

Parámetros fundamentales de cúmulos estelares poco estudiados de la Nube Mayor de Magallanes derivados a partir de sus espectros integrados

C.M. Rodríguez-Buss^{1,2}, M.I. Tapia-Reina^{1,2,3}, A.V. Ahumada^{2,3} & L.R. Vega-Neme^{2,4}

¹ *Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC, Argentina*

² *Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina.*

³ *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.*

⁴ *Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina.*

Received: 09 February 2024 / Accepted: 02 August 2024

©The Authors 2024

Resumen / Se presentan los primeros datos espectroscópicos obtenidos en el Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO, Argentina) de dos cúmulos estelares (CEs) poco estudiados ubicados en la Nube Mayor de Magallanes (NMM). De esta forma, se obtienen edades y metalicidades de los CEs SL 802 y SL 888 a partir de sus espectros integrados aplicando la técnica de síntesis espectral. Se encuentra que son CEs de edad intermedia con valores de metalicidad típicos de la NMM.

Abstract / We present the first spectroscopic data obtained at Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO, Argentina) for two poorly studied star clusters (SCs) located in the Large Magellanic Cloud (LMC). In this way, ages and metallicities of the SCs SL 802 and SL 888 were obtained from their integrated spectra by applying the spectral synthesis technique. They turned out to be intermediate-age SCs with metallicity values typical of the LMC.

Keywords / galaxies: individual (LMC) — galaxies: star clusters: general — techniques: spectroscopic

1. Introducción

Para obtener una mejor comprensión de la evolución estelar y las propiedades significativas de las galaxias, es esencial estudiar sus cúmulos estelares (CEs). Según la definición tradicional, son grupos de estrellas que se mantienen unidas por su propia gravedad, todas ellas con la misma edad, distancia y composición química (Cantat-Gaudin, 2022). Una de las maneras de estudiar CEs es a través de la espectroscopía integrada. Esta técnica implica la síntesis de poblaciones estelares, lo que permite analizar poblaciones estelares compuestas utilizando un conjunto de patrones estándares y una matriz de propiedades espectrales integradas, parametrizadas según la edad y la metalicidad. A partir de esto, se puede obtener información crucial, como la edad, el enrojecimiento y la metalicidad de CEs (Ahumada et al., 2019). En este trabajo se estudian CEs de la Nube Mayor de Magallanes (NMM) mediante la técnica mencionada, siendo estos resultados espectroscópicos los primeros en su tipo.

2. Observación y reducción de datos

Se observaron dos CEs de la NMM, cuyas principales denominaciones y coordenadas ecuatoriales (J2000.0) son SL 888 (NGC 2241) ($\alpha_{2000} = 06^{\text{h}} 22^{\text{m}} 53.0^{\text{s}}$; $\delta_{2000} = -68^{\circ} 55' 30''$) y SL 802 ($\alpha_{2000} = 05^{\text{h}} 57^{\text{m}} 25.0^{\text{s}}$; $\delta_{2000} = -75^{\circ} 08' 24''$). Las observaciones espectroscópicas tu-

vieron lugar en el Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) en San Juan, Argentina. Se utilizó el telescopio “Jorge Sahade” de 2.15 m durante un turno de observación en enero de 2018. Se empleó una cámara CCD acoplada al espectrógrafo REOSC en modo dispersión simple. Se configuró la rendija de 400 μm , con una apertura de 5" y una longitud de 2.25', en la dirección este-oeste. Las observaciones se realizaron desplazando la rendija a lo largo de los objetos en dirección norte-sur para obtener así una adecuada muestra de las estrellas del cúmulo. Se utilizó una red de 300 líneas/mm que produjo una dispersión promedio en la región observada de 3.4 Å/píxel y una región espectral útil de (3800–7250) Å. En la Fig. 1 se presenta al CE SL 802, en tanto que en la Fig. 2 se puede ver a SL 888, junto a una representación de la ranura utilizada.

La reducción de los datos para obtener los espectros finales, se llevó a cabo con PYRAF, que permite ejecutar IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*) en un entorno de Python, siguiendo procedimientos estándar (Tapia-Reina, 2023). Luego de examinar los espectros finales, se decidió acotar el rango espectral útil a (4000–6850) Å debido, por un lado, a la escasa señal en las longitudes de onda más bajas ($S/N \sim 6$), y por el otro, a la ausencia de información relevante que podría existir en las longitudes de onda mayores.

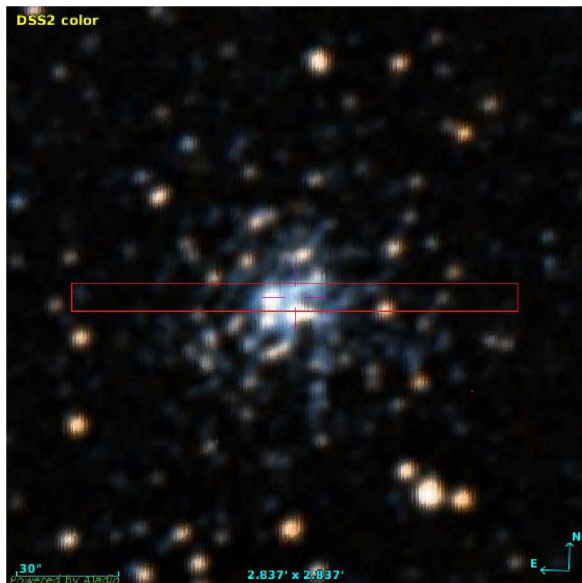


Fig. 1. CE SL 802. La imagen fue creada con ©Aladin en color DSS2. El norte está hacia arriba y el este está hacia la izquierda. Además, se representa la disposición de la ranura $\sim 2.25' \times 5''$ en rojo.

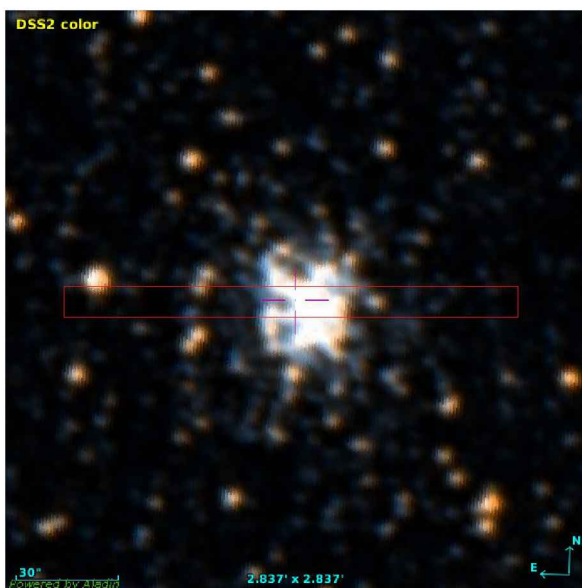


Fig. 2. Ídem que Fig. 1, pero para SL 888.

3. Determinación de parámetros

Se obtuvieron edades y metalicidades mediante modelos de síntesis evolutiva para poblaciones estelares simples (SSPs, por sus siglas en inglés) utilizando el código STARLIGHT de ajuste de espectro completo (Cid Fernandes et al., 2005), que incorpora un conjunto de modelos de SSPs de diferentes edades y metalicidades. Las SSPs se combinan linealmente en diferentes proporciones para obtener el espectro del modelo resultante (M_λ) que mejor se ajusta al espectro integrado observado (O_λ). Los ajustes se realizaron minimizando:

$$\chi^2 = \frac{\sum_\lambda [O_\lambda - M_\lambda]^2}{O_\lambda^2} w_\lambda^2, \quad (1)$$

donde w_λ es una función de peso. Esta minimización proporciona la mejor combinación de SSPs en el espacio de parámetros edad y metalicidad. STARLIGHT realiza la síntesis espectroscópica a partir de una base espectral de más de 300 SSPs obtenidas de los modelos de (Bruzual & Charlot, 2003) (versión actualizada), construidos mediante las librerías MILES + Martins (Sánchez-Blázquez et al., 2006; Martins et al., 2005). Para los propósitos de este estudio, se seleccionaron sólo 69 SSPs con edades entre 1×10^6 años y la edad del Universo ($13\,000 \times 10^6$ años) y tres abundancias químicas diferentes: la típica de la NMM ($Z = 0.008$) y sus dos más cercanas ($Z = 0.019$ y 0.004) (Simondi-Romero et al., 2023). Vale destacar que para los valores finales promediados, se tuvieron en cuenta sólo aquellas SSPs cuyas contribuciones superaron el 5 %.

La Tabla 1 muestra los diferentes porcentajes de las SSPs utilizadas (vectores población) y los valores medios de edad y de metalicidad (Z), que corresponden a la edad y Z pesadas por la contribución de cada SSP. De esta manera, SL 888 presentaría una edad $\log(t) = 9.66$ y una $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.16$, en tanto que SL 802 haría lo propio con $\log(t) = 9.05$ y $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.28$. Los valores promedios se indican de esta forma, ya que González Delgado & Cid Fernandes (2010) señalaron su precisión: $\sigma(\log t) = 0.1-0.2$ y $\sigma[\text{Fe}/\text{H}] = 0.3-0.4$. Las Figs. 3 y 4 presentan los espectros sintetizados de SL 802 y SL 888. El factor de normalización de los espectros observados fue un parámetro libre, en tanto que las SSPs fueron normalizadas a la unidad en $\lambda = 4020 \text{ \AA}$ (Cid Fernandes & González Delgado, 2010). El flujo residual, determinado como la resta entre el espectro integrado observado en una dada longitud de onda y el espectro sintetizado en la misma longitud de onda, es evidencia del buen ajuste obtenido.

4. Discusión y trabajo futuro

Los CEs estudiados presentan investigaciones previas basadas en métodos fotométricos. SL 802, también conocido como IC 2161, es un CE de tipo SWB V (Searle et al., 1980), lo que corresponde a un rango de edad de $(0.8 - 2.0) \times 10^9$ años según Bica et al. (1996). Este valor de edad concuerda con el promedio obtenido aquí ($\sim 1.1 \times 10^9$ años). Por otro lado, SL 888, también conocido como NGC 2241, es de tipo SWB VI (Searle et al., 1980), lo que corresponde a un rango de edad de $(2.0 - 5.0) \times 10^9$ años (Bica et al., 1996). Este CE también cuenta con trabajos previos, aunque más detallados. Uno de Jones (1987), quien obtuvo una edad entre 3 y 4×10^9 años ajustando isócronas en los respectivos diagramas color-magnitud, y otro de Geisler et al. (1997) quienes estimaron una edad de 1.9×10^9 años basándose en la diferencia de magnitud T1 entre la rama gigante y el punto de desvío. Es decir que ambos trabajos señalan a SL 888 como un CE de genuina edad intermedia, tal como el promedio encontrado acá ($\sim 4.6 \times 10^9$ años).

Al analizar los porcentajes de las SSPs utilizadas

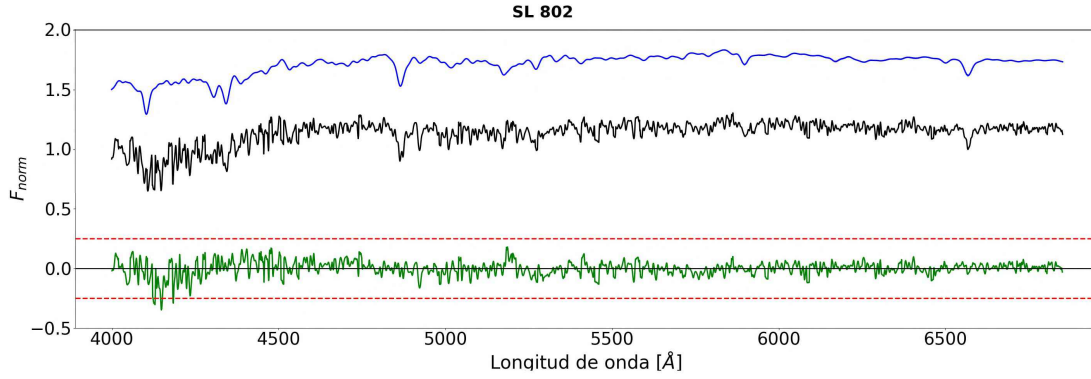


Fig. 3. Ajuste de SL 802 realizado con STARLIGHT. El espectro integrado observado aparece en negro, el sintetizado en azul y el flujo residual en color verde. Se han añadido constantes en el eje vertical a los efectos de una mejor visualización. Las líneas rojas a trazos (-0.25;0.25) señalan la dispersión del flujo residual.

Tabla 1. Parámetros determinados para cada CE y sus vectores población.

| Cúmulo | Edad Promedio (x 10 ⁶ años) | Z Promedio | % | SSP Edad (x 10 ⁶ años) | SSP Z |
|--------|---|------------|----|--------------------------------------|-------|
| SL 888 | 4622 | 0.013 | 11 | 10000 | 0.004 |
| | | | 16 | 13000 | 0.004 |
| | | | 13 | 10000 | 0.008 |
| | | | 28 | 8.7 | 0.019 |
| | | | 11 | 1.0 | 0.019 |
| | | | 6 | 2.5 | 0.019 |
| | | | 6 | 2.9 | 0.019 |
| SL 802 | 1113 | 0.010 | 70 | 1278.1 | 0.008 |
| | | | 14 | 286.1 | 0.019 |

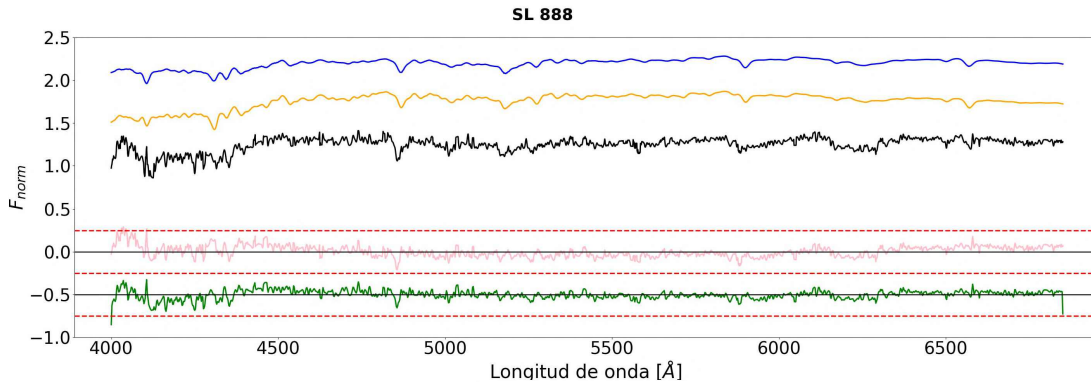


Fig. 4. Ajuste de SL 888 realizado con STARLIGHT, Ídem Fig. 3. También se grafica en amarillo una única población de 4.25×10^9 años y su respectivo flujo residual en rosa. Las líneas rojas a trazos (-0.25;0.25 y -0.25;-0.75) señalan la dispersión del flujo residual de ambos ajustes.

en ambas síntesis espectrales, se encuentra que para el CE SL 802 sólo se utilizaron dos SSPs, siendo el aporte de una de ellas del 70 % y que corresponde a una población de edad intermedia (1.3×10^9 años). Por otro lado, para la síntesis espectral de SL 888 se emplearon ocho SSPs diferentes correspondientes a dos grupos de edades bien marcados, un 40 % correspondiente a poblaciones genuinamente viejas ($10 - 13 \times 10^9$ años), y el porcentaje restante a poblaciones muy jóvenes ($1 - 9 \times 10^6$ años). Estos diferentes porcentajes se podrían deber

a una variedad de efectos, tal como las edades y metalicidades limitadas de las SSPs utilizadas, la contaminación de estrellas no miembros y la baja señal espectral, entre otros. Sin embargo se debe notar la posibilidad de que los vectores población respondan efectivamente a poblaciones múltiples (MPs, por sus siglas en inglés) reales (Ahumada et al., 2019).

Con el objetivo de estudiar si la bimodalidad tan marcada encontrada en la síntesis espectral de SL 888 podría corresponder a una MP genuina, se procedió

a sintetizar su espectro integrado aplicando en STARLIGHT una base con una única SSP correspondiente a la edad más cercana al promedio encontrado anteriormente (4.25×10^9 años) y con la metalicidad típica de la NMM ($Z = 0.008$). La Fig. 4 presenta también la mencionada SSP, que, como puede observarse, es similar al espectro sintetizado con la contribución de las diferentes SSPs indicadas en la Tabla 1. Esto también se puede apreciar en la similitud de ambos flujos residuales. Vale destacar que Cid Fernandes & González Delgado (2010) señalan haber encontrado que la síntesis espectral de algunos CEs correspondía a múltiples contribuciones de SSPs divididas en jóvenes y viejas, como si el espectro sintetizado careciera de estrellas azules viejas, y que estos ajustes con múltiple componentes no deberían ser relevantes para los CEs.

Se tiene previsto mejorar la calidad de los espectros integrados obtenidos, y realizar nuevas síntesis espectrales con mayor cantidad y combinaciones de SSPs. De esta manera, se espera mejorar los resultados acá encontrados y poder ahondar respecto al significado de los vectores población, indagando el porqué STARLIGHT necesitó tantas SSPs de valores tan dispares, en lugar de basar la síntesis de SL 888, principalmente, en SSPs de edad intermedia.

Agradecimientos: Agradecemos al referee por sus valiosos aportes que permitieron mejorar notablemente este trabajo. CMRB agradece a la FaMAF y al OAC por el apoyo económico brindado. Los autores agradecen al Comité Organizador Local por hacer posible su participación en la 65° RAAA. Basado en datos obtenidos en el Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO), operado bajo

acuerdo entre el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina y las Universidades Nacionales de La Plata, Córdoba y San Juan. Esta investigación ha hecho uso de la base de datos SIMBAD, operada en el CDS, Estrasburgo, Francia (2000,A&AS,143,9, “La base de datos astronómicos SIMBAD”, Wenger et al.). Esta investigación ha hecho uso del atlas Aladin sky desarrollado en el CDS, Observatorio de Estrasburgo, Francia [2000A&AS..143...33B (Aladin Desktop), 2014ASPC..485..277B (Aladin Lite v2), y 2022ASPC..532....7B (Aladin Lite v3)].

Referencias

- Ahumada A.V., et al., 2019, PASP, 131, 024101
 Bica E., et al., 1996, ApJS, 102, 57
 Bruzual G., Charlot S., 2003, MNRAS, 344, 1000
 Cantat-Gaudin T., 2022, Universe, 8, 111
 Cid Fernandes R., González Delgado R.M., 2010, MNRAS, 403, 780
 Cid Fernandes R., et al., 2005, MNRAS, 358, 363
 Geisler D., et al., 1997, AJ, 114, 1920
 González Delgado R.M., Cid Fernandes R., 2010, MNRAS, 403, 797
 Jones J.H., 1987, AJ, 94, 345
 Martins L.P., et al., 2005, MNRAS, 358, 49
 Sánchez-Blázquez P., et al., 2006, A&A, 457, 809
 Searle L., Wilkinson A., Bagnuolo W.G., 1980, ApJ, 239, 803
 Simondi-Romero F.O., Ahumada A.V., Vega-Neme L.R., 2023, Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía, La Plata, Argentina, 64, 81
 Tapia-Reina M.I., 2023, *Estudio espectroscópico integrado de cúmulos estelares pertenecientes a las Nubes de Magallanes: parámetros astrofísicos y espectros patrones*, FaMAF, UNC, Argentina