

Estudio de cúmulos estelares en la región interna de la Nube Menor de Magallanes

B.J. De Bortoli^{1,2}, M.C. Parisi^{3,4}, L.P. Bassino^{1,2}, B. Días⁵,
G. Gimeno⁶, M.S. Angelo⁷, D. Geisler^{8,9,10}, F. Mauro¹¹

(1) *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

(2) *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET–UNLP, Argentina*

(3) *Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina*

(4) *Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET–UNC, Argentina*

(5) *Instituto de Alta Investigación, Universidad de Tarapacá, Chile*

(6) *Gemini Observatory, EE.UU.*

(7) *Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil*

(8) *Departamento de Astronomía, Universidad de Concepción, Chile*

(9) *Instituto de Investigación Multidisciplinario en Ciencia y Tecnología, Universidad de La Serena, Chile*

(10) *Departamento de Astronomía, Universidad de La Serena, Chile*

(11) *Instituto de Astronomía, Universidad Católica del Norte, Chile*

Resumen. Presentamos resultados preliminares del análisis químico de 6 cúmulos estelares ubicados en la región interna de la Nube Menor de Magallanes. Utilizamos espectros en el infrarrojo cercano obtenidos con el instrumento GMOS de GEMINI-Sur, en la región de las líneas del Triplete del CaII, de estrellas gigantes rojas pertenecientes a dichos cúmulos. Medimos velocidades radiales y anchos equivalentes de las líneas del triplete del CaII, y a partir de éstos determinamos la velocidad radial y la metalicidad medias de cada cúmulo. Sumando esta información a la disponible en la literatura para otros cúmulos con metalicidades del Triplete del CaII, encontramos que la distribución de metalicidades podría ser bimodal en la región interna de la galaxia.

Abstract. We present preliminary results of the chemical analysis of 6 star clusters in the inner region of the Small Magellanic Cloud. We used near infrared spectra in the Calcium Triplet region of red giants in the clusters obtained with the instrument GMOS of GEMINI-South. We measured the radial velocity and the equivalent widths of the three lines from which we determined the clusters mean radial velocity and metallicity. Adding these results to the information available in the literature for star clusters studied with the same technique, we found that the metallicity distribution could be bimodal in the inner region of the galaxy.

1. Introducción

Los gradientes (GM) y distribuciones de metalicidad (DM) de los cúmulos estelares (CE) de una galaxia son herramientas valiosas para analizar su formación y evolución. Para el caso particular de la Nube Menor de Magallanes (NmM), nuestros trabajos previos (Parisi *et al.* 2015, 2016, en adelante P15 y P16, respectivamente) sugieren que los cúmulos en la región interna de la NmM pueden dividirse en dos grupos con metalicidades mayores y menores que la metalicidad media del campo ($[\text{Fe}/\text{H}]$ entre ≈ -1 y ≈ -0.94 dex, e.g. Carrera *et al.* (2008), Dobbie *et al.* (2014) y P16. Por otra parte P16 sugieren que la DM de los cúmulos podría ser bimodal. En este trabajo analizamos, con un número mayor de cúmulos, el GM y la DM en la región interna de la NmM, la cual definimos como la región comprendida dentro de la elipse proyectada (Piatti *et al.* 2005) de 3.4° . La elección de tal distancia, como límite para definir la región interna, se basa en el punto de corte en el perfil de densidad radial de los cúmulos de la NmM encontrado por Dias *et al.* (2021).

2. Observaciones y reducción

Se obtuvieron espectros, en la región del triplete del calcio ionizado (CaT), de 155 estrellas gigantes rojas pertenecientes a 6 cúmulos de la NmM, utilizando el instrumento GMOS (GEMINI-S) en modo espectroscopía multi-objeto. La resolución de dichos espectros resultó de 0.075 nm/pixel. La reducción y normalización al continuo de los espectros se realizó utilizando tareas de IRAF, en particular aquellas dentro del paquete GMOS.

3. Determinación de metalicidades

Los anchos equivalentes (AE) de las tres líneas del CaT y las velocidades radiales (VR) de las estrellas observadas, se midieron en los espectros normalizados al continuo (ver P15 para mayor detalle). Usando estos parámetros y aplicando la técnica del CaT de acuerdo a las prescripciones de Dias & Parisi (2020), calculamos la metalicidad individual de cada estrella. Se seleccionaron como estrellas pertenecientes a los cúmulos, aquellas con distancias al centro del cúmulo menores al radio del mismo y localizadas dentro de los cortes adoptados de metalicidad y VR (ver Figura 1). Dichos cortes fueron tomados de nuestros trabajos previos (e.g. P15, Dias *et al.* 2021). Por último se verificó a partir de movimientos propios obtenidos de *Gaia* (Gaia collaboration 2018), que las estrellas consideradas miembro no se apartaban en sus los valores de movimientos propios del valor promedio del cúmulo. Utilizando las estrellas que resultaron ser miembros de los cúmulos, se calcularon sus VR y metalicidades medias (Tabla 1). La cantidad de estrellas (n) utilizada para calcular el promedio y la distancia proyectada de cada cúmulo al centro de la galaxia (a) se muestran en la segunda y quinta columna de dicha tabla, respectivamente.

4. Análisis

Con el objetivo de analizar las propiedades globales de la NmM con una muestra estadísticamente más significativa, sumamos a nuestros cúmulos los CE estudia-

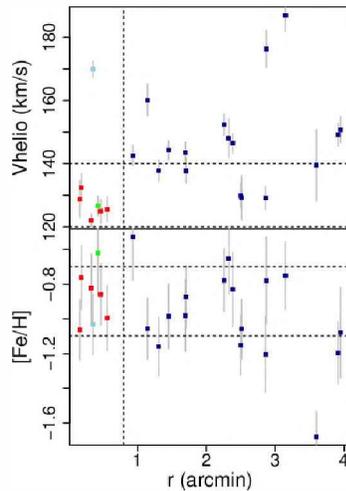


Figura 1: Velocidad radial heliocéntrica y metalicidad en función de la distancia al centro del cúmulo L 91. Las líneas horizontales muestran los cortes adoptados en VR y metalicidad mientras que la línea punteada vertical muestra el radio del cúmulo considerado. Los cuadrados azules, celestes y verdes representan aquellas estrellas descartadas como miembros de los cúmulos por estar fuera del radio y de los cortes en VR y en metalicidad, respectivamente. Los cuadrados rojos son las estrellas consideradas miembros de los cúmulos.

Tabla 1: Valores medios determinados para los cúmulos de la muestra.

Cúmulo	n	VR (kms^{-1})	[Fe/H] (dex)	a °
K 38	13	84.0 ± 0.9	-0.90 ± 0.02	1.4
HW 31	6	125.5 ± 3.4	-0.89 ± 0.04	2.1
HW 41	7	143.6 ± 1.6	-0.67 ± 0.05	1.8
HW 42	5	144.3 ± 2.0	-0.58 ± 0.03	2.6
L 3	7	140.1 ± 3.4	-0.90 ± 0.05	2.9
L 91	5	126.7 ± 1.8	-0.90 ± 0.06	2.6

dos por Da Costa & Hatzidimitriou (1998), Parisi *et al.* (2009), P15, Dias *et al.* (2021), Parisi *et al.* (2022) y Dias *et al.* (2022). Los cúmulos allí estudiados fueron analizados con la misma técnica y mismos procedimientos que en el presente estudio, por lo que disponemos de una muestra de 57 cúmulos con metalicidades homogéneas y comparables entre sí, de los cuales 37 corresponden a la región interna analizada en este trabajo. Las edades de todos los cúmulos de la muestra fueron tomadas de la literatura entonces no son homogéneas.

4.1. Gradiente de metalicidad

Utilizando la muestra extendida de cúmulos de la NmM, analizamos (ver Figura 2) el comportamiento de la metalicidad con la distancia proyectada “ a ” al centro de la galaxia. En este gráfico se observan, de manera más marcada,

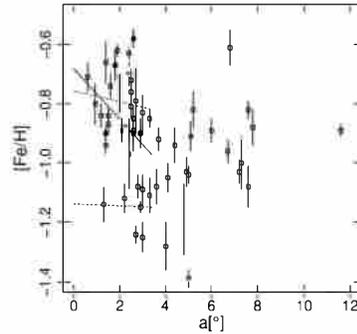


Figura 2: $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de la distancia proyectada al centro de la NmM. Los cuadrados vacíos y llenos corresponden a aquellos obtenidos de la literatura y a los estudiados en este trabajo, respectivamente. Las líneas sólida y de trazos representan los ajustes lineales en la región interna, y para los grupos pobre y rico en metales, respectivamente.

los dos potenciales grupos de cúmulos internos identificados por P16. Definimos como grupos más pobres en metales (GPM) y más ricos en metales (GRM) a los grupos de cúmulos con metalicidades menores y mayores de ≈ -1 , respectivamente. Nuestros ajustes lineales a tales grupos (líneas de trazos en la Figura 2) dan como resultado pendientes de $(-0.003 \pm 0.042) \text{ dex}/^\circ$ y $(-0.02 \pm 0.03) \text{ dex}/^\circ$, para el GPM y GRM. Para el caso de la muestra interna completa obtenemos un valor de la pendiente de $-0.09 \pm 0.04 \text{ dex}/^\circ$ (líneas sólida en la Figura 2).

4.2. Distribución de metalicidades

En la Figura 3 se observa la DM de los cúmulos internos de la NmM. En esa distribución se corrió el código *Gaussian Mixture Modeling* (GMM, Muratov & Gnedin 2010). El ajuste unimodal de los datos da un valor medio de $\mu = -0.87$ y una dispersión de $\sigma = 0.173$, mientras que el ajuste de dos gaussianas arroja valores $\mu_1 = -0.80$, $\mu_2 = -1.15$, $\sigma_1 = 0.105$, $\sigma_2 = 0.061$ y $p = 0.05$. Esto implica que la probabilidad de descartar la hipótesis nula (unimodalidad) equivocadamente es del 5%, en acuerdo con la probabilidad del 95% dada por el parametric bootstrap de que la distribución sea bimodal. El algoritmo GMM además calcula la separación entre los picos encontrando, en este caso, $D = 4.17 \pm 0.40$ y un valor de kurtosis de -0.6 . Para aceptar que una distribución sea bimodal se requiere $D > 2$ y kurtosis < 0 , por lo tanto los valores obtenidos refuerzan la posibilidad de que la DM interna de la NmM sea efectivamente bimodal. El mismo análisis para la muestra completa de cúmulos arroja una probabilidad de que la muestra sea bimodal del 39%. Las edades medias de los grupos pobres en metales y ricos en metales son $(4.2 \pm 1.1) \times 10^9$ años y $(3.1 \pm 0.6) \times 10^9$ años, respectivamente.

5. Conclusiones

Ninguno de los CE analizados en este trabajo cae en el *gap* en metalicidad, alrededor de la metalicidad media del campo (≈ -1) sugerido por P16 en la

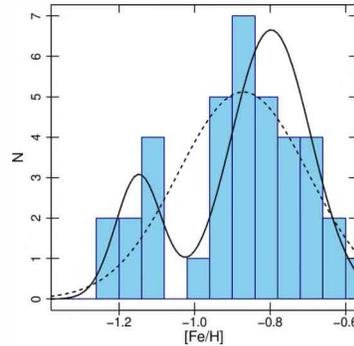


Figura 3: Distribución de metalicidad de los CE de la región interna de la NmM. Las líneas sólida y de trazos representan el ajuste bimodal y unimodal, respectivamente.

región interna de la NmM. El análisis de la DM de una muestra de 57 CE con metalicidades precisas y homogéneas, sugiere una alta probabilidad de que la misma sea bimodal en la región interna de la galaxia. Nuestros resultados parecerían apoyar la idea de la existencia de dos grupos de CE, coexistiendo en la región interna de la galaxia, con metalidades medias de -0.80 y -1.15 , sin una diferencia significativa en la edad media de ambos grupos. Sin embargo, es necesario el estudio de un mayor número de CE para analizar la DM con una muestra estadísticamente más significativa. Por otro lado, disponer de distancias a los cúmulos permitiría evaluar posibles efectos de proyección. Los dos posibles grupos no presentan un GM. La muestra total de CE en la región interna presenta GM, pero con un error del 50 %, debido a la enorme dispersión de metalicidades en esa región.

Agradecimientos. Este trabajo fue financiado por CONICET, la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, la UNLP y la SeCyT de la UNC.

Referencias

- Carrera R., et al., 2008, *AJ*136, 1039
 Da Costa G.S., Hatzidimitriou D., 1998, *AJ*, 115, 1934
 Dias B., Parisi M.C., 2020, *A&A*, 642, A197
 Dias B., et al., 2021, *A&A*, 647, L9
 Dias B., et al., 2022, *MNRAS*, 512, 4334
 Dobbie P.D., et al., 2014, *MNRAS*, 442, 1663
 Gaia Collaboration, et al., 2018, *A&A*, 616, A1
 Muratov A.L., Gnedin O.Y., 2010, *ApJ*, 718, 1266
 Parisi M.C., et al., 2009, *AJ*, 138, 517
 Parisi M.C., et al., 2015, *AJ*, 149, 154
 Parisi M.C., et al., 2016, *AJ*, 152, 58
 Parisi M.C., et al., 2022, *A&A*
 Piatti A.E., et al., 2005, *A&A*, 440, 111