



Estudio de la estructura interna de los cúmulos del Survey VISCACHA

M. J. Rodríguez¹, B. Días², F. S. M. Maia³, C. Feinstein^{1,4}, G. Baume^{1,4}, L. Kerber⁵ & J. F. C. dos Santos Jr.⁶

¹ Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

² Instituto de Alta Investigación, Universidad de Tarapacá, Chile

³ Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

⁴ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

⁵ Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, UESC, Brasil

⁶ Departamento de Física, ICEx - UFMG, Brasil

Contacto / jimenaro@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / El análisis de la estructura interna de los cúmulos estelares nos puede brindar información importante acerca de la formación y evolución dinámica de los mismos. Utilizando los datos del Survey VISCACHA se realizó el estudio de la distribución espacial de estrellas en 83 cúmulos pertenecientes a las periferias de La Nube Menor y de la Nube Mayor de Magallanes. A través de la construcción del *minimum spanning tree*, se pudo caracterizar la estructura interna de cada cúmulo, obteniéndose los parámetros \bar{m} , \bar{s} y Q , los cuales son útiles para distinguir entre distribuciones de puntos radiales, homogéneas o con subestructuras. También se investigó la dependencia de estos parámetros con las distintas características de los cúmulos, como son sus edades y distribución espacial.

Abstract / The analysis of the internal structure of star clusters can provide us important information about their formation and dynamic evolution. Using data from the VISCACHA Survey, we studied the stars spatial distribution in 83 clusters belonging to the peripheries of the Large Magellanic Cloud and the Small Magellanic Cloud. Through the construction of the *minimum spanning tree*, it was possible to characterize the internal structure of each cluster, obtaining the parameters \bar{m} , \bar{s} and Q , which are useful for distinguishing between radial, homogeneous or substructured distributions. The dependence of these parameters with the different characteristics of the clusters, such as their ages and spatial distribution, was also investigated.

Keywords / Magellanic Clouds — galaxies: star clusters: general

1. Introducción

La distribución interna de estrellas en una agrupación estelar cambia a lo largo del tiempo. Los grupos jóvenes presentan en general una estructura en la que se puede observar pequeños subgrupos de estrellas (ej. Elmegreen, 2010; Rodríguez et al., 2020). Esta distribución, conocida como estructura fractal, se piensa que es heredada de los mecanismos turbulentos que tienen lugar en la nube molecular progenitora y que desencadenan la formación estelar (Elmegreen & Scalo, 2004). Simulaciones numéricas y estudios observacionales, sugieren que esta fractalidad se va perdiendo poco a poco con el tiempo, dando paso a una concentración central de estrellas con un perfil de densidad radial (Schmeja & Klessen, 2006; Sánchez & Alfaro, 2009; Parker et al., 2014). La evolución dinámica de una agrupación estelar es un proceso complejo que involucra entre otras cuestiones la energía cinética total del sistema, el potencial gravitatorio de la masa total, la cantidad de gas que es removido del sistema en su etapa inicial y la velocidad a lo que esto sucede, y el ambiente galáctico en el que se encuentran.

Con el fin de comprender mejor las escalas de tiempo en la cual los cúmulos estelares pierden su estructura

fractal inicial y la evolución dinámica de los mismos, hemos estudiado la estructura interna de 83 cúmulos pertenecientes a las Nubes de Magallanes. Para ello utilizamos datos fotométricos de excelente resolución espacial pertenecientes al Survey VISCACHA.

2. Datos

En este trabajo se utilizaron los datos del Data Release I del Survey VISCACHA (Maia et al., 2019; Santos et al., 2020). Los mismos corresponden a 83 cúmulos localizados en las regiones más exteriores de la Nube Mayor y de la Nube Menor de Magallanes (LMC y SMC, respectivamente por sus siglas en inglés). Los datos fueron obtenidos con el telescopio SOAR de 4.1 m más su módulo de óptica adaptativa (SOAR Telescope Adaptive Module, SAM).

Se estudiaron 51 cúmulos en la LMC con distancias entre 4.5 y 6.5 kpc al centro de esta galaxia, y 32 en la SMC con distancias entre 1 y 6.5 kpc al centro de la misma. Los cúmulos estudiados abarcan un amplio rango de edades entre 40 Myr y 5.5 Gyr (Santos et al., 2020).

3. Estructura interna de los cúmulos

3.1. Método

Para estudiar la estructura interna de los cúmulos estelares empleamos el método del minimum spanning tree (MST, ej. Hetem & Gregorio-Hetem, 2019; Rodríguez et al., 2020) El MST de una distribución de puntos, es la red de líneas rectas que conecta todos los puntos de forma tal que la suma total de los segmentos conectados sea mínima y además que no haya bucles cerrados. A partir del MST calculamos dos parámetros, \bar{m} es la longitud media de los segmentos y \bar{s} es la separación media de los puntos, ambas cantidades normalizadas por el tamaño del cúmulo.

Cartwright & Whitworth (2004) introdujeron el parámetro Q como una herramienta para estudiar la distribución de estrellas en un cúmulo. Este parámetro se define como $Q = \bar{m}/\bar{s}$. Valores de $Q \sim 0.8$ corresponden a una distribución uniforme de estrellas, mientras que si $Q < 0.8$ se tiene una distribución fractal, y si $Q > 0.8$ tenemos una distribución radial con una concentración central de estrellas.

3.2. Análisis

Calculamos el valor de Q para todos los cúmulos, tomando en cuenta solo las estrellas del cúmulo con magnitud $v < 22$ y errores en magnitud v e $i < 0.1$. De esta forma minimizamos los errores por contaminación de estrellas no miembros. Repetimos el análisis utilizando distintos valores para el radio del cúmulo: $2R_c$, $2.5R_c$, $3R_c$. Siendo R_c el radio del núcleo del cúmulo derivado en Santos et al. (2020). En la Figura 1 se muestra el histograma de valores de Q obtenidos utilizando un radio de $2.5R_c$, donde vemos que la gran mayoría de cúmulos presenta valores superiores a 0.8, por lo tanto presentan una estructura homogénea o con una concentración central. Por otro lado, encontramos que la diferencia en valores de Q obtenidos con los distintos radios es menor a 0.05 para la gran mayoría de los cúmulos. Por lo tanto, en este trabajo solo presentaremos los resultados obtenidos utilizando un valor de $2.5R_c$, pero se observan las mismas tendencias y similares resultados utilizando $2R_c$ y $3R_c$.

4. Resultados y discusión

En la Fig.2 se muestra el diagrama de \bar{m} vs. \bar{s} , el cual constituye una herramienta típica de este tipo de análisis. En él podemos ver que los cúmulos estudiados siguen el comportamiento predecido por los modelos para cúmulos con una distribución radial de estrellas (Parker et al., 2014). El gradiente de color indica la edad, en aquellos cúmulos para los que se tiene esta cantidad (Santos et al., 2020). Es este gráfico se puede observar una tendencia general en la que a medida que los cúmulos son más viejos parecen ir ubicándose más hacia la izquierda y hacia abajo del diagrama, lo que corresponde en los modelos a cúmulos con una mayor concentración central (Lomax et al., 2018).

Los resultados de la Fig. 2 indican que la distribu-

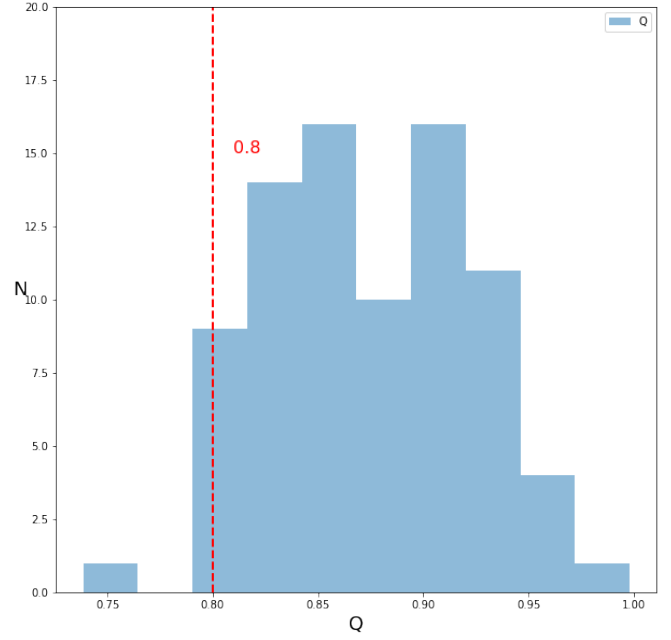


Figura 1: Histograma de los valores de Q obtenidos empleando un radio de $2.5R_c$. La línea roja indica el valor de $Q=0.8$.

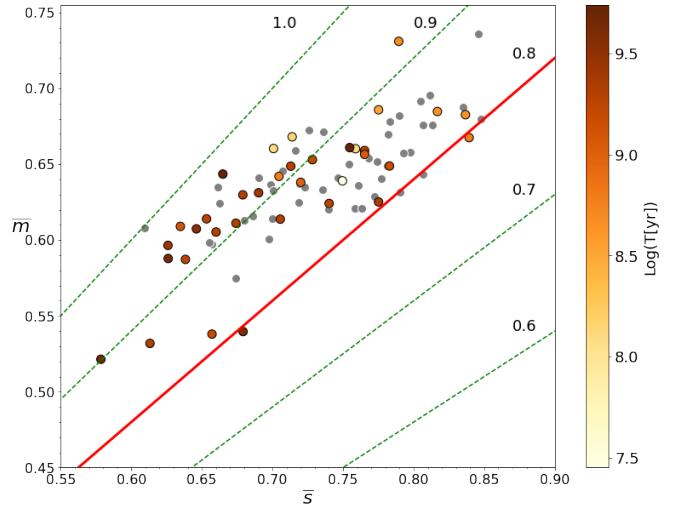


Figura 2: Diagrama \bar{m} vs. \bar{s} . La línea roja indica $Q=0.8$, las líneas verdes punteadas indican otros valores de Q . El gradiente de color representa la edad de los cúmulos.

ción interna de estrellas en un cúmulo parece evolucionar con la edad. Para investigar este comportamiento, en la Fig. 3 presentamos el diagrama de Q vs. $\text{Log}(T/R_t)$, donde R_t es el radio de marea del cúmulo, calculado en Santos et al. (2020). Esta cantidad mide la edad del cúmulo normalizada por el tamaño del mismo, lo cual da una idea del estado dinámico del cúmulo (Sánchez & Alfaro, 2009). Vemos que parece haber una tendencia general positiva entre estas dos cantidades. La línea punteada roja, indica la relación entre ambas cantidades encontrada por Sánchez & Alfaro (2009) para cúmulos de la Vía Láctea, y parece ajustar bien a un conjunto de nuestros cúmulos. Para los cúmulos que no parecen

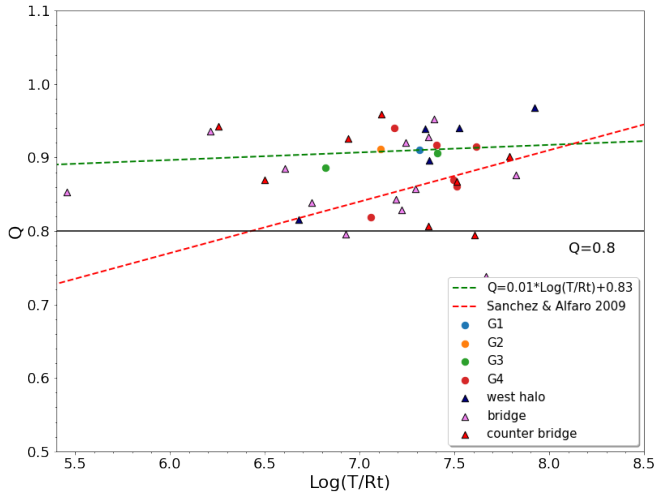


Figura 3: Diagrama de Q vs. $\text{Log}(T/R_t)$. Puntos de distintos símbolos y colores representan cúmulos pertenecientes a distintas regiones (ver Fig. 4). La relación hallada por Sánchez & Alfaro (2009) se muestra con una línea roja punteada. La línea verde indica el ajuste realizado para los cúmulos que no siguen la relación de Sánchez & Alfaro (2009).

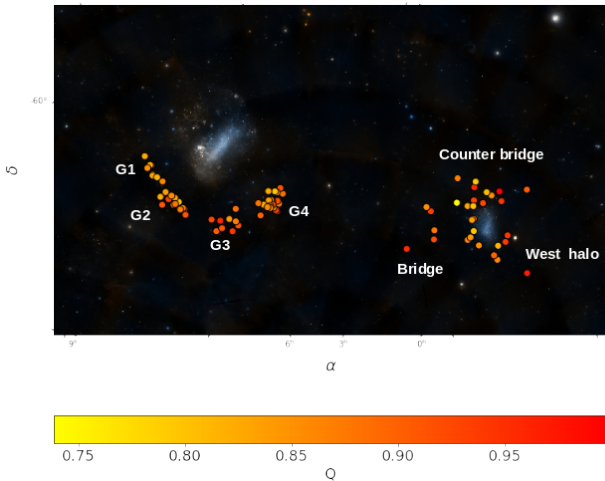


Figura 4: Distribución espacial de los cúmulos estudiados. Se indican los distintos grupos observados en Santos et al. (2020). El gradiente de color indica los valores de Q .

seguir la tendencia de Sánchez & Alfaro (2009), ubicados en la parte superior del diagrama, realizamos un nuevo ajuste que se indica en línea verde. Los cúmulos fueron separados por color y símbolos según la región a

la que pertenecen (ver Fig. 4), siguiendo la distribución espacial utilizada en Santos et al. (2020).

En la Fig 4 se muestra la distribución espacial de los cúmulos estudiados, donde se indicó el valor de Q de cada cúmulo usando un gradiente de color. En esta figura se observa que los cúmulos más alejados del centro de cada nube son los que parecen tener mayores valores de Q .

5. Conclusiones

En este trabajo hemos caracterizado la distribución interna de una muestra relativamente grande de cúmulos estelares en las Nubes de Magallanes abarcando un rango amplio de edad. Destacamos los siguientes puntos como principales conclusiones de nuestro trabajo:

- La mayoría de los cúmulos estudiados tiene una distribución de estrellas homogénea o un perfil de densidad radial con una concentración central.
- Observamos una tendencia general que indica que el valor de Q aumenta con la edad dinámica, cúmulos dinámicamente más evolucionados parecen tener Q mayores, confirmando los resultados de Sánchez & Alfaro (2009) y de varios estudios en base a simulaciones (ej. Parker et al., 2014)
- Observamos que los cúmulos más alejados del centro de cada galaxia presentan en general mayores valores de Q .

Agradecimientos: Trabajo parcialmente financiado por el PIPs 112-201701-00055 de CONICET y el Programa de Incentivos 11/G158 de la UNLP.

Referencias

- Cartwright A., Whitworth A.P., 2004, MNRAS, 348, 589
 Elmegreen B.G., 2010, R. de Grijs, J.R.D. Lépine (Eds.), *Star Clusters: Basic Galactic Building Blocks Throughout Time and Space*, vol. 266, 3–13
 Elmegreen B.G., Scalo J., 2004, ARA&A, 42, 211
 Hetem A., Gregorio-Hetem J., 2019, MNRAS, 490, 2521
 Lomax O., Bates M.L., Whitworth A.P., 2018, MNRAS, 480, 371
 Maia F.F.S., et al., 2019, MNRAS, 484, 5702
 Parker R.J., et al., 2014, MNRAS, 438, 620
 Rodríguez M.J., Baume G., Feinstein C., 2020, A&A, 644, A101
 Sánchez N., Alfaro E.J., 2009, ApJ, 696, 2086
 Santos João F. C. J., et al., 2020, MNRAS, 498, 205
 Schmeja S., Klessen R.S., 2006, A&A, 449, 151