



Universidad de La Laguna

MÁSTER ASTROFÍSICA

Estudio de diagramas H-R usando GAIA

FÍSICA GALÁCTICA

Autor:

Gonzalo Marrero Ramallo

Noviembre, 2022

1. Abstract

El estudio de diagramas H-R se trata de una técnica ideal para determinar una gran cantidad de propiedades de las estrellas así como su secuencia evolutiva. Es por tanto una herramienta de gran utilidad para establecer la **edad** o la **metalicidad** de un cúmulo estelar. El propósito principal de este documento es la creación de diagramas H-R y el ajuste de isocronas para establecer los rangos de edad y metalicidad de los cúmulos. La metodología a tener en cuenta es la extracción adecuada de los datos de dos cúmulos: el cúmulo de Híades (cúmulo abierto) y 47 Tucanae (cúmulo globular), de la base de datos de GAIA, la importación de estos datos en el software TOPCAT, para construir los diagramas H-R, eliminando errores astrométricos y fotométricos y ajustar las isocronas para obtener los rangos de metalicidad y edad de los cúmulos. En cuanto a los resultados obtenidos, se ha determinado una edad de en torno entre 600 y 1000 millones de años para el cúmulo de Híades y una metalicidad entre 0.015 y 0.018. Para el cúmulo 47 Tucanae, se ha determinado un rango de edad cercano a los 13 Gyr y una metalicidad en torno a 0.004 - 0.006. Como conclusión, se determina que los resultados obtenidos se ajustan a lo esperado y ponen de manifiesto la importancia del uso de los diagramas H-R para el análisis de cúmulos y estrellas.

2. Introducción

En este informe se realiza un estudio de diagramas H-R utilizando datos de GAIA. El observatorio espacial GAIA de la ESA (European Space Agency), se lanzó al espacio en el año 2013, y se estima que esté operativo hasta 2022. Fue diseñado para la astrometría, que consiste en la medición de las posiciones de los objetos celestes. De ahí se puede medir magnitudes como la paralaje, los movimientos propios y posiciones con gran precisión. Se ha construido el catálogo 3D más grande y preciso, el cual contabiliza en torno a un billón de objetos astronómicos, principalmente estrellas, aunque en menor medida planetas, asteroides o cometas. GAIA se sitúa en el punto de Lagrange (L2), el cual le provee de una estabilidad gravitatoria y equilibrio térmico [1].

El diagrama H-R (Hertzsprung- Russell), es un gráfico de dispersión de estrellas el cual indica la relación de magnitudes absolutas o luminosidades de las estrellas en comparación con las clasificaciones espectrales o las temperaturas efectivas. Este diagrama permite entender la evolución estelar y en el caso que nos ocupa poder realizar un análisis de la distribución de estrellas de cúmulos estelares. La edad de los cúmulos se puede calcular con el diagrama H-R, ya que la velocidad de evolución de una estrella depende de su masa, el punto en el que la estrella comienza a salirse de la secuencia principal para convertirse en una gigante muestra la edad del cúmulo [2]. En concreto, se realizará la construcción de dos diagramas H-R del cúmulo de Híades y de 47 Tuc, utilizando la base de datos de GAIA ¹.

Los cúmulos estelares son grupos de estrellas relacionadas que se mantienen unidas por efecto de la gravedad. Se clasifican en dos grandes grupos: los cúmulos abiertos (no poseen forma definida) y los cúmulos globulares (esféricos o casi esféricos). Los cúmulos abiertos están formados por cientos de estrellas jóvenes. En cambio, los cúmulos globulares contienen mil veces esa cantidad, y suelen ser estrellas mucho más viejas. Los cúmulos globulares forman un halo alrededor de nuestra galaxia, la Vía Láctea,

¹<https://gea.esac.esa.int/archive/>

mientras que los abiertos se sitúan en los brazos de la espiral. Los cúmulos abiertos son mucho más numerosos que los globulares: se conocen unos 1.000 en nuestra galaxia mientras que sólo hay unos 140 globulares [3].

El cúmulo de las Híades es el cúmulo abierto más cercano al sistema solar. El satélite Hipparcos y el telescopio espacial Hubble han sido utilizados para establecer la distancia aproximada al cúmulo desde el sistema solar en torno a 47 pársecs (152 años luz) hasta el centro del cúmulo. Mediante la elaboración del diagrama H-R, se podrá determinar la edad aproximada de las estrellas de este cúmulo abierto. Consta de unas 80 estrellas situadas en una esfera de unos 12 pársecs de diámetro. El cúmulo en su totalidad tiene unos 23 pársec (75 años luz), el grupo central de estrellas tiene unos 3 pársec de diámetro (10 años luz) [4]

Por otro lado, el cúmulo 47 Tucanae o simplemente 47 Tuc, es un cúmulo globular situado en la constelación del Tucán. Posee un diámetro de alrededor de 120 años luz, y puede verse a simple vista, con una magnitud visual de 4,0 [3].

Los principales objetivos de este informe, será familiarizarse con la base de datos de GAIA, comprender los conceptos básicos de cómo crear un diagrama H-R, así como detectar y acotar los datos para obtener la información para la construcción de estos, así como los posibles errores. Por otro lado, el detallar de forma cualitativa el análisis de poblaciones estelares en estos diagramas y la importancia de encajar las isocronas adecuadas para la extracción de información acerca de dichas poblaciones estelares de estudio. En el caso del informe, los cúmulos estelares.

3. Metodología

Para realizar el diagrama H-R, se debe acudir a la página de **base de datos de GAIA**.², para descargar los datos y posteriormente cargarlos en el programa TOP-CAT®. Para ello, en la base de datos de GAIA, se debe realizar la consulta indicando los datos que queremos obtener. Para la selección de datos de un conjunto de estrellas a una distancia de 100 pc, se debe indicar los parámetros a extraer, la base de datos y las condiciones (distancia de 100 pc, en este supuesto).

```
1 SELECT dr3.ra, dr3.dec, dr3.parallax, dr3.phot_g_mean_mag, dr3.bp_rp,  
2 dr3.astrometric_excess_noise, dr3.phot_bp_rp_excess_factor,  
3 dr3.pmra, dr3.pmra_error, dr3.pmdec, dr3.pmdec_error, dr3.l, dr3.b  
4 FROM gaiadr3.gaia_source AS dr3  
5 WHERE dr3.parallax > 10  
6 AND dr3.parallax_over_error > 10  
7 AND dr3.phot_bp_mean_flux_over_error > 10  
8 AND dr3.phot_rp_mean_flux_over_error > 10
```

Figura 1: Extracción datos grupo de estrellas a 100 pc. Fuente: elaboración propia.

Para la selección de datos de GAIA, en el caso de los cúmulos, se debe utilizar la *cone search*, indicando los datos de ascensión recta en grados, la declinación en grados y el ángulo de apertura desde nuestro punto de observación hasta el cúmulo, utilizando el radio del cúmulo y la distancia.

Hay que tener en cuenta que, en el caso de esta base de datos, la paralaje va en miliarcosegundo de arco. Para hacer la conversión de pársec a miliarcosegundo, se

²<https://gea.esac.esa.int/archive/>

```

1 SELECT *, DISTANCE(
2     POINT(66.75, 15.87),
3     POINT(ra, dec)) AS ang_sep
4 FROM gaiadr3.gaia_source
5 WHERE 1 = CONTAINS(
6     POINT(66.75, 15.87),
7     CIRCLE(ra, dec, 3.29))
8 AND phot_g_mean_mag < 20.5

```

Figura 2: Extracción de datos de GAIA. Cúmulo de Híades. Fuente: elaboración propia.

emplea la siguiente fórmula, y calcular la distancia en pársecs, se emplea la siguiente fórmula:

$$d(pc) = \frac{1000}{parallax(mas)} \quad (1)$$

De esta manera, mediante trigonometría y para cada cúmulo, obtendremos el ángulo de separación, conocidas la distancia al cúmulo y el radio, donde se encuentran las estrellas del cúmulo. Se escoge normalmente, el radio más pequeño, para acotar la búsqueda. La ascensión recta y la declinación, se han de pasar a grados. A continuación, se muestran los datos para cada cúmulo.

Cúmulo	Híades	47 Tuc
Distancia	47 pc	4±0.35 pc
Radio	2.7 pc	18.4 pc
Ascensión Recta	4h 27m 0s	0h 24m 5.67s
Declinación	15 ^o 52'12"	-72 ^o 04' 52.6"

Tabla 1: Información de los cúmulos de Híades y 47 Tuc

Una vez descargados los datos de GAIA, se importan al programa TOPCAT. Por otro lado, se definen dos nuevas columnas que nos harán falta más adelante para los gráficos de los diagramas H-R: la magnitud absoluta y la distancia en pársecs. Se recuerda que la magnitud absoluta se corresponde con la magnitud aparente que tiene un cuerpo celeste si lo llevamos a una distancia de 10 pársec, en un espacio completamente vacío sin absorción interestelar. Por tanto, si llevamos todas nuestras estrellas a la misma distancia, al transformar a magnitudes absolutas, podremos comparar las estrellas entre sí en el mismo diagrama. Para ello, se debe crear en el programa TOPCAT, una nueva columna “g abs”, así como la distancia, aplicando la fórmula vista del paralaje y la distancia (1).

14	14	<input checked="" type="checkbox"/>	g abs	\$14	Double	mag	phot_g_mean_mag + 5*log10(parallax/100)
15	15	<input checked="" type="checkbox"/>	d	\$15	Double	pc	1000/parallax

Figura 3: Creación de columnas de magnitud absoluta y distancia. Fuente: elaboración propia.

Se grafica en TOPCAT el diagrama H-R, representando color frente a magnitud absoluta. En la siguiente imagen, se visualiza un ejemplo de diagrama H-R, el cual se realizó siguiendo la guía de la práctica, descargando de la base de datos de GAIA un conjunto de estrellas a 100 pársecs.

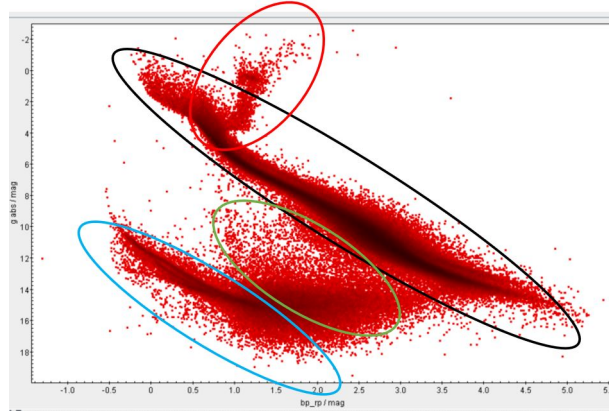


Figura 4: Diagrama H-R, conjunto de estrellas a una distancia de 100 pc. Fuente: elaboración propia.

Se toma este diagrama para comentar las partes principales y los errores que debemos limpiar para obtener el resultado deseado. Se observa la secuencia principal (círculo negro), la rama de gigantes (círculo rojo) y la rama de enanas blancas (círculo cian). Sin embargo, en medio notamos la presencia de estrellas (círculo verde) que, según la teoría de evolución estelar, sostiene el diagrama H-R, no deberían estar ahí. Se debe “limpiar” el diagrama eliminando **errores astrométricos** y **errores fotométricos**.

El exceso de puntos en el diagrama se trata de errores astrométricos. Para ello, utilizando TOPCAT, graficamos los datos eliminando este error (en este caso nos referimos al exceso de ruido de la fuente astrometric excess noise). En este ejemplo, se impone que sea inferior a 1.

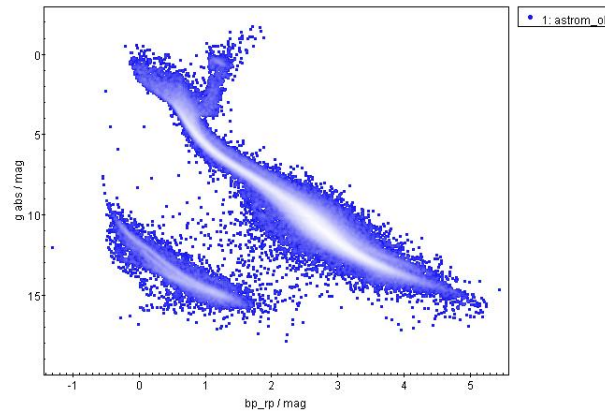


Figura 5: Diagrama H-R, tras corrección de errores astrométricos. Fuente: elaboración propia.

El siguiente paso es limpiar los **errores fotométricos**. Para ello se representa el *bp rp colour* contra el *phot bp rp excess factor*.

La cantidad en el eje Y es una medida de la fiabilidad fotométrica, quedando los valores mayores considerados como desechables. Se define una región en este espacio para excluir los valores inusualmente altos.

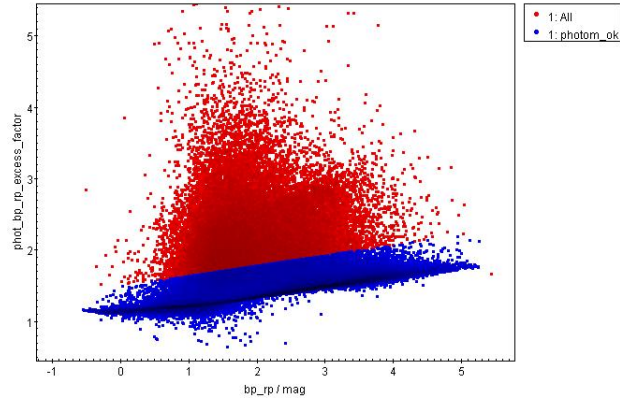


Figura 6: Diagrama H-R. Selección de región excluyendo valores desechables. Fuente: elaboración propia.

Se grafica el diagrama H-R (color - magnitud), tras la corrección de los errores astrométricos y fotométricos.

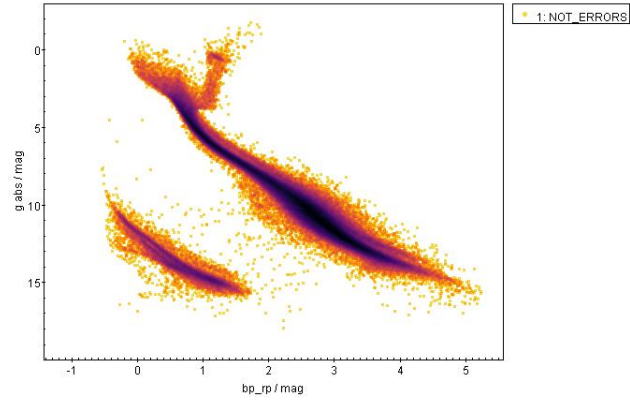


Figura 7: Diagrama H-R, tras eliminar errores astrométricos y fotométricos. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se representa la magnitud y la distancia, y se realiza una selección mediante un polígono, de las estrellas que estén en el rango de 100 pc. Se vuelve a representar el diagrama color - magnitud, seleccionando este grupo de estrellas.

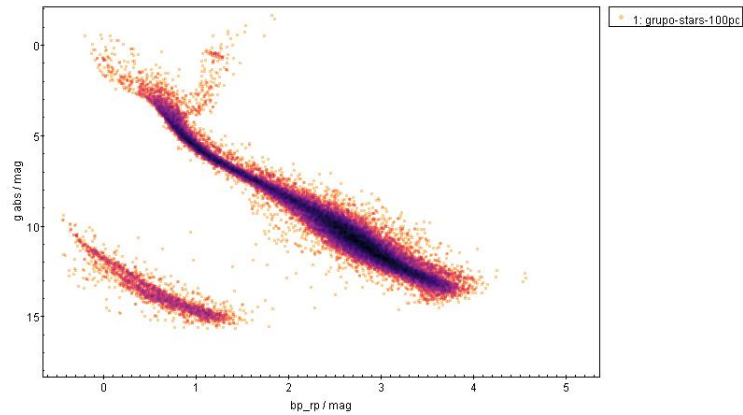


Figura 8: Diagrama H-R grupo de estrellas a 100pc. Fuente: elaboración propia.

Respecto al ajuste de isocronas, se acude a la [web](http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd) ³ facilitada en el documento de esta práctica para descargarlas. Se selecciona el sistema fotométrico *Gaia EDR3* y se selecciona un rango de valores de edad y metalicidad, indicando el intervalo entre los valores inicial y final, con el objetivo de descargar varias isocronas para que al graficarlas sobre nuestro diagrama H-R, se visualice cual encaja mejor. Se importa las isocronas a TOPCAT. Se grafica sobre el diagrama H-R.

En primer lugar, se pone como tercera variable la edad, en el diagrama de color - magnitud y las isocronas. De esta manera, se podrá determinar la edad del cúmulo, observando aquella isocrona que encaje mejor con el trazado de que sigue nuestras estrellas en el diagrama H-R.

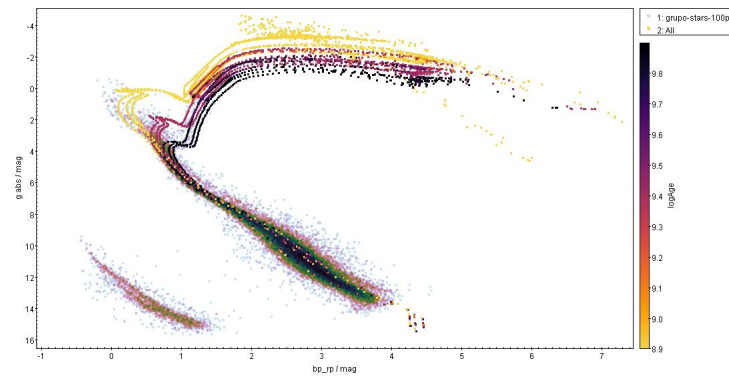


Figura 9: Diagrama H-R grupo de estrellas a 100 pc. Ajuste de las isocronas. Edad del cúmulo (escala logarítmica). Fuente: elaboración propia.

De igual manera, para la metalicidad.

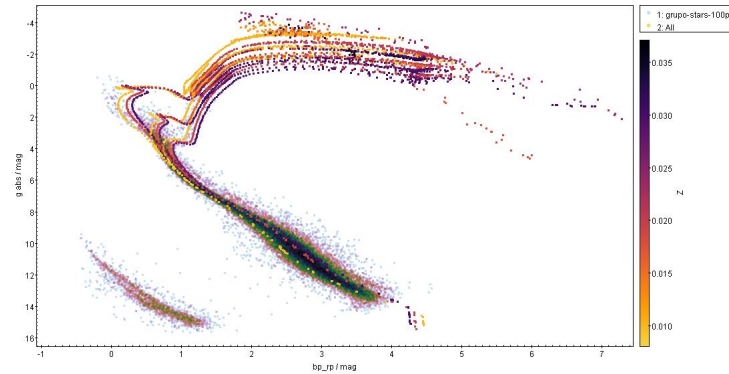


Figura 10: Diagrama H-R grupo de estrellas a 100 pc. Ajuste de las isocronas. Metalicidad del cúmulo. Fuente: elaboración propia.

³<http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>

4. Discusión y resultados

A continuación, siguiendo la metodología explicada en el apartado anterior, se muestran los resultados para cada uno de los cúmulos de estudio y la discusión de los mismos. Finalmente se presenta una tabla con los principales resultados, a modo de resumen.

4.1. Cúmulo abierto de las Híades

Se recuerda que el cúmulo de las **Híades** es el **cúmulo abierto** más cercano al sistema solar. Se encuentra a unos 47 pársec de distancia y el grupo central del cúmulo se encuentra en una esfera de radio 2.7 pársec.

Empleando los datos mencionados en la tabla 1, la ascensión recta y declinación en grados, se extrae los datos de la base GAIA.

En primer lugar, se representa el diagrama H-R (color - magnitud) con los datos brutos obtenidos (aún sin limpiar los errores).

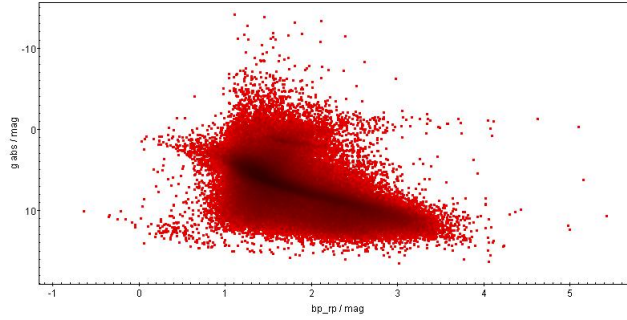


Figura 11: Diagrama H-R cúmulo abierto de las Híades. Datos en bruto. Fuente: elaboración propia.

Se prosigue realizando, en primer lugar la limpieza de los errores astrométricos. A continuación, se visualiza la comparativa con los datos en bruto, y finalmente, tras realizar la limpieza de los errores, nos queda lo siguiente:

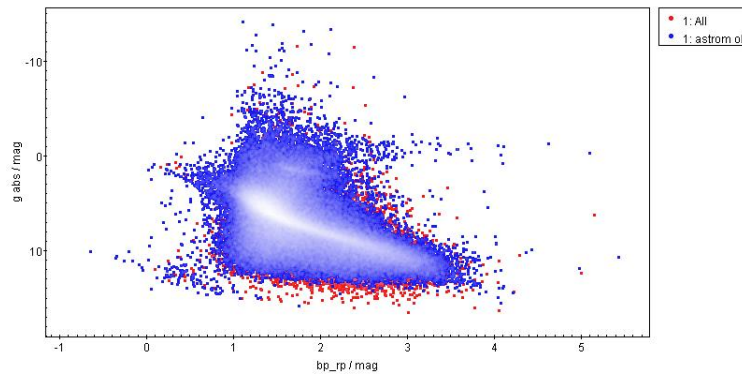


Figura 12: Diagrama H-R cúmulo abierto de las Híades. Comparativa datos en bruto (All) y datos tras aplicar la limpieza de los errores astrométricos (astrom ok). Fuente: elaboración propia.

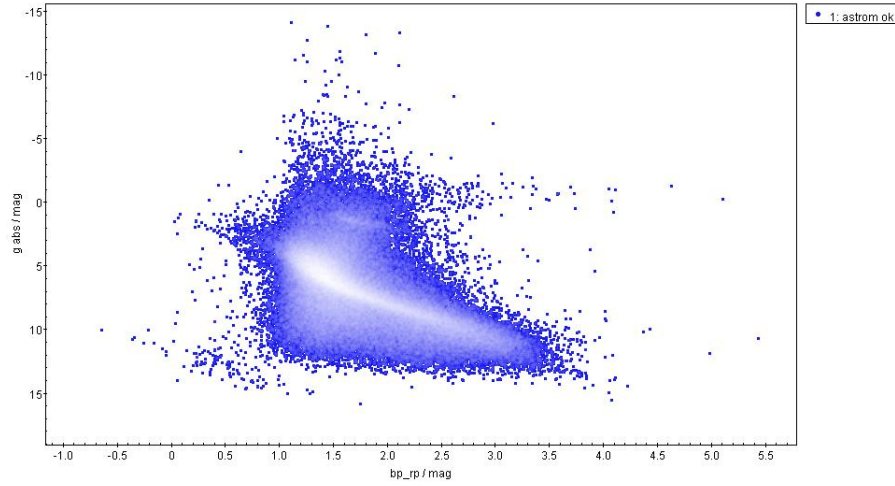


Figura 13: Diagrama H-R cúmulo abierto de las Híades. Datos tras aplicar la limpieza de los errores astrométricos (astrom ok). Fuente: elaboración propia.

A continuación, se realiza la limpieza de los errores fotométricos, siguiendo la metodología. Una vez eliminados, se combinan ambos errores, dejando visible el diagrama completamente limpio de errores.

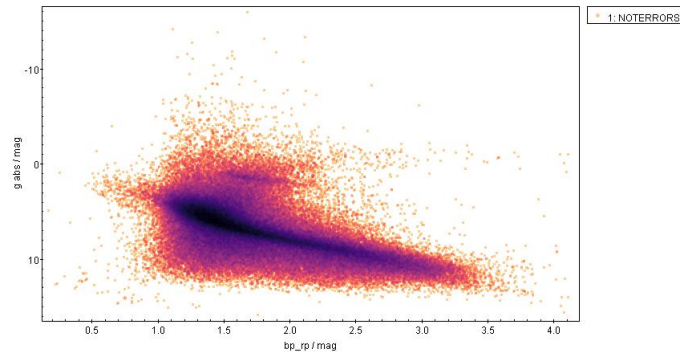


Figura 14: Diagrama H-R cúmulo abierto de las Híades. Datos tras aplicar la limpieza de los errores astrométricos (astrom ok) y fotométricos (photom ok). Fuente: elaboración propia.

Conocida la distancia al cúmulo, para acotar algo más el diagrama, representamos la magnitud absoluta frente a la distancia y seleccionamos aquellas estrellas que se encuentren en el rango de distancias en torno a 47 pársec. Se grafica el diagrama H-R (color - magnitud), de esta selección de estrellas.

Se visualiza que tal y como se comentó, los cúmulos abiertos, en concreto este cúmulo de las Híades, posee en torno a 80 estrellas [4], lo que es coherente con la imagen de la figura 15.

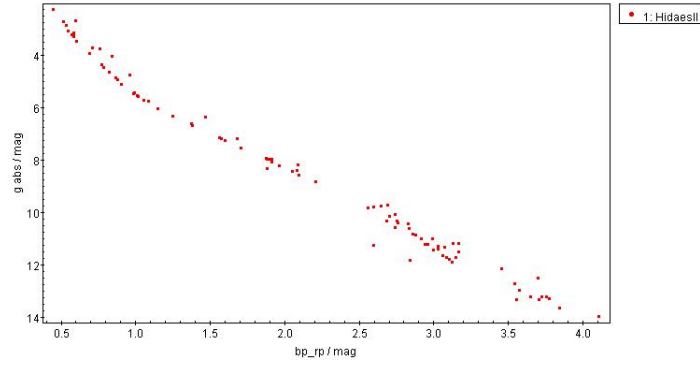


Figura 15: Diagrama H-R cúmulo abierto de las Híades, tras seleccionar el conjunto de estrellas que están en torno a los 47 pársec. Fuente: elaboración propia.

Por último, en cuanto al ajuste de las **isocronas**, se conoce que el cúmulo de las Híades posee una edad aproximada de 625 millones de años [4]. Por tanto, a la hora de realizar la descarga de las isocronas de la web, establecemos un rango de edades en torno a esta cifra, para comprobar que este valor de edad se ajusta a las observaciones. En concreto, he considerado descargar isocronas entre 7.5 y 9 dex. Para la metalicidad, se ha tomado un rango de 0.015 (metalicidad solar) y 0.04 [5].

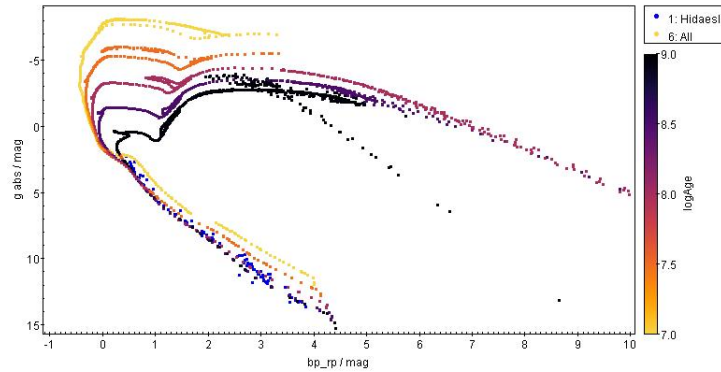


Figura 16: Diagrama H-R cúmulo abierto de las Híades tras graficar el conjunto de isocronas. En el eje derecho, se grafica la edad en unidades de log. Fuente: elaboración propia.

Se observa que la isocrona que mejor se ajusta es la de color **negro**. Según la escala de colores del eje que mide la edad en escala logarítmica, se encuentra entre 8.5 y 9. La edad estimada del cúmulo es de 625 millones de años (8.8 dex) [4]. Se comprueba que los datos se ajustan.

Finalmente, respecto a la metalicidad, si se grafica las isocronas y en el eje derecho se representa la metalicidad, se observa lo siguiente: se observa que la metalicidad se ajusta por la isocrona que presenta una metalicidad entre 0.015 - 0.018. De acuerdo a las referencias (Bojacá Rojas, N, 2021) [5], un rango razonable de metalicidades para este cúmulo se puede situar entre 0.015 y 0.04, por lo que nuestros resultados se sitúan en el rango esperable. El cúmulo de las Híades, cabe destacar, posee una variedad de estrellas, que se sitúa en estrellas tipo B (enanas blancas), tipo G, tipo A y tipo F y tipo M, lo que establece una complejidad a la hora de establecer una horquilla en la metalicidad que sea más ajustada [6].

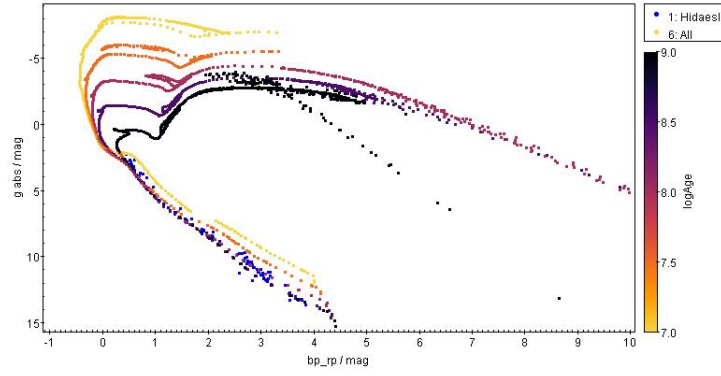


Figura 17: Diagrama H-R cúmulo abierto de las Híades tras graficar el conjunto de isocronas. En el eje derecho, se grafica la metalicidad. Fuente: elaboración propia.

4.2. Cúmulo globular 47 Tucanae

El cúmulo 47 Tucanae es el segundo cúmulo globular más brillante después de Omega Centauri, y revela telescópicamente unas diez mil estrellas, muchas de las cuales aparecen dentro de un pequeño núcleo central denso. Se encuentra a unos 4 kpc pársec de distancia y en una esfera de radio 18.4 pársec.

Empleando los datos mencionados en la tabla 1, la ascensión recta y declinación en grados, se extrae los datos de la base GAIA.

En primer lugar, se representa el diagrama H-R (color - magnitud) con los datos brutos obtenidos (aún sin limpiar los errores).

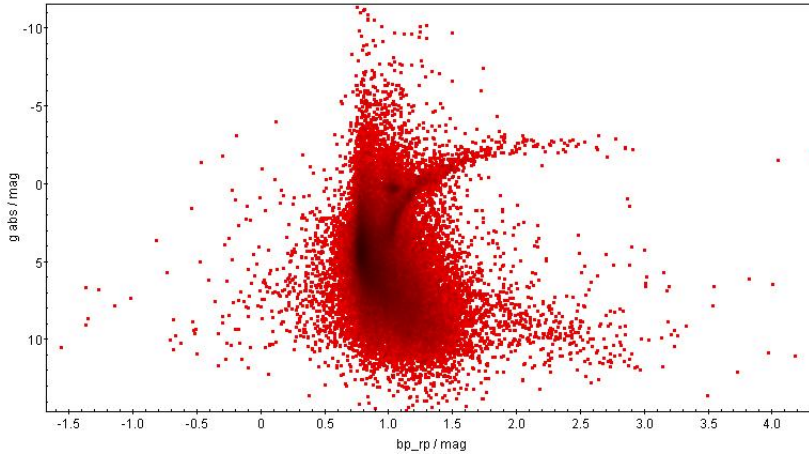


Figura 18: Diagrama H-R cúmulo globular 47 Tucanae. Datos en bruto. Fuente: elaboración propia.

Se prosigue realizando, en primer lugar la limpieza de los errores astrométricos. A continuación, se visualiza la comparativa con los datos en bruto, y finalmente, tras realizar la limpieza.

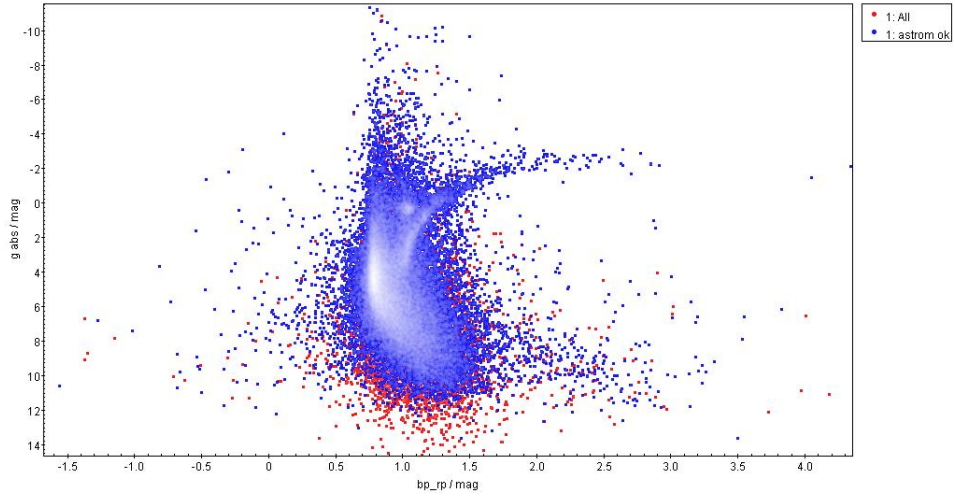


Figura 19: Diagrama H-R cúmulo globular 47 Tucanae. Comparativa datos en bruto (All) y datos tras aplicar la limpieza de los errores astrométricos (astrom ok). Fuente: elaboración propia.

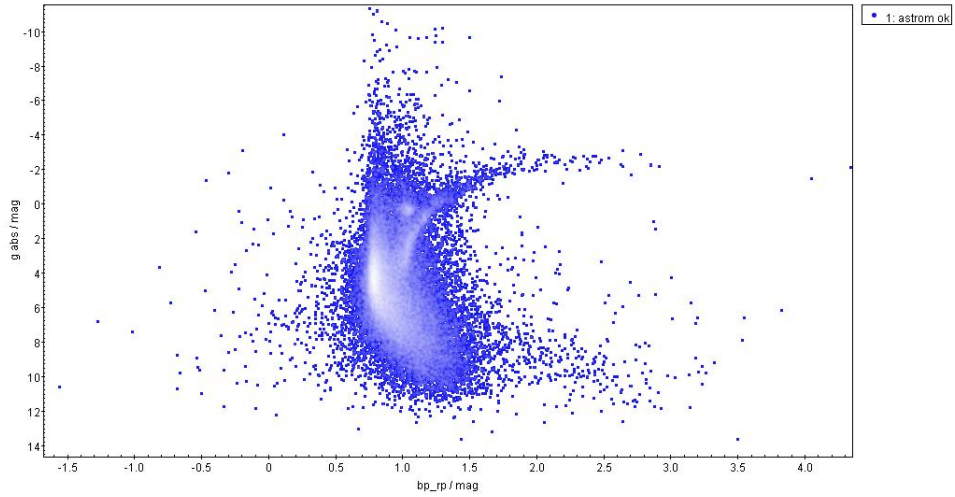


Figura 20: Diagrama H-R cúmulo globular 47 Tucanae. Datos tras aplicar la limpieza de los errores astrométricos (astrom ok). Fuente: elaboración propia.

A continuación, se realiza la limpieza de los errores fotométricos, siguiendo la metodología. Una vez eliminados, se combinan ambos errores, dejando visible el diagrama completamente limpio de errores.

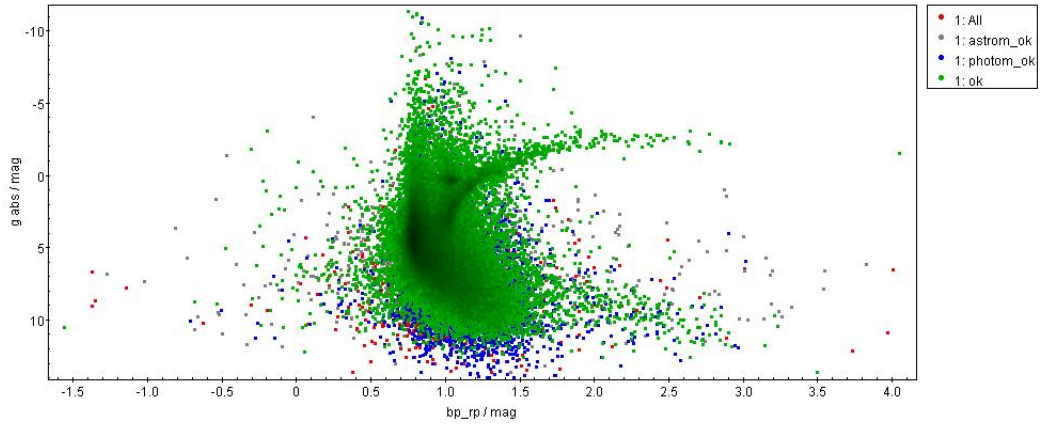


Figura 21: Diagrama H-R cúmulo globular 47 Tucanae. Datos comparando los datos en bruto y la aplicación la limpieza de los errores astrométricos (astrom ok) y fotométricos (photom ok). Fuente: elaboración propia.

Conocida la distancia al cúmulo, para acotar algo más el diagrama, representamos la magnitud absoluta frente a la distancia y seleccionamos aquellas estrellas que se encuentren en el rango de distancias en torno a 3500 y 4500 pársec. Se grafica el diagrama H-R (color - magnitud), de esta selección de estrellas.

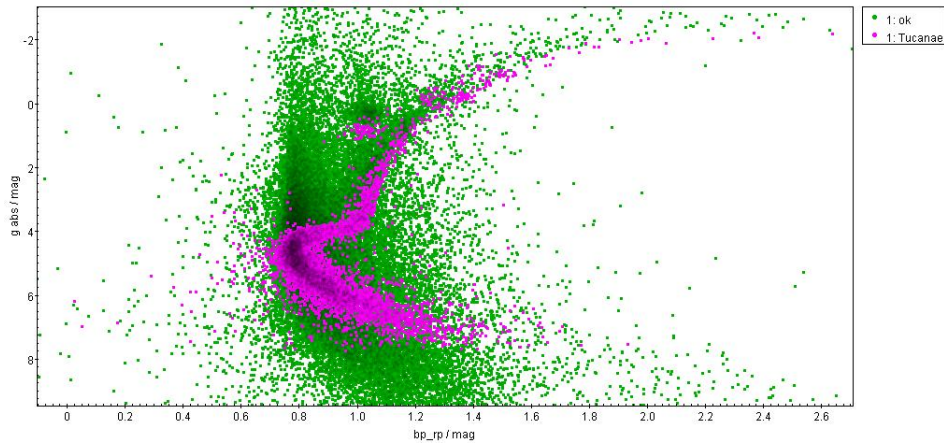


Figura 22: Diagrama H-R cúmulo globular 47 Tucanae, tras seleccionar el conjunto de estrellas que están en torno a 3500-4500 pársec.y comparado con el total. Fuente: elaboración propia.

Se visualiza que tal y como se comentó, los cúmulos globulares poseen muchas más estrellas que un cúmulo abierto, lo que es coherente con la imagen de la figura.

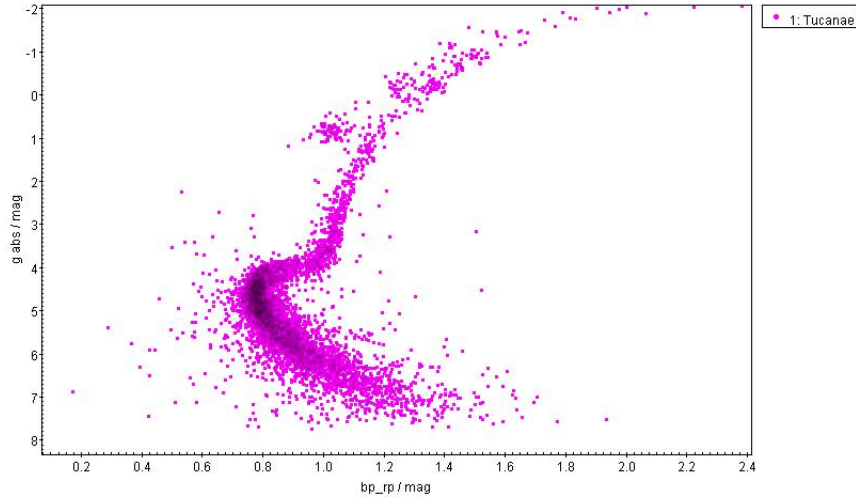


Figura 23: Diagrama H-R cúmulo globular 47 Tucanae, tras seleccionar el conjunto de estrellas que están en torno a 3500-4500 pársec. Fuente: elaboración propia.

Por último, en cuanto al ajuste de las **isocronas**, se conoce que el cúmulo globular 47 Tucanae posee una edad aproximada de 13 Giga años [7]. Por tanto, a la hora de realizar la descarga de las isocronas de la web, establecemos un rango de edades en torno a esta cifra, para comprobar que este valor de edad se ajusta a las observaciones. En concreto, se ha considerado descargar isocronas entre 9.5 y 10 dex. Respecto a la extinción, en el caso de Tucanae, se considera: 0.124. El rango de metalicidad acorde a la bibliografía, es 0.004 - 0.006 [7].

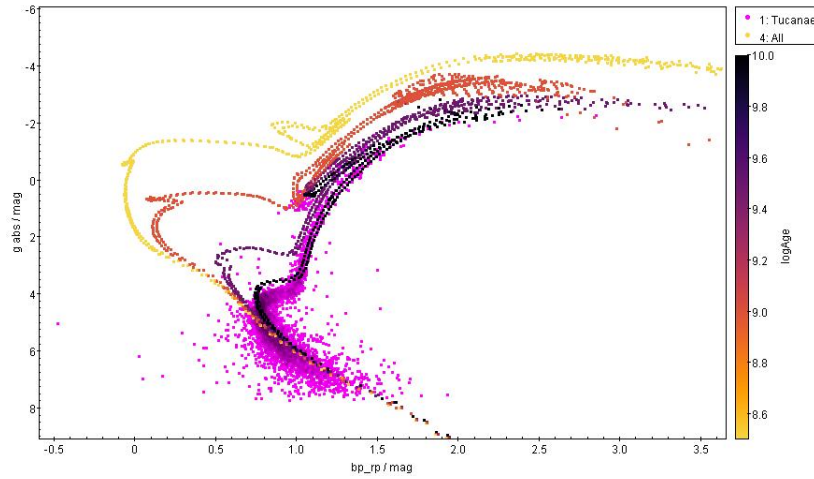


Figura 24: Diagrama H-R cúmulo globular 47 Tucanae tras graficar el conjunto de isocronas. En el eje derecho, se grafica la edad en unidades de log. Fuente: elaboración propia.

Se observa que la isocrona que mejor se ajusta es la de color **negro**. Según la escala de colores del eje que mide la edad en escala logarítmica, se encuentra entre 9.5 y 10. La edad estimada del cúmulo es de 13 giga años (10.11 dex) [7]. Se comprueba que los datos se ajustan aproximadamente a la isocrona.

Finalmente, respecto a la metalicidad, el cúmulo gloubular de 47 Tucanae tiene un $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.78$ dex [7], lo que equivale a una metalicidad de $Z = 0.004 - 0.006$. Si se grafica las isocronas y en el eje derecho se representa la metalicidad, se observa

lo siguiente: se observa que la metalicidad se ajusta por la isocrona que presenta una metalicidad de en torno a 0.005, si se toma el camino que mejor encaja con nuestra muestra. Acorde con la información tomada como referencia, está situada en torno a este valor[7].

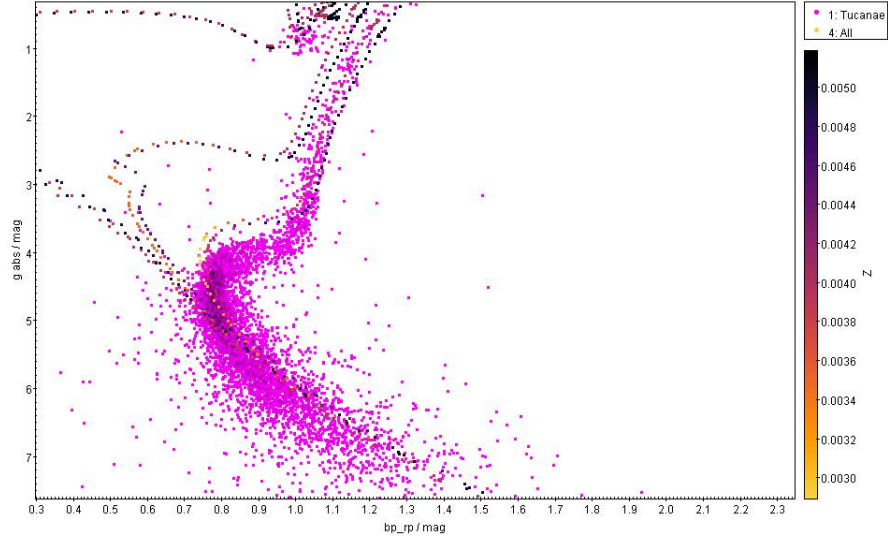


Figura 25: Diagrama H-R cúmulo globular de 47 Tucanae, tras graficar el conjunto de isocronas. En el eje derecho, se grafica la metalicidad. Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

En este apartado se comentan las principales impresiones tras realizar el análisis de los cúmulos de Híades y 47 Tucanae. En la siguiente tabla se recoge a modo de conclusión, los principales parámetros de estudio.

Cúmulo	Distancia	Radio	Edad	Metalicidad
<i>Híades</i>	47 (pc)	2.7 (pc)	8.5 - 9 (dex)	0.015 - 0.018
<i>47 Tucanae</i>	4 (kpc)	18.4 (pc)	9.5 - 10 (dex)	0.004 - 0.006

Tabla 2: Tabla resumen resultados obtenidos

En base a los resultados obtenidos y tras lo comentado en el apartado anterior, se puede afirmar la importancia de los diagramas H-R para establecer la edad y metalicidad de cúmulos estelares, con una gran precisión. En el caso del cúmulo de Híades, se tomó el radio más pequeño dado, que es el más representativo. Una vez tratados los datos en TOPCAT, se observa que es un cúmulo más joven (sus estrellas son menos numerosas, lo cual es esperado para cúmulos abiertos), y se ubican en el diagrama color magnitud siguiendo una secuencia principal. En cuanto a la edad, y tras comparar con referencias tal y como se mencionó en el apartado anterior, la edad se sitúa en torno a 8.5 - 9 dex (316 - 1000 millones de años), siendo la edad estimada en torno a los 625 millones de años. Por último, respecto a la metalicidad, el cúmulo de Híades se sitúa en un rango de metalicidad amplio por la variedad de estrellas que posee. En base a los resultados obtenidos, se ha determinado metalicidades más cercanas a la solar (en torno a $Z = 0.015$), aunque como se comentó en el apartado anterior, el rango puede ser más amplio por la variedad estelar.

Respecto al cúmulo globular 47 Tucanae, se encuentra a una distancia mucho mayor y con una cantidad de estrellas mucho mayor tal y como se ve en los diagramas H-R que se han obtenido de este cúmulo. La mayor parte de las estrellas de los cúmulos globulares son viejas. Si observamos el diagrama, se ve que la parte correspondiente a la secuencia principal es más reducida, y las estrellas van hacia la parte derecha del diagrama. La edad del cúmulo es de unos 13 Gyr, lo que es coherente con el rango de resultados obtenidos. Finalmente, la metalicidad obtenida, se sitúa en el rango que la bibliografía expone (0.004 - 0.006), lo que es coherente con lo esperado.

Referencias

- [1] J. M. Abreu, «Apuntes de la asignatura Física Galáctica», 2022.
- [2] «Diagrama de Hertzsprung-Russell», 2022. dirección: https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Hertzsprung-Russell.
- [3] «Cúmulos Estelares. Cúmulo 47 Tuc», 2022. dirección: <https://www.astromia.com/universo/cumulos.htm>.
- [4] «Cúmulos Estelar de Híades», 2022. dirección: [https://es.wikipedia.org/wiki/H%C3%ADades_\(astronom%C3%ADa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/H%C3%ADades_(astronom%C3%ADa)).
- [5] N Bojacá Rojas, «Distance to Hyades open cluster using Gaia EDR3. Universidad de los Andes», 2021. dirección: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/55194>.
- [6] «Cúmulo de Híades. Estructura y evolución», 2022. dirección: [https://es-frwiki.wiki/wiki/Hyades_\(astronomie\)](https://es-frwiki.wiki/wiki/Hyades_(astronomie)).
- [7] «47 Tucanae», 2022. dirección: https://hmong.es/wiki/47_Tucanae.