

Vía Láctea: Cúmulos Estelares

Pedro Villegas — pedrovillegas@gmail.com

Sistemas Estelares (2022) – Práctica 05

Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas – UNLP

Profesores: Claudia Scóccola, Sergio Cellone, Lilia Bassino

JTP: Gabriel Ferrero

AD: Lucía Rizzo

AA: Natalia Guevara

Última modificación: 7 de noviembre de 2022

Ejercicios:

Ejercicio 1.

Descargue del Classroom la tabla del catálogo de Cúmulos Globulares (CG) de [W. E. Harris \(1996, AJ, 112, 1487\)](#), edición 2010. La tabla contiene las posiciones de los CG y la abundancia de hierro de cada uno.

Recuerde que las coordenadas X , Y , Z de cada CG están dadas en un sistema rectangular centrado en el Sol, cuyo eje X apunta al centro galáctico y cuyo eje Y apunta en la dirección del movimiento solar ($l = 90^\circ$).

- a) Grafique (en 3D) las posiciones de todos los CG que se encuentren dentro de un cubo de 40 kpc de lado, centrado en el Sol. Señale la posición del Sol y del plano galáctico. ¿Qué información puede extraer a través de la inspección visual de este gráfico acerca de la distribución espacial de los CG?

Incluya en el informe los gráficos de las proyecciones de los cúmulos antes mencionados sobre los planos (X, Y) y (X, Z). Tómelos en cuenta en su argumentación.

Nota: recuerde mantener la misma escala en abscisas y ordenadas en estos últimos gráficos.

- b) Obtenga un valor aproximado para la distancia del Sol al centro galáctico (R_0) de la siguiente forma:

- Calcule los valores medios $\langle X_0 \rangle$, $\langle Y_0 \rangle$, $\langle Z_0 \rangle$ y las dispersiones¹ σ_X , σ_Y y σ_Z de las coordenadas X , Y y Z .
- Seleccione los cúmulos que tengan $|X - \langle X_0 \rangle| < 2\sigma_X$, $|Y - \langle Y_0 \rangle| < 2\sigma_Y$ y $|Z - \langle Z_0 \rangle| < 2\sigma_Z$. Para esos cúmulos recalcule el valor medio de las coordenadas $\langle X_0 \rangle$, $\langle Y_0 \rangle$ y $\langle Z_0 \rangle$. En base a estos resultados, indique cuál sería la distancia más probable del Sol al centro Galáctico, así como sus coordenadas Y_C , Z_C . Analice si los resultados obtenidos son compatibles con sus conocimientos acerca de la posición del centro galáctico.

Nota: en este paso es muy importante combinar correctamente las condiciones de selección en los tres ejes.

- c) Calcule y grafique un histograma de metalicidades para los CG de la Vía Láctea. Utilice intervalos de metalicidad $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = 0.1 \text{ dex}$, y centre el primer conteo en $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.5$. Elija luego un valor de $[\text{Fe}/\text{H}]$ que le permita separar las poblaciones de CG de alta y de baja metalicidad ("rojos" y "azules").
- d) Repita los gráficos de la parte a) pero seleccionando un cubo de 40 kpc de lado centrado en la posición del centro Galáctico calculado en b). Distinga con símbolos diferentes a los CG de acuerdo a las poblaciones identificadas en c). Señale la posición del Sol y del centro Galáctico. Describa las distribuciones espaciales de los CG en general y de cada una de las poblaciones.

Respuesta 1.

- a) En la figura 1 podemos ver los cúmulos globulares contenidos en un cubo de 40 kpc de lado centrado en el Sol, extraídos del catálogo [W. E. Harris \(1996, AJ, 112, 1487\)](#). En la figura 2 están las proyecciones en los planos X - Y y X - Z con los ejes orientados según la convención de las coordenadas galácticas. De estos gráficos podemos notar que pese a ser una figura centrada en el Sol, los cúmulos globulares tienden a concentrarse más hacia la zona de componente X positiva. Sabemos que por definición en esta región se encuentra el Centro Galáctico, luego los cúmulos globulares estarían distribuidos alrededor del mismo.

¹Considere la dispersión como $\sigma_x = \sqrt{\sum_1^N (\langle x \rangle - x_i)^2 / (N - 1)}$

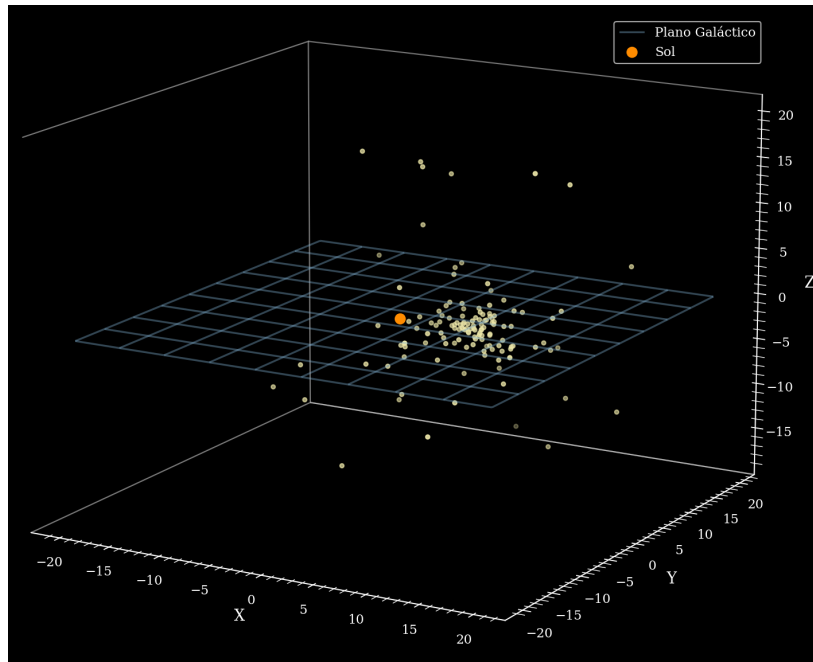


Figura 1: Cúmulos Globulares del catálogo de [W. E. Harris \(1996, AJ, 112, 1487\)](#) filtrados según un cubo de 40 kpc de lado centrado en el Sol.

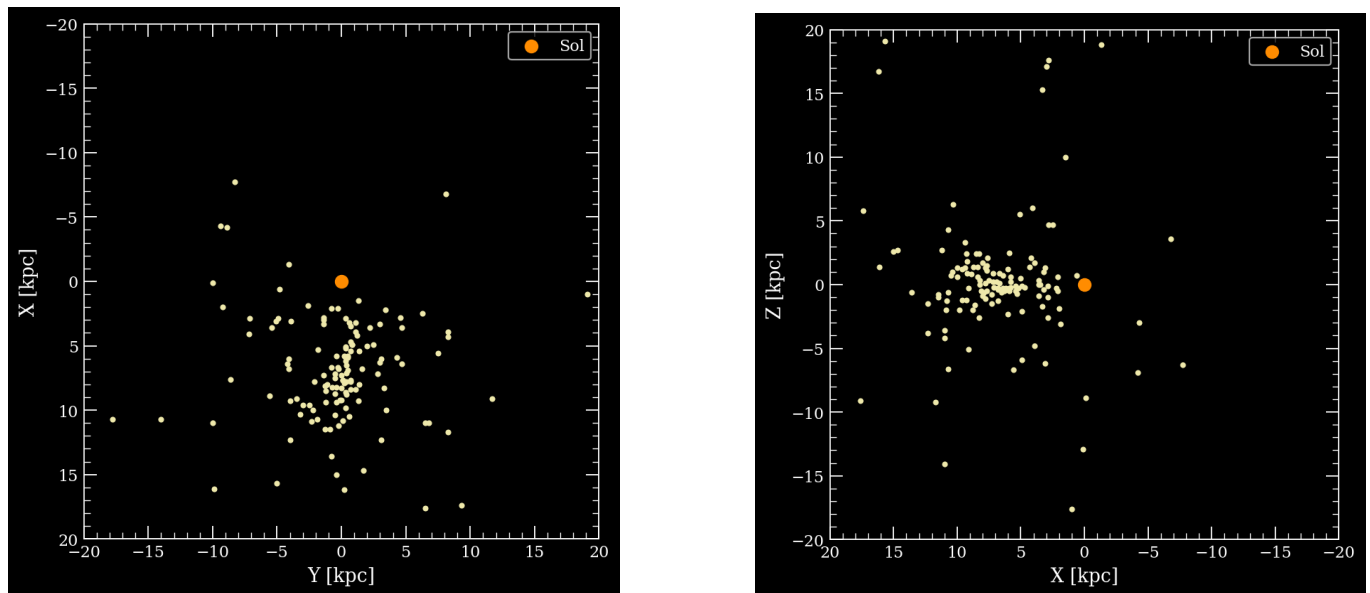


Figura 2: Proyecciones en los planos X-Y (izquierda) y X-Z (derecha) de los cúmulos globulares.

- b) Si suponemos que los cúmulos globulares se distribuyen simétricamente en torno al centro galáctico, más aún suponemos que esta simetría es de carácter esférico, podemos aproximar la distancia del Sol al centro galáctico (R_0) como la distancia media del Sol a los CG's de la Vía Láctea. De esta forma, obtuvimos como distancias medias de los cúmulos globulares al Sol los siguientes valores:

$$\langle X \rangle = 6.014 \pm 12.67 \text{ kpc} \quad \langle Y \rangle = -1.377 \pm 11.29 \text{ kpc} \quad \langle Z \rangle = 1.148 \pm 15.90 \text{ kpc} \quad (1)$$

Podemos notar que para los valores que hemos obtenido las dispersiones son demasiado significativas, por lo que vamos a filtrar los cúmulos del catálogo nuevamente según el criterio de 2σ , con el objetivo de reducir dichas dispersiones. De esta forma, seleccionamos los cúmulos que cumplan con las ecuaciones:

$$|X - \langle X_0 \rangle| < 2\sigma_X \quad |Y - \langle Y_0 \rangle| < 2\sigma_Y \quad |Z - \langle Z_0 \rangle| < 2\sigma_Z \quad (2)$$

Y volvemos a calcular los valores medios de las distancias a estos cúmulos. Así, nuestra aproximación de la distancia del Sol al Centro Galáctico es $R_0 = 7.82 \pm 5.9 \text{ kpc}$, y sus coordenadas rectangulares galácticas:

$$\langle X \rangle = 7.82 \pm 5.9 \text{ kpc} \quad \langle Y \rangle = -0.3 \pm 5.5 \text{ kpc} \quad \langle Z \rangle = 0.3 \pm 6.3 \text{ kpc} \quad (3)$$

Podemos decir que estos resultados son compatibles con otros estudios, cuyos valores oscilan alrededor de los 8.5 kpc, el standard de la IAU.

- c) Utilizando los datos de las metalicidades de los cúmulos globulares del catálogo, procedemos a realizar el histograma que se encuentra en la figura 3 según los detalles mencionados en el enunciado. Podemos ver que en dicho gráfico se hayan principalmente dos poblaciones con sus respectivos máximos: las separamos por el valor $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.9$. De esta forma, por debajo de este valor se encontrarán los cúmulos globulares azules o de baja metalicidad y por encima los cúmulos rojos o de alta metalicidad. A partir de estos datos podríamos preguntarnos por qué se presenta una escasez de cúmulos con metalicidades $\simeq -0.9$: la separación en dos poblaciones no es arbitraria, sino que podría estar indicándonos dos procesos evolutivos diferentes en este tipo de objetos.

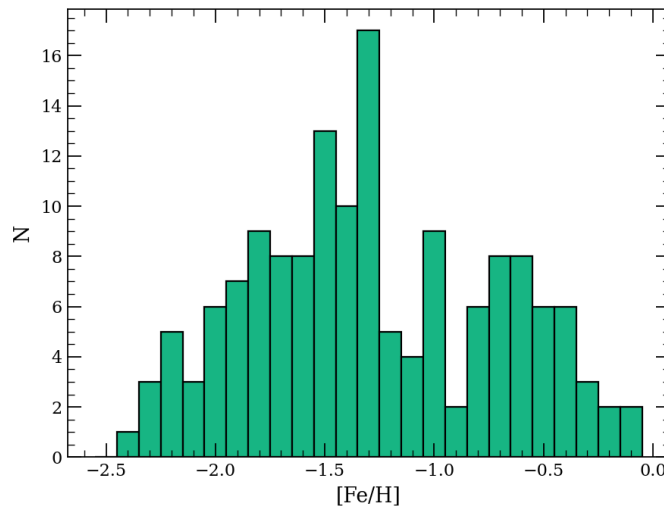


Figura 3: Histograma de metalicidades vs cantidad de CG's de la Vía Láctea.

- d) En las figuras 4 y 5 podemos observar nuevamente los datos graficados en el inciso a) superpuestos con la información obtenida en los incisos previos. Podemos observar tanto la posición del Centro Galáctico como la clasificación de los cúmulos según el rango de metalicidades en el que se presentan: las poblaciones azul para metalicidades $[\text{Fe}/\text{H}] < -0.9$ y roja para $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.9$. Se puede notar que los cúmulos con mayor metalicidad (rojos) están más concentrados hacia el centro de la galaxia, en comparación con los que son más pobres en metales (azules), lo cual es un comportamiento característico de las galaxias espirales. Aún así, ambas poblaciones tienden a concentrarse hacia el Centro Galáctico.

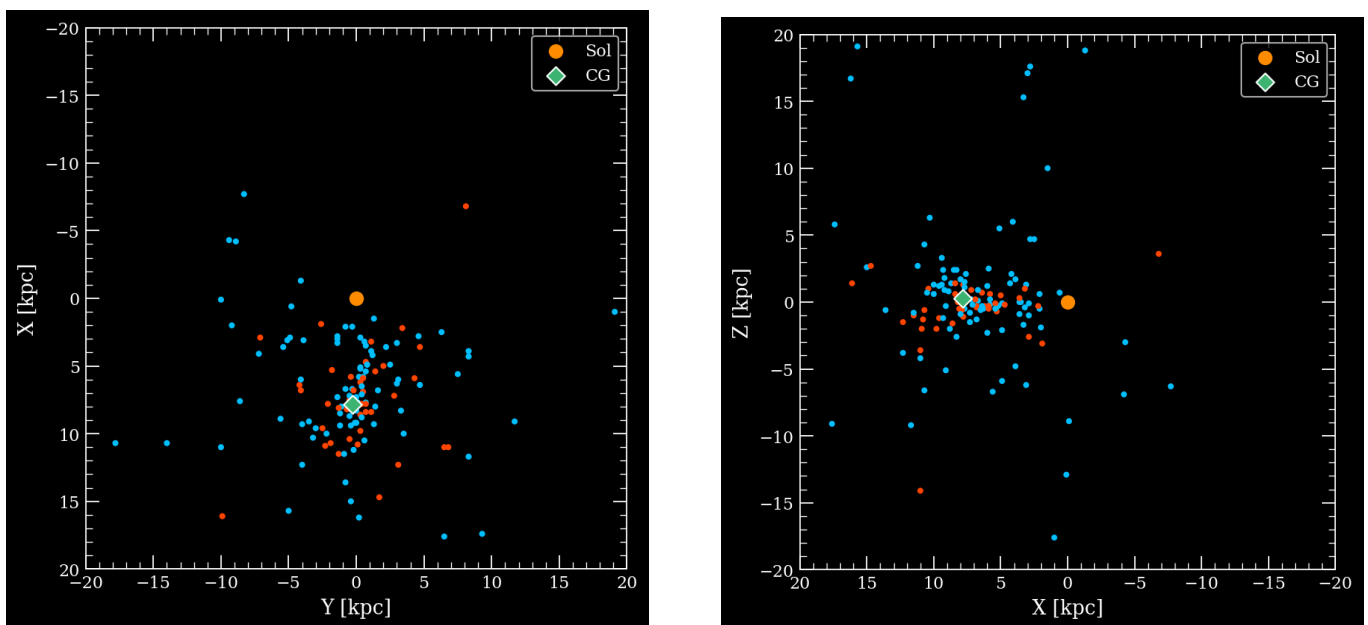


Figura 4: Proyecciones en los planos X-Y (izquierda) y X-Z (derecha) de los cúmulos globulares con sus metalicidades. Notemos la concentración de los cúmulos de mayor metalicidad hacia el Centro Galáctico.

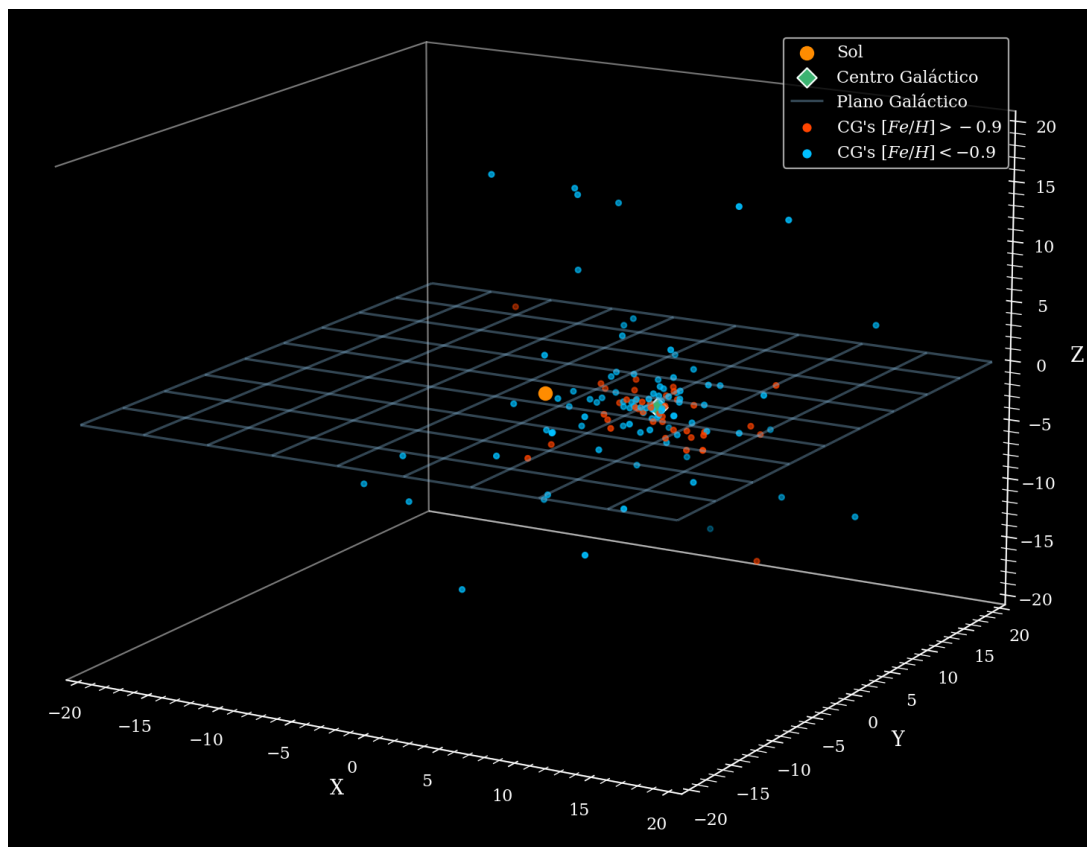


Figura 5: Cúmulos Globulares del catálogo de [W. E. Harris \(1996, AJ, 112, 1487\)](#) filtrados según un cubo de 40 kpc de lado centrado en el Sol, separados según su metalicidad en cúmulos rojos y azules.

□

Ejercicio 2.

Descargue del Classroom la última versión del Catálogo de Cúmulos Abiertos Ópticamente Visibles de [W. S. Dias et al. \(2002, A&A, 387, 871\)](#) (archivo `Dias2002_15comp.dat`).

Utilizando los datos del catálogo, haga lo siguiente:

- Para todos los cúmulos con distancia al Sol conocida, calcule sus coordenadas X, Y, Z en el mismo sistema rectangular del ejercicio anterior. Grafique X contra Y, Z contra X, y Z contra Y; en los dos primeros gráficos, ubique la posición del centro Galáctico. Describa la distribución espacial observada de los cúmulos abiertos en la Galaxia y los efectos que pueden estar afectando a la distribución observada.
- Repita el gráfico X contra Y, pero limitado a los cúmulos que se encuentren a una distancia de menos de 5 kpc del Sol, tengan más de 10 miembros estimados, exista fotometría, no sean dudosos, ni posibles cúmulos globulares, ni posibles asterismos, ni objetos no encontrados en el Digital Sky Survey (DSS). Los mismos se encuentran en el archivo `Dias2002_15sel.dat`. Agrupe los cúmulos en los siguientes rangos de edades (haciendo un gráfico para cada grupo):

$$\begin{aligned} \log(t) &\leq 7.0 \\ \log(t) &\leq 7.5 \\ 7.5 < \log(t) &\leq 8.0 \\ 8.0 < \log(t) & \end{aligned}$$

Describa las distribuciones espaciales que se obtienen; considere para ello la estructura de la Galaxia (ver figura `MW_map.jpg` en el Classroom) y las condiciones que deben cumplir los “trazadores” de la estructura espiral.

- Calcule la distancia galactocéntrica R de cada cúmulo abierto al centro galáctico y grafique las metalicidades en

función de R. Use distintos símbolos y/o colores para los cúmulos con diferentes rangos de edades:

$$\begin{aligned}\log(t) &\leq 7.25 \\ 7.25 < \log(t) &\leq 8.0 \\ 8.0 < \log(t) &\leq 9.0 \\ 9.0 < \log(t)\end{aligned}$$

Describa este gráfico, tratando de relacionar la distribución espacial de los cúmulos abiertos con sus edades y metalicidades.

Respuesta 2.

- a) En los gráficos de la figura 6 podemos observar los 2040 Cúmulos Abiertos del catálogo mencionado en el enunciado, proyectados sobre los tres planos del sistema rectangular. Para graficarlos de esta forma, hemos tomado los datos de las coordenadas galácticas de cada cúmulo (distancia al sol d , longitud l y latitud galáctica b) y realizado el siguiente cálculo:

$$X = d \cos(l) \cos(b) \quad Y = d \sin(l) \cos(b) \quad Z = d \sin(b) \quad (4)$$

De la inspección visual de estos gráficos podemos notar que todos los cúmulos abiertos se encuentran en el plano galáctico, y que no encontramos cúmulos en el catálogo que estén a más de 15 kpc de distancia. Esta distancia hacia el centro galáctico es incluso menor ($\simeq 8$ kpc), y que en conjunto parecerían presentar una mayor concentración a medida que nos acercamos al Sol. Todo esto se debe a la propia distribución espacial de los cúmulos: al estar todos concentrados en el plano, no es posible observar cúmulos más allá del centro galáctico debido a la alta absorción en el visual que esa región del cielo presenta.

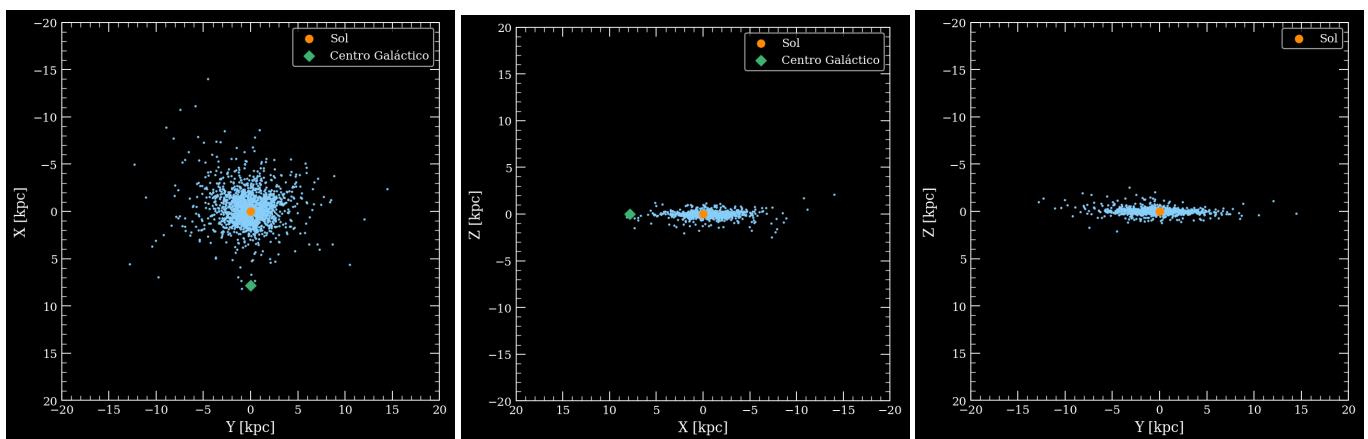


Figura 6: Cúmulos Abiertos Ópticamente Visibles del catálogo *W. S. Dias et al. (2002, A&A, 387, 871)* proyectados sobre los planos X-Y, X-Z e Y-Z del sistema rectangular galáctico. También están marcados el Centro Galáctico y el Sol.

- b) Del catálogo anterior ha sido seleccionado el grupo de cúmulos abiertos que cumplen las condiciones dadas en el enunciado en el archivo `Dias2002_15se1.dat`. Luego utilizando la edad de los mismos, se los ha graficado en 4 grupos distintos según sus edades, como podemos ver en la figura 7.

Si consideramos que estos cúmulos son cercanos, tienen más de 10 miembros estimados y son jóvenes, luego han de ser buenos trazadores de la estructura espiral de la galaxia. Comparando los gráficos de cúmulos de menor edad (por ejemplo el de $\log(t) \leq 7.0$) con la estructura de la Galaxia de la figura 9, podemos llegar a percibir una tendencia de los cúmulos a distribuirse sobre tres curvas que descienden desde la parte superior izquierda del gráfico hacia la derecha, una de las cuales atraviesa la región por la que se encuentra el Sol: se trataría de los brazos de Sagitario (el inferior o más interno), el brazo de Orión o local (el central), y el brazo de Perseo (el superior o externo). Esta distribución también puede apreciarse bien en la figura con cúmulos cuyas edades satisfacen $\log(t) \leq 7.5$, pero se desdibuja progresivamente si tomamos cúmulos de edades mayores. A medida que aumenta la edad de un cúmulo, se vuelve peor trazador de la estructura espiral.

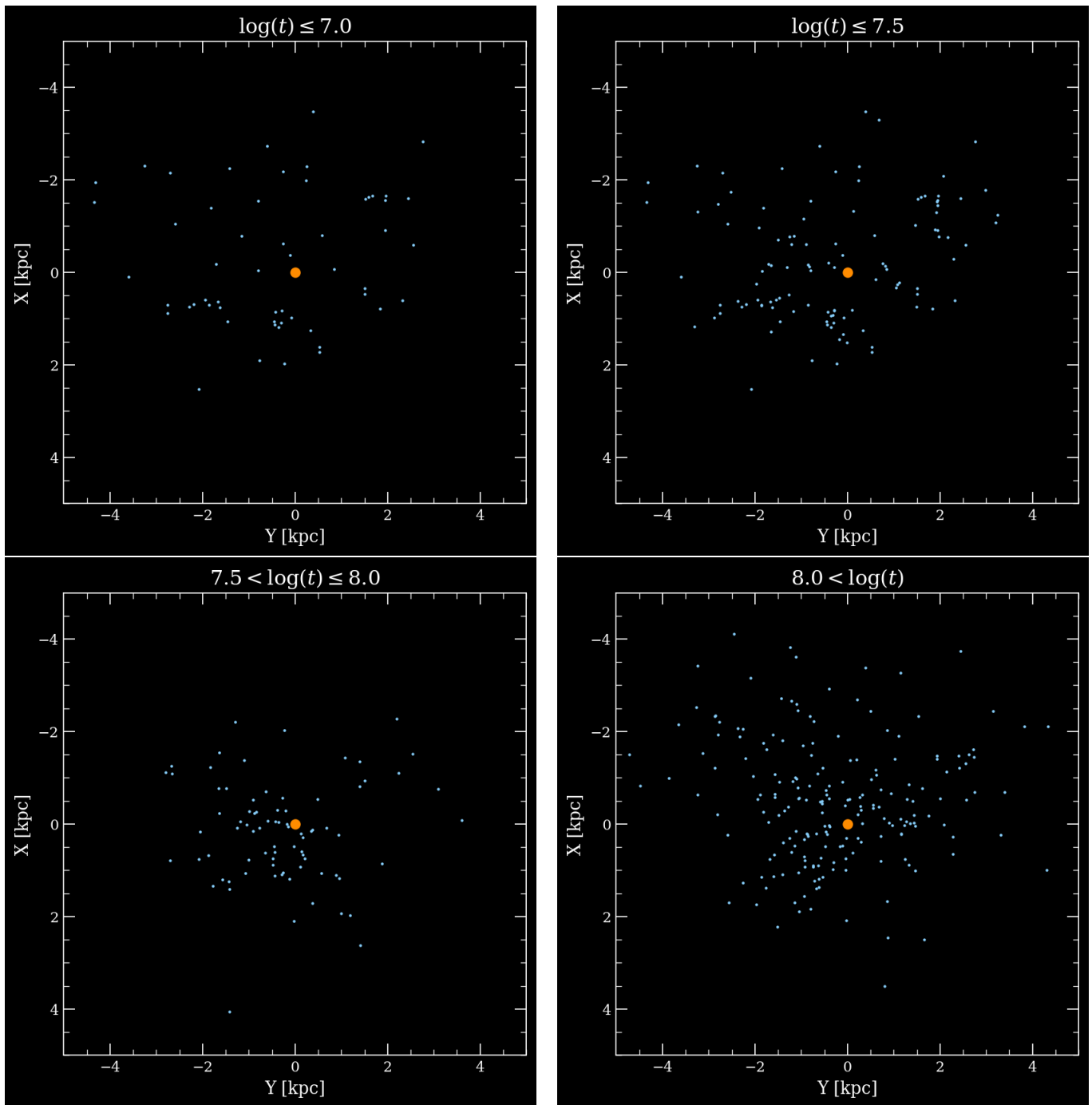


Figura 7: Distribuciones en el plano X-Y de los cúmulos abiertos de la tabla *Dias2002_15se1.dat* para distintos rangos etarios de los mismos. A menor es la edad del grupo de cúmulos, más notoria es la presencia de los brazos espirales.

- c) Para calcular la distancia galactocéntrica R de cada cúmulo abierto a partir de las coordenadas galácticas, procedemos a aplicar el teorema del coseno al triángulo que une al Sol, el Centro Galáctico y el cúmulo de la siguiente forma:

$$R = \sqrt{R_0^2 + d^2 - 2R_0d \cos l} \quad (5)$$

Donde R es la distancia galactocéntrica de cada cúmulo, R_0 es la distancia Centro Galáctico - Sol (calculada en 3), d es la distancia cúmulo - Sol y l es la longitud galáctica. Con estos datos, podemos visualizar la metalicidad en función de la distancia galactocéntrica de cada cúmulo (figura 8), teniendo en cuenta también la edad de cada uno. De este gráfico podemos observar que la edad de los cúmulos abiertos en nuestra galaxia es mayor a medida que nos alejamos del centro galáctico, notemos que aproximadamente a partir de los 9kpc del centro galáctico predominan los cúmulos de más de 10^9 Gyr. Respecto a la metalicidad, podemos mencionar que en principio parece haber un pico de abundancias alrededor de los 8kpc, pero este dato podría verse afectado por la muestra de cúmulos con la que estamos trabajando: recordemos que en el inciso a) vimos que en la dirección del centro galáctico es difícil observar cúmulos abiertos debido a la cantidad de polvo que extingue la luz en el

rango óptico. Habiendo explicitado esto, podríamos decir que los cúmulos más cercanos al Centro Galáctico parecerían ser más metálicos que el resto. De esta forma lo cúmulos más lejanos serían menos metálicos que sus compañeros. En conclusión, existirían dos gradientes radiales: en edad y en metalicidad, pero estos gradientes no parecerían estar bien correlacionados.

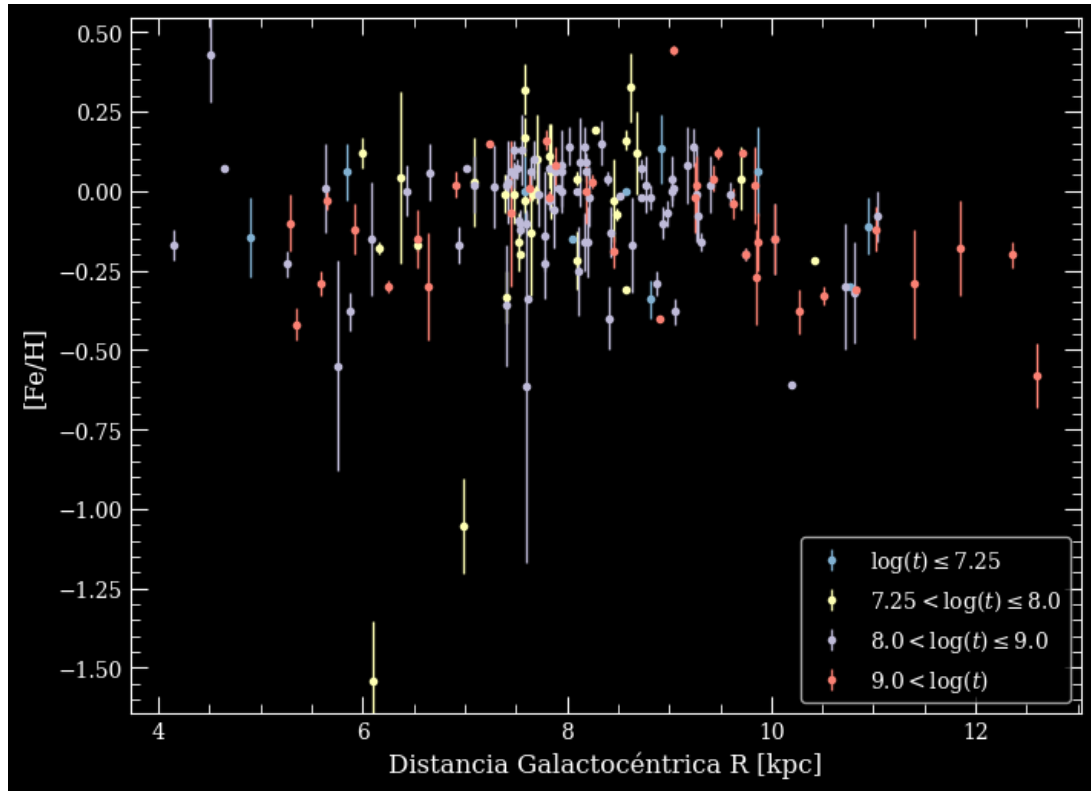


Figura 8: Metalicidad $[Fe/H]$ vs distancia galactocéntrica R de los cúmulos abiertos de la tabla *Dias2002_15se1.dat*.

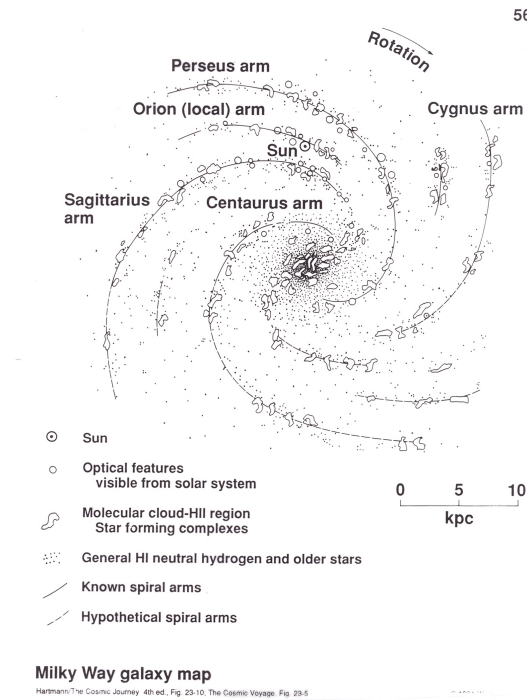


Figura 9: Modelo de la estructura de la Vía Láctea.

□