

Sistemas Estelares 2023

Cúmulos Abiertos - clase 02

Prof. Claudia Scóccola

Repaso de la determinación de la distancia a cúmulos abiertos

Todas las estrellas están aproximadamente a la misma distancia.

Desventaja: la mayoría de los cúmulos abiertos están confinados al plano de la galaxia, donde hay más contaminación por estrellas del disco, y extinción por material interestelar.

Métodos de medición de distancia:

- 1) Medir la distancia a cada una de las estrellas y calcular el promedio.
- 2) Ajuste de la secuencia principal (comparando la secuencia principal con aquella de un cúmulo de distancia conocida (como el cúmulo de las Híades).
- 3) Determinación de la ZAMS, y comparación de la secuencia principal del cúmulo de interés, con la ZAMS.

Satélites que hicieron avanzar mucho este campo de investigación, ya que miden (midieron) paralajes y movimientos propios con altísima precisión:

Hipparcos (1989 - 1993) [Hipparcos - overview](#)
Gaia (2013- continua (~ 2025)) [Gaia - overview](#)

Gaia mission

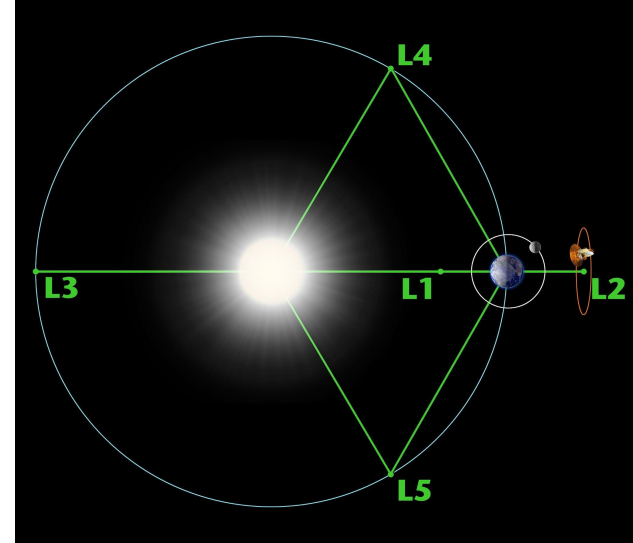
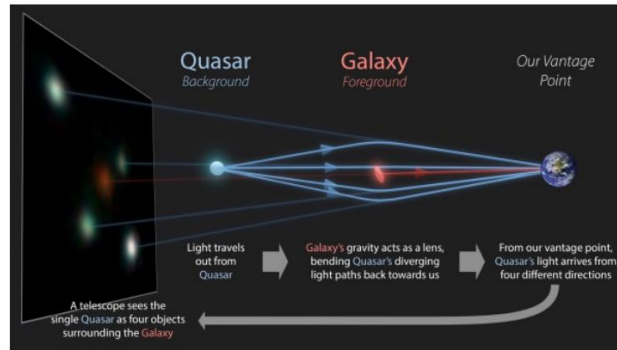
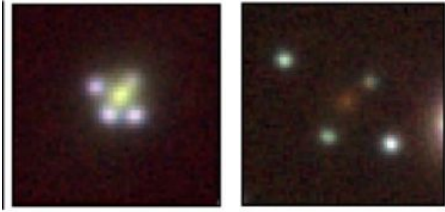
La misión Gaia

- ❖ Gaia está creando un mapa 3D extraordinariamente preciso de más de mil millones de estrellas en nuestra galaxia y más allá.
- ❖ Mov. propio, luminosidad, temperatura y composición química.
- ❖ Estos datos ayudan, entre otras cosas, a responder preguntas sobre el origen, estructura e historia evolutiva de nuestra galaxia.

Curiosidad:

A veces se llega a descubrimientos fortuitos sorprendentes.

Por ejemplo, gracias a Gaia y técnicas de *machine learning*, se han descubierto 12 quasars cuya luz está tan fuertemente deflectada por galaxias entre el quasar y nosotros (foreground galaxies) que se ven como cuatro imágenes distintas: “*Einstein cross*”.



Launch: 19 December 2013

Orbit: L2 Lagrangian point

Data release milestones:

Data Release 1: 14 September 2016

Data Release 2: 25 April 2018

Early Data Release 3: 3 December 2020

Data Release 3: 13 June 2022

Diagramas color-magnitud

***Gaia* Data Release 2**

Observational Hertzsprung-Russell diagrams★

Gaia Collaboration, C. Babusiaux^{1,2,★★}, F. van Leeuwen³, M. A. Barstow⁴, C. Jordi⁵, A. Vallenari⁶, D. Bossini⁶,

[Link al paper](#)

Veamos los **diagramas color magnitud** de cúmulos abiertos cercanos.

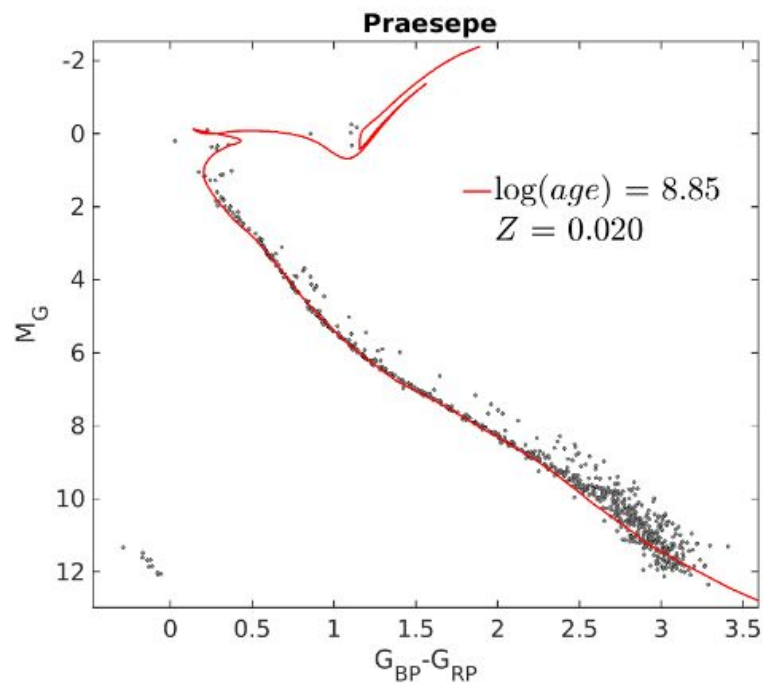
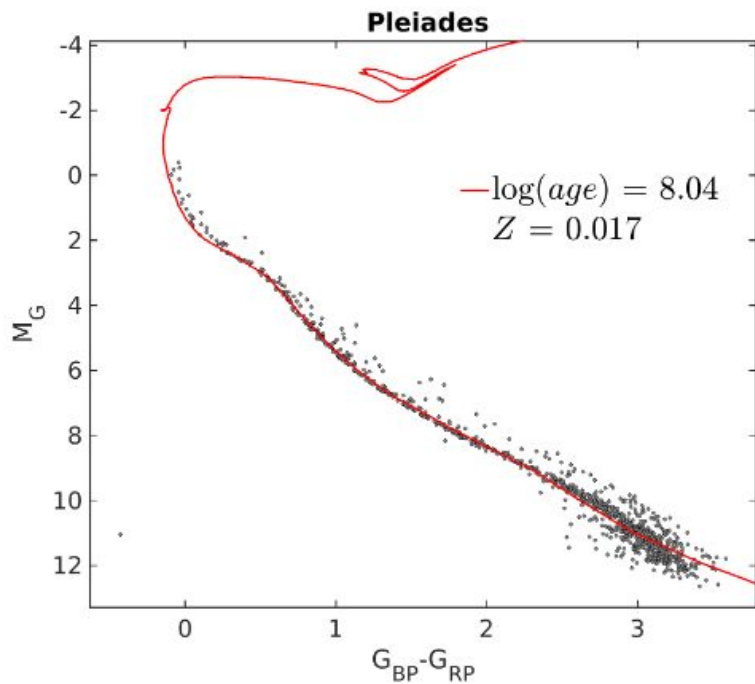
Fig. 17. HRDs of nearby clusters compared with PARSEC isochrones (see text for details) of the Pleiades (*panel a*), Praesepe (*panel b*), Coma Ber (*panel c*), Hyades (*panel d*), Alpha Per (*panel e*), and Blanco 1 (*panel f*). Praesepe, Hyades, and Alpha Per are fitted with $Z = 0.02$, while the others are reproduced using $Z = 0.017$.

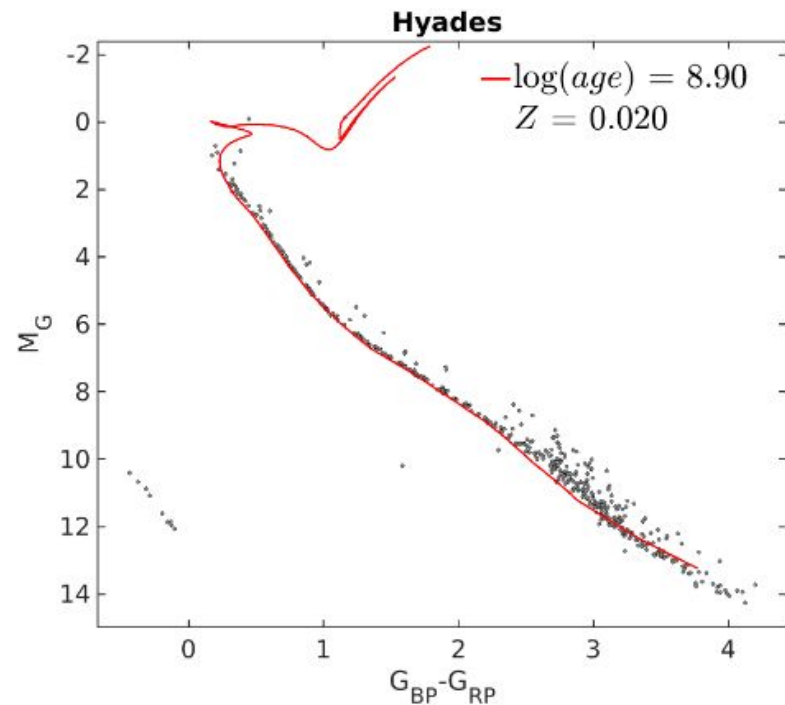
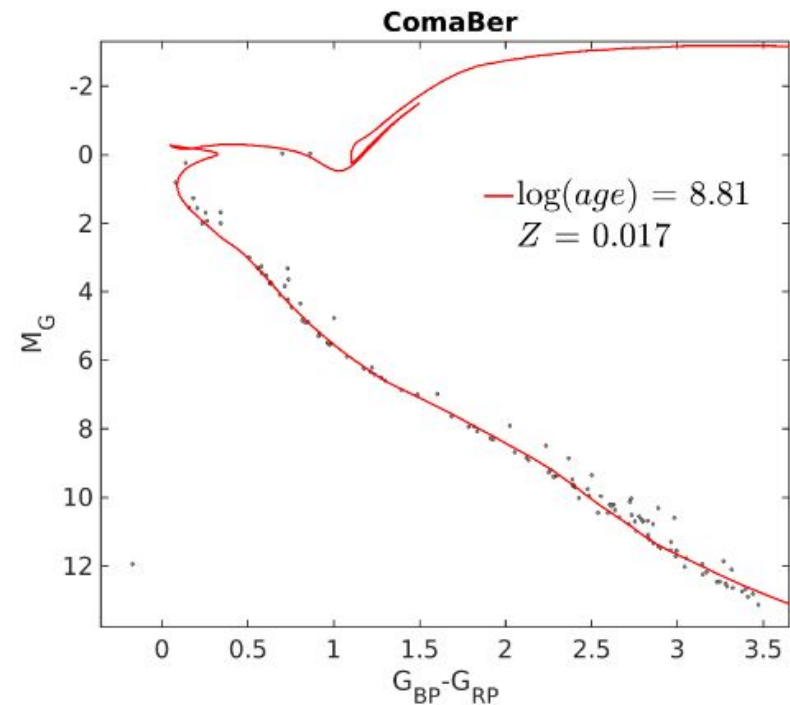


Figure 17 shows the HRD of a few nearby open clusters compared with PARSEC isochrones. The distance modulus (Table 2) was used, and the extinction was not corrected in the photometry, but was applied on the isochrones.

La manera de determinar la edad de cúmulos abiertos de manera precisa es hacer un **ajuste de isocronas** (donde al mismo tiempo, también, se ajusta la **metalicidad**).

A&A 616, A10 (2018)

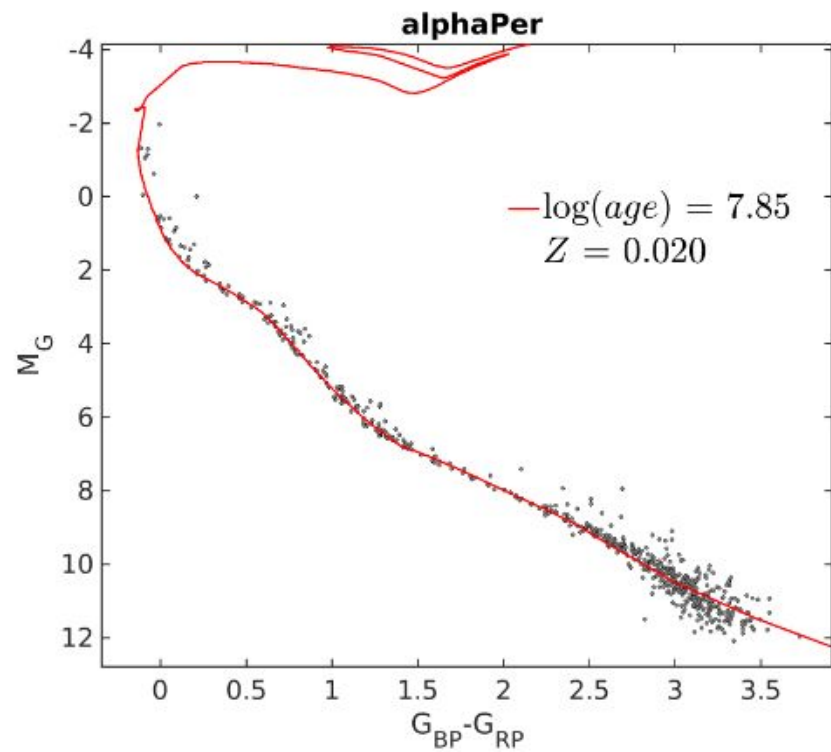




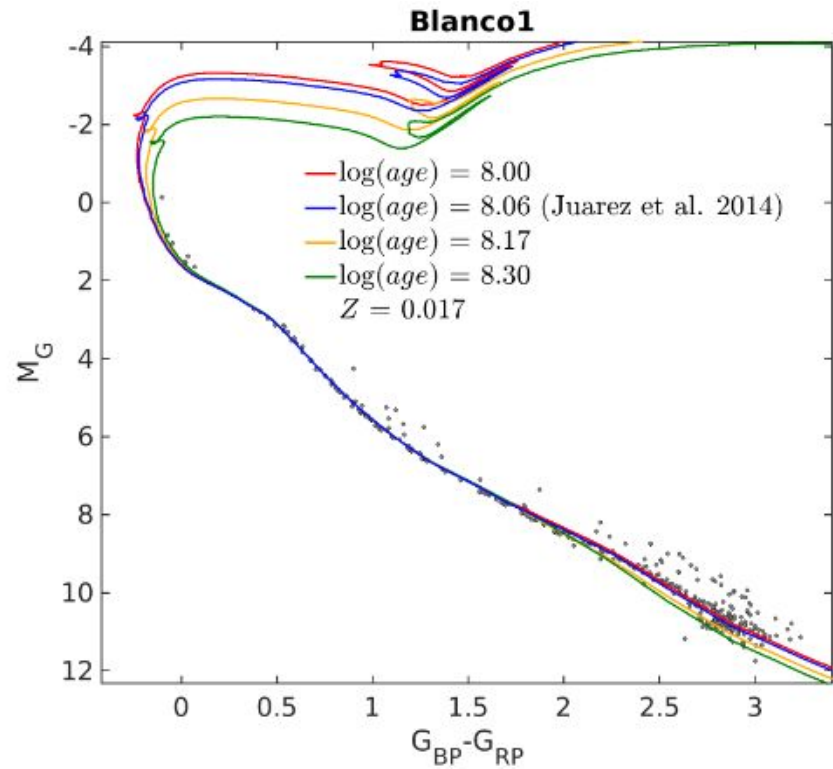
El ajuste de isocronas, nos permite determinar la edad y metalicidad del cúmulo.

El **turn-off point** es indicador de la edad del cúmulo.

Notar el gran rango de magnitudes absolutas (en el eje y) gracias a la sensibilidad de los instrumentos.



Este cúmulo es más joven que los cúmulos de la filmina anterior. Notar que el turn-off point está en magnitudes absolutas menores (estrellas más brillantes).



Isocronas de distintas edades muestran turn-off points diferentes. Cuanto mayor es la edad, más abajo aparece el turn-off point.

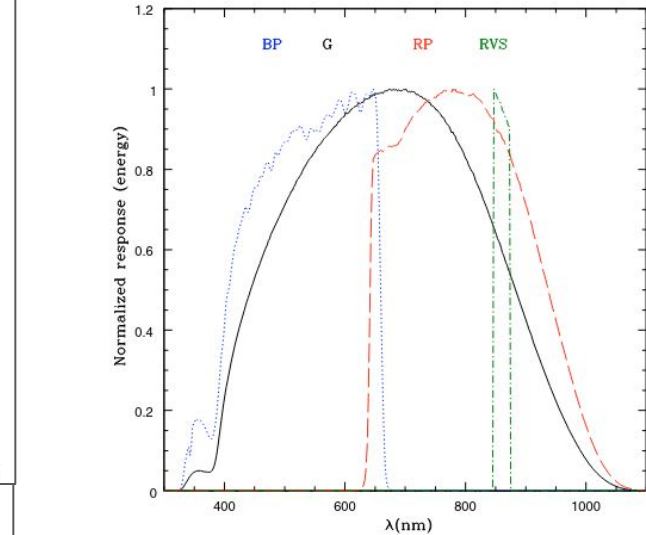
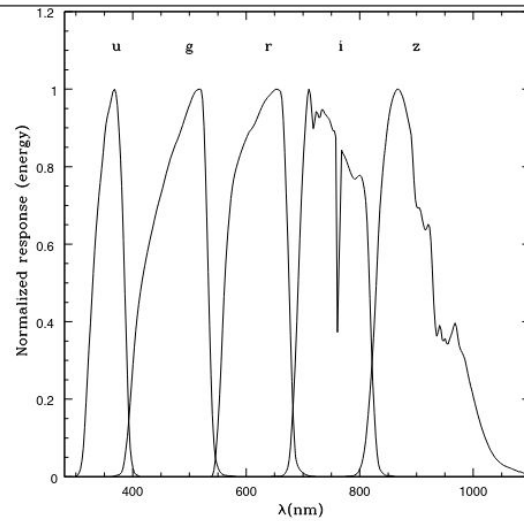
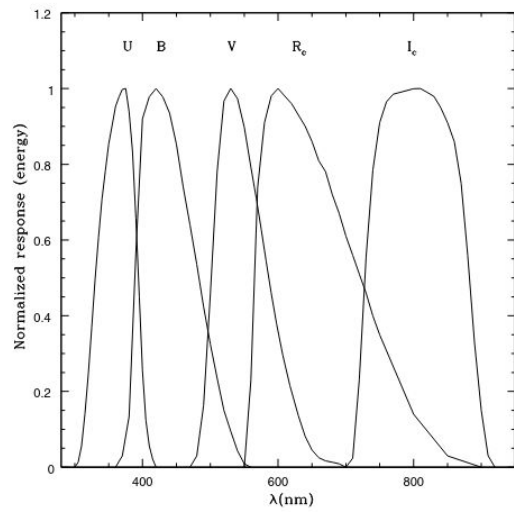


Fig. 3. Gaia G (solid line), G_{BP} (dotted line), G_{RP} (dashed line) and G_{RVS} (dot-dashed line) normalised passbands.

Johnson-Cousins normalised passbands (Bessell 1990).

SDSS normalised passbands (<http://www.sdss.org/>).

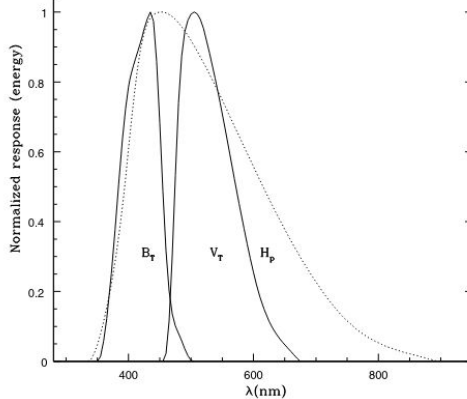


Fig. 7. Hipparcos and Tycho normalised passbands (ESA 1997).

Nota acerca de los distintos sistemas de filtros

Existen **distintos sistemas de filtros**, muchos de ellos diseñados para experimentos particulares. Al comparar la fotometría en distintas bandas, es importante notar qué sistema se está utilizando.

Los parámetros que determinan el aspecto del diagrama color-magnitud son:

- EDAD
- METALICIDAD

Tiempos de vida en la Secuencia Principal: $\tau_{SP} \propto 1 / M^\alpha$ ($\alpha \sim 2 - 3$)

Estrella de $10 M_{\text{sun}}$ $\rightarrow \tau_{SP} \sim 10^7$ años

Estrella de $2 M_{\text{sun}}$ $\rightarrow \tau_{SP} \sim 10^9$ años

Estrella de $0.8 M_{\text{sun}}$ $\rightarrow \tau_{SP} \sim 14 \times 10^9$ años

En los diagramas color-magnitud, el **turn-off point** cambia para distintas edades, y es un parámetro útil.

Algunas parametrizaciones útiles:

$$M_V(\text{T.O.}) = 2.70 \log(t/\text{Gyr}) + 0.30 [\text{Fe}/\text{H}] + 1.41 \quad \text{Bergbusch \& Vandenberg (1992)}$$

$$\log(t) = 0.825 \log^2(M_{\text{TO}}/120) + 6.43 \quad \text{para } [\text{Fe}/\text{H}]=0 \quad \text{Buzzoni (2002)}$$

Relación entre el tiempo de vida en sec. ppal. y la masa de la estrella en el turn-off point.

Existen muchos trabajos más actuales, con métodos más refinados.

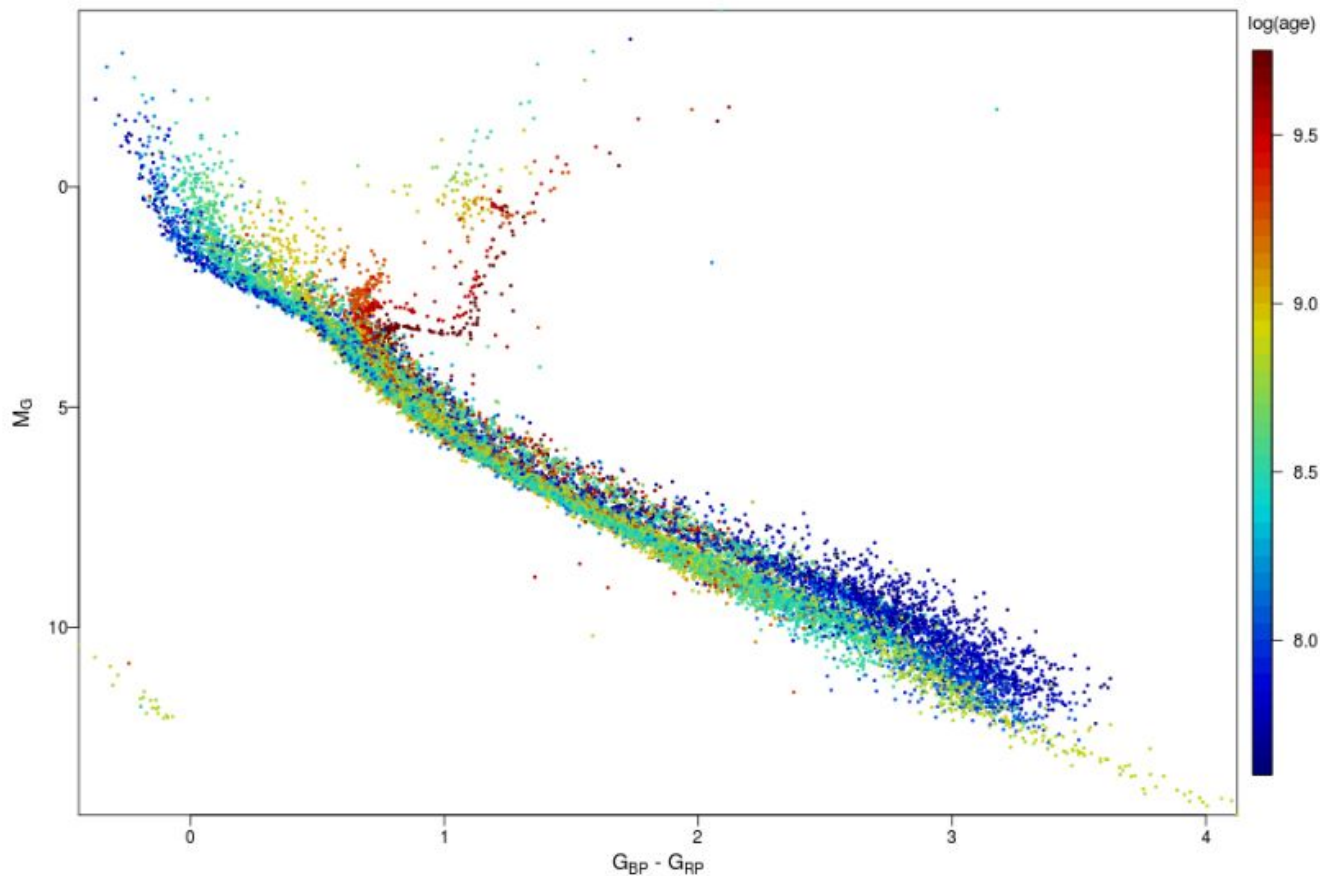


Diagrama color-magnitud para 32 cúmulos abiertos, coloreados según su edad.

Notar que los cúmulos más viejos tienen turn-off points en magnitudes más débiles, correspondientes a estrellas de menor masa.

Notar la posición en el diagrama de las estrellas de menor masa en cúmulos más jóvenes.

Fig. 2. Composite HRD for 32 open clusters, coloured according to $\log(\text{age})$, using the extinction and distance moduli as determined from the Gaia data (Table 2).

Turn-off point

Es el punto en el cual las estrellas comienzan a separarse de la secuencia principal.

Es el mejor “reloj astrofísico” para medir la edad de las poblaciones.

Además, gracias a las curvas teóricas (isocronas), podemos determinar no sólo las edades de los cúmulos, sino también las metalicidades.



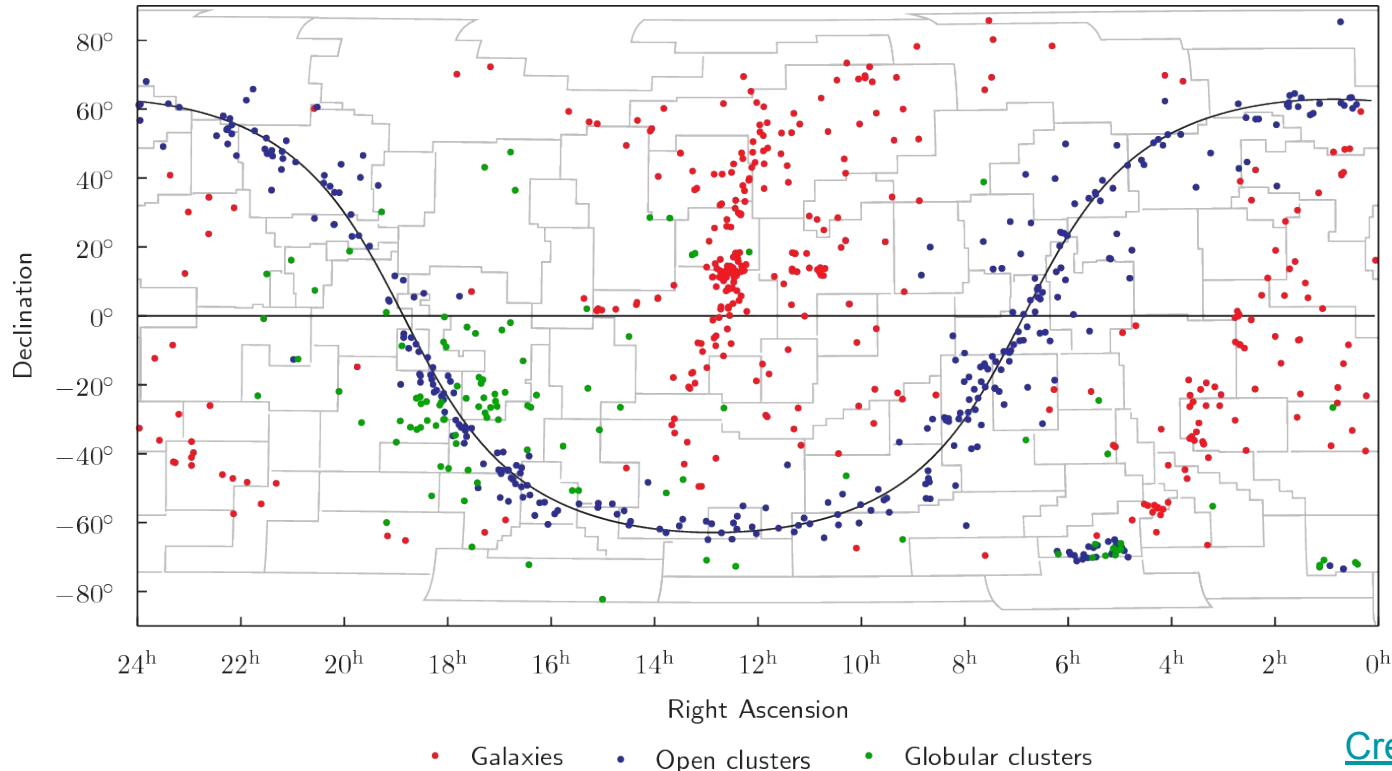
Turn-off point

“Reloj astrofísico” para medir la edad de las poblaciones.

Distribución espacial e historia evolutiva

Si miramos la distribución de los cúmulos en *coordenadas ecuatoriales* (α , δ) veremos lo siguiente:

Los puntos azules son cúmulos abiertos.



En cambio, si graficamos la posición de los cúmulos abiertos en **coordenadas galácticas**, vemos claramente que se agrupan en el plano galáctico.

THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 157:12 (14pp), 2019 January

ATENCIÓN: Los colores representan algo distinto que en la filmina anterior.

[Bica et al. \(2019\)](#)

Notar que los pocos cúmulos con $|b|$ grandes, no necesariamente están lejos del plano, sino que son cercanos al Sol.

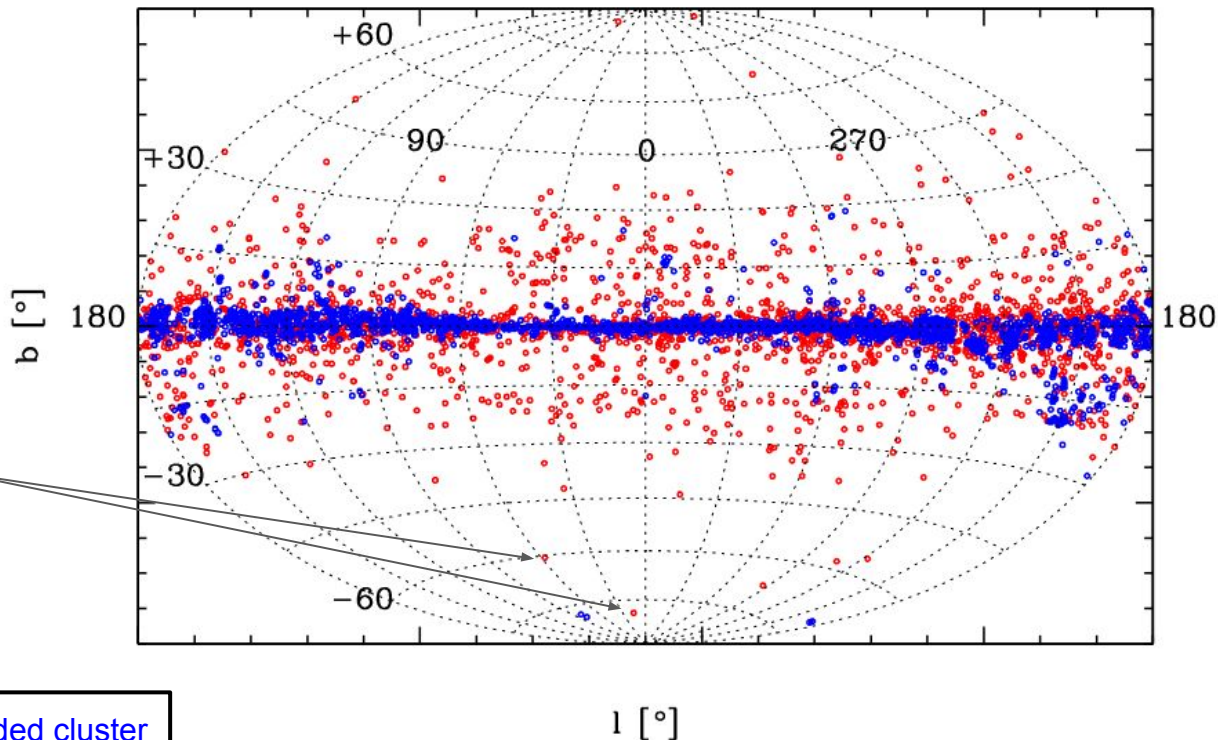


Figure 4. Aitoff projection for the ECs (blue circles) compared to OCs (red circles).

Distribución en edad y metalicidad

1×10^7 años $< t < 3 \times 10^8$ años

$-0.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.2$ con alto pico en $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$

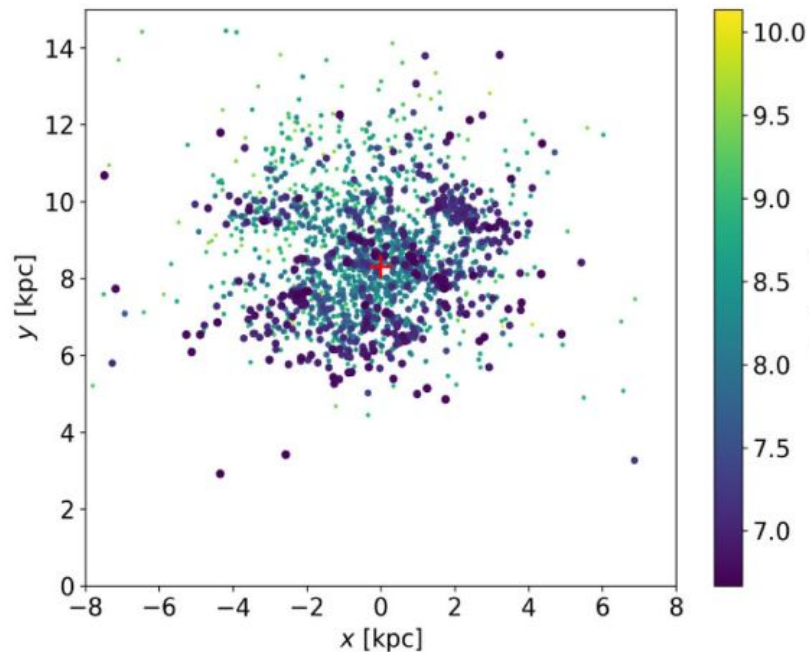
La mayoría de los C.A.: $t < 10^8$ años

$N(10^8 \text{ años} < t < 10^9 \text{ años}) \sim N(< 10^8 \text{ años})$

$N(t > 10^9 \text{ años}) \sim 0.4 N(< 10^8 \text{ años})$

No hay cúmulos abiertos viejos.

Todos los CA de la muestra



CA con edades menores a 50 Myr

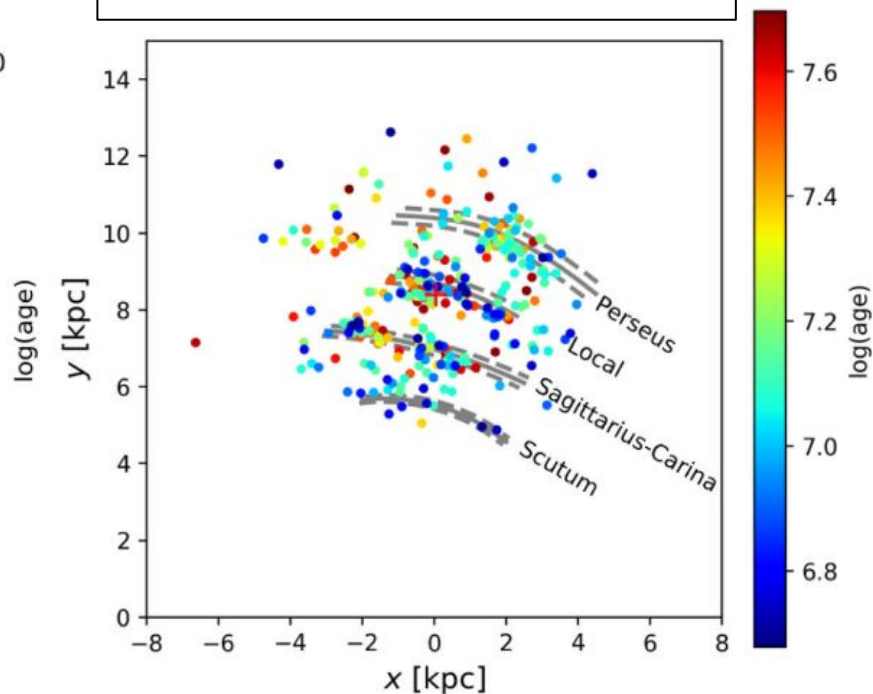
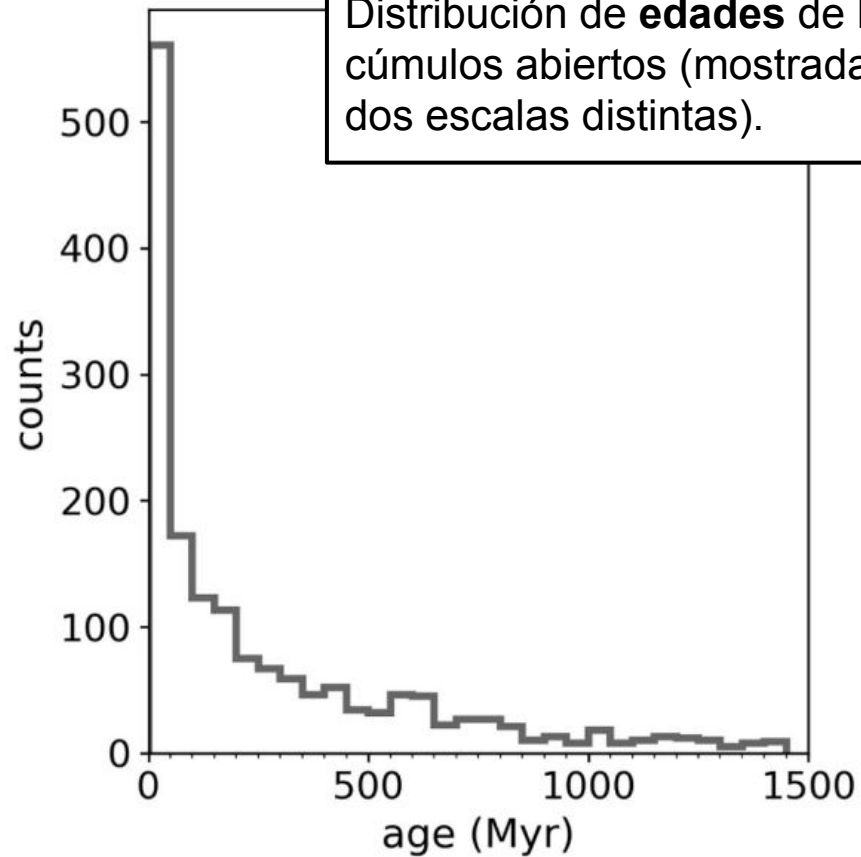
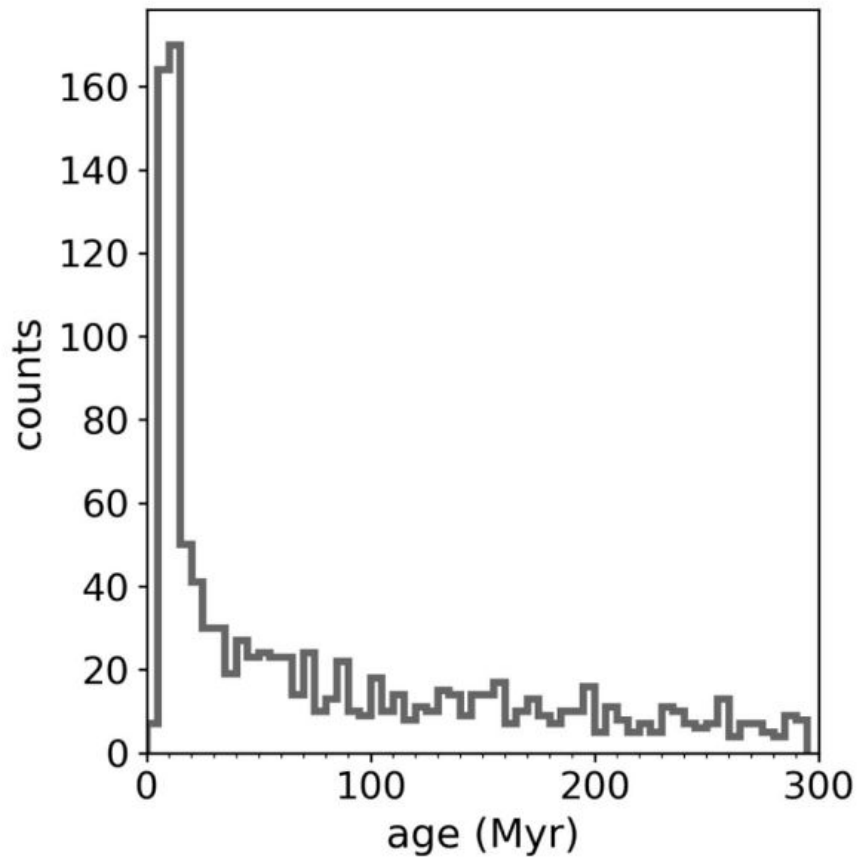


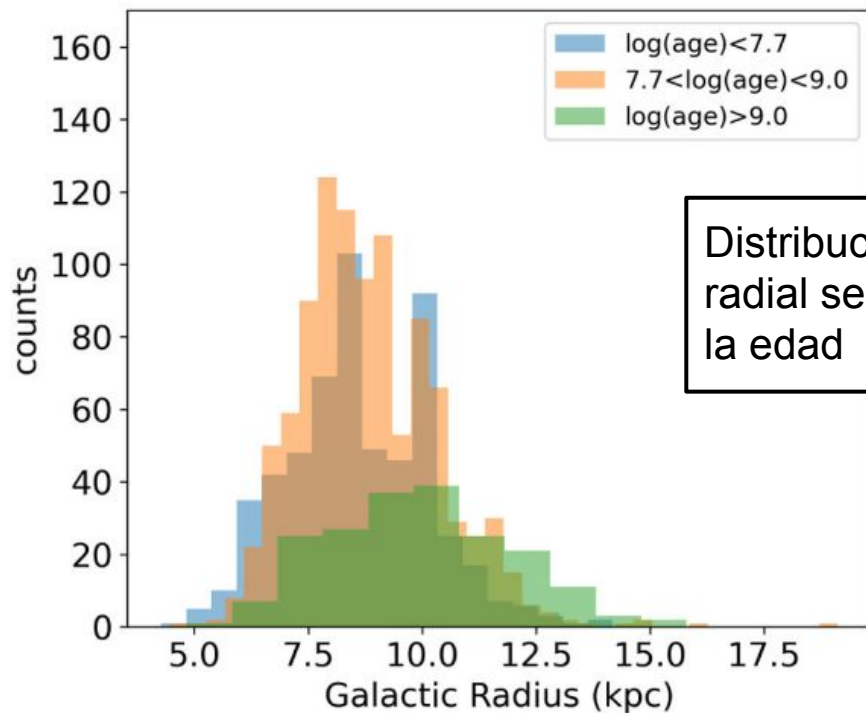
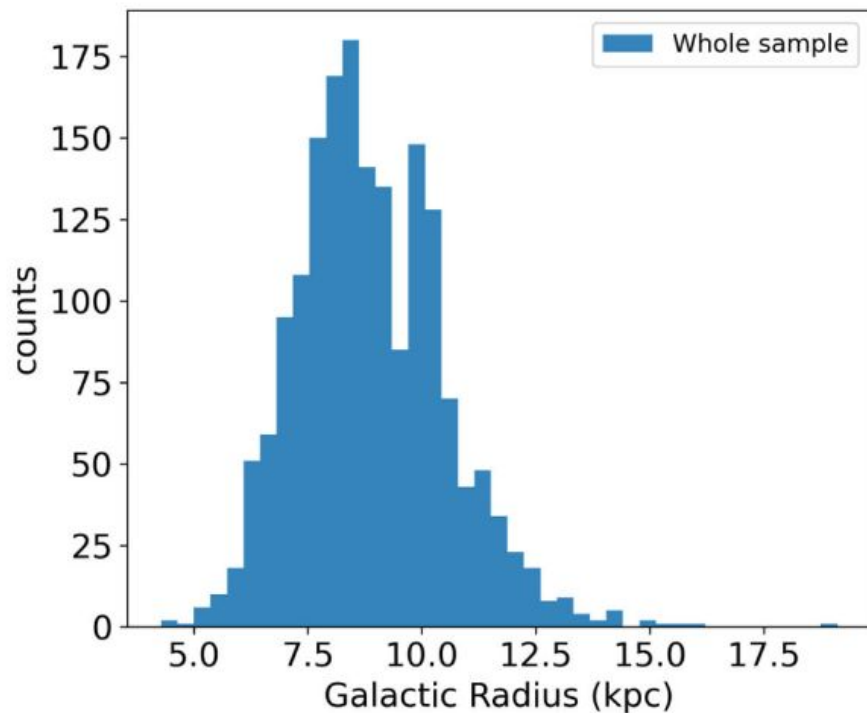
FIGURE 1 | Distribution of the 1,750 open clusters in the Galactic plane. In the right plot are presented the open clusters with ages lower than 50 Myr. In light-gray are the present zero-age arms positions. The Sun (red cross) is at coordinates $(0, 8.3)$ kpc and the Galactic center is at $(0, 0)$. The vector angular velocity is perpendicular to the x-y plane pointing in the direction of the paper.

Los cúmulos abiertos jóvenes son trazadores de los brazos espirales.



Distribución de **edades** de los cúmulos abiertos (mostrada en dos escalas distintas).

FIGURE 3 | The age distribution of the open clusters of our total sample. Two time-scales are presented, with bin width 5 Myr, extending to 300 Myr (left plot) and with bin width 40 Myr, extending to 1,500 Myr (right plot). The evolution of the number of clusters is quite smooth on the two scales.



Distribución radial según la edad

FIGURE 4 | The Galactocentric radial distribution of the open clusters sample with different age intervals. In the left-hand panel, the whole sample is presented. The minimum near 9.5 kpc is the most evident structure. In the right-hand panel, we show the radial distribution of the objects separated in three age ranges: younger than $\log(\text{age}) < 7.7$, $7.7 \leq \log(\text{age}) \leq 9.0$ and $\log(\text{age}) > 9.0$. We can see that the gap at 9.5 kpc is much wider (about 1 kpc width) and deeper in the younger cluster distribution. The gap is smaller in the intermediate age distribution and disappears in the older distribution. We interpret this as being due to open cluster's radial migrations, that tends to fill the gaps with time. Note that the brown color is the effect of superposing blue and yellow.

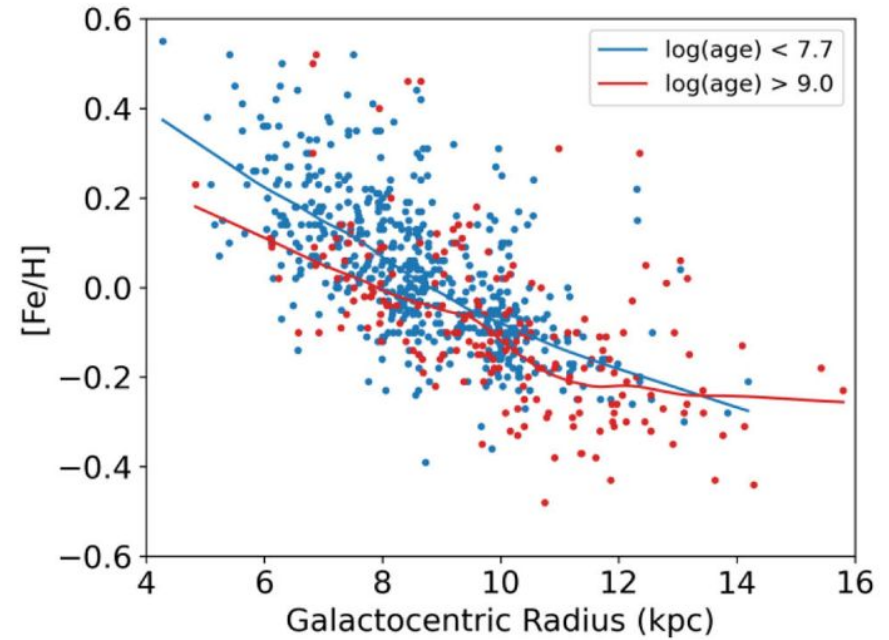
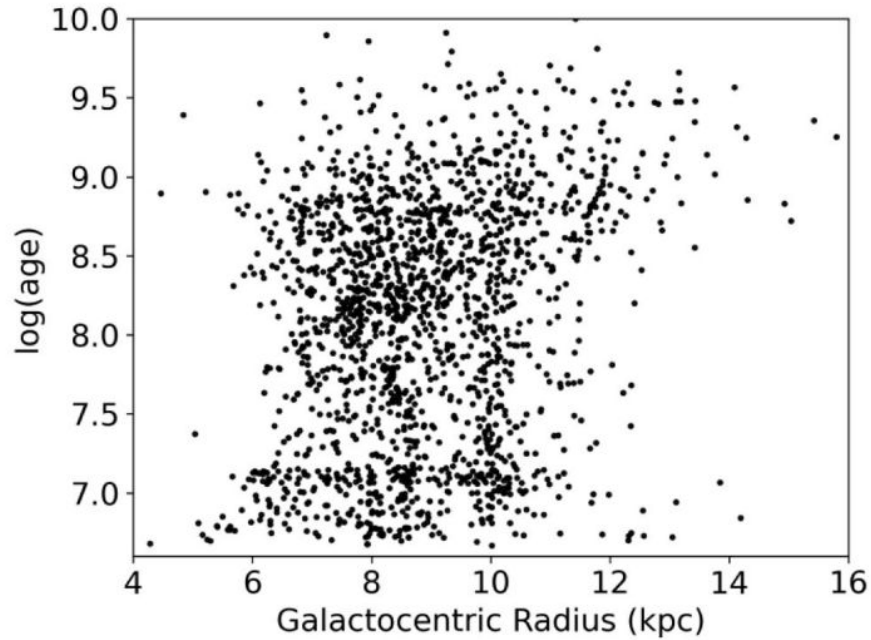


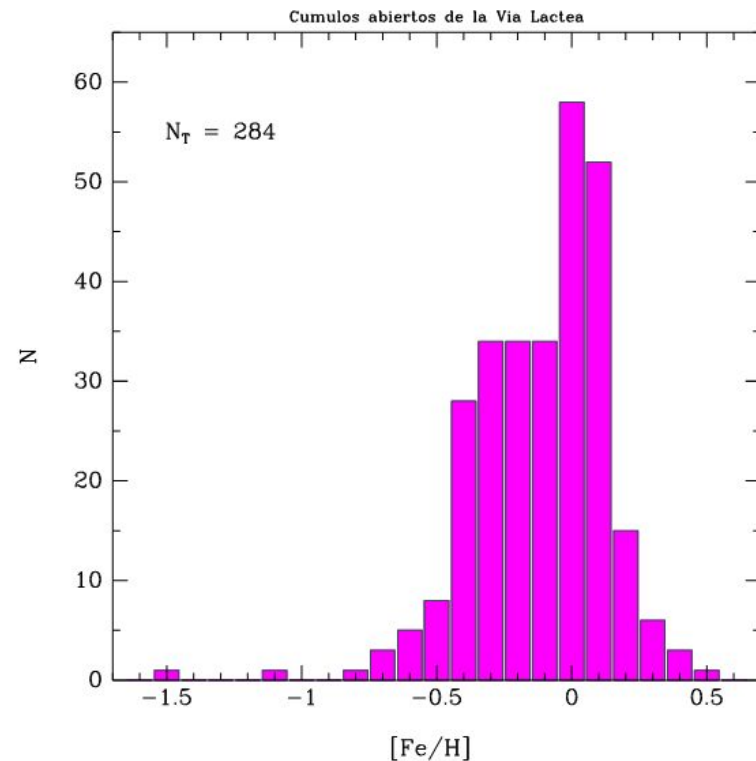
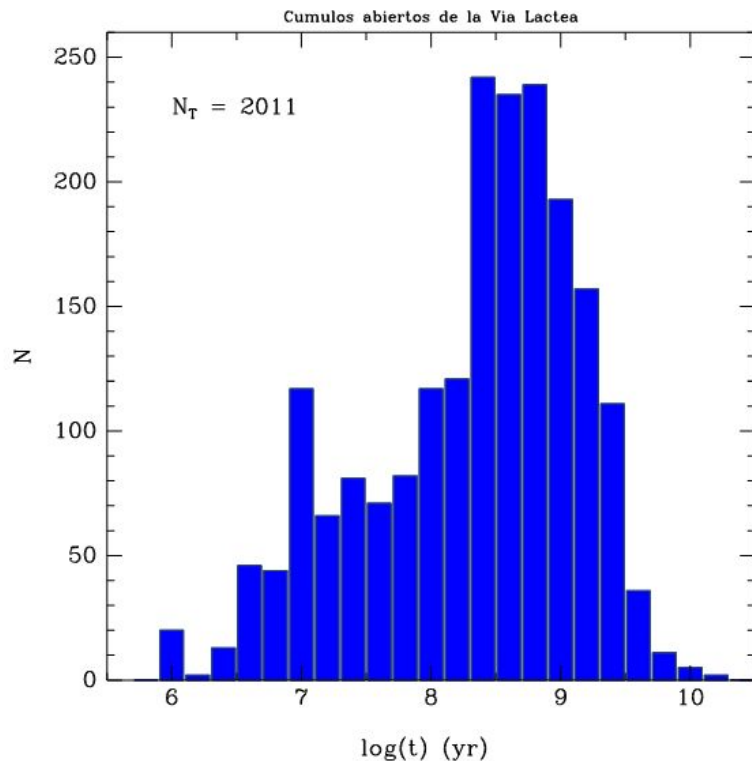
FIGURE 9 | Metallicity, equal to iron abundance $\log [Fe/H]$ normalized to the Solar value as a function of Galactic radius.

. In the lower left panel the logarithm of the age of the clusters is presented as a function of the Galactic radius, showing a prevalence of old clusters in the region with radius larger than 11 kpc. In the lower right panel, the $[Fe/H]$ distribution of the old and young population of clusters is shown with their respective non-parametric regression LOESS line over-plotted.

Distribución radial en la galaxia, según edad y metalicidad

Distribuciones en edad y metalicidad

Estos plots son algo antiguos, pero válidos



edad

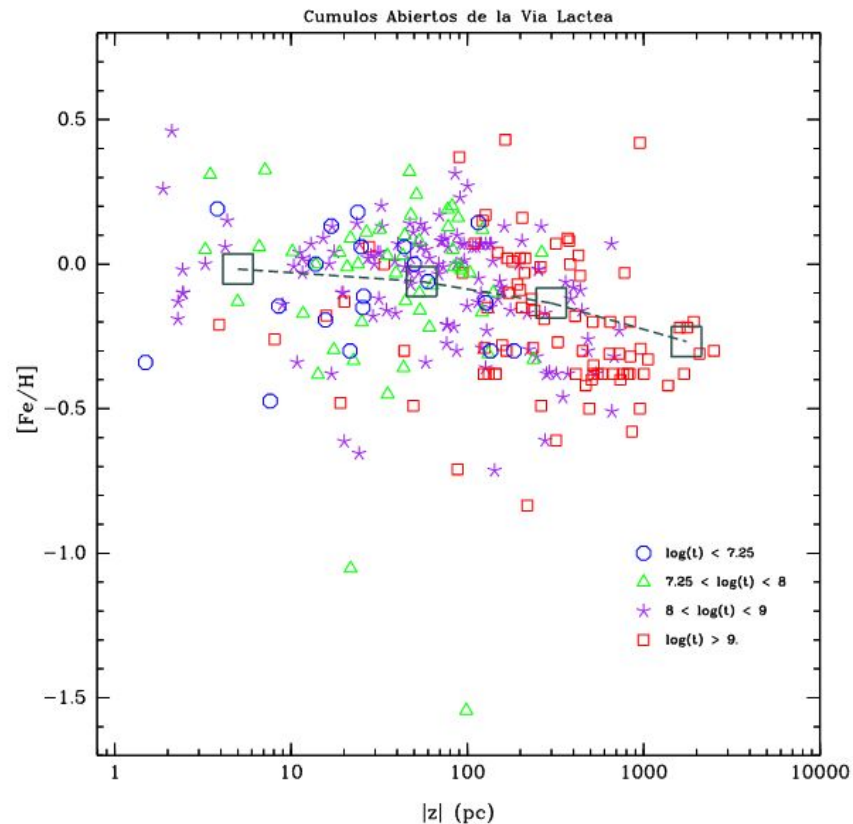
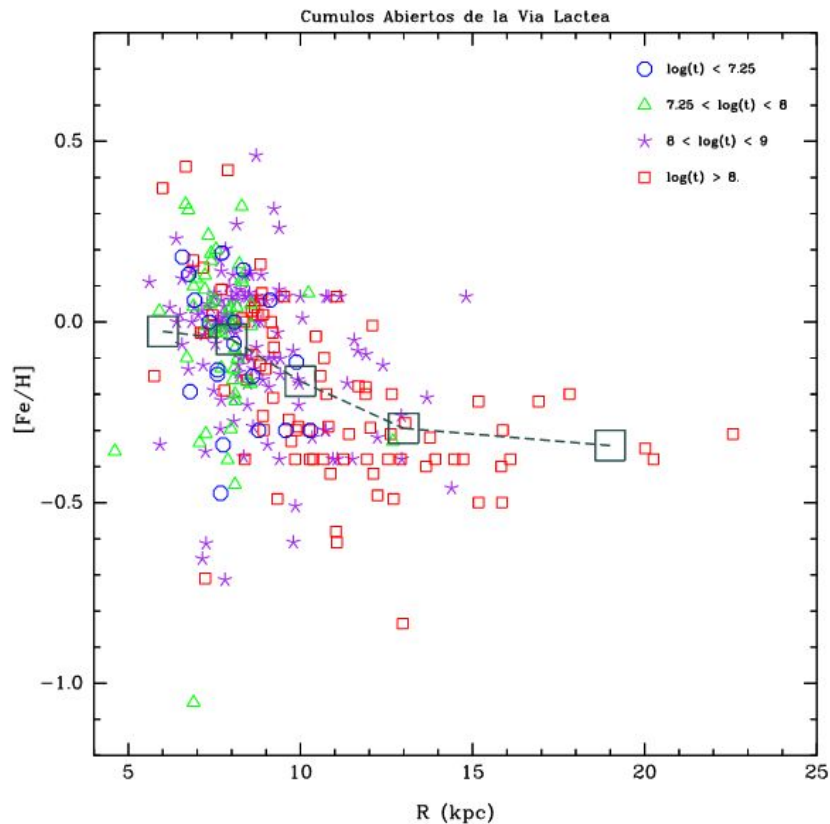
metalicidad

- A los 10^8 años, el C.A. tiene alta probabilidad de disgregarse.
- A pesar de que los cúmulos viejos pueden haberse disociado, las observaciones sugieren que la tasa de formación de cúmulos fue mayor en el pasado.
- La mayoría de los C.A. viejos están lejos del centro y lejos del plano galáctico.
- La metalicidad en los C.A. disminuye a medida que nos alejamos del centro de la galaxia.
- Cuando se formaron los C.A. en la galaxia, ya habían tenido lugar las principales etapas de enriquecimiento químico (aumento en la metalicidad).
- Los cúmulos jóvenes determinan los **brazos espirales** de la galaxia, y los de edad mediana definen el **plano galáctico**.
- Existe un **gradiente radial** en: edad y metalicidad
- Hay poca relación edad-metalicidad: la mayoría de los C.A. se formaron hace menos de 1 Gyr, cuando ya había terminado las etapas de enriquecimiento químico.

Gradientes de edad y de metalicidad

Plots algo antiguos, pero válidos

Metalicidad en función de la distancia al centro Galáctico y altura sobre el plano



Funciones de Luminosidad y de masa

Función inicial de masa (IMF - Initial Mass Function): $\Psi_0(M)$

La función de masa, $\Psi(M)$, describe cómo se distribuyen las masas de estrellas en una población estelar.

(en un evento de formación estelar, se forman muchas estrellas de poca masa y pocas estrellas de gran masa).

Función de masa depende del tiempo porque las estrellas evolucionan por eso nos interesa la IMF (es decir, la fracción de estrellas en cada rango de masa, cuando se forma el sistema).

$$dN = N_0 \Psi(M) dM$$

Número de estrellas con masa entre M y $M+dM$

$$N = N_0 \int_0^{\infty} \Psi(M) dM$$

Número total de estrellas

$$M_{\text{total}} = N_0 \int_0^{\infty} M \Psi(M) dM$$

En general $\Psi(M) \neq \Psi_0(M)$



Debido a:

- Evolución estelar
- Evolución de SFR (*star formation rate*)

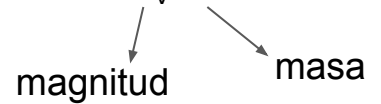
Si queremos medir la función inicial de masa en cúmulos abiertos, podemos despreciar la evolución (en cuanto a pérdida de masa de las estrellas) porque:

- Trabajamos con cúmulos jóvenes donde aún no se ha dado la evolución.
- Además, todas las componentes se formaron al mismo tiempo \rightarrow desprecio evolución (diferencias entre distintas estrellas debido a que algunas están más evolucionadas que otras).

Tasa de formación estelar: SFR (*star formation rate*)

En un cúmulo abierto, cuando se forma, hay un sólo evento de formación estelar (población estelar simple) por lo tanto: SFR = $\delta(t)$ (delta de Dirac).

Medimos masas a partir de la relación Masa - Luminosidad (obtenida de las binarias): $M_V(M)$



Lo que se observa es la Función de Luminosidad $\Phi(M_V)$

En los cúmulos abiertos la evolución es poco importante, y $\Phi(M_V) \sim \Phi_0(M_V) \rightarrow \Psi(M) \sim \Psi_0(M)$

Hay un rango de edades ideal para estudiar esto:

Las estrellas OB tienen que haberse formado pero estar aún en Secuencia Principal (S.P.) (hay pocos cúmulos abiertos que cumplen esto). Se puede estudiar en la Vía Láctea y en las Nubes de Magallanes.

Obtención de $\Psi_0(M)$

Distribución observada en magnitudes aparentes $\rightarrow N(m_V)$ para estrellas en S.P.

Se obtiene entonces una distribución de magnitudes absolutas: $N(M_V)$

Hay que corregir por:

- Contaminación por estrellas de campo
- Completitud
- Distancia y extinción

Luego, corrigiendo por efectos de evolución estelar, y suponiendo $SFR = f(t) = \delta(t)$ se obtiene la **Función inicial de Luminosidad** $\Phi_0(M_V)$

Aplicando la relación masa-luminosidad $M_V(M)$:

$$\psi_0(M) = dM_V / dM \Phi_0(M_V(M))$$

Deducción:

$$dN = N_0 \psi_0(M) dM = N_0 \Phi_0(M_V(M)) dM_V \rightarrow \psi_0(M) = \boxed{dM_V / dM} \Phi_0(M_V(M))$$

Sólo vale para cúmulos abiertos jóvenes.

Relación masa-luminosidad

Obtención de la relación masa luminosidad $M_V(M)$:

Teoría: anda mal para $M < 0.5 M_{\text{sun}}$

Observación: binarias (escasas)

Parametrización de la Función de masas inicial

Salpeter (1955) $\psi_0(M) \propto M^{-\alpha}$ $\alpha=2.35$ Scalo (1986) sugiere 3 valores distintos de α según rango de masa.

Kroupa, Tout, & Gilmore (1993):

$$\psi_0(M) \propto \begin{cases} M^{-4.5} & \text{para } M > 1 M_{\text{sun}} \\ M^{-2.2} & \text{para } 0.5 M_{\text{sun}} < M < 1 M_{\text{sun}} \\ M^{-1.2} & \text{para } M < 0.5 M_{\text{sun}} \end{cases}$$

El exponente α depende de la capacidad de fragmentación de la nube molecular que da origen al cúmulo. No se sabe por qué, pero resulta similar en distintos cúmulos.

Función de luminosidad en la vecindad solar

Las estrellas no son coetáneas (no tienen todas la misma edad), como sucede en los cúmulos abiertos.

Por lo tanto, hay que tener en cuenta la tasa de formación estelar (SFR) y la evolución estelar.

La función de luminosidad observada se obtiene integrando la $\Phi_0(M_V)$ multiplicada por la SFR para todas las estrellas formadas t_{SP} años antes del instante actual (t_0)

$$\Phi(M_V) = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \Phi_0(M_V) \cdot f(t) dt$$

$$(t_{SP} \geq t_0)$$

↑
Tiempo de vida en SP pl estrella
de magnitud absoluta M_V .

$$\Phi(M_V) = \frac{1}{t_0} \int_{t_0 - t_{SP}}^{t_0} \Phi_0(M_V) \cdot f(t) dt$$

$$(t_{SP} < t_0)$$

Donde t_{SP} es el tiempo de vida en la S.P. de una estrella de magnitud absoluta M_V .

Consideramos dos casos para SFR. Tasa de formación estelar constante:

$$\underline{\text{SFR cte}} \quad f(t) = 1$$

$$\Phi(M_V) = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \Phi_0(M_V) dt = \frac{\Phi_0(M_V)}{t_0} \left. t \right|_0^{t_0} = \Phi_0(M_V)$$

$$\Phi(M_V) = \frac{1}{t_0} \int_{t_0 - t_{SP}}^{t_0} \Phi_0(M_V) dt = \frac{\Phi_0(M_V)}{t_0} \left. t \right|_{t_0 - t_{SP}}^{t_0} = \Phi_0(M_V) \frac{t_{SP}}{t_0}$$

($t_0 - t_0 + t_{SP}$)

No es buena aprox. en nuestro caso. Consideramos $t_0 = t_D$ (edad del disco de la galaxia)

Tasa de formación estelar exponencial decreciente:

SFR exponencial decreciente

$$f(t) = e^{-\alpha t}$$

esto normaliz
= 1 $\rightarrow \alpha t_0 e^{\alpha t_0} = e^{\alpha t_0} - 1$

$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Phi_0(M_V) = \Phi(M_V) \frac{\alpha t_0 e^{\alpha t_0}}{(e^{\alpha t_0} - 1)} \quad \text{p/ } t_{SP} > t_0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\Phi}_0(M_V) = \bar{\Phi}(M_V) \frac{\alpha t_0 e^{\alpha t_0}}{(e^{\alpha t_{SP}} - 1)} e^{\alpha t_0 - 1} \quad \text{p/ } t_{SP} < t_0 \end{array} \right.$$

Normalizamos las funciones:

$$\left. \begin{array}{l} p) \ t_{sp} > t_0 \rightarrow \Phi_0(M_V) = \bar{\Phi}(M_V) \\ p) \ t_{sp} < t_0 \rightarrow \Phi_0(M_V) = \frac{e^{\alpha t_0} - 1}{e^{\alpha t_{sp}} - 1} \cdot \bar{\Phi}(M_V) \end{array} \right\}$$

Porque las estrellas aún no evolucionaron así que las distribuciones son iguales.

Detalles de la cuenta del SFR exponencial decreciente: $f(t) = e^{-\alpha t}$

$$|t_{sp} \geq t_0 \Rightarrow \Phi(M_V) = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \Phi_0(M_V) e^{-\alpha t} dt = \frac{1}{t_0} \Phi_0(M_V) \cdot \frac{e^{-\alpha t}}{(-\alpha)} \Big|_0^{t_0} =$$

$$= \Phi_0(M_V) \cdot \frac{e^{-\alpha t_0} - 1}{(-\alpha) t_0} = \Phi_0(M_V) \cdot \frac{[1 - e^{-\alpha t_0}]}{\alpha t_0} \cdot \frac{e^{\alpha t_0}}{e^{\alpha t_0}}$$

$$\Phi(M_V) = \Phi_0(M_V) \cdot \frac{[e^{\alpha t_0} - 1]}{\alpha t_0 e^{\alpha t_0}}$$

$$\Phi_0(M_V) = \bar{\Phi}(M_V) \cdot \frac{\alpha t_0 e^{\alpha t_0}}{(e^{\alpha t_0} - 1)}$$

$$P | t_{\text{SP}} < t_0 \Rightarrow \bar{\Phi}(M_V) = \frac{1}{t_0} \int_{t_0 - t_{\text{SP}}}^{t_0} \bar{\Phi}_0(M_V) \cdot e^{-\alpha t} dt = \frac{\bar{\Phi}_0(M_V)}{\alpha t_0} \left[\underbrace{e^{-\alpha(t_0 - t_{\text{SP}})}}_{e^{-\alpha t_0 + \alpha t_{\text{SP}}}} - e^{-\alpha t_0} \right]$$

$$= \frac{\bar{\Phi}_0(M_V)}{\alpha t_0} \cdot e^{-\alpha t_0} [e^{\alpha t_{\text{SP}}} - 1] = \frac{\bar{\Phi}_0(M_V)}{\alpha t_0} \frac{e^{\alpha t_{\text{SP}}} - 1}{e^{\alpha t_0}}$$

$$\bar{\Phi}(M_V) = \bar{\Phi}_0(M_V) \cdot \frac{e^{\alpha t_{\text{SP}}} - 1}{\alpha t_0 e^{\alpha t_0}}$$

$$\bar{\Phi}_0(M_V) = \bar{\Phi}(M_V) \cdot \frac{\alpha t_0 e^{\alpha t_0}}{(e^{\alpha t_{\text{SP}}} - 1)}$$

Función inicial de Luminosidad $\bar{\Phi}_0(M_V)$ es la proporción con la que se forman estrellas de distintas luminosidades en cada episodio de formación estelar.

Constraining the star formation rate in the solar neighbourhood with star clusters

C. Bonatto[★] and E. Bica

Departamento de Astronomia, Universidade Federal do Rio

Departamento de Astronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre 91501-970, RS, Brazil

[link al paper](#)

* embedded clusters (ECs)

* age distribution function (ADF)

The best match between observed and simulated ADFs corresponds to a **non-constant SFR**, with **enhanced rates for the ages ≤ 9 Myr and 220–600 Myr** (the so-called local starburst). The average SFR is $\overline{\text{SFR}} \approx (2500 \pm 500) M_{\odot} \text{ Myr}^{-1}$, corresponding to the average density $\overline{\Sigma}_{\text{SFR}} \approx (790 \pm 160) M_{\odot} \text{ Myr}^{-1} \text{ kpc}^{-2}$. These values agree with the SFR inferred from ECs, but represent only ~ 16 per cent of the rate implied by field stars. Both the local starburst and the recent formation (≤ 9 Myr) have ADF amplitudes suggesting periods with a SFR about twice the average value. We also find that **91.2 ± 2.7 per cent of the clusters created in the solar neighbourhood dissolve before 10 Myr**, which is consistent with the rate of EC dissolution.