

Análisis conjunto de tránsitos y velocidades radiales del sistema WASP-189b con TESS y HARPS

M. VALDERRAMA¹

¹*Instituto de Astrofísica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile*

ABSTRACT

En este trabajo se presenta el análisis fotométrico y espectroscópico del sistema exoplanetario WASP-189, con el objetivo de comprender los métodos de detección y caracterización de planetas mediante tránsitos y velocidades radiales. Se utilizaron observaciones del instrumento *High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher* (HARPS) y de la misión *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS). Los datos fueron procesados empleando herramientas de **Python** como **Lightkurve** y **Juliet**, lo que permitió construir la curva de luz, medir velocidades radiales y ajustar modelos fotométricos y Keplerianos de forma independiente.

El ajuste del tránsito entregó un período orbital de $P = 2.72398$ d y una profundidad de $\delta = 0.0049$, correspondiente a un radio planetario de $R_p = 1.65 R_J$. Por su parte, el análisis de velocidades radiales arrojó una semiamplitud $K = 0.1789$ km s⁻¹, equivalente a una masa de $M_p = 1.97 M_J$ y una densidad de $\rho_p = 0.58$ g cm⁻³. Estos resultados se encuentran en excelente acuerdo con los valores reportados por [M. Lendl et al. \(2020\)](#). La experiencia permitió integrar conceptos teóricos y herramientas computacionales modernas en un flujo de trabajo completo para la caracterización de exoplanetas.

Keywords: [Exoplanet detection methods \(489\)](#) — [Photometry \(1234\)](#) — [Radial velocity \(1332\)](#) — [Transits \(1711\)](#)

1. INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento del primer planeta extrasolar alrededor de una estrella de tipo solar, 51 Pegasi b, por [M. Mayor & D. Queloz \(1995\)](#), el estudio de los exoplanetas se ha consolidado como una de las áreas más dinámicas y transformadoras de la astrofísica moderna. Los exoplanetas —planetas que orbitan estrellas distintas al Sol— han permitido extender los límites de la teoría de formación planetaria y comprender la diversidad de sistemas planetarios presentes en nuestra galaxia. Desde aquel hallazgo pionero, la cantidad de exoplanetas confirmados ha superado los cinco mil, gracias al desarrollo de instrumentos de alta precisión y misiones dedicadas a su detección ([J. N. Winn & D. C. Fabrycky 2015](#); [M. Perryman 2018](#)).

En esta experiencia se busca comprender el proceso de detección y caracterización de planetas extrasolares mediante la combinación de observaciones *espectroscópicas* y *fotométricas*, obtenidas a partir de instrumentos como el *High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher* (HARPS; [F. Pepe et al. 2002](#)) y el *Transiting*

Exoplanet Survey Satellite (TESS; [G. R. e. a. Ricker 2015](#)). Estos datos permiten derivar parámetros orbitales fundamentales del sistema estelar, tales como el período, el semieje mayor y, en caso de presencia de tránsitos, la profundidad de tránsito (*transit depth*). Si bien no se determinan parámetros como la masa o la densidad del planeta, el análisis de las curvas de luz y de las variaciones de velocidad radial ofrece información clave sobre la geometría y periodicidad orbital del sistema.

El método de **velocidad radial** (RV) se basa en la detección del movimiento reflejo de la estrella debido a la atracción gravitacional del planeta. Este movimiento produce un desplazamiento Doppler en las líneas espectrales estelares, observable como un corrimiento periódico hacia el rojo o el azul. Para cuantificar este desplazamiento se utilizan espectros de alta resolución y técnicas de *correlación cruzada*, donde un espectro observado se compara con un espectro plantilla (*template*) de referencia, generando una función cuya posición máxima indica la velocidad radial instantánea de la estrella ([A. e. a. Baranne 1996](#); [F. Pepe et al. 2002](#)). Este método es particularmente sensible a planetas ma-

sivos y cercanos a la estrella, y ha sido responsable de la mayoría de los descubrimientos iniciales de exoplanetas.

Por otro lado, el método de **tránsito** consiste en medir la disminución del flujo observado de una estrella cuando un planeta pasa por delante de su disco desde nuestra línea de visión (D. Charbonneau et al. 2000). La fracción de luz bloqueada depende del cuadrado de la razón entre el radio planetario y el radio estelar, permitiendo estimar directamente el tamaño del planeta. La periodicidad de los tránsitos, junto con la duración y profundidad de las curvas de luz, entrega información sobre el período orbital y la geometría del sistema (S. Seager & G. Mallén-Ornelas 2003). Instrumentos espaciales como *Kepler* y *TESS* han sido fundamentales en la detección de miles de planetas mediante este método, al ofrecer fotometría de alta precisión y cobertura temporal continua.

La combinación de ambos enfoques —velocidades radiales y tránsitos— permite construir una descripción completa de un sistema planetario. Mientras que el método de tránsitos determina el radio y el período orbital, el método de velocidades radiales proporciona información sobre la dinámica estelar y la amplitud del movimiento orbital. Aunque en este trabajo no se realiza un ajuste combinado de ambos conjuntos de datos, la experiencia introduce las herramientas necesarias para este propósito, incluyendo el manejo de espectros de alta resolución, la aplicación de correcciones baricéntricas y la reducción de datos fotométricos con módulos de Python como *Lightkurve* (Lightkurve Collaboration et al. 2018). En conjunto, estos procedimientos sientan las bases para el modelamiento posterior de sistemas exoplanetarios mediante técnicas bayesianas y herramientas como *Juliet* (N. Espinoza et al. 2018).

Finalmente, este trabajo tiene como objetivo aplicar los principios descritos a un sistema exoplanetario específico, utilizando observaciones de los archivos de la ESO y de TESS. A lo largo de este estudio se presentan las etapas de descarga, selección y procesamiento de datos HARPS, la obtención de velocidades radiales, el análisis de fotometría de TESS y la interpretación de los resultados orbitales derivados. Este proceso permite comprender de forma práctica la sinergia entre observaciones espectroscópicas y fotométricas en la caracterización de exoplanetas.

2. DATOS, EXPLORACIÓN Y PREPARACIÓN

2.1. Velocidad Radial.

Los datos espectroscópicos de WASP-189 fueron obtenidos directamente desde el archivo público de la ESO, correspondiente al instrumento *High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher* (HARPS). Este espectrógrafo se encuentra instalado en el telescopio de

3.6 m del Observatorio de La Silla (Chile), operado por el *European Southern Observatory*. HARPS es un espectrógrafo échelle de alta estabilidad, alimentado por fibra, que cubre el rango espectral entre 378 nm y 691 nm con una resolución espectral de $R \simeq 120,000$. Su diseño permite alcanzar precisiones en velocidad radial del orden de 1 m s^{-1} , lo que lo convierte en uno de los instrumentos más precisos disponibles para la detección de exoplanetas mediante el método Doppler.

Desde esta base de datos se descargaron todos los productos disponibles asociados al sistema, lo que resultó en aproximadamente 200 archivos en formato *.fits*, abarcando observaciones entre los años 2018 y 2023. Cada descarga contenía además un archivo comprimido *.tar*, que incluye productos intermedios tales como las correlaciones cruzadas y los espectros utilizados en la determinación de velocidades radiales. No obstante, en este trabajo se utilizaron exclusivamente los espectros ya calibrados (Phase 3), que contienen las correcciones instrumentales aplicadas por la reducción oficial del observatorio.²

Para asegurar la consistencia temporal y minimizar los efectos del movimiento baricéntrico de la Tierra, seleccioné únicamente los espectros correspondientes a observaciones obtenidas durante junio de 2023. El resto de los datos, que abarcan intervalos de varios años, presentaban diferencias significativas en la velocidad baricéntrica y no resultaban directamente comparables. Asimismo, se descartaron los espectros con baja relación señal a ruido (S/N) a fin de reducir el impacto del ruido en el análisis posterior de velocidades radiales. El criterio de selección se basó en la información contenida en los encabezados de cada archivo *.fits*, donde se indica el valor de S/N reportado por el instrumento.

Con el fin de ilustrar las características espectrales del sistema, identifiqué el espectro con mayor relación S/N de toda la muestra, correspondiente al archivo *ADP.2018-03-28T01_03_35.950.fits*, que presenta un $S/N = 186$. A partir de este espectro normalizado se identificaron las principales líneas de absorción estelares [Figura 1], entre las que destacan las pertenecientes a la serie de Balmer hasta $H\eta$, junto con las líneas metálicas de Na I, Ca II H&K y Mg I. La identificación se realizó considerando una tolerancia de $\pm 0.8 \text{ \AA}$, con la cual se obtuvieron coincidencias confiables entre los picos de absorción y las longitudes de onda teóricas.

² Based on data obtained from the ESO Science Archive Facility with DOI: <https://doi.org/10.18727/archive/33>.

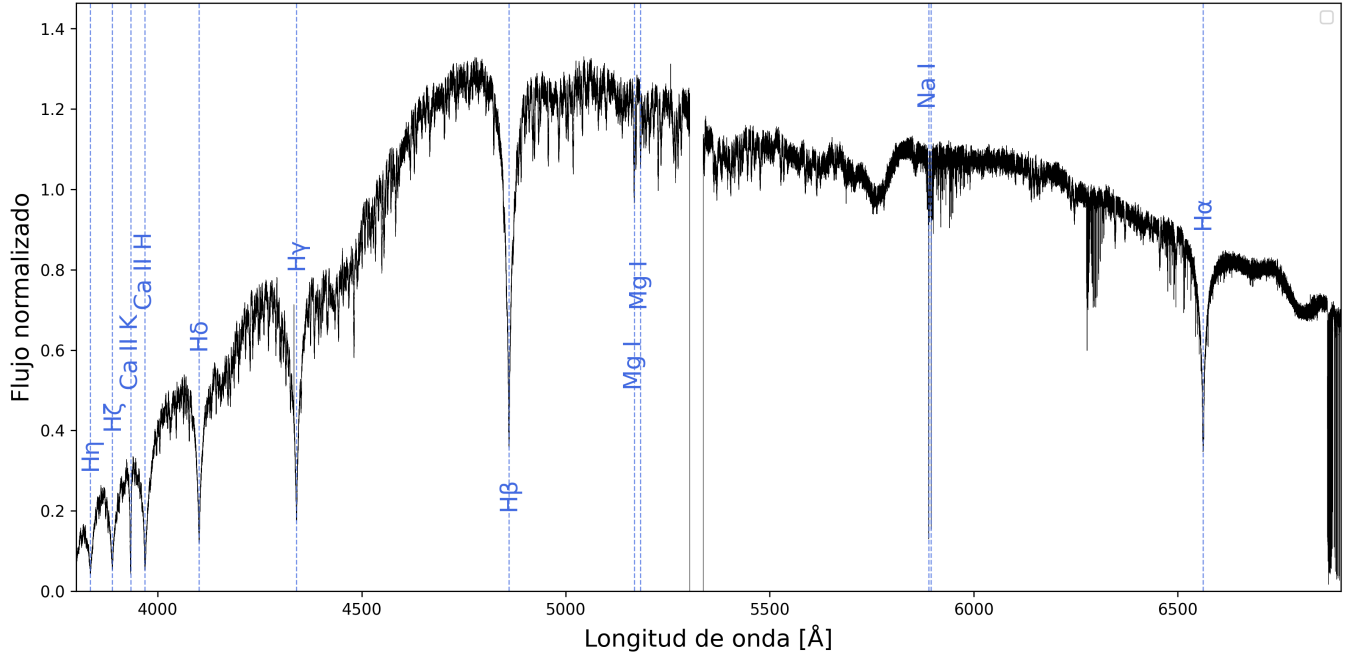


Figure 1. Espectro normalizado de WASP-189 obtenido con HARPS ($S/N = 186$). Se destacan líneas de absorción de la serie de Balmer (hasta $H\gamma$) y líneas metálicas Na I, Ca II H&K y Mg I. Los ejes muestran longitud de onda en Å y flujo normalizado.

2.2. Transito.

Los datos fotométricos del sistema WASP-189 fueron obtenidos a partir de la misión *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS; G. R. e. a. Ricker 2015) utilizando el módulo *Lightkurve* (Lightkurve Collaboration et al. 2018) de Python. Mediante la función `lk.search_targetpixelfile('WASP-189')` se identificaron observaciones correspondientes al *Sector 51* de TESS, realizado durante el año 2022. En dicho sector se encontraban disponibles dos conjuntos de observaciones con tiempos de exposición de 120 s y 600 s, respectivamente. Se seleccionó el conjunto con cadencia corta de 120 s debido a que ofrecía una mejor resolución temporal y permitía apreciar con mayor claridad los tránsitos del planeta. Las fechas de observación abarcan desde $MJD = 59692.45$ hasta 59717.04 , cubriendo un intervalo de aproximadamente 25 días.

A partir del *Target Pixel File* (TPF), utilizamos la función `tpf.to_lightcurve()` de *lightkurve* para convertir la secuencia de imágenes en una curva de luz. En la Figura 2 se observan las modulaciones asociadas a los tránsitos periódicos del planeta.

El propio catálogo *lightkurve* permite extraer curvas de luz aplicando distintos métodos de fotometría según la máscara de apertura utilizada. En este caso, se compararon tres opciones: la máscara por umbral (`'threshold'`), la máscara del *pipeline* (`'pipeline'`) y una máscara personalizada definida con `create_threshold_mask()`.

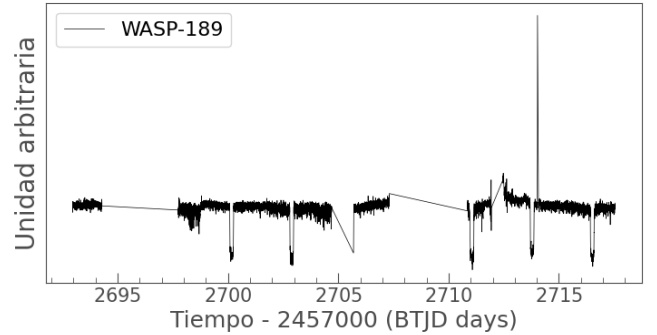


Figure 2. Curva de luz de WASP-189 observada por TESS durante el Sector 51. En el eje X se muestra el tiempo en días BTJD y en el eje Y el flujo estelar en electrones por segundo. Los tránsitos del planeta son claramente visibles en los descensos periódicos de flujo.

Para cada caso se generó la curva de luz mediante `tpf.to_lightcurve(aperture_mask=...)` y se aplicaron los mismos pasos de preprocesamiento: eliminación de valores atípicos, normalización y aplanado del continuo, utilizando las funciones encadenadas `remove_outliers().normalize().flatten()`.

Las tres curvas fueron analizadas y graficadas de manera comparativa (Figura 2). Si bien el análisis del ruido RMS mostró valores muy similares entre los métodos, se observó que en ciertos casos la máscara por umbral (`threshold`) podía eliminar parcialmente un tránsito, mientras que la máscara personalizada permitió conser-

var correctamente las modulaciones asociadas al planeta.

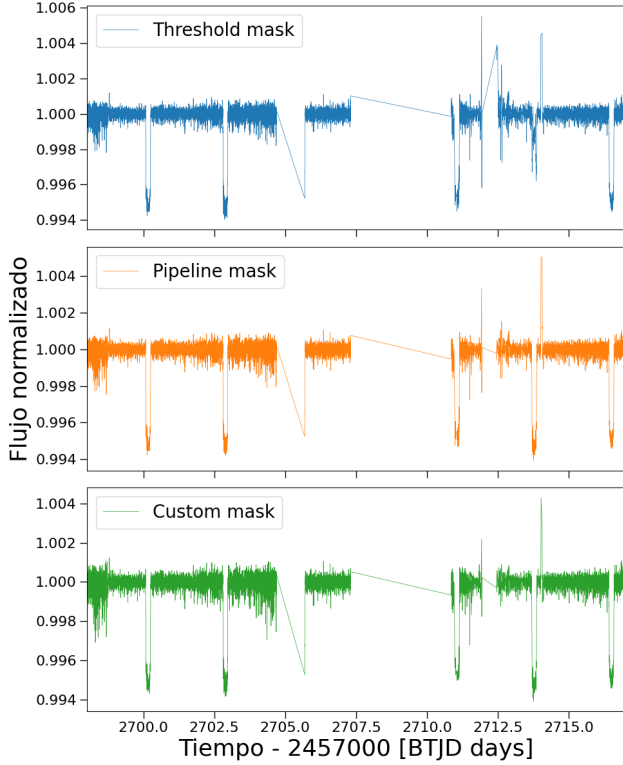


Figure 3. Comparación de las curvas de luz obtenidas con diferentes máscaras de fotometría en `lightkurve`: `threshold`, `pipeline` y `custom`.

Finalmente, se compararon las distintas curvas generadas a partir de los métodos de fotometría disponibles en `Lightkurve`. De las opciones consideradas —*threshold*, *pipeline* y *custom mask*—, la fotometría obtenida mediante una *máscara personalizada* ofreció la menor dispersión fuera de los tránsitos. Por esta razón, se seleccionó como la curva definitiva del análisis. La serie temporal resultante fue exportada en formato `.fits` mediante la función `flat.to_fits(path='(...).fits', overwrite=True)`, con el propósito de utilizarla posteriormente en el modelamiento conjunto de velocidades radiales y fotometría con el software `Juliet` (N. Espinoza et al. 2018).

El siguiente paso consistió en analizar la periodicidad de las variaciones de flujo mediante un periodograma, una herramienta que permite identificar señales periódicas presentes en la curva de luz. Este método busca los períodos que mejor reproducen las modulaciones observadas, asignando a cada frecuencia un valor de potencia o “puntaje” que indica la significancia de la señal.

En la Figura 4 se muestra el periodograma correspondiente al objetivo WASP-189, donde el máximo de potencia se encuentra en $P = 2.7011595$ d. Este valor representa el período orbital del planeta, y será utilizado en los análisis posteriores.

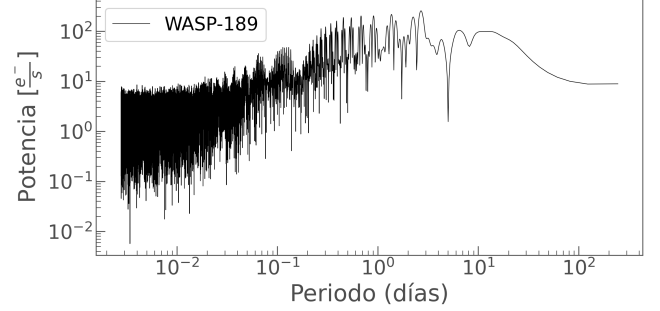


Figure 4. Periodograma de WASP-189; máximo en $P = 2.7011595$ d.

2.3. Propiedades de WASP-189 (estrella huésped)

Las propiedades estelares adoptadas para WASP-189 se muestran en la Tabla 1, tomadas de M. Lendl et al. (2020).

Table 1. Propiedades físicas de la estrella huésped WASP-189 (M. Lendl et al. 2020).

Parámetro	Valor
T_{eff} (K)	8000 ± 80
M_* (M_{\odot})	2.030 ± 0.066
R_* (R_{\odot})	2.36 ± 0.03
$\log g$ ($\log_{10}(\text{cm s}^{-2})$)	3.9 ± 0.2
[Fe/H] (dex)	0.29 ± 0.13
$v \sin i$ (km s^{-1})	93.1 ± 1.7
Edad (Gyr)	0.73 ± 0.13

Estos parámetros son fundamentales para los análisis posteriores, como la correlación cruzada utilizada en la determinación de la velocidad radial. En particular, conocer la temperatura efectiva, la gravedad superficial y la metalicidad de la estrella permite seleccionar un *template* (espectro de referencia) con propiedades físicas similares a las de la estrella huésped. De esta manera, al comparar las líneas espectrales observadas con las del modelo, se obtiene una medida más precisa del desplazamiento Doppler y, por ende, de la velocidad radial.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Antes de realizar la correlación cruzada y medir las velocidades radiales, es fundamental disponer de un espec-

tro plantilla (*template*) que reproduzca las propiedades físicas de la estrella huésped. En la literatura existen múltiples bases de datos de espectros sintéticos parametrizados por T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ y $v \sin i$. Para obtener un resultado confiable, es esencial que el espectro plantilla sea lo más similar posible a la estrella analizada en estos parámetros.

En este trabajo se seleccionaron los modelos de P. Coelho et al. (2005), ya que constituyen una de las pocas bibliotecas espectrales disponibles que incluyen explícitamente el efecto de la rotación estelar a través del parámetro $v \sin i$. Este aspecto resulta clave, pues la rotación produce un ensanchamiento de las líneas espectrales que puede afectar la forma del perfil de correlación. Aunque existen otras bibliotecas con parámetros comparables, la mayoría asume $v \sin i = 0$, lo que introduce discrepancias notables al compararlas con una estrella de rotación rápida como WASP-189. Los parámetros adoptados para el espectro plantilla fueron $v \sin i = 50 \text{ km s}^{-1}$, $T_{\text{eff}} = 6750 \text{ K}$, $\log g = 4.0$ y $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.2$.

Una vez definidos los espectros, es necesario normalizarlos adecuadamente antes de aplicar la correlación cruzada, de modo que las diferencias en el continuo no introduzcan sesgos en el cálculo. La normalización del continuo en los espectros HARPS es una tarea compleja sin el uso de un *pipeline* robusto diseñado específicamente para este tipo de datos, como lo son CERES³ o RASSINE⁴. En ausencia de estos, se exploraron alternativas de ajuste mediante modelos polinomiales y regresión robusta, empleando los módulos RANSACRegressor y make_pipeline de scikit-learn, además de la función numpy.polyfit para ajustes más directos.

Finalmente, se optó por un ajuste polinomial a orden 1, simple pero efectivo, considerando que el análisis se restringió a una ventana espectral de aproximadamente $\pm 150 \text{ \AA}$ alrededor de la línea de H_β ($\lambda 4861$). En la Figura 5 se muestra la comparación entre los espectros observacional y sintético luego del proceso de normalización.

3.1. Correlación cruzada de los espectros

Una vez normalizados ambos espectros, se aplicó la correlación cruzada mediante la función `crosscorrRV` del módulo `PyAstronomy.pyasl` (S. Czesla et al. 2019). Esta rutina permite calcular la función de correlación cruzada (*Cross-Correlation Function*, CCF) entre un espectro observado y un espectro plantilla, desplazando

este último en velocidad radial para encontrar el corrimiento Doppler que maximiza la coincidencia entre ambos.

El procedimiento implementado por la función es el siguiente: para cada desplazamiento radial v_j dentro del rango definido ($v_{\text{min}}, v_{\text{max}}$), el eje de longitudes de onda del espectro plantilla se corrige aplicando el corrimiento Doppler correspondiente. Luego, el espectro desplazado se interpola linealmente sobre los puntos de longitud de onda del espectro observado y se calcula el valor de la correlación cruzada como:

$$CC(v_j) = \sum_{i=1}^N \alpha_i [f_i \times t(w_i - \Delta_{i,j})], \quad (1)$$

donde f_i representa el flujo del espectro observado en la longitud de onda w_i , t es el espectro plantilla desplazado, y α_i son pesos opcionales aplicados a cada punto (por defecto, $\alpha_i = 1$). El desplazamiento Doppler $\Delta_{i,j}$ depende del modo de cálculo seleccionado.

De esta forma, la velocidad radial del sistema se obtiene identificando el valor de v_j que maximiza la función $CC(v_j)$, lo que corresponde al mejor alineamiento entre las líneas espectrales del modelo y las observadas.

Aplicando la correlación cruzada al espectro mostrado en la Figura 5, se obtuvo la función de correlación cruzada (*Cross-Correlation Function*, CCF) entre el espectro observado y el espectro plantilla seleccionado. A primera vista, la CCF presenta un peak bien definido en torno a $v_r \approx -33 \text{ km s}^{-1}$, lo que indica la velocidad radial correspondiente al mejor alineamiento entre ambos espectros.

Para determinar con mayor precisión la posición del máximo de la función de correlación cruzada, se ajustó una función compuesta por una gaussiana más un término polinomial de fondo. Este modelo permite describir la forma del pico principal del CCF y corregir posibles variaciones suaves del continuo. La función ajustada tiene la forma:

$$f(v) = A \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{v - v_0}{\sigma} \right)^2 \right] + \sum_{i=0}^n a_i v^i, \quad (2)$$

donde A es la amplitud de la gaussiana, v_0 la velocidad radial central, σ la desviación estándar (relacionada con el ancho de la línea) y los coeficientes a_i representan el fondo polinomial de orden n .

El ajuste se realizó empleando el algoritmo `curve_fit` de `scipy.optimize`, que utiliza un método de mínimos cuadrados no lineales para determinar los parámetros óptimos. El rango de ajuste se centró en torno al máximo de la CCF, dentro de un intervalo de $\pm 20 \text{ km s}^{-1}$.

³ CERES: <https://github.com/rabrahm/ceres>.

⁴ RASSINE: https://github.com/MichaelCretignier/Rassine_public.

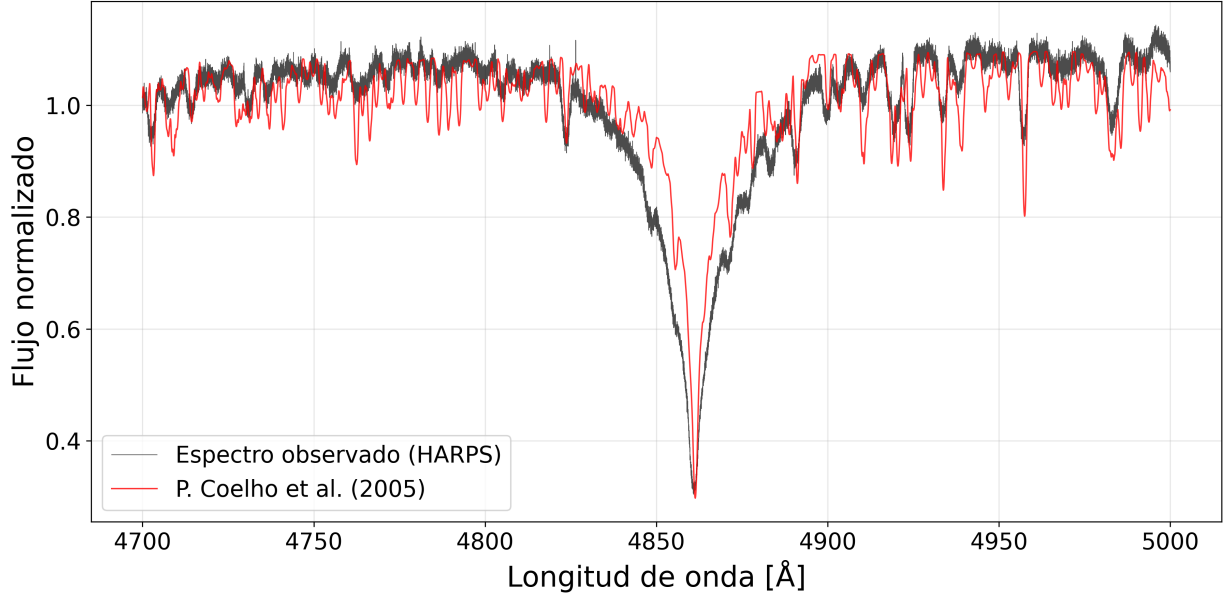


Figure 5. Comparación del proceso de normalización entre el espectro observado de HARPS y el espectro sintético adoptado como plantilla. La región mostrada corresponde a ± 150 Å alrededor de la línea de H_β ($\lambda 4861$).

A partir de los parámetros ajustados se calculó la anchura a mitad de máxima intensidad (FWHM) mediante:

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma. \quad (3)$$

La incertidumbre estadística en la velocidad radial, σ_{v_0} , se obtuvo de la matriz de covarianza devuelta por el ajuste. Sin embargo, este valor suele subestimar el error real, por lo que se consideró una estimación adicional basada en la relación señal-ruido (SNR) del peak de correlación, de acuerdo con la formulación de Tonry & Davis (1979):

$$R = \frac{A}{\sigma_{\text{noise}}}, \quad (4)$$

donde σ_{noise} corresponde a la desviación estándar del CCF fuera del pico principal. A partir de este valor, el error empírico en la velocidad radial se calculó como:

$$\sigma_{\text{TD}} = \frac{3}{8} \frac{\text{FWHM}}{1 + R}. \quad (5)$$

La incertidumbre final adoptada para la velocidad radial se definió como la combinación cuadrática de ambas contribuciones:

$$\sigma_{v_r} = \sqrt{\sigma_{v_0}^2 + \sigma_{\text{TD}}^2}. \quad (6)$$

De esta forma, el valor central v_0 obtenido del ajuste gaussiano se adopta como la **velocidad radial medida para el espectro analizado**, mientras que σ_{v_r} representa su error asociado.

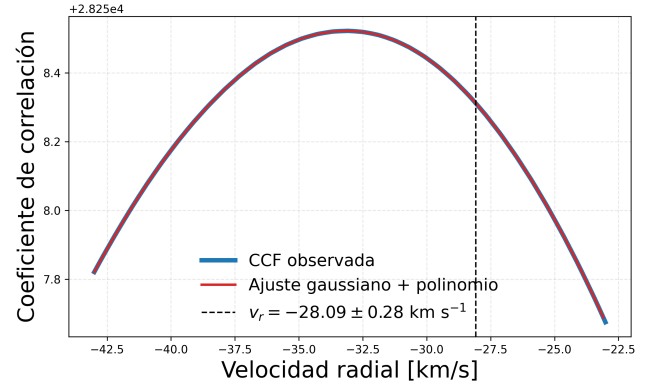


Figure 6. Ajuste gaussiano aplicado al pico de la función de correlación cruzada (CCF) para el espectro analizado. La línea roja corresponde al modelo gaussiano ajustado, mientras que la línea punteada marca la posición del máximo, que representa la velocidad radial medida para la observación.

Aplicando este mismo procedimiento a todos los espectros disponibles, se obtuvieron las velocidades radiales individuales. Posteriormente, cada medición fue corregida por el movimiento de la Tierra utilizando la función `radial_velocity_correction` de `Astropy`, considerando las coordenadas del sistema y la ubicación del observatorio de La Silla. Una vez aplicadas las correcciones baricéntricas, se construyó la curva de velocidades radiales con sus respectivas barras de error, mostrada en la Figura 7.

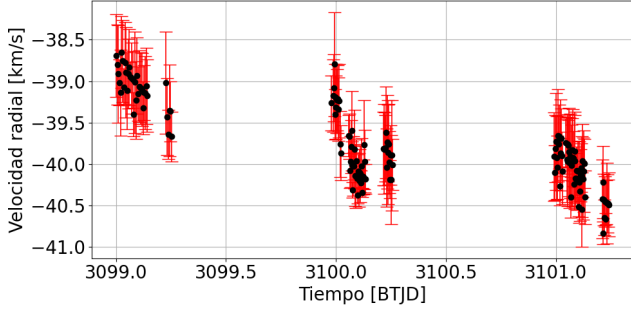


Figure 7. Velocidades radiales medidas para el sistema WASP-189, corregidas por el movimiento de la Tierra. Cada punto representa una observación individual con su barra de error asociada.

3.2. *Juliet*.

En esta etapa se utilizó el paquete *Juliet* para ajustar simultáneamente la fotometría de *TESS* y las velocidades radiales de *HARPS*. Antes de ejecutar el ajuste, se definieron los *priors*, que corresponden a las estimaciones iniciales o suposiciones del modelo sobre los parámetros a ajustar. Estos valores funcionan como “conjeturas informadas” que guían el proceso de inferencia bayesiana hacia soluciones físicamente razonables.

Para el caso del tránsito, el parámetro más importante es el período orbital, cuyo valor aproximado de $P \simeq 2.7$ d fue determinado a partir del periodograma. Con esta información, *Juliet* pudo ajustar un modelo fotométrico que reproduce el tránsito del planeta de manera consistente con las observaciones.

Del mismo modo, se aplicó el ajuste a las velocidades radiales, empleando como punto de partida los hiperparámetros derivados de la correlación cruzada: $P = 2.7240330$ d, $t_0 = 2460099.7276$, $\mu_{\text{HARPS}} = -40$ km s $^{-1}$, $K = 0.1\text{--}0.3$ km s $^{-1}$, y una dispersión instrumental $\sigma_w = 0.001\text{--}0.2$ km s $^{-1}$. Estos valores permitieron a *Juliet* modelar el componente Kepleriano del sistema y estimar los parámetros orbitales más probables.

Las Figuras 10 y 11 muestran las distribuciones posteriores de los parámetros ajustados en los modelos de tránsito y de velocidades radiales, respectivamente. El muestreo *nested* implementado en *Juliet* permite estimar las incertidumbres y correlaciones entre parámetros de forma robusta.

La Figura 10 muestra las distribuciones posteriores de los parámetros ajustados en el modelo de tránsito: P_p , r_1 y a_p . Se observa una buena convergencia y distribuciones unimodales, lo que indica que los datos fotométricos de *TESS* permiten restringir de forma precisa tanto la periodicidad como la geometría del tránsito.

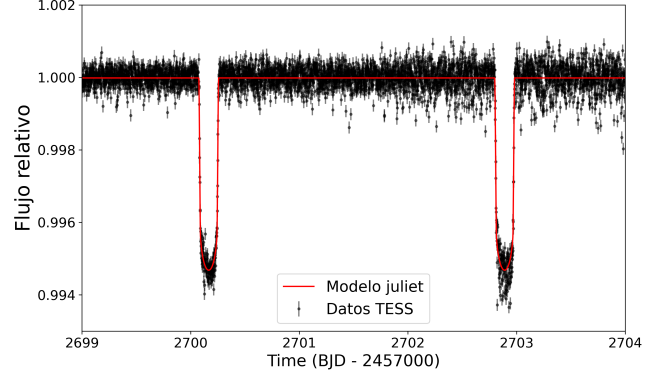


Figure 8. Modelo de tránsito ajustado por *Juliet* sobre los datos fotométricos de *TESS*. El modelo reproduce adecuadamente la forma y profundidad del tránsito correspondiente al planeta WASP-189b.

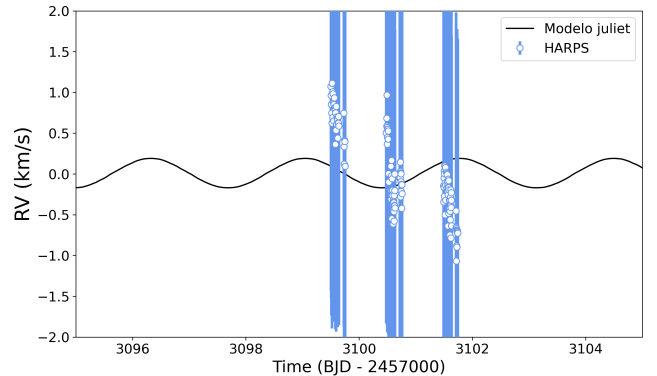


Figure 9. Ajuste simultáneo de las velocidades radiales obtenido con *Juliet*. Los puntos representan las mediciones individuales de HARPS con sus barras de error, mientras que la línea negra indica el modelo Kepleriano ajustado al conjunto de datos.

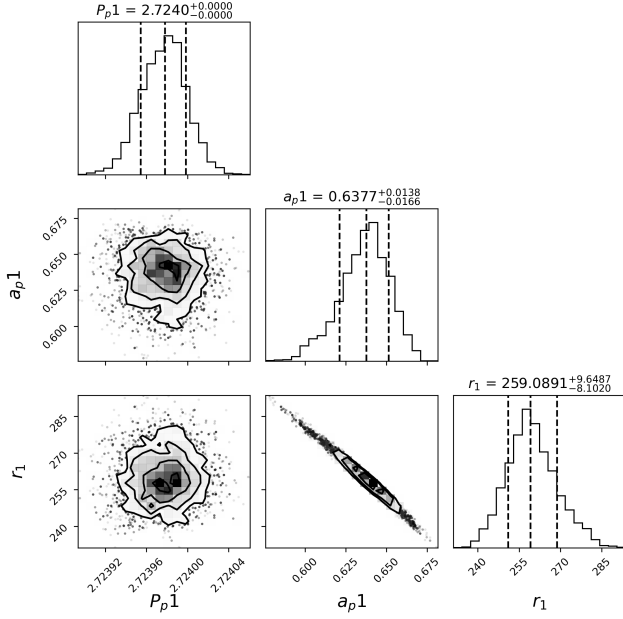


Figure 10. Distribuciones posteriores de los parámetros ajustados en el modelo de tránsito.

En contraste, el modelo Kepleriano ajustado a las velocidades radiales (Figura 11) presenta una convergencia limitada. Las distribuciones muestran una alta dispersión, sugiriendo que los hiperparámetros iniciales o la calidad de los datos no son suficientes para restringir de manera robusta los parámetros orbitales. Esto podría reflejar tanto la baja amplitud del semiamplitud esperada (K_p) como el nivel de ruido en las mediciones de HARPS.

Al comparar los parámetros obtenidos con los valores reportados en la literatura (Tabla 2), se observa una muy buena consistencia en el período orbital, con diferencias menores a 10^{-4} d entre el ajuste fotométrico, el ajuste espectroscópico y el valor publicado. Esto indica que ambos conjuntos de datos reproducen correctamente la periodicidad del sistema WASP-189b.

Por otro lado, los parámetros geométricos derivados del tránsito (b e i) presentan ligeras discrepancias con respecto a los valores de la literatura, del orden de un par de desviaciones estándar. Estas diferencias pueden atribuirse principalmente a dos factores: (i) la elección de priors y la parametrización del oscurecimiento al borde, y (ii) posibles efectos de dilución o contaminación en la fotometría.

En cambio, el ajuste de velocidades radiales muestra una mayor dispersión y menor convergencia en el parámetro K , lo que sugiere que las mediciones presentan errores relativamente altos o un nivel de ruido que limita la precisión del modelo. Una posible mejora consi-

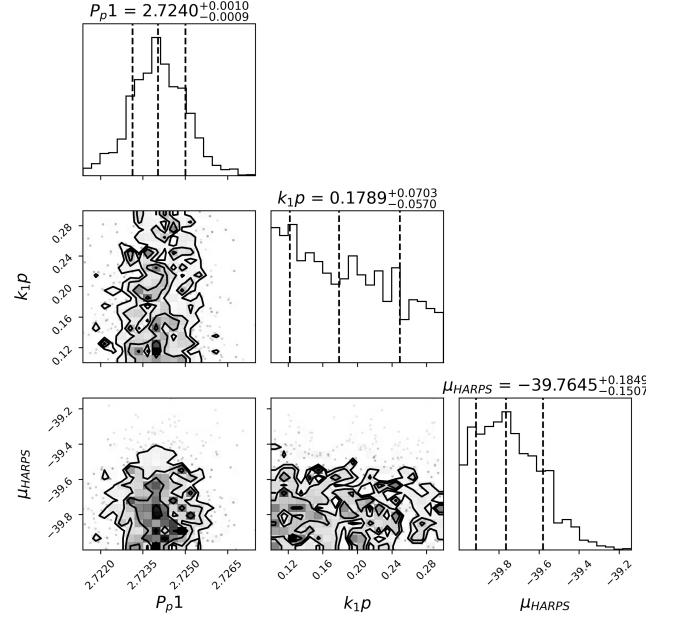


Figure 11. Distribuciones posteriores de los parámetros ajustados en el modelo Kepleriano de velocidades radiales.

stiría en emplear un método de extracción de velocidades radiales más robusto o con menor error sistemático (por ejemplo, refinando la correlación cruzada o aplicando un ajuste de línea gaussiana adaptativo), de modo que las incertidumbres individuales sean más representativas y el modelo Kepleriano pueda converger de forma más estable.

Pese a estas diferencias, los resultados globales se encuentran en excelente acuerdo con la literatura, validando la consistencia del modelado independiente realizado con *Juliet*.

3.3. Parámetros derivados

A partir de los parámetros obtenidos con *Juliet* y de las propiedades estelares de la Tabla 1, se pueden determinar magnitudes físicas del planeta como su radio, masa mínima y densidad media (Tabla 3).

$$R_p = p R_\star \quad (7)$$

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_\star + M_p)^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1-e^2}} \quad (8)$$

$$M_p \sin i \simeq \frac{K \sqrt{1-e^2}}{(2\pi G)^{1/3}} P^{1/3} M_\star^{2/3} \quad (9)$$

$$\rho_p = \frac{3 M_p}{4\pi R_p^3} \quad (10)$$

Table 2. Comparación de los parámetros orbitales obtenidos con *Juliet* a partir del ajuste fotométrico (tránsito) y espectroscópico (velocidad radial), en contraste con los valores reportados en la literatura *M. Lendl et al. (2020)*. Las incertidumbres corresponden a intervalos de credibilidad al 68%.

Parámetro	Tránsito (TESS)	Velocidad radial (HARPS)	Literatura
P [d]	$2.72398^{+0.00002}_{-0.00002}$	$2.72404^{+0.00097}_{-0.00091}$	2.7240330
K [km s $^{-1}$]	—	$0.1789^{+0.0703}_{-0.0573}$	0.182 ± 0.013
b	$0.456^{+0.021}_{-0.025}$	—	$0.478^{+0.009}_{-0.012}$
i [deg]	$84.39^{+0.37}_{-0.32}$	—	84.03 ± 0.14

Table 3. Comparación de los parámetros planetarios derivados con *Juliet* y los valores reportados por *M. Lendl et al. (2020)*.

Parámetro	Este trabajo	Lendl et al. 2020	Unidades
P	$2.72398^{+0.00002}_{-0.00002}$	2.7240330	d
K	$0.1789^{+0.0703}_{-0.0573}$	0.182 ± 0.013	km s $^{-1}$
b	$0.456^{+0.021}_{-0.025}$	$0.478^{+0.009}_{-0.012}$	—
i	$84.39^{+0.37}_{-0.32}$	84.03 ± 0.14	deg
R_p/R_\star	$0.07032^{+0.00065}_{-0.00070}$	$0.07045^{+0.00013}_{-0.00015}$	—
δ	0.00495 ± 0.00010	0.00879 ± 0.00043	—
R_p	1.65 ± 0.03	1.619 ± 0.021	R_J
M_p	1.97 ± 0.70	1.99 ± 0.16	M_J
ρ_p	0.58 ± 0.21	$0.622^{+0.077}_{-0.037}$	g cm $^{-3}$

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo logró reproducir de forma satisfactoria el proceso completo de detección y caracterización de un exoplaneta mediante la combinación de datos espectroscópicos y fotométricos. A partir de las observaciones de *HARPS* y *TESS* para el sistema WASP-189, se desarrolló un flujo de análisis que incluyó la reducción de datos, la determinación de velocidades radiales por correlación cruzada, el ajuste de curvas de luz y la modelación bayesiana con *Juliet*.

El ajuste fotométrico permitió estimar una profundidad de tránsito de $\delta = 0.0049 \pm 0.0001$ y un radio planetario de $R_p = 1.65 \pm 0.03 R_J$, mientras que el ajuste espectroscópico entregó una semiamplitud $K = 0.1789^{+0.0703}_{-0.0573}$ km s $^{-1}$, correspondiente a una masa de $M_p = 1.97 \pm 0.70 M_J$. De ambos parámetros se obtuvo una densidad media de $\rho_p = 0.58 \pm 0.21$ g cm $^{-3}$, consistente con la de un planeta tipo Júpiter caliente. Todos los valores concuerdan, dentro de las incertidumbres, con los reportados por *M. Lendl et al. (2020)*, confirmando la validez del modelamiento independiente.

Las diferencias menores observadas, especialmente en la profundidad del tránsito y en la dispersión del parámetro K , se atribuyen a la calidad de los datos y al método de extracción de velocidades radiales. No obstante, los resultados globales demuestran una excelente coherencia entre los métodos de tránsito y velocidad radial, y evidencian la potencia de *Juliet* como herramienta de análisis conjunto.

En conjunto, la experiencia permitió comprender de manera práctica la aplicación de técnicas de reducción, modelamiento y análisis de datos astronómicos reales, integrando los conceptos teóricos vistos en clase con herramientas computacionales modernas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se basa en datos obtenidos del *ESO Science Archive Facility*, correspondientes al instrumento *High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher* (HARPS), con DOI: <https://doi.org/10.18727/archive/33>.

El código desarrollado y los procedimientos implementados se encuentran documentados en el *notebook's* de *Python* adjunto, que acompaña este informe y contiene las rutinas empleadas en cada etapa del análisis.

REFERENCES

- Baranne, A. e. a. 1996, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 119, 373–390
- Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., & Mayor, M. 2000, *The Astrophysical Journal Letters*, 529, L45–L48, doi: [10.1086/312457](https://doi.org/10.1086/312457)

- Coelho, P., Barbuy, B., Meléndez, J., Schiavon, R. P., & Castilho, B. V. 2005, *A&A*, 443, 735, doi: [10.1051/0004-6361:20053511](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053511)
- Czesla, S., Schröter, S., Schneider, C. P., et al. 2019, *PyA: Python astronomy-related packages*, <http://ascl.net/1906.010>
- Espinoza, N., Kossakowski, D., & Brahm, R. 2018, arXiv e-prints, arXiv:1812.08549. <https://arxiv.org/abs/1812.08549>
- Lendl, M., Csizmadia, S., Deline, A., et al. 2020, *A&A*, 643, A94, doi: [10.1051/0004-6361/202038677](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038677)
- Lightkurve Collaboration, Cardoso, J. V. d. M., Hedges, C., et al. 2018, *Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python*, *Astrophysics Source Code Library* <http://ascl.net/1812.013>
- Mayor, M., & Queloz, D. 1995, *Nature*, 378, 355, doi: [10.1038/378355a0](https://doi.org/10.1038/378355a0)
- Pepe, F., Mayor, M., & Galland, F. e. a. 2002, *Astronomy and Astrophysics*, 388, 632–638, doi: [10.1051/0004-6361:20020433](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020433)
- Perryman, M. 2018, Cambridge University Press
- Ricker, G. R. e. a. 2015, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1, 014003, doi: [10.1117/1.JATIS.1.1.014003](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.1.1.014003)
- Seager, S., & Mallén-Ornelas, G. 2003, *The Astrophysical Journal*, 585, 1038–1055, doi: [10.1086/346105](https://doi.org/10.1086/346105)
- Winn, J. N., & Fabrycky, D. C. 2015, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 53, 409–447, doi: [10.1146/annurev-astro-082214-122246](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082214-122246)