

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Físico Matemático

Búsqueda y Estudio Fotométrico de Variables Cataclísmicas

Tesis de Maestría en Astrofísica Planetaria y Tecnologías Afines

Presentada por:

**Ramón Caballero
Villegas**

Asesor:

**Dr. Andrés Alberto
Avilés Alvarado**

Año Académico 2022-2023

Resumen

Las *variables cataclísmicas* son un tipo de sistemas binarios con un comportamiento particular. Estas están compuestas comúnmente de una estrella *enana blanca* y una de *secuencia principal*, donde material fluye de la secuencia principal hacia la enana blanca, por lo cual se les llama sistemas en contacto. De esto surge el fenómeno de las explosiones *nova*, en donde el material acrecido es lanzado de manera violenta al medio interestelar, causando un aumento en el brillo del sistema. Este abrillantamiento es una de las características más llamativas de las variables cataclísmicas, siendo un comportamiento volátil y periódico cuyo mecanismo no ha sido completamente explorado.

A pesar de ser objetos de interés son relativamente pocas los sistemas identificados como VCs en la literatura. Hasta recientemente solo se han podido encontrar poco más de 1,000 VCs; esto limita posibles observaciones a una parte pequeña de la población en la Galaxia, lo cual causa un desacuerdo en los mecanismos en juego en la evolución de estos mismos. Cada nuevo sistema observado provee datos útiles que ayudan a desarrollar un modelo general no solo para las VCs, si no que también para la estructura y evolución de estrellas solas como nuestro Sol.

Esta tesis tiene de objetivo encontrar candidatas a VCs dentro del catálogo de *Gaia*, implementando una búsqueda fotométrica basado en filtros de colores de las bandas del *Sloan Digital Sky Survey*, con énfasis en encontrar sistemas previamente no observados. De los sistemas candidatos se llevo a cabo un estudio fotométrico desde el Observatorio Astronómico Universitario de la Universidad Autónoma de Nuevo León, ubicado en el Municipio de Iturbide Nuevo León. Como resultado final de este trabajo se presenta las curvas de luz de cada objeto, obteniendo de estas varios parámetros efemérides de los sistemas.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 2 |
| 1.1. Estrellas | 2 |
| 1.1.1. Formación | 2 |
| 1.1.2. Evolución | 3 |
| 1.2. Sistemas Binarios | 3 |
| 1.2.1. Clasificaciones Observacionales | 3 |
| 1.2.2. Binarias en Contacto | 4 |
| 1.3. Variables Cataclísmicas | 4 |
| 1.3.1. Clasificación | 4 |
| 1.3.2. Evolución | 4 |
| 1.3.3. Componentes | 4 |
| 1.4. Enana Blanca | 4 |
| 1.5. Enana Roja | 6 |
| 2. Muestra | 7 |
| 2.1. Catálogos | 7 |
| 2.1.1. Gaia | 7 |
| 2.1.1.1. Fotometría | 7 |
| 2.1.1.2. Data Release 2 | 7 |
| 2.1.2. Sloan Digital Sky Survey | 8 |
| 2.1.2.1. Data Release 9 | 8 |
| 2.2. Szkody, et al.: Cataclysmic Variables from the Sloan Digital Sky Survey | 8 |
| 2.2.1. Encontrando Candidatas a VCs | 9 |
| 2.3. Criterios de Selección | 9 |
| 2.3.1. Búsqueda Fotométrica | 9 |
| 3. Metodología | 10 |
| 3.1. Análisis del Periodo Orbital | 10 |
| 3.2. Modelo Computacional | 12 |
| 3.2.1. Estimaciones Iniciales | 12 |
| 3.2.1.1. Elección de Modelo Inicial | 12 |
| A. Gaia ADQL Encuestas | 15 |
| A.1. DR2 | 15 |
| A.2. DR3 | 16 |
| Bibliografía | 18 |

Capítulo 1

Introducción

1.1 Estrellas

Las **estrellas** son de los objetos más fundamentales e importantes en el estudio de los astros. LeBlanc (2010a) define una estrella como “un objeto celeste en el cual existe, o alguna vez existió (en el caso de una estrella muerta) fusión de hidrógeno sostenido en su núcleo.” Dentro del núcleo de cada estrella activa se forjan nuevos elementos más pesados debido a estas reacciones termonucleares, primero generando el helio mediante el siguiente proceso: $4\ ^1\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He} + E$, hasta después llegar a la fusión del helio para formar el carbono mediante el *proceso triple-alfa* en cuanto se agote el hidrógeno dentro de la estrella. Dentro de todas las estrellas existe un balance de fuerzas que mantiene la forma esférica de la estrella; esto se le conoce como el *equilibrio hidrostático*, en el cual la presión interna de la estrella tiene una contra-fuerza equivalente del peso de su mismo gas. Este balance es modelado a escalas menores a las de las propiedades macroscópicas de la estrella Prialnik (2010), en la cual la estrella está en un estado de *equilibrio termodinámico local*.

El equilibrio termodinámico local es caracterizado por el comportamiento promedio de las partículas del plasma estelar. Esto se ve en las escalas del tiempo y el espacio de colisiones en el plasma estelar—descritos por el *tiempo libre medio* y el *camino libre medio* respectivamente—las cuales son mucho menor que las dimensiones de variación temporales y espaciales de una estrella en el caso del equilibrio local.

1.1.1 Formación

El **medio interestelar** (ISM por sus siglas en inglés) es el hogar de toda la materia que existe dentro de nuestra Galaxia. Está compuesta de todo el polvo, gas, e incluso los rayos cósmicos que atraviesan el espacio hasta llegar a la Tierra donde los podemos detectar. Mucho de este material termina siendo acumulado en volúmenes discretos en el espacio. Estas nebulosas llegan a temperaturas extremadamente frías, llegando hasta los 10-20° K en su estado de equilibrio. En cuanto esta nube es perturbada por alguna fuerza externa su configuración empieza a evolucionar. Empiezan a aparecer regiones de mayor densidad, donde el material se comienza a acumular, aumentando la masa del volumen local y junto a ella la fuerza gravitacional que ejerce en el resto de la nube. A lo largo del tiempo el material se empieza a calentar por el mismo colapso gravitacional, en la cual la energía gravitacional es convertida a energía térmica en las partículas. En cuanto el material logre calentarse lo suficiente para que el hidrógeno puede empezar a fusionar a helio el conjunto de material se convierte en una **protoestrella**, la primera fase en la formación y evolución de una estrella.

El proceso de colapso gravitacional necesariamente requiere una masa mínima para que las reacciones termonucleares ocurran de una manera sustentable tal como se observa en una estre-

lla. El material acumulado debe consistir de al menos $0,08M_{\odot}$ [LeBlanc \(2010b\)](#); de no cumplir con esta condición, el cúmulo de gas y polvo no logrará mantener la cadena de reacciones termonucleares en su núcleo, resultando en un objeto inerte, una *enana café*.

1.1.2 Evolución

En el transcurso del tiempo una estrella va a estar sujeta a ciertos cambios en su estructura característica. Esto se debe a que podemos considerar a una estrella cómo un objeto aislado en el espacio, lo cual significa que no tendrá algún ingreso de material significativo para reemplazar el combustible “quemado” en las reacciones termonucleares. A lo largo del tiempo la composición física y química de la estrella deberán cambiar para mantener el equilibrio termodinámico.

El combustible primario de una estrella viene siendo el hidrógeno atómico, el cual se fusiona con otros átomos (protones individuales) libres, resultando en la producción de grandes cantidades de energía en forma de radiación, dejando en el lugar de los dos protones un átomo de helio. El helio no es inmediatamente útil para la estrella cómo combustible; el helio requiere temperaturas más altas de las que actualmente están presentes en el núcleo para poder fusionar entre sí. Todas las estrellas conocidas pasan por esta etapa de evolución estelar; mientras que una estrella dependa principalmente del hidrógeno para brillar se dice que está en su etapa de *secuencia principal*.

1.2 Sistemas Binarios

La gran mayoría de sistemas estelares dentro de nuestra Galaxia no son aquellos solitarios como nuestro propio sistema solar, si no que son compuestas de dos o más estrellas ubicadas en corta aproximación de una a otra, a ordenes de unidades astronómicas (AU por sus siglas en inglés). Estos sistemas múltiples se pueden clasificar con mayor precisión para aquellos compuestos de solo dos estrellas, denominados como *sistemas binarios*. Dentro de un sistema binario la corta separación orbital entre ambas estrellas da como consecuencia a fenómenos que surgen mediante la interacción entre las componentes, tanto como la interacción gravitacional debido a sus masas, como a la física interesante que ocurre en el caso de interacciones de material entre una estrella a otra.

1.2.1 Clasificaciones Observacionales

Dependiendo del método de detección y las propiedades aparentes del sistema se puede clasificar un sistema binario de estrellas. Estas clasificaciones son independiente de sus propiedades físicas, como la clase espectral de cada estrella o sus masas individuales. Al determinar su clasificación observacional se puede delimitar las técnicas observacionales que son viables para recabar datos del sistema; un sistema astrométrico sería indistinguible de uno espectroscópico si uno intenta identificar las componentes individuales a simple vista, o con un telescopio demasiado débil para el trabajo.

Las *binarias visuales* son aquellos cuya separación orbital aparente es suficientemente grande para distinguir las dos estrellas individuales en la bóveda celeste. A pesar de que se puede trazar la órbita de la secundaria con varios años de observaciones, se requiere de cálculos adicionales para determinar la órbita exacta de las componentes. Esto se debe a la inclinación del sistema con respecto al eje de observación hacia la Tierra; solo es posible observar “una proyección del eclipse orbital relativo en el plano del cielo,” aunque esto se puede superar usando el hecho de que la estrella primaria aparentemente inmóvil debe de estar presente “en un punto focal de la órbita relativa.” [Karttunen et al. \(2017\)](#)

Las *binarias espectroscópicas* presentan variaciones periódicas en sus espectros, en donde las líneas espectrales detectadas “oscilan periodicamente alrededor de la longitud de onda promedio” Kutner (2017a). Esto se observa debido al **desplazamiento de Doppler**, lo cual causa que la frecuencia de un fotón se recorra hacia frecuencias más pequeñas (azules) o más grandes (rojas) dependiendo de su velocidad radial con respecto al observador, si se va acercando o alejando, respectivamente. Estas también pueden identificadas al observar dos distintos grupos de líneas espectrales, el cual es resultado de la contribución de ambas estrellas.

Las *binarias astrométricas*, al igual que las espectroscópicas, solo muestran una componente visible al ser observada, al contrario de las binarias visibles. Sin embargo, una binaria astrométrica difiere de las otras dos categorías definidas en cuestión de su movimiento observado en la bóveda celeste. Estas muestran un movimiento errático y no-lineal, algo que no se esperaría ver en una estrella solitaria dado su inercia según la primera ley de Newton. Estas perturbaciones son causadas por una estrella secundaria no aparente al observar el sistema.

1.2.2 Binarias en Contacto

1.3 Variables Cataclísmicas

1.3.1 Clasificación

1.3.2 Evolución

1.3.3 Componentes

1.4 Enana Blanca

Una estrella nace de una nube molecular interestelar, una región de material ubicada en el espacio entre estrellas. Dependiendo de la masa inicial de el conjunto inicial de material es lo que determina las fases que la estrella pasa al envejecer. El camino que tomaría una estrella de secuencia principal durante el fin de su vida se puede ver en la figura 1.1, donde está marcado los distintos caminos que una estrella toma en el **diagrama Hertzsprung-Russell (HR)**. Este diagrama relaciona la temperatura efectiva de la estrella con su luminosidad, dada en términos de luminosidad solar.

Aquellas estrellas cuyas masas iniciales recae bajo $8.5\text{-}10.6 M_{\odot}$ terminan su vida como una estrella *enana blanca*. Kepler et al. (2017) El ciclo de reacciones nucleares dentro del núcleo de una estrella solo ocurre en la presencia de cierta cantidad de hidrógeno durante su tiempo en la secuencia principal; al acabarse esta fuente de combustible la estrella empieza a colapsar en si misma, ya que la presión radiativa del núcleo hacia el exterior disminuye a tal grado que la presión hacia el interior de su propia gravedad causa el encogimiento de la estrella. Esta disminución de su radio causa que el núcleo se caliente hasta llegar a temperaturas $T \approx 10^8 K$ [Kutner (2017b)], empezando de nuevo reacciones nucleares, esta vez involucrando el helio en vez del hidrógeno. Estas reacciones se conocen como el proceso *triple alfa*, donde tres partículas alfa 4He fusionan para crear un átomo de ^{12}C y un fotón gama. Mientras que en el núcleo ocurren reacciones con elementos cada vez más pesados, el resto de los elementos más livianos (ya sea hidrógeno en el caso de estrellas sometidas al proceso alfa u objetos más pesados como neon u oxígeno en el caso de núcleos más densos Kutner (2017b)) siguen presentes en las capas que rodean al núcleo. La energía generada por las reacciones nucleares dentro del núcleo se transporta a estas capas externas por medio de la radiación generada, la cual calienta los elementos livianos, desatando de nuevo la fusión de elementos como hidrógeno.

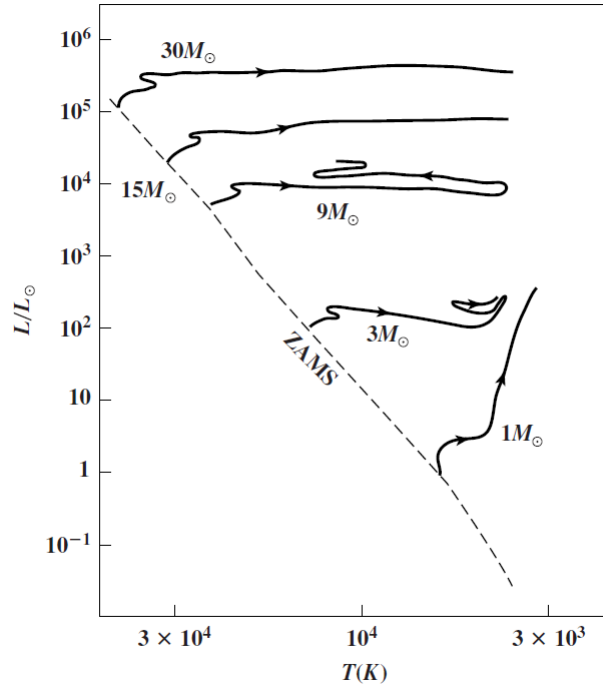


Figura 1.1: Evolución de estrellas de la secuencia principal basado en su masa inicial en el diagrama HR. La línea punteada representa la posición de la estrella en el primer momento que se integra a la secuencia principal. Al consumir el hidrógeno en su núcleo por las reacciones nucleares que ocurren en esta misma región se comienza a desatar el equilibrio delicado que mantiene la forma de la estrella. Esta deformación provoca una oscilación en su tamaño, causado por las fluctuaciones del balance entre la presión radiativa generada por las reacciones nucleares en el núcleo contra la presión gravitacional. Diagrama obtenido de [Kutner \(2017b\)](#)

Estas explosiones en las capas exteriores de la estrella causa la expansión de la estrella, llegando a la fase gigante dentro del diagrama HR.

Dependiendo de su masa inicial, una estrella puede seguir produciendo elementos cada vez más pesados dentro de su núcleo. Sin embargo, este combustible solo le permite a la estrella llegar hasta cierta temperatura, a partir de cual no podrá seguir manteniendo su tasa de fusión nuclear. Una vez que llegue a este punto empieza a expulsar las capas exteriores hasta solo dejar el núcleo expuesto, ahora inerte debido a la ausencia de fusión nuclear. Este resto de la estrella progenitora es lo que se conoce como la *enana blanca*, a pesar de no ser una estrella formalmente. La composición del material dentro de este objeto es distinto al de una estrella de secuencia principal; a pesar de tener como mínimo una masa $\sim 0.30\text{-}0.45 M_{\odot}$ su radio en promedio cae dentro del mismo orden de magnitud que el radio de la Tierra. [Kepler et al. \(2017\)](#) Esto implica una densidad inmensa, en donde solo un *gas degenerado de Fermi* puede existir en estas condiciones. Un gas degenerado surge como consecuencia del **principio de exclusión de Pauli**: dentro de una molécula no pueden existir más de un electrón por cada estado cuántico. Es debido a éste fenómeno que las moléculas de una estrella enana blanca están acumuladas en un volumen varias ordenes menor comparado con una estrella de secuencia principal, en la cual los electrones degenerados les permiten a las moléculas almacenar más energía térmica de lo que predicen los modelos en un gas no degenerado. Por lo tanto la escala termodinámica de una estrella enana blanca puede llegar a ordenes de $\sim 10^{10}$ años, en la cual su temperatura efectiva podría disminuir de $100,000K$ a $\sim 5,000K$. [Kepler et al. \(2017\)](#)

1.5 Enana Roja

Capítulo 2

Muestra

Este trabajo tiene como objetivo principal producir datos fotométricos de estrellas marcadas como candidatas a variables cataclísmicas. Debido a la escasez de variables cataclísmicas en la literatura—solo 1093 variables cataclísmicas habían sido identificadas hasta 2015 en el catálogo de Ritter-Kolb [Ritter and Kolb \(2015\)](#)—existen pocos datos con los cuales corroborar los modelos actuales de una variable cataclísmica. Al identificar nuevas estrellas como variables cataclísmicas y generar una curva de luz de estas mismas estaremos aportando a la muestra disponible en la literatura. Con este fin utilizamos el catálogo de *Gaia* para obtener nuestras candidatas, usando el catálogo de SDSS para seleccionar solo las fuentes no observadas previamente.

2.1 Catálogos

2.1.1 Gaia

Originalmente denominado como *GAIA*, la misión de *Gaia* fue lanzada por la **Agencia Espacial Europea (ESA)** el 19 de Diciembre del 2013, con el objetivo de generar un mapa tridimensional de nuestra Galaxia, la Vía Láctea. Esto incluye calcular las propiedades astrométricas y astrofísicas de sus fuentes observadas con mayor precisión que cualquier otro catálogo publicado previamente. Para lograr esto se utiliza un satélite espacial, el cual está denominado como *Gaia*, ubicado en el punto de Lagrange L2 con respecto al sistema Sol-Tierra. Desde este punto la nave tiene una vista sin obstrucciones que le permite observar una cantidad de estrellas enorme, con ~1,000 millones de fuentes visibles con los instrumentos del satélite *Gaia*. [Gaia Collaboration et al. \(2016\)](#)

2.1.1.1 Fotometría

2.1.1.2 Data Release 2

Para facilitar el acceso público a los datos recabados por la misión de *Gaia* la ESA ha escogido liberar los datos públicamente mediante los van recibiendo y procesando. Estos son conocidos como los **Data Releases**. Este trabajo se basa en el **Data Release 2**, el cuál de ahora en adelante será denominado simplemente **GDR2**. Este catálogo está compuesto de las observaciones hechas por *Gaia* entre las fechas de 25 de Julio del 2014 y el 23 de Mayo del 2016, un periodo de tiempo de 22 meses en total. [Gaia Collaboration et al. \(2018\)](#) GDR2 consiste de 1,692,919,135 de fuentes individuales. Existe una gran diversidad de objetos dentro de este catálogo, desde estrellas de secuencia principal, asteroides dentro del sistema solar, hasta estrellas variables en las regiones más lejanas en la Galaxia.

Los datos utilizados en este estudio fueron accedidos a través de el *Gaia Archive*¹, una herramienta libre publicada por la ESA. Este cuenta con una interfaz de ADQL², un lenguaje estructurado para hacer consultas a la base de datos de *Gaia*, incluyendo tablas conectando los datos de *Gaia* con otros catálogos, por ejemplo el catálogo de SDSS.

2.1.2 Sloan Digital Sky Survey

La colección de catálogos **Sloan Digital Sky Survey**³ (de ahora en adelante será referido como **SDSS**) compila varias fuentes de datos astronómicos y astrofísicos en un sitio centralizado, con el objetivo de crear un mapa tridimensional del Universo con una precisión no vista antes. Estos incluyen imágenes de objetos astronómicos en varios colores, acompañados de un espectro obtenido como parte de esta misión. Para los finales del siglo XX habían surgido avances tecnológicos que llegarían a revolucionar la astronomía observacional. De estos, los de mayor interés ocurrieron con los detectores de estado sólido y en la capacidad computacional de procesamiento. Partiendo de estos empezaron a desarrollar la infraestructura necesaria para recabar datos fotométricos y espectroscópicos.

El instrumento principal utilizado es el telescopio de 2.5m, ubicado en el observatorio *Apache Point Observatory*, descrito a detalle en [Gunn et al. \(2006\)](#). Este telescopio de diseño de Ritchey-Chrétien alimenta dos instrumentos separados; una CCD multi-banda de ancha área, y un par de espectrógrafos alimentados por fibra óptica. Su construcción empezó en 1998, pero no fue hasta el año 2000 que estuvo operacional.

2.1.2.1 Data Release 9

SDSS libera datos en colecciones iterativas; es decir cada Data Release (DR) liberado contiene todas las observaciones que forman parte del DR previo, agregando los datos recabados durante el periodo de observación para el DR actual. Cada DR cae bajo una fase de operaciones de SDSS, delimitado tanto por las fechas de observaciones como por los instrumentos y tipos de datos disponibles. Para el periodo operacional de **GDR2** el catálogo más actual de SDSS era el DR9 publicado como parte de SDSS-III⁴. Esta tercera fase fue marcada por una gran mejora del equipo espectroscópico, instalando nuevos instrumentos con los cuales pudieron analizar la dinámica de nuestra Galaxia, al igual que otras galaxias y planetas gaseosos extra-solares.

2.2 Szkody, et al.: Cataclysmic Variables from the Sloan Digital Sky Survey

Con el lanzamiento del SDSS, Szkody y su equipo reconocieron una nueva área de oportunidad para expandir la población de variables cataclísmicas conocidas en la Galaxia. De interés particular son aquellos sistemas que más se aproximan al periodo mínimo según los modelos evolutivos de las VCs; estos objetos llegan a magnitudes fuera del alcance de la mayoría de los telescopios usados hasta este entonces, por lo cual no han sido el objetivo de estudio en la literatura. Partiendo de SDSS Szkody y colaboradores iniciaron una búsqueda de VCs tenues, con la expectativa de capturar VCs de todas varias sub-categorías.

¹<https://gea.esac.esa.int/archive/>

²<https://www.ivoa.net/documents/ADQL/20180112/PR-ADQL-2.1-20180112.html>

³<https://www.sdss.org>

⁴<https://www.sdss3.org/index.php>

2.2.1 Encontrando Candidatas a VCs

2.3 Criterios de Selección

Para identificar estas candidatas a variables cataclísmicas utilizamos el catálogo de *Gaia* para obtener una amplia muestra fotométrica de estrellas dentro de la Galaxia. Gracias a la alta precisión y sensibilidad de los instrumentos de *Gaia* es posible observar estrellas que no han sido bien documentadas en la literatura. Para esto utilizamos la base de datos dinámica de SIMBAD⁵ para identificar estrellas cuya clasificación sea de interés para nuestra investigación. Estas las priorizamos en base a la cantidad de datos disponibles en la literatura; aquellos sistemas con la menor cantidad de referencias en la literatura (obtenidas de SIMBAD) tienen una mayor prioridad que aquellos objetos con varios estudios publicados.

2.3.1 Búsqueda Fotométrica

Para obtener la muestra inicial de objetos de interés acudimos a la base de datos de Gaia. Tal como es descrito en la sección 2.1.1 la selección de objetos fue llevada a cabo dentro del *Gaia Archive* utilizando su interfaz de ADQL. Sin embargo, los criterios definidos por Szkody y colaboradores solo fueron definidos para el sistema fotométrico de SDSS; para poder utilizar estos primero se llevó a cabo una conversión de las magnitudes reportadas en el catálogo de Gaia a magnitudes en los pasa bandas de SDSS. Esta conversión se llevó a cabo utilizando las siguientes relaciones definidas en la documentación de Gaia DR3 [van Leeuwen et al. \(2022\)](#), tal como se puede ver en la figura 2.1.

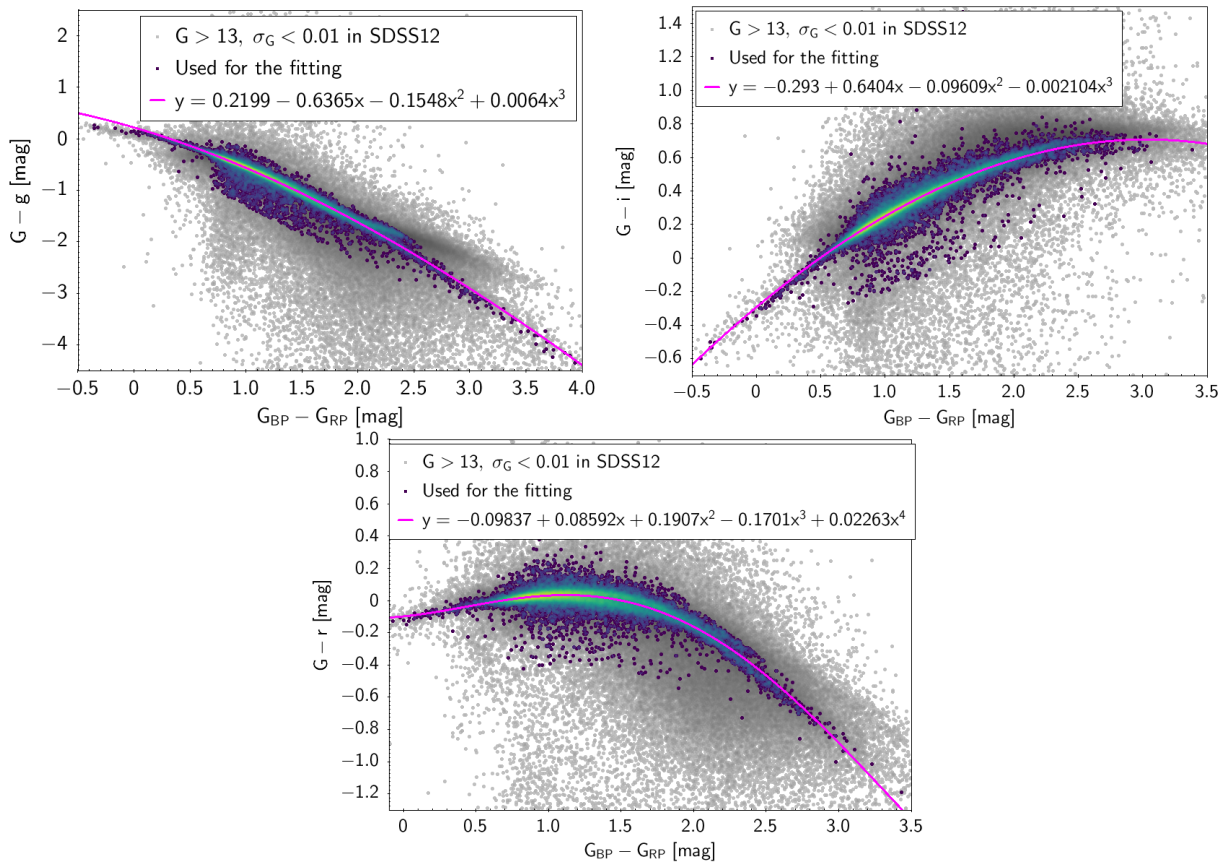


Figura 2.1: Relación empírica

⁵<http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>

Capítulo 3

Metodología

3.1 Análisis del Periodo Orbital

Una de las propiedades más importantes presente en la curva de luz de una binaria eclipsante es su **periodo orbital**. Partiendo del periodo orbital es posible presentar los datos observacionales en el espacio fase en vez de tiempo, el cual nos permite ajustar modelos analíticos para determinar ciertas propiedades del sistema binario. Dada una curva de luz se puede encontrar el periodo orbital usando **periodogramas**: herramientas utilizadas para generar un espectro de potencias para una serie de tiempo periódica. Para series de tiempo cuyo muestreo no es uniforme en el tiempo (como es común de observaciones astronómicas) se utiliza el periodograma **Lomb-Scargle**, derivado de la transformada de Fourier [VanderPlas (2017)]. Usando un mallado suficientemente fino para explorar el espacio de frecuencias se puede encontrar la frecuencia de mayor potencia, indicando el periodo orbital del sistema. El espectro de frecuencias se encuentra en la figura 3.1. El código para determinar el periodo orbital se ubica en el Notebook [periodogram.ipynb](#).

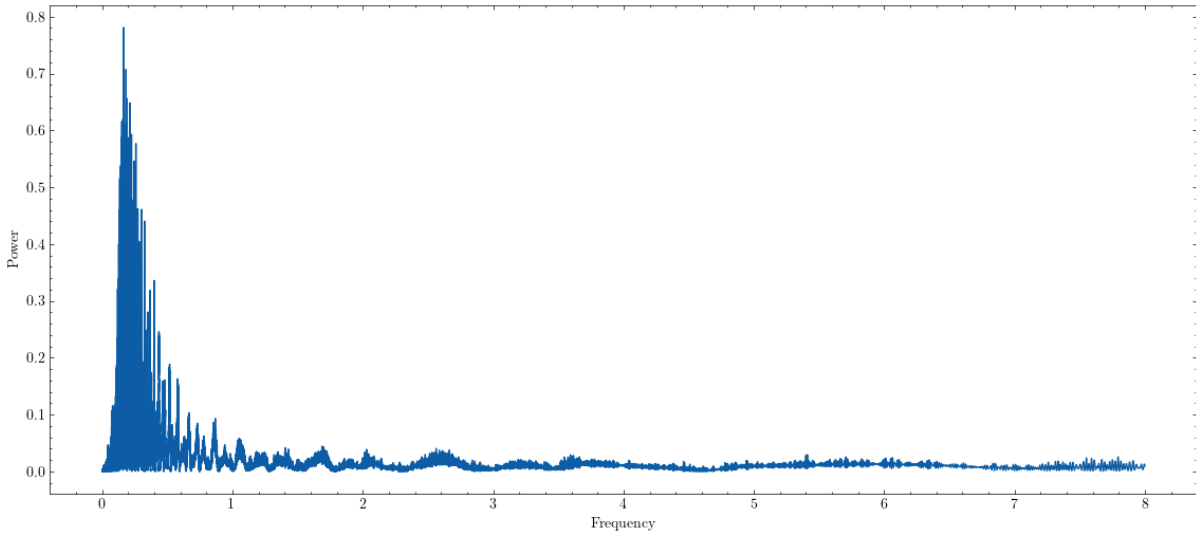


Figura 3.1: Espectro de frecuencias de las curvas de luz fotométricas de ATO J339.9469+45.1464, usando los datos recabados de Iturbide y de Gaia. Esta fue generada usando el periodograma dentro de los estimadores de PHOEBE, el cual utiliza el periodograma Lomb-Scargle en Astropy. El pico de más alta potencia está ubicado en el periodo de 0.16677069137624234 d [4.002496593 h]

Dado este espectro de frecuencias encontramos que el periodo orbital yace en la segunda armónica de la frecuencia principal. Esto se debe a los requisitos para analizar una curva de

luz de un sistema binario eclipsante; estos muestran dos valles en el espacio fase, las cuales corresponden a las etapas en la curva de luz en las que se observan eclipses en el sistema. Esto es necesario para poder modelar la curva de luz en fase como una Gaussiana doble, el modelo aceptado para una binaria eclipsante. Utilizando la segunda armónica de la frecuencia de más alta potencia se puede ver esta forma esperada de la curva de luz, como se puede ver en la figura 3.2. El periodo orbital encontrado es de 8.0049931 horas.

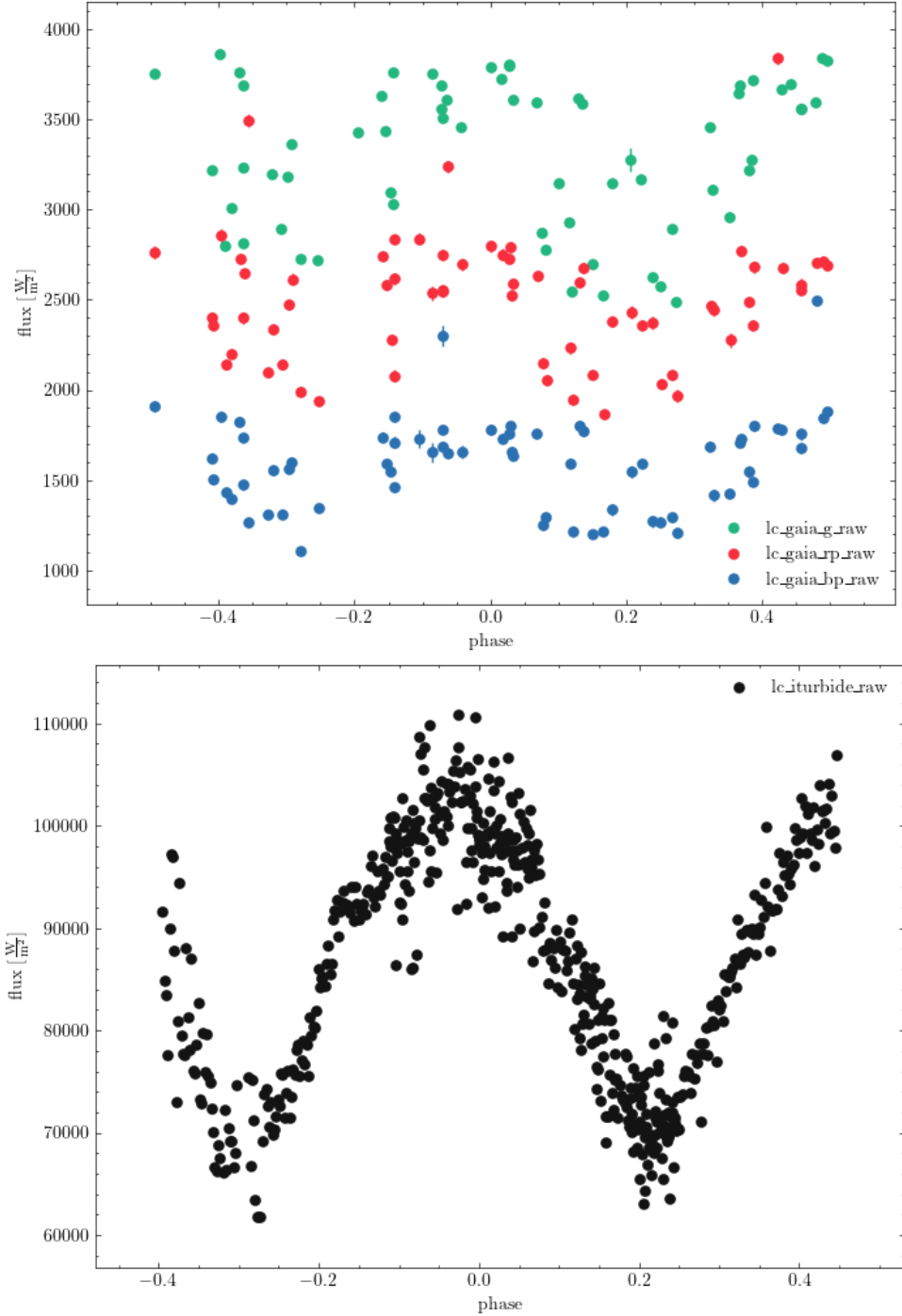


Figura 3.2: Curvas de luz de Gaia e Iturbide en espacio fase dado un periodo orbital de 8.0049 horas. En este momento las curvas de luz de Gaia muestran un comportamiento desordenado debido a que el tiempo de conjunción superior del sistema no ha sido bien definido, y actualmente se encuentra en su valor inicial de 0.0, el cual no es correcto para este sistema. Tanto el periodo orbital como el tiempo de conjunción superior son corregidos en los siguientes pasos de afinación del modelo de PHOEBE.

3.2 Modelo Computacional

Usando todas las curvas de luz disponible para el sistema ATO J339.9469+45.1464 — tanto de Gaia como los datos recabados de Iturbide — se puede generar un modelo computacional cuyas propiedades físicas pueden adecuadamente explicar los datos observacionales. Este método al final daría como resultado una *solución fotométrica* del sistema. En el mejor de los casos, esta solución muestra un valor satisfactorio de ajuste a los datos observacionales. A continuación se plasma el proceso que se llevó a cabo para llegar a una solución fotométrica del sistema ATO J339.9469+45.1464; esta solución no es única en el sentido que otra combinación de parámetros podría llegar a las mismas conclusiones.

3.2.1 Estimaciones Iniciales

Una vez determinado el periodo orbital del sistema se puede empezar un estudio de la morfología de las curvas de luz en fase. PHOEBE para facilitar esto ofrece distintos métodos para generar los las primeras estimaciones de parámetros físicos del sistema. El estimador **EBAI-KNN** para estimar los siguientes parámetros: el *tiempo de conjunción superior* (`t0_supconj`), la *razón de temperaturas* (`teffratio`), la *inclinación orbital* (`incl@binary`), el *factor de relleno* (“*fillout factor*” en inglés, `fillout_factor`), y la *razón de masas* (`q`). A pesar que dentro de PHOEBE estén implementados estimadores adicionales, solo se puede aplicar el **EBAI-KNN** estimador; esto se debe a que el modelo del sistema del que parte este trabajo corresponde al de una binaria en contacto (elegido por la morfología aparente de la curva de luz de Iturbide).

Dentro del Jupyter Notebook [ebai-default.ipynb](#) se puede encontrar el código con el que se llevaron a cabo las pruebas de estimación de parámetros. El estimador **EBAI-KNN** puede que obtenga diferentes soluciones del sistema dependiendo de la curva de luz utilizada; por lo cual se esperaba que obtuviera diferentes resultados dependiendo de la curva de entrada. Para obtener un panorama completo de las posibles soluciones fotométricas se ejecutaron varios estimadores de PHOEBE, cada uno operando sobre una diferente combinación de curvas de luz; se corrió un estimador por cada curva de luz individual, al igual que unos estimadores que tuvieron de entrada una combinación de curvas de luz de Gaia e Iturbide. El experimento completo junto a sus curvas de luz sintéticas correspondientes se pueden ver en el Notebook antedicho, acompañado de las gráficas resultantes de cada estimador.

3.2.1.1 Elección de Modelo Inicial

Una consideración importante en el proceso de modelación computacional es la existencia de diferentes soluciones fotométricas dado un mismo conjunto de datos. Esto se debe a la ortogonalidad de los parámetros en el sistema; dos o más parámetros pueden estar en un estado de degeneración, donde existe una relación lineal entre estos, lo cual significa que no existe una solución única correcta del sistema. Para decidir entre los varios estimadores se tomó como criterio de selección el ajuste del “forward model.”^a los datos mediante la estadística χ^2 . Estos se pueden ver en la figura 3.3. Partiendo de la medición del ajuste de cada modelo se ve que `ebai_knn_raw` y `ebai_knn_lc_iturbide_raw` son los que mejor se acoplan a los datos observacionales. La optimización de parámetros se llevó a cabo partiendo de las estimaciones de `ebai_knn_raw`, el cual de entrada recibió las cuatro curvas de luz de este trabajo (3 de Gaia, 1 de Iturbide). El resultado inicial del modelo se puede ver en la figura 3.4, junto a los parámetros del modelo en la tabla 3.1.

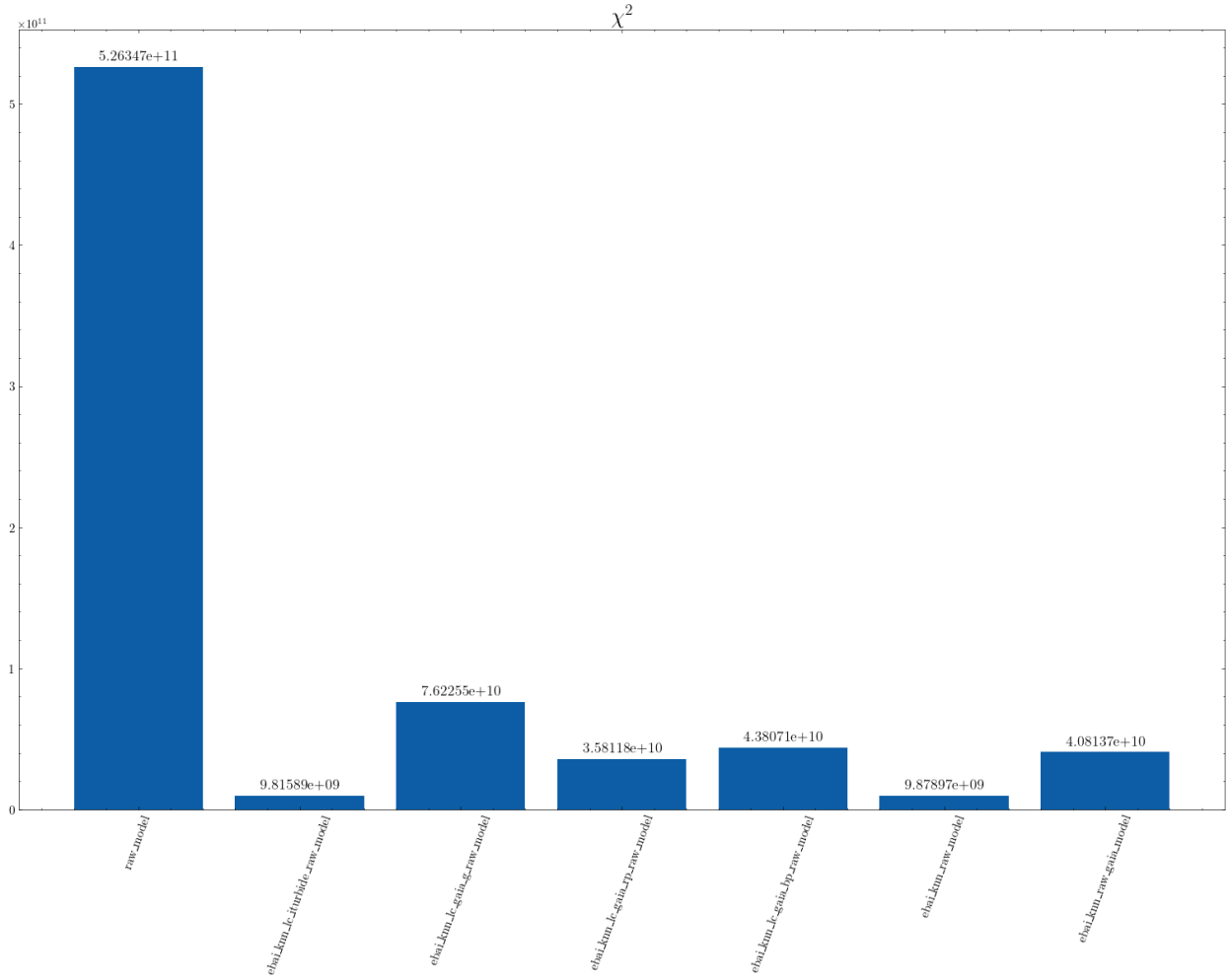


Figura 3.3: Resultados del ajuste (χ^2) de los modelos sintéticos generados utilizando los parámetros de los estimadores. Cada estadística fue calculada con respecto a todos los datos observacionales disponibles, sin importar las combinaciones de curvas de luz utilizadas para hacer la estimación. `raw_model` corresponde al modelo inicial que ofrece PHOEBE a través de la función `phoebe.default_contact_binary()`.

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------|-------------|
| t0_supconj@binary | 0.06841 d |
| teffratio@binary | 0.99560 |
| incl@binary | 1.25572 rad |
| fillout_factor@contact_envelope | 0.51640 |
| q@binary | 3.49495 |

Cuadro 3.1: Resultados adoptados de las estimaciones iniciales, utilizando el estimador cuyos datos de entrada fueron las cuatro curvas de luz disponibles. Las unidades de cada valor son especificadas excepto para los parámetros adimensionales.

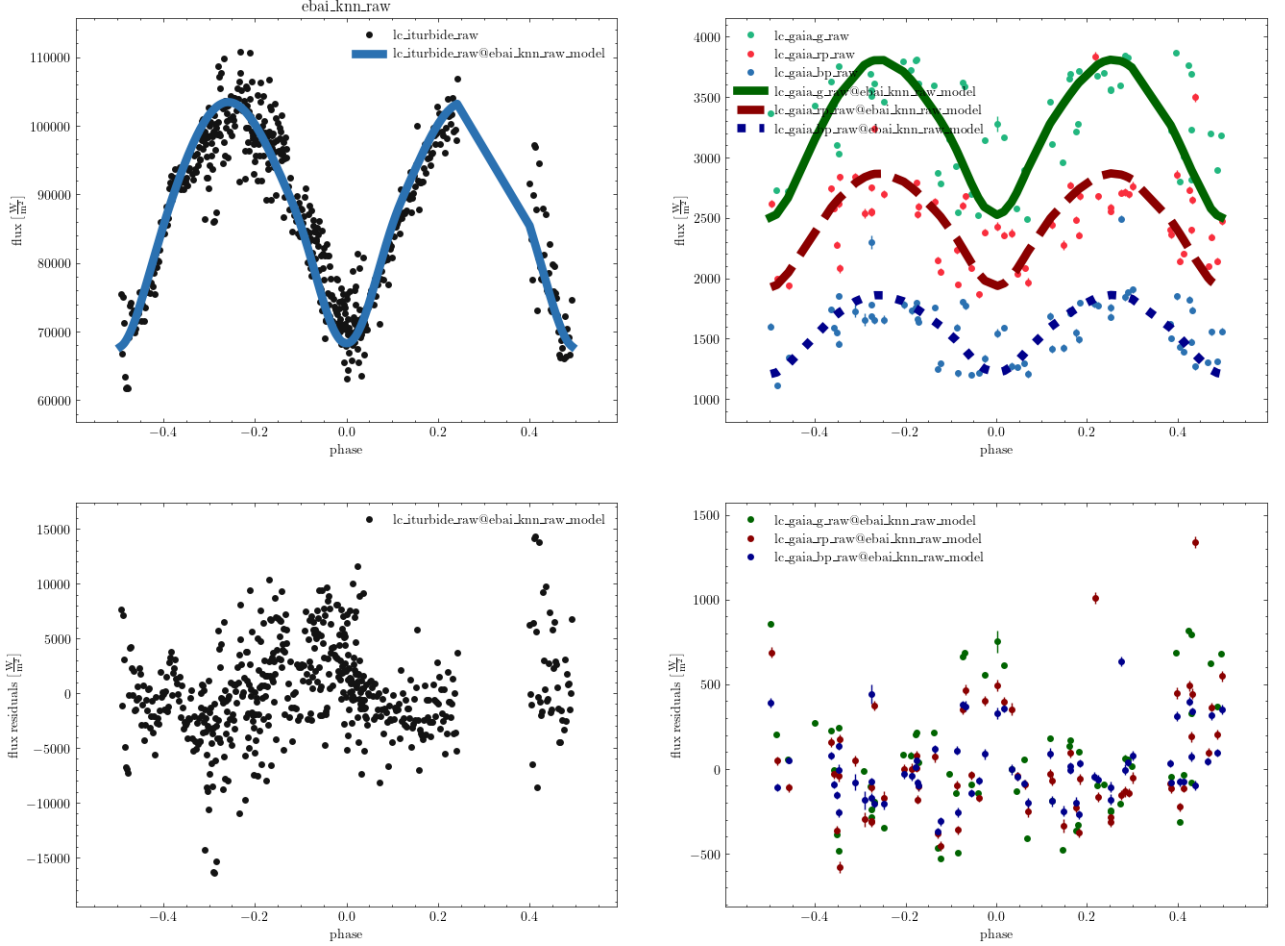


Figura 3.4: Modelos sintéticos del modelo utilizando los parámetros estimados por `ebai_knn_raw_solver` junto a los residuos en los flujos para cada curva de luz. Estos modelos fueron sintetizados utilizando un factor de escala de flujos flexible, utilizando la opción `pblum_mode = "dataset_scaled"`, el cual nos permite analizar la morfología del modelo sintético sin considerar por ahora el efecto en la escala de la curva de parámetros relacionados con la luminosidad de cada componente, como las temperaturas absolutas de ambas estrellas. Estos parámetros son ajustados en los siguientes pasos de afinación del modelo.

Apéndice A

Gaia ADQL Encuestas

A.1 DR2

```
SELECT *,
    array_element(a0, 1) AS J2000_ra_prop,
    array_element(a0, 2) AS J2000_dec_prop,
    array_element(a0, 3) AS J2000_parallax_prop,
    array_element(a0, 4) AS J2000_pmra_prop,
    array_element(a0, 5) AS J2000_pmdec_prop,
    array_element(a0, 6) AS J2000_rv_prop, sdss_transform.g_sdss -
sdss_transform.r_sdss AS g_r_sdss_color, sdss_transform.r_sdss -
sdss_transform.i_sdss AS r_i_sdss_color
FROM (
    SELECT *,
        -0.13518 + 0.46245 * bp_rp + 0.2517 * Power(bp_rp , 2) -
0.021349 * Power(bp_rp , 3) + phot_g_mean_mag AS g_sdss,
        0.29676 - 0.64728 * bp_rp + 0.10174 * Power(bp_rp , 2) +
phot_g_mean_mag AS i_sdss,
        0.12879 - 0.24662 * bp_rp + 0.027464 * Power(bp_rp , 2) +
0.049465 * Power (bp_rp , 3) + phot_g_mean_mag AS r_sdss
    FROM (
        SELECT source_id, phot_variable_flag, bp_rp,
phot_g_mean_mag, ra, dec, parallax, pmra, pmdec, radial_velocity AS rv,
EPOCH_PROP(ra, dec, parallax, pmra, pmdec, radial_velocity, ref_epoch,
2000) AS a0
        FROM gaiadr2.gaia_source
    ) as gdr2
    WHERE
        gdr2.phot_variable_flag = 'VARIABLE'
        AND gdr2.source_id IN (
            SELECT source_id
            FROM external.gaiadr2_geometric_distance
        )
        AND gdr2.source_id NOT IN (
            SELECT source_id
            FROM gaiadr2.sdssdr9_best_neighbour
        )
    ) AS sdss_transform
WHERE sdss_transform.g_sdss - sdss_transform.r_sdss < 0.7 AND
sdss_transform.r_sdss - sdss_transform.i_sdss > 0.30
```

A.2 DR3

```
SELECT
    *,
    array_element(a0, 1) AS J2000_ra_prop,
    array_element(a0, 2) AS J2000_dec_prop,
    array_element(a0, 3) AS J2000_parallax_prop,
    array_element(a0, 4) AS J2000_pmra_prop,
    array_element(a0, 5) AS J2000_pmdec_prop,
    array_element(a0, 6) AS J2000_rv_prop,
    sdss_transform.g_sdss - sdss_transform.r_sdss AS g_r_sdss_color,
    sdss_transform.r_sdss - sdss_transform.i_sdss AS r_i_sdss_color
FROM
    (
        SELECT
            *,
            -0.13518 + 0.46245 * bp_rp + 0.2517 * Power(bp_rp, 2) -
            0.021349 * Power(bp_rp, 3) + phot_g_mean_mag AS g_sdss,
            0.29676 - 0.64728 * bp_rp + 0.10174 * Power(bp_rp, 2) +
            phot_g_mean_mag AS i_sdss,
            0.12879 - 0.24662 * bp_rp + 0.027464 * Power(bp_rp, 2) +
            0.049465 * Power(bp_rp, 3) + phot_g_mean_mag AS r_sdss
        FROM
            (
                SELECT *, EPOCH_PROP(ra, dec, parallax, pmra, pmdec,
                    radial_velocity, ref_epoch, 2000) AS a0
                FROM gaiadr3.gaia_source
            ) as gdr3
        WHERE
            gdr3.phot_variable_flag = 'VARIABLE'
            AND gdr3.source_id NOT IN (
                SELECT source_id FROM gaiadr3.sdssdr13_best_neighbour
            )
    ) AS sdss_transform
WHERE
    sdss_transform.g_sdss - sdss_transform.r_sdss < 0.7
    AND sdss_transform.r_sdss - sdss_transform.i_sdss > 0.30
```

Agradecimientos

This work has made use of data from the European Space Agency (ESA) mission *Gaia* (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), processed by the *Gaia* Data Processing and Analysis Consortium (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Funding for the DPAC has been provided by national institutions, in particular the institutions participating in the *Gaia* Multilateral Agreement.

This research made use of Astropy,¹ a community-developed core Python package for Astronomy. The Astropy Collaboration et al. (2018).

¹<http://www.astropy.org>

Bibliografía

Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Babusiaux, C., and Bailer-Jones, C. A. L. (2018). Gaia data release 2. summary of the contents and survey properties. *Astronomy & Astrophysics*, 616.

Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J., Brown, A., Vallenari, A., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C., Bastian, U., Biermann, M., Evans, D., Eyer, L., F., J., Jordi, C., Klioner, S., Lammers, U., Lindegren, L., Luri, X., Mignard, F., Milligan, D., Panem, C., Poinsignon, V., Pourbaix, D., Randich, S., Sarri, G., Sartoretti, P., Siddiqui, H., Soubiran, C., Valette, V., F., Walton, N., Aerts, C., Arenou, F., Cropper, M., Drimmel, R., Høg, E., Katz, D., M.G., L., O'Mullane, W., Grebel, E., Holland, A., Huc, C., Passot, X., Bramante, L., Cacciari, C., Castañeda, J., Chaoul, L., Cheek, N., Angeli, F. D., Fabricius, R., Hernández, J., Jean-Antoine-Piccolo, A., Masana, E., Messineo, R., Mowlavi, N., Nienartowicz, K., Ordóñez-Blanco, D., Panuzzo, P., Portell, J., Richards, P., Riello, M., Seabroke, G., Tanga, P., Thévenin, F., Torra, J., Els, S., Gracia-Abril, G., Comoretto, Garcia-Reinaldos, M., Lock, T., Mercier, E., Altmann, Andrae, R., Astraatmadja, T., Bellas-Velidis, I., Benson, K., Berthier, J., Blomme, R., Busso, G., Carry, B., Cellino, A., Clementini, G., Cowell, S., Creevey, O., Cuypers, J., Davidson, M., Ridder, J. D., de Torres, A., Delchambre, L., Dell'Oro, A., Ducourant, C., Frémat, García-Torres, M., Gosset, E., Halbwachs, J.-L., Hambly, N., Harrison, D., Hauser, M., Hestroffer, D., Hodgkin, S., Huckle, H., Hutton, A., Jasiewicz, G., Jordan, S., Kontizas, M., Korn, A., Lanzafame, A., Manteiga, M., Moitinho, A., Muinonen, K., Osinde, J., Pancino, E., Pauwels, T., Petit, J.-M., Recio-Blanco, A., Robin, A., Sarro, L., Siopis, C., Smith, M., Smith, K., Sozzetti, A., Thuillot, W., van Reeven, W., Viala, Y., Abbas, U., Aramburu, A. A., Accart, S., Aguado, J., Allan, P., Allasia, W., Altavilla, G., Álvarez, M., Alves, J., Anderson, R., Andrei, A., Varela, E. A., Antiche, E., Antoja, T., Antón, S., Arcay, B., Atzei, A., Ayache, L., Bach, N., Baker, S., Balaguer-Núñez, L., Barache, C., Barata, C., Barbier, Barblan, F., Baroni, M., y Navascués, D. B., Barros, M., Barstow, M., Becciani, U., Bellazzini, M., Bellei, G., García, A. B., Belokurov, V., Bendjoya, P., Berihuete, A., Bianchi, L., Bienaymé, O., Billebaud, Blagorodnova, N., Blanco-Cuaresma, S., Boch, T., Bombrun, A., Borrachero, R., Bouquillon, S., Bourda, G., Bouy, H., Bragaglia, A., Breddels, M., Brouillet, N., Brüsemeister, T., Bucciarelli, B., Budnik, F., Burgess, P., Burgon, R., Burlacu, A., Busonero, D., Buzzì, R., Caffau, E., Cambras, J., Campbell, H., Cancelliere, R., Cantat-Gaudin, T., Carlucci, T., Carrasco, J., Castellani, M., Charlot, P., Charnas, J., Charvet, P., Chassat, F., A., Clotet, M., Coccozza, G., Collins, R., Collins, P., Costigan, G., Crifo, F., Cross, N., Crosta, M., Crowley, C., Dafonte, C., Damerdjì, Y., Dapergolas, A., David, P., David, M., Cat, P. D., de Felice, F., de Laverny, P., Luise, F. D., March, R. D., deMartino, D., de Souza, R., Debosscher, J., del Pozo, E., Delbo, M., Delgado, A., Delgado, H., di Marco, F., Matteo, P. D., Diakite, S., Distefano, E., Dolding, C., Anjos, S. D., Drazinos, P., Durán, J., Dzigan, Y., Ecale, E., Edvardsson, B., Enke, H., Erdmann, M., Escolar, D., Espina, M., Evans, N., Bontemps, G. E., Fabre, C., Fabrizio, M., Faigler, S., Falcão, A., Casas, M. F., Faye, F., Federici, L., Fedorets, G., Fernández-Hernández, J., Fernique, P., Fienga, A., Figueras, F., Filippi, F., Findeisen, K., Fonti, A., Fouesneau, E., Fraser, M., Fuchs, J., Furnell, R., Gai,

M., Galletti, S., Galluccio, L., Garabato, D., García-Sedano, F., Garé, P., Garofalo, A., Garralda, N., Gavras, P., Gerssen, J., Geyer, R., Gilmore, G., Girona, Giuffrida, G., Gomes, M., González-Marcos, A., González-Núñez, J., González-Vidal, J., Granvik, M., Guerrier, A., Guillout, P., Guiraud, J., Gúrpide, A., Gutiérrez-Sánchez, R., Guy, L., Haignon, R., Hatzidimitriou, D., Haywood, M., Heiter, U., Helmi, A., Hobbs, D., Hofmann, W., Holl, B., Holland, G., Hunt, J., Hypki, A., Icardi, V., Irwin, M., de Fombelle, G. J., Jofré, P., Jonker, P., Jorissen, A., Julbe, F., Karampelas, A., Kochoska, A., Kohley, R., Kolenberg, K., Kontizas, E., Koposov, S., Kordopatis, G., Koubsky, P., Kowalczyk, A., Krone-Martins, A., Kudryashova, M., Kull, Bachchan, R., Lacoste-Seris, F., Lanza, A., Lavigne, J.-B., Poncin-Lafitte, C. L., Lebreton, Y., Lebzelter, T., Leccia, S., Leclerc, N., Lecoeur-Taibi, I., Lemaitre, V., Lenhardt, H., Leroux, F., Liao, S., Licata, E., Lindstrøm, H., Lister, T., Livanou, E., Lobel, W., López, M., Lopez-Lozano, A., Lorenz, D., Loureiro, T., MacDonald, I., Fernandes, T. M., S., Mann, R., Mantelet, G., Marchal, O., Marchant, J., Marconi, M., Marie, J., Marinoni, S., Marrese, P., Marschalkó, G., Marshall, D., Martín-Fleitas, J., Martino, M., Mary, N., Matijević, G., Mazeh, T., McMillan, P., Messina, S., Mestre, A., Michalik, D., Millar, N., Miranda, B., Molina, D., Molinaro, R., Molinaro, M., Molnár, L., Moniez, M., Montegriffo, P., Monteiro, D., Mor, R., Mora, A., Morbidelli, R., Morel, T., Morgenthaler, S., Morley, T., Morris, D., Mulone, A., Muraveva, T., Musella, I., Narbonne, J., Nelemans, G., Nicastro, L., Noval, L., Ordénovic, C., Ordieres-Meré, J., Osborne, P., Pagani, C., Pagano, I., Pailler, F., Palacin, H., Palaversa, L., Parsons, P., Paulsen, T., Pecoraro, M., Pedrosa, R., Pentikäinen, H., Pereira, J., Pichon, B., Piersimoni, A., Pineau, F.-X., Plachy, E., Plum, G., Poujoulet, E., Prša, A., Pulone, L., Ragaini, S., Rago, S., N., R., Ramos-Lerate, M., Ranalli, P., Rauw, G., Read, S., Renk, F., Reylé, C., Ribeiro, R., Rimoldini, L., Ripepi, V., Riva, A., Rixon, G., Roelens, Romero-Gómez, M., Rowell, N., Royer, F., Rudolph, Ruiz-Dern, L., Sadowski, G., Sellés, T. S., Sahlmann, J., Salgado, J., Salguero, E., Sarasso, M., H., Schnorhk, A., Schultheis, M., Sciacca, E., Segol, M., Segovia, J., Segransan, D., Serpell, E., Shih, I.-C., Smareglia, R., Smart, R., Smith, C., Solano, E., Solitro, F., Sordo, R., Nieto, S. S., Souchay, A., Spoto, F., Stampa, U., Steele, I., Steidelmüller, H., Stephenson, C., Stoev, H., Suess, F., Süveges, M., Surdej, J., Szabados, L., Szegedi-Elek, E., Tapiador, D., Taris, F., Tauran, G., Taylor, M., Teixeira, R., Terrett, D., Tingley, B., Trager, S., C., Ulla, A., Utrilla, E., Valentini, G., van Elteren, A., Hemelryck, E. V., van Leeuwen, M., Varadi, M., Vecchiato, A., Veljanoski, J., Via, T., Vicente, D., Vogt, S., Voss, H., Votruba, V., Voutsinas, S., G., W., Weiler, M., Weingrill, K., Werner, D., Wevers, G., Wyrzykowski, L., Yoldas, A., Žerjal, M., Zucker, S., Zurbach, C., Zwitter, T., Alecu, A., Allen, M., Prieto, C. A., Amorim, A., G., A., Arsenijevic, V., Azaz, S., Balm, P., Beck, M., Bernstein, H.-H., Bigot, L., Bijaoui, A., Blasco, C., Bonfigli, M., Bono, G., Boudreault, S., Bressan, A., Brown, S., Brunet, P.-M., Bunclark, P., Buonanno, R., Butkevich, A., Carret, C., Carrion, C., Chemin, L., F., C., Corcione, L., Darmigny, E., de Boer, K., de Teodoro, P., de Zeeuw, P., Luche, C. D., Domingues, C., Dubath, P., Fodor, F., Frézouls, B., Fries, A., Fustes, D., Fyfe, D., Gallardo, E., Gallegos, J., Gardiol, D., Gebran, M., Gomboc, A., Gómez, A., Grux, E., Gueguen, A., Heyrovsky, A., Hoar, J., Iannicola, G., IsasiParache, Y., Janotto, A.-M., Joliet, E., Jonckheere, A., Keil, R., Kim, D.-W., Klagyivik, P., Klar, J., Knude, J., Kochukhov, O., Kolka, I., Kos, J., Kutka, A., Lainey, V., LeBouquin, D., Liu, C., Loreggia, D., Makarov, V., Marseille, M., Martayan, C., Martinez-Rubi, O., Massart, B., Meynadier, F., Mignot, S., Munari, U., Nguyen, A.-T., Nordlander, T., Ocvirk, P., O’Flaherty, K., Sanz, A. O., Ortiz, P., Osorio, J., Oszkiewicz, D., Ouzounis, A., Palmer, M., Park, P., Pasquato, E., Peltzer, C., Peralta, J., Péturaud, F., Pieniluoma, T., Pigozzi, J., Prat, G., Prod’homme, T., Raison, F., Rebordao, J., Risquez, D., Rocca-Volmerange, B., Rosen, S., Ruiz-Fuertes, M., Russo, F., Sembay, S., Vizcaino, I. S., Short, A., Siebert, A., Silva, H., Sinachopoulos, D., Slezak, E., Soffel, M., Sosnowska, D., Straižys, V., ter Linden, M., Terrell, D., Theil, S., Tiede, C., Troisi, L., Tsalmantza, P., Tur,

- D., Vaccari, Vachier, F., Valles, P., Hamme, W. V., Veltz, L., J., Wallut, J.-M., Wichmann, R., Wilkinson, M., Ziaepour, H., and Zschocke, S. (2016). The gaia mission. *Astronomy & Astrophysics*, 595.
- Gunn, J. E., Siegmund, W. A., Mannery, E. J., Owen, R. E., Hull, C. L., Leger, R. F., Carey, L. N., Knapp, G. R., York, D. G., Boroski, W. N., Kent, S. M., Lupton, R. H., Rockosi, C. M., Evans, M. L., Waddell, P., Anderson, J. E., Annis, J., Barentine, J. C., Bartoszek, L. M., Bastian, S., Bracker, S. B., Brewington, H. J., Briegel, C. I., Brinkmann, J., Brown, Y. J., Carr, M. A., Czarapata, P. C., Drennan, C. C., Dombeck, T., Federwitz, G. R., Gillespie, B. A., Gonzales, C., Hansen, S. U., Harvanek, M., Hayes, J., Jordan, W., Kinney, E., Klaene, M., Kleinman, S. J., Kron, R. G., Kresinski, J., Lee, G., Limmongkol, S., Lindenmeyer, C. W., Long, D. C., Loomis, C. L., McGehee, P. M., Mantsch, P. M., Jr., E. H. N., Neswold, R. M., Newman, P. R., Nitta, A., Jr., J. P., Pier, J. R., Prieto, P. S., Prosapio, A., Rivetta, C., Schneider, D. P., Snedden, S., and i Wang, S. (2006). The 2.5 m telescope of the sloan digital sky survey. *The Astronomical Journal*, 131.
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., and Donner, K. J. (2017). *Fundamental Astronomy*, chapter 10. Springer.
- Kepler, S., Romero, A. D., Pelisoli, I., and Ourique, G. (2017). White dwarf stars. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*.
- Kutner, M. L. (2017a). *Astronomy A Physical Perspective*, chapter 5 - Binary stars and stellar masses. Cambridge University Press, 2 edition.
- Kutner, M. L. (2017b). *Astronomy A Physical Perspective*, chapter Stellar old age. Cambridge University Press, 2 edition.
- LeBlanc, F. (2010a). *An Introduction to Stellar Astrophysics*, chapter 1. John Wiley & Sons Ltd.
- LeBlanc, F. (2010b). *An Introduction to Stellar Astrophysics*, chapter 2. John Wiley & Sons Ltd.
- Prialnik, D. (2010). *An Introduction to the Theory of Stellar Structure and Evolution*, chapter 2. Cambridge University Press.
- Ritter, H. and Kolb, U. (2015). The ritter-kolb catalogue and its impact on research into cvs, lmxbs and related objects. *Acta Polytechnica*.
- The Astropy Collaboration, Price-Whelan, A. M., Sip
Hocz, B. M., Günther, H. M., Lim, P. L., Crawford, S. M., Conseil, S., Shupe, D. L., Craig, M. W., Dencheva, N., Ginsburg, A., VanderPlas, J. T., Bradley, L. D., Pérez-Suárez, D., de Val-Borro, M., Paper Contributors, ., Aldcroft, T. L., Cruz, K. L., Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., Coordination Committee, ., Ardelean, C., Babej, T., Bach, Y. P., Bachetti, M., Bakanov, A. V., Bamford, S. P., Barentsen, G., Barmby, P., Baumbach, A., Berry, K. L., Biscani, F., Boquien, M., Bostroem, K. A., Bouma, L. G., Brammer, G. B., Bray, E. M., Breytenbach, H., Buddelmeijer, H., Burke, D. J., Calderone, G., Cano Rodríguez, J. L., Cara, M., Cardoso, J. V. M., Cheedella, S., Copin, Y., Corrales, L., Crichton, D., D
rsquoAvella, D., Deil, C., Depagne,
É., Dietrich, J. P., Donath, A., Droettboom, M., Earl, N., Erben, T., Fabbro, S., Ferreira, L. A., Finethy, T., Fox, R. T., Garrison, L. H., Gibbons, S. L. J., Goldstein, D. A., Gommers, R., Greco, J. P., Greenfield, P., Groener, A. M., Grollier, F., Hagen, A., Hirst, P., Homeier,

D., Horton, A. J., Hosseinzadeh, G., Hu, L., Hunkeler, J. S., Ivezić,

v Z., Jain, A., Jenness, T., Kanarek, G., Kendrew, S., Kern, N. S., Kerzendorf, W. E., Khvalko, A., King, J., Kirkby, D., Kulkarni, A. M., Kumar, A., Lee, A., Lenz, D., Littlefair, S. P., Ma, Z., Macleod, D. M., Mastropietro, M., McCully, C., Montagnac, S., Morris, B. M., Mueller, M., Mumford, S. J., Muna, D., Murphy, N. A., Nelson, S., Nguyen, G. H., Ninan, J. P., Nöthe, M., Ogaz, S., Oh, S., Parejko, J. K., Parley, N., Pascual, S., Patil, R., Patil, A. A., Plunkett, A. L., Prochaska, J. X., Rastogi, T., Reddy Janga, V., Sabater, J., Sakurikar, P., Seifert, M., Sherbert, L. E., Sherwood-Taylor, H., Shih, A. Y., Sick, J., Silbiger, M. T., Singanamalla, S., Singer, L. P., Sladen, P. H., Sooley, K. A., Sornarajah, S., Streicher, O., Teuben, P., Thomas, S. W., Tremblay, G. R., Turner, J. E. H., Terr

ón, V., van Kerkwijk, M. H., de la Vega, A., Watkins, L. L., Weaver, B. A., Whitmore, J. B., Woillez, J., Zabalza, V., and Contributors, . (2018). The astropy project: Building an open-science project and status of the v2.0 core package. *aj*, 156:123.

van Leeuwen, F., de Bruijne, J., Babusiaux, C., Busso, G., Castañeda, J., Ducourant, C., Fabricius, C., Hambly, N., Hobbs, D., Luri, X., Marrese, P. M., Mora, A., Muinonen, K., Pourbaix, D., Rimoldini, L., Roegiers, T., Sartoretti, P., Teyssier, D., Ulla, A., Utrilla, E., Vallenari, A., van Leeuwen, M., Altavilla, G., Altmann, M., Álvarez, M. A., Andrae, R., Antoja, T., Antonio, M., Arenou, F., Audard, M., Bailer-Jones, C. A. L., Bakker, J., Balbinot, E., Barache, C., Barblan, F., Bastian, U., Bauchet, N., Bellas-Velidis, I., Bellazzini, M., Berthier, J., Biermann, M., Blomme, R., Bombrun, A., Bossini, D., Brouillet, N., Brown, A., Brugaletta, E., Busonero, D., Butkevich, A., Cacciari, C., Cánovas, H., Cantat-Gaudin, T., Carballo, R., Carnerero, M. I., Carrasco, J. M., Cellino, A., Cheek, N., Clementini, G., Clotet, M., Creevey, O. L., Crowley, C., Dafonte, C., Damerdj, Y., David, M., David, P., Davidson, M., De Angeli, F., De Ridder, J., De Teodoro, P., Delbó, M., Delchambre, L., Delisle, J. B., Dell-Oro, A., Dharmawardena, T., Diakité, S., Distefano, E., Drimmel, R., Duran, J., Evans, D. W., Eyer, L., Fabrizio, M., Faigler, S., Fernández-Hernández, J., Figueras, F., Findeisen, K., Fouesneau, M., Frémat, Y., Galluccio, L., Garabato, D., Garcia-Gutierrez, A., Garofalo, A., Gavras, P., Giacobbe, P., Giuffrida, G., Gommel, R., González, Á., González-Núñez, J., Gosset, É., Gracia-Abril, G., Guerra, R., Halbwachs, J. L., Harrison, D. L., Hatzidimitriou, D., Heiter, U., Helmi, A., Henar Sarmiento, M., Hernandez, J., Hestroffer, D., Hodgkin, S., Holl, B., Hutton, A., Jevardat de Fombelle, G., Jordi, C., Jorissen, A., Katz, D., Khanna, S., Klioner, S., Kordopatis, G., Korn, A. J., Krone-Martins, A., Kruszyńska, K., Lammers, U., Lanza fame, A., Lattanzi, M. G., Le Champion, J. F., Lebreton, Y., Lebzelter, T., Leccia, S., Leclerc, N., Lecoœur-Taïbi, I., Licata, E., Lindegren, L., Lobel, A., Löffler, W., Manteiga, M., Mantelet, G., Marinoni, S., Marshall, D. J., Martín-Fleitas, J., Masana, E., Masip Vela, A., Mazeh, T., Messineo, R., Michalik, D., Mignard, F., Molinaro, R., Monguió, M., Montegriffo, P., Morel, T., Mowlavi, N., Muraveva, T., Nicolas, C., Nienartowicz, K., Ordenovic, C., Osinde, J., Pailler, F., Pallas-Quintela, L., Panahi, A., Pancino, E., Panem, C., Pauwels, T., Pichon, B., Portell, J., Rainer, M., Raiteri, C. M., Ramos, P., Recio-Blanco, A., Reylé, C., Riello, M., Ríos Diaz, C., Ripepi, V., Riva, A., Rixon, G., Robin, A. C., Romero-Gómez, M., Rowell, N., Rybicki, K. A., Rybizki, J., Sadowski, G., Sáez-Núñez, A., Sahlmann, J., Sanna, N., Sarro Baro, L. M., Schultheis, M., Seabroke, G., Segovia Serrato, J. C., Segransan, D., Siddiqui, H., Siopis, C., Smart, R., Sordo, R., Soubiran, C., Sozzetti, A., Spina, L., Spoto, F., Stephenson, C., Tanga, P., Teixeira, R., Thévenin, F., Torra, F., Trabucchi, M., Turon, C., Weiler, M., Wyrzykowski, Ł., and Zucker, S. (2022). Gaia DR3 documentation. Gaia DR3 documentation, European Space Agency; Gaia Data Processing and Analysis Consortium. Online at [jA](https://arxiv.org/abs/2212.04859)

href="https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/index.html" ;https://gea.esac.esa.int/arc
id. 1.

VanderPlas, J. T. (2017). Understanding the lomb-scargle periodogram. *The Astrophysical Journal Supplement Series*.