

# Primeros resultados del estudio observacional de estrellas masivas y centrales en cúmulos abiertos

A.D. Alejo<sup>1,2</sup>, J.F. González<sup>1,2</sup> & S.P. González<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNSJ, Argentina*

<sup>2</sup> *Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio, CONICET-UNSJ, Argentina*

Received: 09 February 2024 / Accepted: 24 May 2024

©The Authors 2024

**Resumen** / Los modelos teóricos muestran que las estrellas binarias y múltiples juegan un papel importante en la energética de los cúmulos estelares y por lo tanto en su evolución dinámica, en particular en cúmulos pobres dominados por una estrella masiva central. En este trabajo presentamos los resultados de un análisis espectroscópico, astrométrico y fotométrico de cuatro cúmulos abiertos jóvenes (UPK 617, Markarian 38, Alessi 19 y UPK 38), que son parte de una muestra seleccionada de 43 cúmulos que poseen una o pocas estrellas centrales que son al menos una magnitud más brillantes que el resto de los miembros. Medimos velocidades radiales de las estrellas brillantes en espectros obtenidos en el Complejo Astronómico El Leoncito y analizamos la variabilidad fotométrica con datos de *TESS*. A partir de datos astrométricos y fotométricos de *Gaia* DR3 realizamos un análisis de membresía a los cúmulos, estimamos sus masas y edades. En los dos cúmulos más jóvenes encontramos que las estrellas centrales brillantes son sistemas binarios masivos. Específicamente la estrella HD 173003 de UPK 38, es una binaria de líneas dobles de 7.9 d de período, mientras que la estrella HD 167287 en el cúmulo Markarian 38 es una binaria de 12.1 d de período con una primaria supergigante azul. Por su parte, el cúmulo Alessi 19 tiene dos estrellas más masivas que el resto de los miembros, una de las cuales posee líneas anchas y la otra presenta una probable variabilidad en velocidad radial. Finalmente en UPK 617, el cúmulo más viejo analizado, la estrella central (HD 139165) posee una alta rotación y es una pulsante lenta de tipo espectral B. Estas estrellas masivas podrían jugar un rol destacado en la evolución dinámica de los cúmulos, particularmente cuando se trata de agregados pobres, como es el caso de UPK 38, donde la binaria central contiene cerca del 40% de la masa total del cúmulo.

**Abstract** / Theoretical models show that binary and multiple stars play an important role in the energetics of open clusters and therefore in their dynamical evolution, particularly in poor clusters dominated by one or a few central massive stars. In this work we present the results of our spectroscopic, astrometric and photometric analysis of four young open clusters (UPK 617, Markarian 38, Alessi 19 and UPK 38), that are part of a selected sample of 43 clusters that have one or a few central stars that are at least one magnitude brighter than the rest of the members. We measure radial velocities of bright stars in spectra obtained at the Complejo Astronómico El Leoncito and we analyze photometric variability with data from *TESS*. Using astrometric and photometric data from *Gaia* DR3 we perform a membership analysis of the clusters, estimating their masses and ages. In the two youngest clusters we find that the bright central stars are massive binary systems. Specifically, the star HD 173003 in UPK 38 is a double-line binary with a period of 7.9 d, while star HD 167287 in the cluster Markarian 38 is a binary with a period of 12.1 d with a blue supergiant primary. The cluster Alessi 19 has two stars that are more massive than the rest of the members, one of which has broad spectral lines and the other presents a probable variability in radial velocity. Finally, UPK 617 is the oldest cluster analyzed whose central star (HD 139165) has a high rotation and is a slow pulsating B-type star. These massive stars could play a prominent role in the dynamical evolution of clusters, particularly in the case of poor aggregates like UPK 38, whose central binary contains about 40% of the total mass of the cluster.

**Keywords** / open clusters and associations: general — methods: data analysis — surveys

## 1. Introducción

Los cúmulos abiertos son considerados como laboratorios naturales para estudiar la evolución de una población estelar acotada. Sin embargo, el abordaje integral del problema es complejo porque la evolución estelar, la dinámica global del cúmulo y actividad binaria (formación y ruptura de sistemas) son procesos que se influyen mutuamente y que se desarrollan en escalas temporales comparables. Particularmente la población de estrellas binarias y múltiples juega un papel crucial en la

energética de los cúmulos. Los modelos numéricos muestran que la interacción dinámica de éstos objetos ocasiona continuamente la formación y rompimiento de sistemas múltiples (Portegies Zwart et al., 2001, 2004). Leigh & Geller (2012, 2013) destacan el papel de las triples y otras múltiples de alto orden, ya que poseen secciones eficaces mucho mayores y por lo tanto tienen más chances de interactuar dinámicamente en el cúmulo. Por otro lado, el estrechamiento (endurecimiento) de las órbitas binarias libera energía que “calienta” dinámicamente el

cúmulo. En las simulaciones de cúmulos suficientemente masivos (población inicial de algunos miles de miembros) se ha encontrado que se podrían formar objetos mucho más masivos que las demás estrellas a través de sucesivos eventos de fusiones colisionales (Moeckel & Clarke, 2011; Oh & Kroupa, 2018; Reinoso et al., 2022). Estos procesos dinámicos son relativamente rápidos. Oh & Kroupa (2018) estiman que en el 50% de los casos se alcanzan objetos centrales con más de  $50 M_{\odot}$  en los primeros 5 millones de años. Existe cierto número de cúmulos abiertos jóvenes con pocos miembros que parecen dominados por una estrella luminosa central que se ubica en los diagramas color–magnitud en por lo menos una magnitud por encima de las demás estrellas de secuencia principal, en una posición frecuentemente irreconciliable con la isócrona del cúmulo.

El presente estudio se enmarca dentro de un proyecto más amplio que incluye el análisis de la dinámica de 43 cúmulos abiertos jóvenes que poseen una estrella central significativamente más brillante que el resto de los miembros del grupo. Particularmente nuestro objetivo es hacer un aporte al conocimiento empírico del papel de las estrellas binarias, múltiples y masivas en la evolución dinámica y la eventual desintegración de los cúmulos, mediante un estudio observacional utilizando espectroscopía propia obtenida en CASLEO y la fotometría disponible en la base de datos *TESS* (Ricker et al., 2015).

## 2. Análisis

### 2.1. Membresía y cálculo de masa

En este trabajo presentamos los primeros resultados obtenidos de las estrellas centrales de los cúmulos UPK 617, Markarian 38 (desde ahora Mrk 38), Alessi 19 y UPK 38. Como primer paso realizamos un estudio de membresía utilizando SCLUDAM\* (*Star CLUster Detection And Membership estimation*) (González, 2022), una librería de Python que permite obtener datos de los catálogos de *Gaia* (*Gaia* Collaboration et al., 2023), localizar cúmulos mediante la detección de picos de densidad en histogramas multidimensionales y calcular probabilidades de pertenencia. SCLUDAM utiliza HDBSCAN (*Hierarchical density based clustering*) y KDE (*Kernel Density Estimation*) con ancho de banda variable, incorporando los errores y correlaciones provistas por los catálogos.

Una vez realizado el estudio de membresía, calculamos los parámetros medios del cúmulo como el promedio de los valores de las estrellas pesadas por su probabilidad de pertenencia. En el cálculo de la velocidad radial media del cúmulo ( $v_C$ ) utilizamos las probabilidades de pertenencia y el error de la medición de *Gaia*. Posteriormente ajustamos una isócrona de los modelos PARSEC (Nguyen et al., 2022) al diagrama color – magnitud para obtener la edad de cada uno de los cúmulos. Finalmente, a cada estrella se le asignó la masa correspondiente al punto más cercano de la isócrona en el diagrama color–magnitud (masa fotométrica). En estos cálculos tuvimos

en cuenta los errores de la magnitud G y del color (BP–RP).

### 2.2. Variabilidad

Analizamos la variabilidad fotométrica y espectroscópica de las estrellas más brillantes de los cúmulos utilizando espectroscopía y fotometría. Las observaciones espectroscópicas se obtuvieron con el espectrógrafo REOSC del CASLEO en modo dispersión cruzada, de poder resolvente  $R=14000$ , en varios turnos de observación entre los años 2022 y 2023.

A partir de una primera inspección visual de los espectros analizamos la variabilidad de la morfología de las líneas y determinamos el tipo espectral. De acuerdo al tipo seleccionamos un espectro sintético de referencia (*template*) adecuado para medir las velocidades radiales utilizando la tarea FXCOR del paquete *Iraf*. En las estrellas en que las mediciones de velocidad radial sugerían variabilidad, aplicamos la tarea PDM del paquete ASTUTIL para identificar el período. En el caso de las binarias de líneas espectrales dobles, realizamos la separación espectral de las componentes utilizando el código de *disentangling* de González & Levato (2006). Cuando fue posible determinar el período, ajustamos una órbita kepleriana por cuadrados mínimos para calcular los parámetros orbitales.

Para estudiar la variabilidad fotométrica de las estrellas más brillantes, descargamos de la base de datos de *TESS* las imágenes disponibles y aplicamos fotometría con la herramienta LightKurve (*Lightkurve Collaboration et al., 2018*). Solamente encontramos datos para la estrella HD 139165 en el cúmulo UPK 617 (ver Sec. 3.4).

## 3. Resultados

### 3.1. UPK 38

UPK 38 aparece dominado por la estrella HD 173003, la cual es 2 mag más brillante que las demás estrellas del cúmulo. A partir de nuestro análisis de pertenencia y del ajuste de la isócrona obtuvimos la edad y los parámetros listados en la Tabla 1).

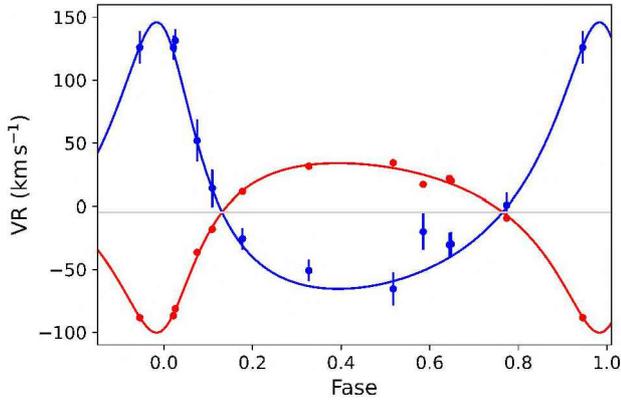
Si bien los parámetros astrométricos de HD 173003 ( $H = 1.25 \pm 0.09$  msa,  $\mu_{\alpha}^* = -2.31 \pm 0.10$  msa año<sup>-1</sup>,  $\mu_{\delta} = -6.32 \pm 0.09$  msa año<sup>-1</sup>) difieren apreciablemente de los del cúmulo, si se considera el parámetro de exceso del ruido (*Excess noise of the source*) consignado en *Gaia* (0.67 msa), las diferencias son comparables a las incertezas.

Por otro lado, los espectros mostraron que HD 173003 es una binaria espectroscópica de doble línea. Realizamos una separación espectral que nos permitió hallar que las componentes poseen morfologías espectrales similares correspondientes a un tipo espectral B1–B2V. Para la clasificación espectral utilizamos los criterios de Gray & Corbally (2009). El mejor ajuste de las curvas de velocidad radial (Fig. 1) arroja una razón de masas  $q = 0.6$  ( $M_1 \sin^3 i = 1.86 M_{\odot}$ ,  $M_2 \sin^3 i = 1.18 M_{\odot}$ ) y un período de 7.889 d, aunque se trata de una órbita preliminar ya que las observaciones actuales no permiten identificar inequívocamente el período.

\*<https://github.com/simonpedrogonzalez/scludam>.

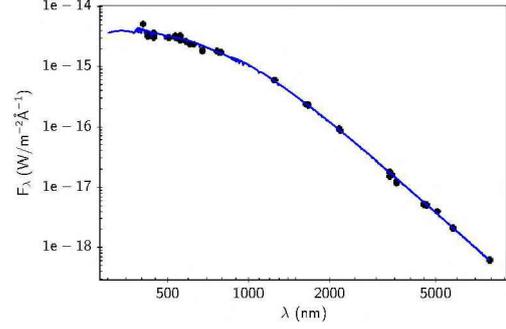
**Tabla 1.** Parámetros obtenidos para los cúmulos a partir del análisis de pertenencia y del ajuste de la isócrona. Para cada cúmulo se lista el número de estrellas, paralaje, movimientos propios, velocidad radial media del cúmulo, el logaritmo de la edad medida en millones de años, enrojecimiento y masa fotométrica.

	UPK 38	Mrk 38	Alessi 19	UPK 617
N	17	170	85	57
$\Pi$ (msa)	1.69 $\pm 0.16$	0.56 $\pm 0.01$	1.70 $\pm 0.08$	1.37 $\pm 0.09$
$\mu_{\alpha}^*$ (msa año $^{-1}$ )	-1.88 $\pm 0.12$	+5.57 $\pm 0.03$	-1.4 $\pm 0.04$	-4.58 $\pm 0.04$
$\mu_{\delta}$ (msa año $^{-1}$ )	-5.29 $\pm 0.51$	-2.30 $\pm 0.05$	-7.13 $\pm 0.32$	-5.29 $\pm 0.35$
$v_C$ (km s $^{-1}$ )	-13.7 $\pm 2.5$ (9)	—	-7.7 $\pm 2.6$ (36)	-36.1 $\pm 4.4$ (33)
$\log(\tau)$	6.98 $\pm 0.06$	7.41 $\pm 0.12$	7.63 $\pm 0.07$	7.97 $\pm 0.18$
E(BP-RP) (mag)	1.09 $\pm 0.13$	0.41 $\pm 0.03$	0.19 $\pm 0.03$	0.18 $\pm 0.02$
$M_{\text{fot}}$ ( $M_{\odot}$ )	40 $\pm 6$	248 $\pm 19$	74 $\pm 9$	60 $\pm 5$

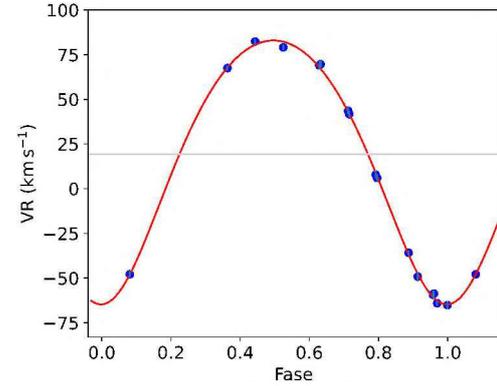


**Fig. 1.** Curva de velocidad radial de HD 173003. La línea gris corresponde a la velocidad del centro de masas.

Como un criterio adicional de pertenencia analizamos la distribución de energía espectral (SED) de HD 173003 comparando la fotometría disponible con los espectros sintéticos de Coelho (2014) (Fig.2). Encontramos consistencia con la distancia y el enrojecimiento del cúmulo si se asume que la binaria está compuesta por una primaria de  $T_{\text{ef}} = 25000$  K y  $R = 6.3 R_{\odot}$ , y una secundaria de  $T_{\text{ef}} = 19000$  K y  $R = 3 R_{\odot}$ , parámetros que son consistentes con el tipo espectral y la razón de masas espectroscópica.



**Fig. 2.** Distribución espectral de energía (SED) de HD 173003.



**Fig. 3.** Curva de velocidad radial de HD 167287. La línea gris corresponde a la velocidad del centro de masas.

**Tabla 2.** Parámetros orbitales de HD 167287.

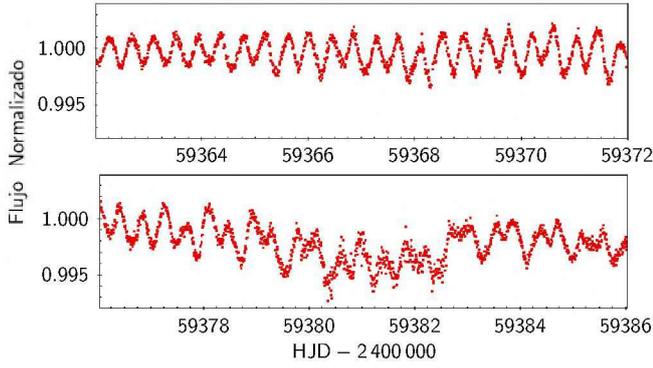
Parámetro	HD 167287
$T_0$ (HJD)	2460001.607 $\pm$ 0.038
$V_{\gamma}$ (km s $^{-1}$ )	19.44 $\pm$ 0.75
$K_1$ (km s $^{-1}$ )	73.83 $\pm$ 0.72
$\omega$ ( $^{\circ}$ )	3.159 $\pm$ 0.072
$e$	0.140 $\pm$ 0.013
$P$ (d)	12.1272 $\pm$ 0.0016

### 3.2. Markarian 38

Este cúmulo está formado por un compacto grupo de estrellas alrededor de HD 167287 en una región de alta densidad estelar. La estrella central es una binaria de líneas simples con un período de 12.13 d y una velocidad del centro de masa de 19.4 km s $^{-1}$  (Fig 3 y Tabla 2). Analizando los espectros hallamos que posee un tipo espectral B1Ia. Del ajuste de isócronas al diagrama color–magnitud encontramos que HD 167287 se encuentra en una posición consistente con una masa fotométrica de  $9.9 \pm 0.6 M_{\odot}$ .

### 3.3. Alessi 19

Alessi 19 posee dos estrellas brillantes de tipo espectral B temprano. Para la estrella central, denominada HD 168431, determinamos una masa fotométrica de  $6.1 \pm 0.3 M_{\odot}$ . Hacia el sur del cúmulo, se halla HD 168131



**Fig. 4.** Curva de luz de *TESS* de HD 139165. La variación de la forma de la curva sugiere la presencia de varias frecuencias simultáneas, siendo la principal frecuencia  $2.40 \text{ d}^{-1}$ .

con una masa de  $6.2 \pm 0.2 M_{\odot}$ . Los espectros de la estrella central presentan líneas anchas (estimamos  $v \text{ sen } i \approx 300 \text{ km s}^{-1}$ ) y variación en la posición y morfología de las líneas espectrales. Sin embargo, con los datos actuales no es posible asegurar que sea la binaridad la causa de esas variaciones por lo que se planea continuar el monitoreo espectroscópico con una mayor relación señal-ruido. Las velocidades radiales medias de las estrellas HD 168131 y HD 168431 son  $-8.5 \pm 5.3 \text{ km s}^{-1}$  y  $-11.8 \pm 0.7 \text{ km s}^{-1}$  respectivamente, las cuales son consistentes con la obtenida para el cúmulo (Tabla 1).

### 3.4. UPK617

La edad que obtuvimos para UPK 617 es la mayor de todos los cúmulos analizados en este trabajo (Tabla 1). La estrella HD 139165 se encuentra en el centro del grupo y posee un movimiento propio algo diferente al obtenido para el cúmulo ( $H = 1.40 \pm 0.03 \text{ msa}$ ,  $\mu_{\alpha}^* = -3.01 \pm 0.03 \text{ msa año}^{-1}$ ,  $\mu_{\delta} = -4.99 \pm 0.03 \text{ msa año}^{-1}$ ), por lo que se obtuvo una baja probabilidad de pertenencia, aún cuando el resto de los parámetros son consistentes con los del cúmulo. Al igual que en otras estrellas, HD 139165 posee un exceso de ruido astrométrico apreciable ( $0.21 \text{ msa}$ ), por lo que no la podemos descartar como probable miembro del cúmulo. La masa fotométrica que hallamos para esta estrella fue de  $4.0 \pm 0.3 M_{\odot}$ . Por otro lado, analizando la fotometría de *TESS* hallamos que es una pulsante lenta de tipo espectral B con una amplitud de  $1.5 \times 10^{-3} \text{ mag}$  y un período de  $0.416 \text{ d}$  (ver Fig.4).

## 4. Discusión

En los cúmulos estudiados en este trabajo, confirmamos que las estrellas centrales brillantes son los objetos más masivos de los cúmulos, siendo múltiples en dos de los cuatro casos analizados. Una de las estrellas para las que no obtuvimos indicios de variabilidad es HD 168131 en Alessi 19. Sin embargo, su alta rotación conspira contra la detección de variaciones moderadas de velocidad radial y no es posible analizar variaciones fotométricas de

baja amplitud ya que no dispone de datos fotométricos *TESS*.

La binaria HD 173003 es un objeto masivo que estaría jugando un rol crucial en la dinámica del cúmulo UPK 38 ya que representa al menos dos quintos la masa total del cúmulo y es unas 5 veces más masiva que el segundo objeto más masivo, lo que la convierte en una estrella muy interesante para nuestro objetivo.

Por otro lado la binaria ubicada en el centro de coordenadas de Mrk 38, posee una componente primaria masiva evolucionada. Estimamos que incluyendo ambas componentes el sistema tiene unas 16 a  $20 M_{\odot}$ , lo que representa un 8 % aproximadamente la masa del cúmulo.

La suma de las masas de las estrellas más masivas de Alessi 19, representan el 17 % aproximadamente de la masa total del cúmulo. Finalmente la estrella HD 139165 representa un 7 % la masa de UPK 617 y es el doble de las dos estrellas que le siguen en masa.

Como trabajo a futuro planeamos completar la caracterización de las estrellas centrales en la muestra total de cúmulos y analizar su relación con los parámetros estructurales y dinámicos de los cúmulos (escalas de tiempo, radio de marea, radio que contiene la mitad de la masa, existencia de segregación de masas).

*Agradecimientos:* Este trabajo está basado en datos obtenidos en el Complejo Astronómico El Leoncito, operado bajo convenio entre el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina y las Universidades Nacionales de la Plata, Córdoba y San Juan. Este trabajo ha utilizado datos de la misión *Gaia* de la Agencia Espacial Europea (ESA) (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), procesado por el Consorcio de Análisis y Procesamiento de Datos *Gaia* (DPAC). La financiación para el DPAC ha sido proporcionada por instituciones nacionales, en particular las instituciones que participan en el Acuerdo Multilateral de *Gaia*.

## Referencias

- Coelho P.R.T., 2014, *MNRAS*, 440, 1027  
 Gaia Collaboration, et al., 2023, *A&A*, 674, A1  
 González J.F., Levato H., 2006, *A&A*, 448, 283  
 González P.S., 2022, *Desarrollo de software para el cálculo de probabilidades de pertenencias astrométricas en cúmulos estelares*, Trabajo Final de Licenciatura, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan.  
 Gray R.O., Corbally Christopher J., 2009, *Stellar Spectral Classification*  
 Leigh N., Geller A.M., 2012, *MNRAS*, 425, 2369  
 Leigh N.W.C., Geller A.M., 2013, *MNRAS*, 432, 2474  
 Lightkurve Collaboration, et al., 2018, *Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python*, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1812.013  
 Moeckel N., Clarke C.J., 2011, *MNRAS*, 415, 1179  
 Nguyen C.T., et al., 2022, *A&A*, 665, A126  
 Oh S., Kroupa P., 2018, *MNRAS*, 481, 153  
 Portegies Zwart S.F., et al., 2001, *MNRAS*, 321, 199  
 Portegies Zwart S.F., et al., 2004, *MNRAS*, 351, 473  
 Reinoso B., et al., 2022, *MNRAS*, 509, 3724  
 Ricker G.R., et al., 2015, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1, 014003