| 211955417 | 8.6142       | 19.5564      | 183.5907 | -33.049               | -13.15                | -         |

**Tabla B.3:** Candidatos obtenidos para el cúmulo M44 III, el símbolo - denota que la estrella no pertenece a nuestro catálogo.

## B.2. Candidatos para el cúmulo M67

Se recuerdan los criterios de búsqueda para este cúmulo abierto: distancia  $d = 890 \pm 90$  pc, coordenadas pertenecientes al ángulo sólido de  $3,5^\circ$  de apertura centrado en  $8^h 51^{min}$  ( $8,855h$ ) de ascensión recta y  $11^\circ 48'$  de declinación ( $11,967$ ) y movimientos propios  $\mu_\alpha = -10,913 \pm 1,637$  mas/yr,  $\mu_\delta = -2,801 \pm 0,420$  mas/yr.

| EPIC      | $\alpha$ (h) | $\delta$ (°) | $d$ (pc) | $\mu_\alpha$ (mas/yr) | $\mu_\delta$ (mas/yr) | Tipo      |
|-----------|--------------|--------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| 211432140 | 8.8583       | 12.1274      | 868.4325 | -10.982               | -2.445                | Irregular |
| 211416111 | 8.8524       | 11.8839      | 928.5913 | -10.915               | -2.411                | -         |
| 211380313 | 8.8717       | 11.3273      | 828.0202 | -11.050               | -2.881                | -         |
| 211388452 | 8.8588       | 11.4588      | 901.7133 | -10.916               | -2.998                | Irregular |
| 211390158 | 8.8294       | 11.4860      | 891.5040 | -11.098               | -3.024                | Irregular |
| 211391297 | 8.8448       | 11.5051      | 834.1675 | -11.008               | -2.929                | Irregular |
| 211391585 | 8.8947       | 11.5102      | 899.7661 | -10.944               | -2.768                | -         |
| 211391779 | 8.8651       | 11.5130      | 903.4240 | -10.994               | -2.696                | Irregular |
| 211392837 | 8.8702       | 11.5303      | 842.8150 | -11.064               | -2.762                | -         |
| 211393067 | 8.8728       | 11.5341      | 802.9549 | -10.961               | -3.185                | -         |
| 211396155 | 8.8582       | 11.5826      | 908.5128 | -11.229               | -2.785                | Irregular |
| 211395971 | 8.8853       | 11.5799      | 906.1254 | -10.806               | -2.795                | Irregular |
| 211401317 | 8.8776       | 11.6597      | 963.0200 | -12.022               | -2.428                | Irregular |

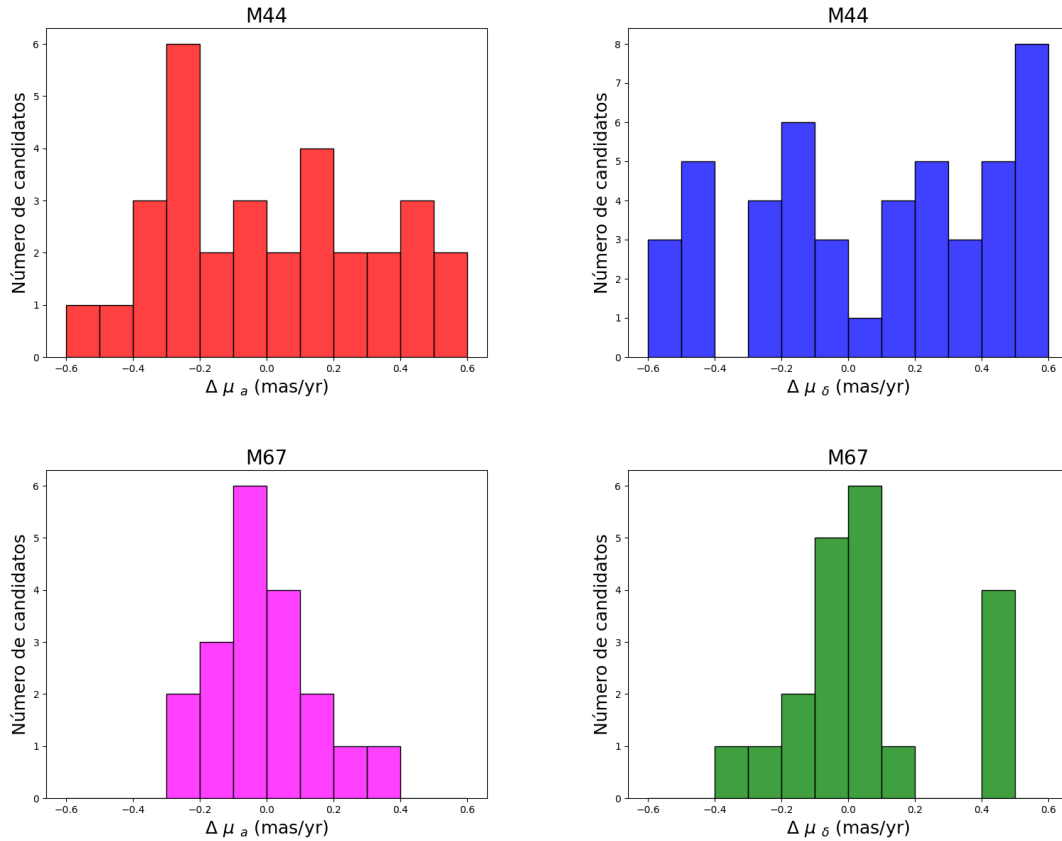
**Tabla B.4:** Candidatos obtenidos para el cúmulo M67 I, el símbolo - denota que la estrella no pertenece a nuestro catálogo.

| EPIC      | $\alpha$ (h) | $\delta$ ( $^{\circ}$ ) | $d$ (pc) | $\mu_{\alpha}$ (mas/yr) | $\mu_{\delta}$ (mas/yr) | Tipo      |
|-----------|--------------|-------------------------|----------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| 211403356 | 8.8329       | 11.6925                 | 837.0302 | -10.728                 | -2.829                  | Irregular |
| 211403975 | 8.8340       | 11.7027                 | 864.0802 | -10.978                 | -2.762                  | Irregular |
| 211406540 | 8.8723       | 11.7407                 | 838.5744 | -11.127                 | -3.142                  | -         |
| 211407666 | 8.8551       | 11.7582                 | 864.6031 | -11.259                 | -2.407                  | Irregular |
| 211409376 | 8.8556       | 11.7841                 | 825.8320 | -10.634                 | -2.944                  | -         |
| 211413515 | 8.8595       | 11.8446                 | 916.0865 | -10.768                 | -2.877                  | -         |
| 211414351 | 8.8267       | 11.8571                 | 929.1953 | -10.985                 | -2.922                  | -         |

**Tabla B.5:** Candidatos obtenidos para el cúmulo M67 II, el símbolo - denota que la estrella no pertenece a nuestro catálogo.

### B.3. Distribuciones de movimientos propios para los cúmulos M44 y M67

Histogramas correspondientes a las Figuras 4.4 y 4.5.



**Figura B.1:** Histogramas que muestran las distribuciones de movimientos propios para cada cúmulo abierto y para cada dirección de la bóveda celeste, arriba cúmulo M44 y abajo cúmulo M67.

# Referencias

- [1] Manan Agarwal, Khushboo K Rao, Kaushar Vaidya, and Souradeep Bhattacharya. ML-moc: Machine learning (knn and gmm) based membership determination for open clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502(2):2582–2599, 2021.
- [2] Julia Alfonso-Garzon, Benjamin Montesinos, Andres Moya, J Miguel Mas-Hesse, and Susana Martin-Ruiz. Omc/integral photometric observations of pulsating components in eclipsing binaries and characterization of dy aqr. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 443(4):3022–3032, 2014.
- [3] Luis A Balona. Gaia luminosities of pulsating af stars in the kepler field. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 479(1):183–191, 2018.
- [4] SCC Barros, O Demangeon, and M Deleuil. New planetary and eb candidates from campaigns 1-6 of the k2 mission. *arXiv preprint arXiv:1607.02339*, 2016.
- [5] G Fritz Benedict, BE McArthur, LW Fredrick, TE Harrison, CL Slesnick, J Rhee, RJ Patterson, MF Skrutskie, OG Franz, LH Wasserman, et al. Astrometry with the hubble space telescope: a parallax of the fundamental distance calibrator  $\delta$  cephei. *The Astronomical Journal*, 124(3):1695, 2002.
- [6] Anupam Bhardwaj, Marina Rejkuba, Richard de Grijs, Soung-Chul Yang, Gregory J Herczeg, Marcella Marconi, Harinder P Singh, Shashi Kanbur, and Chow-Choong Ngeow. Rr lyrae variables in messier 53: Near-infrared period–luminosity relations and the calibration using gaia early data release 3. *The Astrophysical Journal*, 909(2):200, 2021.
- [7] JL Christiansen, A Derekas, LL Kiss, MCB Ashley, SJ Curran, Duane Willis Hamacher, MG Hidas, MR Thompson, JK Webb, and TB Young. The university of new south wales extrasolar planet search: a catalogue of variable stars from fields observed between 2004 and 2007. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 385(4):1749–1763, 2008.
- [8] Tyler A Gordon, James RA Davenport, Ruth Angus, Daniel Foreman-Mackey, Eric Agol, Kevin R

Covey, Marcel Agüeros, and David Kipping. Stellar rotation in the k2 sample: Evidence for broken spindown. *arXiv e-prints*, pages arXiv–2101, 2021.

- [9] Martin AT Groenewegen and Monika Jurkovic. The period-luminosity and period-radius relations of type ii and anomalous cepheids. *arXiv preprint arXiv:1705.04487*, 2017.
- [10] Joyce Ann Guzik. Highlights of discoveries for  $\delta$  scuti variable stars from the kepler era. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8:55, 2021.
- [11] Steve B Howell, Charlie Sobeck, Michael Haas, Martin Still, Thomas Barclay, Fergal Mullally, John Troeltzsch, Suzanne Aigrain, Stephen T Bryson, Doug Caldwell, et al. The k2 mission: characterization and early results. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126(938):398, 2014.
- [12] Pouria Khalaj and Holger Baumgardt. The stellar mass function, binary content and radial structure of the open cluster praesepe derived from ppmxl and sdss data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 434(4):3236–3245, 2013.
- [13] Geza Kovács, Shay Zucker, and Tsevi Mazeh. A box-fitting algorithm in the search for periodic transits. *Astronomy & Astrophysics*, 391(1):369–377, 2002.
- [14] Adam L Kraus and Lynne A Hillenbrand. The stellar populations of praesepe and coma berenices. *The Astronomical Journal*, 134(6):2340, 2007.
- [15] Alexios Liakos and Panagiotis Niarchos. Poetry in motion: Asteroseismology of delta scuti stars in binaries using kepler data. *arXiv preprint arXiv:1606.08638*, 2016.
- [16] M Libralato, D Nardiello, LR Bedin, L Borsato, V Granata, L Malavolta, G Piotto, P Ochner, A Cunial, and V Nascimbeni. A psf-based approach to kepler/k2 data–ii. exoplanet candidates in praesepe (m 44). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463(2):1780–1796, 2016.
- [17] D Nardiello, M Libralato, LR Bedin, G Piotto, L Borsato, V Granata, L Malavolta, and V Nascimbeni. A psf-based approach to kepler/k2 data–iii. search for exoplanets and variable stars within the open cluster m 67 (ngc 2682). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463(2):1831–1843, 2016.
- [18] D Nardiello, M Libralato, LR Bedin, G Piotto, P Ochner, A Cunial, L Borsato, and V Granata. Variable stars in one open cluster within the kepler/k2-campaign-5 field: M 67 (ngc 2682). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455(3):2337–2344, 2016.



- [19] B Paczyński, DM Szczygieł, B Pilecki, and G Pojmański. Eclipsing binaries in the all sky automated survey catalogue. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 368(3):1311–1318, 2006.
- [20] David J Pinfield, PD Dobbie, Richard F Jameson, IA Steele, HRA Jones, and AC Katsiyannis. Brown dwarfs and low-mass stars in the pleiades and praesepe: membership and binarity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 342(4):1241–1259, 2003.
- [21] Andrej Prša, Natalie Batalha, Robert W Slawson, Laurance R Doyle, William F Welsh, Jerome A Orosz, Sara Seager, Michael Rucker, Kimberly Mjaseth, Scott G Engle, et al. Kepler eclipsing binary stars. i. catalog and principal characterization of 1879 eclipsing binaries in the first data release. *The Astronomical Journal*, 141(3):83, 2011.
- [22] Timo Reinhold, Keaton J Bell, James Kuszlewicz, Saskia Hekker, and Alexander I Shapiro. Transition from spot to faculae domination—an alternate explanation for the dearth of intermediate\textit {Kepler} rotation periods. *arXiv preprint arXiv:1810.11250*, 2018.
- [23] Timo Reinhold and Saskia Hekker. Stellar rotation periods from k2 campaigns 0–18—evidence for rotation period bimodality and simultaneous variability decrease. *Astronomy & Astrophysics*, 635:A43, 2020.
- [24] I Soszynski, R Poleski, A Udalski, MK Szymanski, M Kubiak, G Pietrzynski, L Wyrzykowski, O Szewczyk, and K Ulaczyk. The optical gravitational lensing experiment. the ogle-iii catalog of variable stars. i. classical cepheids in the large magellanic cloud. *arXiv preprint arXiv:0808.2210*, 2008.
- [25] PF Wang, WP Chen, CC Lin, AK Pandey, CK Huang, N Panwar, CH Lee, MF Tsai, C-H Tang, B Goldman, et al. Characterization of the praesepe star cluster by photometry and proper motions with 2mass, ppmxl, and pan-starrs. *The Astrophysical Journal*, 784(1):57, 2014.
- [26] KADRİ Yakut, Wolfgang Zima, BELİNDİ Kalomeni, Hans Van Winckel, Christoffel Waelkens, P De Cat, Eva Bauwens, M Vučković, Sophie Saesen, L Le Guillou, et al. Close binary and other variable stars in the solar-age galactic open cluster m 67. *Astronomy & Astrophysics*, 503(1):165–176, 2009.
- [27] M Zechmeister and M Kürster. The generalised lomb-scargle periodogram—a new formalism for the floating-mean and keplerian periodograms. *Astronomy & Astrophysics*, 496(2):577–584, 2009.
- [28] Elham Ziaali, Timothy R Bedding, Simon J Murphy, Timothy Van Reeth, and Daniel R Hey. The period–luminosity relation for  $\delta$  scuti stars using gaia dr2 parallaxes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486(3):4348–4353, 2019.