

Artículo original

## Órbita de Algol a partir de espectros obtenidos con el espectrógrafo Espartaco 2

### Orbit of Algol from Espartaco-2 spectra

Benjamin Oostra, Julian Rojas\*, Alejandro Cante

Observatorio Astronómico, Departamento de Física, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

#### Resumen

Reportamos las mediciones del sistema binario espectroscópico Algol, realizadas con el espectrógrafo Espartaco-2 en el observatorio astronómico de la Universidad de los Andes en Bogotá. A partir de las velocidades radiales medidas en varias épocas, inferimos los parámetros orbitales. Nuestros resultados son similares a los valores encontrados en la literatura.

**Palabras clave:** Algol; Espectroscopía; Velocidad radial; Órbita; Función de masa; Periodo Orbital.

#### Abstract

We report measurements of the spectroscopic binary system Algol performed with the Espartaco-2 spectrograph at the astronomical observatory of the Universidad de los Andes in Bogotá. From the radial velocities measured at several epochs we infer the orbital parameters. Our results are similar to the values found in the literature.

**Keywords:** Algol; Spectroscopy; Radial velocity; Orbit; Mass function; Orbital period.

#### Introducción

Algol ( $\beta$  Persei) es una estrella de secuencia principal de tipo B8, con una magnitud visual de 2.1, ubicada en la constelación de Perseo (Zavala *et al.*, 2010). En el siglo XVII, Geminiano Montanari reportó en 1667 que esta estrella se atenúa periódicamente a una magnitud de 3.4. (Mozaffari and Drake, 2021) Más de un siglo después, John Goodricke midió el período de la variación. (Goodricke, 1783) La duración de los eclipses sugiere que el cuerpo en órbita es otra estrella de tamaño similar, pero esta Algol-B debe ser mucho más fría que la más brillante Algol-A, ya que los eclipses secundarios son muy superficiales. (Starfacts, 2020).

La explicación del eclipse ha sido verificada mediante la medición de la velocidad radial (VR) de Algol-A utilizando métodos espectroscópicos: Durante la mitad del ciclo después de un eclipse, la VR es negativa (la estrella se acerca a la tierra) y durante la mitad del ciclo antes de un eclipse, la VR es positiva (Chen, Merrill, and Richardson, 1977). La amplitud de la oscilación de la VR, junto con el período orbital, permite calcular el radio orbital y la función de masa, lo que impone limitaciones a las masas de las dos estrellas.

En el Observatorio Astronómico de la Universidad de los Andes en Bogotá (Colombia), monitoreamos la VR de Algol durante varios meses con la finalidad de establecer la órbita. En la siguiente sección damos detalles de los instrumentos y observaciones. En la Sección 3 se detalla el procesamiento de datos y la construcción de la curva de velocidad. Finalmente, en la Sección 4 se presenta el cálculo de los parámetros orbitales.

**Citación:** Oostra B., *et al.* Órbita de Algol a partir de espectros obtenidos con el espectrógrafo Espartaco 2. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(190):7-15, enero-marzo de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.3065>

**Editor:** Santiago Vargas

**\*Correspondencia:**

Julian Rojas Tapias;  
[ja.rojast1@uniandes.edu.co](mailto:ja.rojast1@uniandes.edu.co)

**Recibido:** 28 de agosto de 2024

**Aceptado:** 14 de enero de 2025

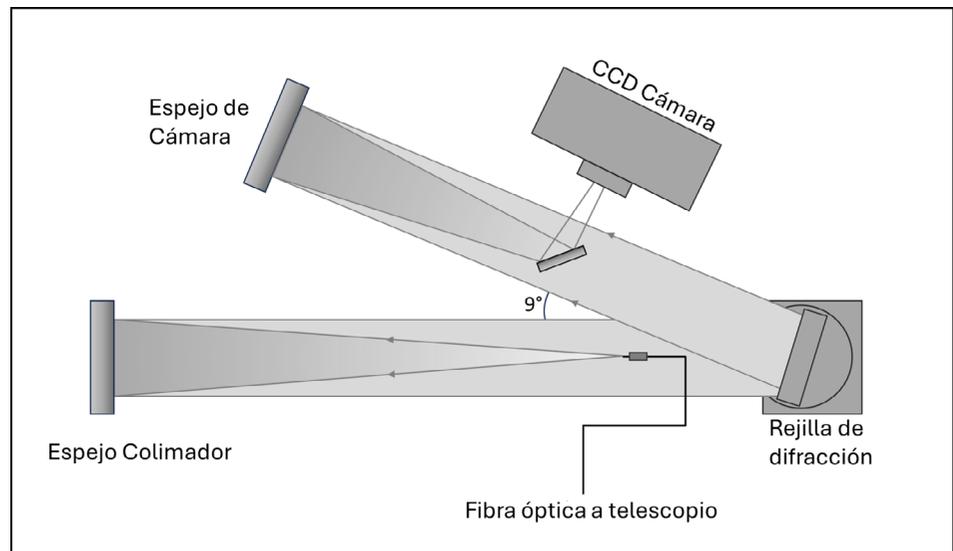
**Publicado en línea:** 12 de marzo de 2025



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

## Materiales y métodos

Las observaciones se realizaron entre enero y marzo de 2024. Se registraron 18 espectros en 12 noches utilizando el telescopio de 40 cm del Observatorio y el recién completado espectrógrafo Espartaco 2 (Oostra and Batista, 2024), acoplado mediante una fibra óptica multimodo de 50 mm de diámetro. Es posible observar la composición interna de Espartaco 2 en la figura 1.

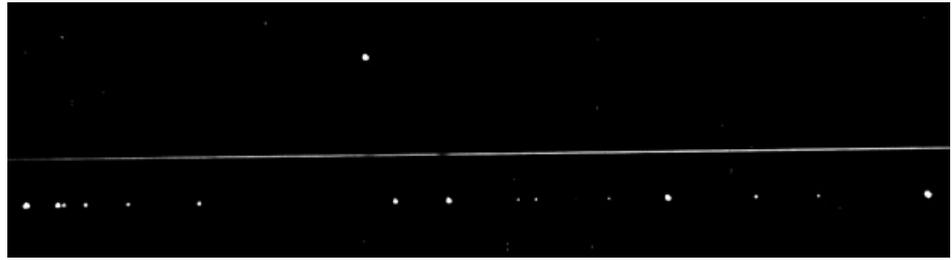


**Figura 1.** Montaje interno de Espartaco 2, en donde se puede observar el funcionamiento del espectrógrafo junto a sus diversos espejos y demás componentes.

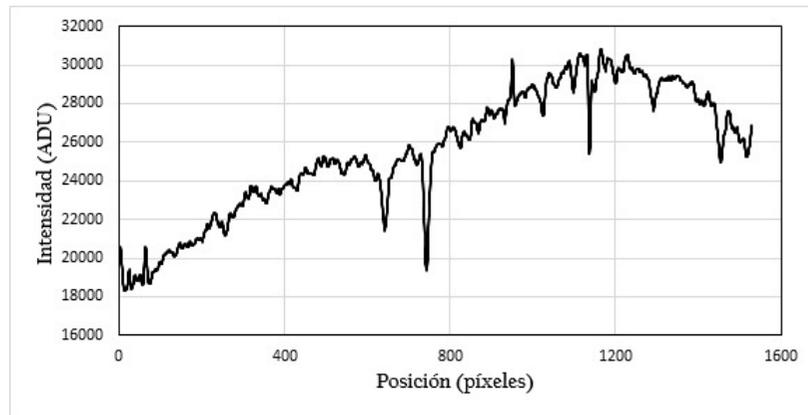
El espectrógrafo tiene una rejilla de 1200 líneas/mm. Se utilizó en primer orden, con una resolución espectral de 25000. Se utilizaron exposiciones de 20 minutos, lo cual es bastante prolongado para una estrella de segunda magnitud, pero necesario debido a la alta dispersión del espectrógrafo y su baja sensibilidad en el rango azul. Para estas observaciones se contaron con valores de S/N iguales a 50 y 20, en los espectros buenos y malos, respectivamente.

Siendo una estrella de tipo temprano, Algol tiene pocas líneas de absorción estrechas adecuadas para mediciones de VR. Por lo tanto, elegimos la línea de Mg II a 448 nm, que es en realidad triple pero sigue siendo la línea más estrecha y profunda en el espectro visible. Tomamos su longitud de onda natural como 448,12200 nm.

Cada espectro se registró en un detector CCD de 1530 píxeles de ancho, que captura una porción de 10 nm del espectro. La misma exposición incluye un espectro de Torio-Argón para calibración y un espectro de Helio (que presenta solo la línea de 447 nm) para centrado y enfoque rápido (Figura 2).



**Figura 2.** Espectro de Algol que abarca aproximadamente de 443 a 453 nm. Se emplean tres fibras ópticas: Arriba, un espectro de Helio que contiene solo una línea de emisión a 447 nm; en el centro, el espectro de la estrella que muestra la línea de absorción de He I y la línea de Mg II a 448 nm; la línea inferior muestra una serie de líneas de Th y Ar.



**Figura 3.** Perfil del espectro mostrado en la Figura 1. La escala vertical indica la intensidad en unidades de conversión analógica-digital (ADU). La escala horizontal mide la posición en píxeles. La línea de absorción prominente en 740 es la línea de Mg II a 448 nm. También son visibles otras líneas de absorción más débiles. El continuo desigual se debe a una iluminación no uniforme de la cámara, que podría corregirse aplicando un procedimiento de campo plano. Los picos estrechos son ruido de la cámara.

La calibración precisa de la escala de longitud de onda es un paso fundamental para la determinación de las velocidades radiales. El procedimiento comienza con la identificación de cinco líneas prominentes en el espectro de Torio y Argón, cercanas a la posición de la línea de Mg II de la estrella. Estas líneas son seleccionadas debido a su intensidad y características bien definidas. Las posiciones de las líneas se miden en píxeles ajustando una función gaussiana a cada una de ellas, lo que permite una localización precisa. Posteriormente, las posiciones medidas se corrigen por un desfase de 2.8 píxeles que surge del desplazamiento horizontal entre las dos fibras ópticas utilizadas en el sistema. A partir de estas posiciones corregidas y las longitudes de onda conocidas de las líneas de Torio, se construye una curva de calibración empleando una función cuadrática, que se utiliza para convertir las posiciones en píxeles del espectro estelar a unidades de longitud de onda.

Una vez calibrada la escala de longitud de onda, esta función se aplica directamente al espectro de la estrella Algol. Antes de realizar la calibración, el espectro estelar se somete a una normalización, dividiéndolo por un continuo generado mediante un ajuste polinomial. Este paso asegura que las características espectrales no se vean afectadas por las variaciones del fondo o la iluminación no uniforme del detector. En la escala calibrada, se mide la posición observada de la línea de Mg II, que es de particular interés por ser la línea más prominente y estrecha dentro del rango espectral analizado. Esta longitud de onda observada

Fecha(2024)	UT fecha	BJD-2460330	$V_{Observada}$	$V_{terlurica}$	$V_{heliocentrica}$
			Km/s	Km/s	Km/s
Enero 26	27,0049	6,5066	66 ± 6	-26,305 ± 0,001	40 ± 6
Enero 30	31,0264	10,5278	10 ± 6	-26,912 ± 0,001	-17 ± 6
Febrero 8	9,0292	19,5297	40 ± 6	-27,789 ± 0,001	12 ± 6
	9,0493	19,5499	43 ± 6	-27,786 ± 0,001	15 ± 6
Febrero 12	13,0035	23,5037	68 ± 6	-27,949 ± 0,001	40 ± 6
	13,0201	23,5204	65 ± 6	-27,947 ± 0,001	37 ± 6
Febrero 13	14,0681	24,5682	-1 ± 6	-27,951 ± 0,001	-29 ± 6
Febrero 19	19,9819	30,4815	1 ± 6	-27,885 ± 0,001	-27 ± 6
	20,0139	30,5135	2 ± 6	-27,879 ± 0,001	-26 ± 6
Febrero 22	23,0215	33,5208	15 ± 6	-27,722 ± 0,001	-13 ± 6
Marzo 5	6,0139	45,5121	50 ± 6	-26,392 ± 0,001	24 ± 6
	6,0347	45,5329	52 ± 6	-26,385 ± 0,001	26 ± 6
Marzo 11	11,9938	51,4914	76 ± 6	-25,302 ± 0,001	51 ± 6
Marzo 12	12,9861	52,4837	34 ± 6	-25,094 ± 0,001	9 ± 6
	13,0021	52,4997	28 ± 6	-25,085 ± 0,001	3 ± 6
Marzo 14	14,9868	54,4842	83 ± 6	-24,645 ± 0,001	58 ± 6
	15,0021	54,4995	86 ± 6	-24,636 ± 0,001	61 ± 6
Marzo 15	15,9938	55,4911	12 ± 6	-24,406 ± 0,001	-12 ± 6

**Tabla 1.** Fechas de observación y velocidades. La tercera columna da el Día Juliano Baricéntrico, que incluye el tiempo necesario para que la luz llegue al baricentro del sistema solar. La cuarta columna muestra la velocidad Doppler medida a partir de los espectros; la quinta columna da la velocidad de la Tierra (o, más exactamente, del Observatorio) proyectada en la dirección de Algol (Calculada con la ayuda del programa ISIS - V6.1.1); y la última columna es la suma de las dos anteriores, dando la velocidad radial de Algol en el sistema de referencia solar.

es un parámetro crucial para determinar la velocidad radial de la estrella. Sin embargo, teniendo en cuenta la poca simetría de dicha línea, junto a la cantidad de ruido detectado, se optó por implementar un método de baricentro con la finalidad de encontrar con mayor precisión la longitud de onda de dicha línea espectral.

Finalmente, la longitud de onda observada de la línea de Mg II de la estrella Algol se utiliza junto con el efecto Doppler para calcular la velocidad radial, permitiendo así inferir las características dinámicas del sistema binario. Este procedimiento asegura la precisión y reproducibilidad de los datos obtenidos. Dicha metodología fue realizada para cada una de las muestras de datos realizadas, esto se puede observar en la tabla 1.

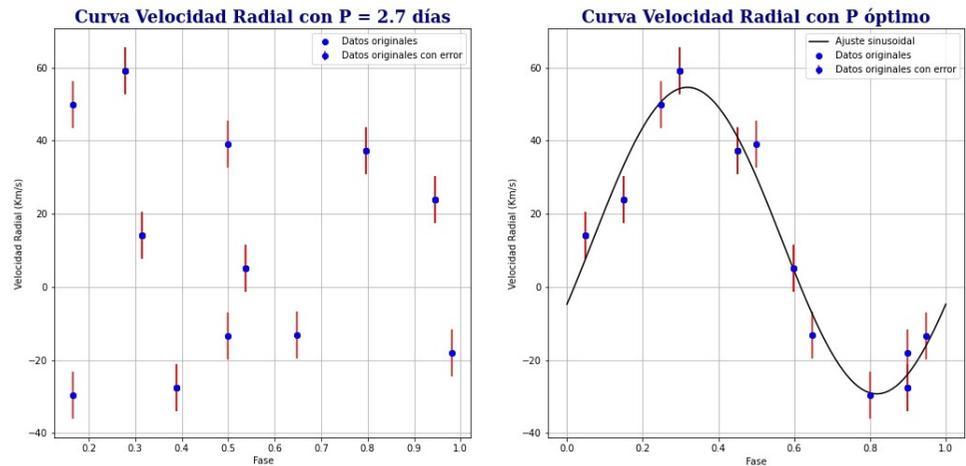
## Resultados

### *Curva de Velocidad Radial*

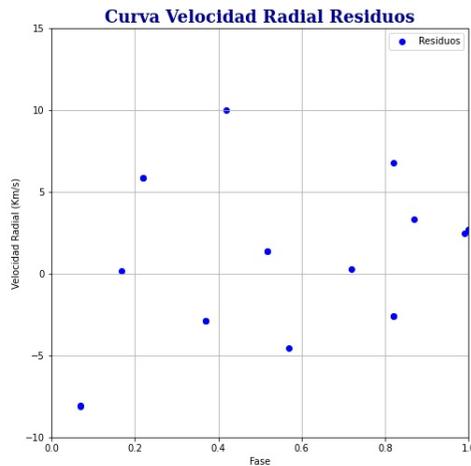
Como se mencionó anteriormente, los resultados de las velocidades radiales se pueden observar en la Tabla 1.

Las 12 fechas de observación cubren aproximadamente 17 períodos, por lo que el muestreo es muy disperso; para determinar los parámetros orbitales, la mejor estrategia es agrupar todos los datos en un diagrama compacto que abarque una sola oscilación. Para hacer esto, dividimos las épocas BJD por un valor de prueba tentativo para el período y restamos las partes enteras de los cocientes resultantes. Este procedimiento asigna a cada observación una fase entre 0 y 1, y el diagrama de fases resultante muestrea exactamente una oscilación completa. Si el período provisional está cerca del valor real, el diagrama de fases mostrará

una gráfica razonablemente coherente, pero si el período está mal elegido, el diagrama será caótico (Figura 4: muestra dos diagramas, uno con  $P=2,7$  días y el otro con el  $P$  óptimo, y los residuos). Este es el método para encontrar el período orbital: modificar el período de prueba para maximizar la consistencia del diagrama de fases.



**Figura 4.** Diagramas de fases de la velocidad radial heliocéntrica de Algol. Izquierda: Asumiendo un período de 2,7 días. Derecha: Usando nuestro período óptimo de 2,8596 días.



**Figura 5.** Residuos de los datos medidos después de restar el mejor ajuste. La desviación estándar es de 5,25 Km/s.

Para cuantificar la coherencia de los puntos de datos, elegimos una función modelo y minimizamos la dispersión de los puntos de datos alrededor de este modelo. Nuestro modelo elegido fue una simple sinusoidal, en primer lugar porque, tras alguna inspección, vimos que nuestros datos no permitían inferir ninguna excentricidad orbital; y en segundo lugar porque, según la literatura, la excentricidad de Algol es despreciable.

El ajuste de nuestros datos de VR medidos a una sinusoidal nos permite optimizar 4 parámetros: el período orbital, la época de fase cero, la amplitud de la oscilación y el valor medio de la

Periodo Orbital	$2,8596 \pm 0,004$	días
Época	2460335,253	BJD
V amplitud K	$42,6147 \pm 2,62$	Km/s
Promedio (sistemática) V	13,2372	Km/s
Desviación Estándar	$5,25 \pm 0.9$	Km/s

**Tabla 2.** Resultados del procedimiento de optimización.

VR. La Tabla 2 muestra nuestros valores óptimos para estos resultados y sus incertidumbres experimentales. La optimización de estos datos fue llevada a cabo con la función *curve\_fit* de la librería *scipy* en *python*.

### ***Parámetros orbitales derivados***

Se midió el periodo orbital (P) y la semi-amplitud de la velocidad radial (K). Asumiendo que la inclinación orbital es de  $90^\circ$ , valor real es de  $81.4^\circ \pm 0.2^\circ$  (Richards, 1993), se tiene  $\omega = 2\pi/P$  y  $R_1 = K/\omega$ . Aquí "1" se refiere a la estrella observada (Algol A); el compañero no visible (Algol B) se denominará "2".

La primer y tercera ley de Kepler establecen que

$$G(M_1 + M_2) = \omega^2 (R_1 + R_2)^3 \quad (1)$$

Donde  $M_1$  es la masa de la estrella 1,  $M_2$  es la masa de la estrella 2,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $R_1$  es el radio de la estrella 1 y  $R_2$  es el radio de la estrella 2. El valor desconocido de  $R_2$  puede eliminarse utilizando

$$M_1 R_1 = M_2 R_2 \quad (2)$$

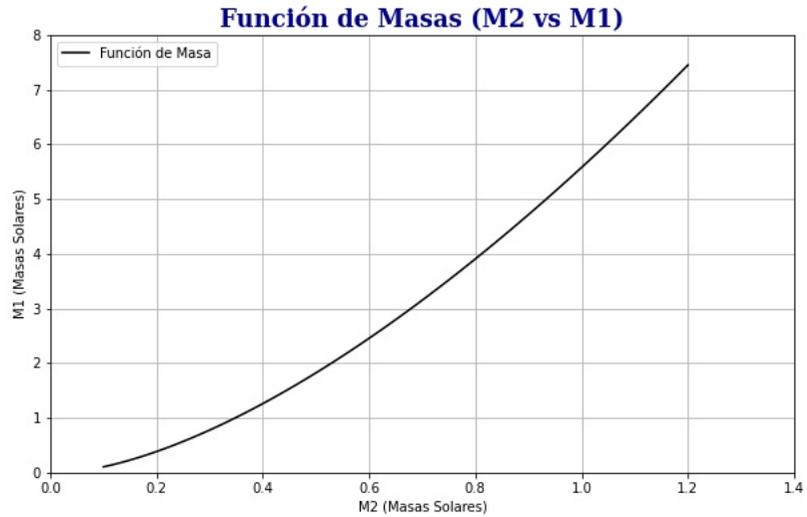
El resultado es la función de masa, esta describe la relación que existe entre la masa de la estrella 2 y la masa total ( $M_T$ ) del sistema.

$$\frac{M_2^3}{M_T^2} = \frac{K^3}{\omega G} \quad (3)$$

A partir de nuestras mediciones, la función de masa tiene el siguiente valor:

$$\frac{M_2^3}{M_T^2} = 0,0231 M_\odot \quad (4)$$

Este pequeño valor, en comparación con la masa del sol, indica que la estrella secundaria posee menor cantidad de masa que la estrella observada. A partir de nuestro valor de la función de masa,  $M_1$  se puede graficar como una función de  $M_2$  como se muestra en la Figura 6:



**Figura 6.** Masa de la estrella primaria en función de la masa secundaria y la función de masa medida.

Esto es lo máximo que se puede concluir a partir de las observaciones de la velocidad radial. El espectro clasifica a esta estrella como de tipo B8V, lo que sugiere un valor razonable para  $M_1$  de  $3.38 M_{\odot}$  (Mamajek, 2022), y permite calcular  $M_2$  a partir de la función de masa. Las estimaciones actuales dan las masas de las dos estrellas como  $M_1 = 3,17M_{\odot}$  y  $M_2 = 0,70M_{\odot}$  (Starfacts, 2020).

### Discusión

Un resultado destacado que se puede inferir del panel derecho de la Figura 4 es la similitud de las velocidades medidas en el mismo día. Los seis pares (o al menos cinco) se destacan claramente; y la diferencia dentro de cada par no es aleatoria, sino que sigue la tendencia de la estrella. Esto implica que los residuos (Figura 5) son aún más similares. Las diferencias entre los residuos de las velocidades medidas el mismo día son:

Fase	Diferencia (Km/s)
0,09	0,37
0,22	2,43
0,39	-1,25
0,52	-5,48
0,83	0,26
1,00	1,10

**Tabla 3.** Diferencia residuales por día

El hecho de que las diferencias entre las mediciones realizadas el mismo día sean mucho menores que la dispersión general de los residuos indica que nuestra metodología de calibración podría mejorarse y/o que los errores sistemáticos podrían ser eliminados.

## Conclusiones

En conclusión, a partir de espectros obtenidos con el espectrógrafo Espartaco-2 en el Observatorio de la Universidad de los Andes, se ha logrado determinar parámetros orbitales clave para el sistema binario Algol con un alto grado de precisión. El periodo orbital de  $2,8596 \pm 0,004$  días fue calculado mediante la optimización de un ajuste sinusoidal de las velocidades radiales, logrando una amplitud de oscilación de  $42,6147 \pm 2,62$  km/s y una velocidad radial promedio de 13,2372 km/s. Estos valores, junto con una baja dispersión en los residuos ( $5,25 \pm 0,9$  km/s), evidencian la fiabilidad de los datos y la robustez del proceso de calibración utilizado.

Aplicando la tercera ley de Kepler y el valor de la función de masa,  $\frac{M_3^3}{M_T^3} = 0,0231M_\odot$ , calculamos que la masa de la estrella primaria, Algol A, es aproximadamente  $3,17 M_\odot$ , mientras que la masa de su compañera Algol B se estima en  $0,70M_\odot$ , en línea con los valores teóricos para una estrella de tipo B8V. La consistencia de nuestras mediciones con las encontradas en la literatura valida la eficacia de Espartaco-2 para observaciones de precisión en sistemas binarios.

La repetibilidad de los resultados en distintas noches, y la reducción de errores sistemáticos observados en pares de datos tomados el mismo día, sugieren que el proceso de calibración podría optimizarse aún más. La diferencia promedio en las mediciones de velocidad radial dentro de pares diarios fue de 1,98 km/s, significativamente menor que la dispersión general. Estos hallazgos no solo proporcionan un modelo orbital detallado de Algol, sino que también demuestran la capacidad del espectrógrafo para obtener mediciones consistentes en rangos espectrales desafiantes como el de Mg II a 448 nm.

## Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a María Gracia Batista, por su colaboración, disposición y tiempo brindado a este proyecto. Adicionalmente extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad de Los Andes, pues el uso de sus instalaciones fue vital para el desarrollo de este proyecto.

## Contribución de los autores

BO: hizo observaciones de la estrella, procesó datos y calculó resultados. Luego redactó el texto o la primera versión o la mayor parte.

JR: Se encargó de la toma de datos, investigación previa acerca de algol, procesaron datos y calcularon resultados. posteriormente, adaptó a formato de la revista en LATEX, adicionalmente, programó el código de modelado de resultados, y traducción de primer borrador del documento.

AC: Se encargó de la toma de datos, investigación previa acerca de algol, procesaron datos y calcularon resultados. posteriormente, adaptó a formato de la revista en LATEX, y traducción de primer borrador del documento.

## Conflicto de intereses

Ninguno de los autores presenta algún conflicto de interés.

