

Estudio de diagramas HR usando datos de GAIA

JULEN EXPÓSITO

Universidad de La Laguna

20 de enero de 2021

Resumen

Gaia DR2 ha supuesto una revolución en el número y calidad de datos astronómicos disponibles. En este trabajo, haciendo uso de las mediciones astrométricas y fotométricas de una muestra de estrellas de la vecindad solar tomadas de Gaia DR2, se han estudiado las características y precisión de los datos disponibles para la creación de diagramas color-magnitud. Finalmente se han tomado mediciones tanto del cúmulo abierto Hyades como del cúmulo globular 47 Tucanae para construir un diagrama color-magnitud de los mismos y se ha deducido su edad y metalicidad mediante un ajuste de isócronas calculadas por PARSEC.

I. INTRODUCCIÓN

UN diagrama Hertzsprung-Russel relaciona la temperatura efectiva de una estrella con su temperatura. La posición de una estrella en dicho diagrama depende principalmente de su masa, composición y tiempo de vida, por lo que es una herramienta extremadamente útil para los estudios astrofísicos.

La posición en el diagrama HR de todas las estrellas de un cúmulo estelar (un grupo de estrellas ligadas gravitacionalmente) permite conocer la metalicidad y la edad de dicho cúmulo. Esto es debido a que durante la mayor parte de su vida, las estrellas permanecen en la llamada secuencia principal, una línea diagonal en el diagrama HR que cubre de temperaturas efectivas y luminosidades altas a temperaturas efectivas y luminosidades bajas. Las estrellas más masivas se encuentran en valores mayores de temperatura efectiva y luminosidad, y son también las que menor tiempo de vida tienen. Cuando salen de la secuencia principal lo hacen hacia luminosidades mayores y temperaturas menores, para morir poco después. En un cúmulo estelar esto implica que podremos ver la parte de la secuencia principal correspondiente a las estrellas menos masivas que aún no han salido de la misma y un pequeño rango de masas en el que vemos a las estrellas salir de la secuencia principal (el punto en el que se produce el giro hacia temperaturas efectivas menores es el turn-off point). La longitud de la secuencia principal en el diagrama será dependiente de la edad del cúmulo, pues decrecerá con el tiempo (debido a que cuanto mayor sea la edad de un cúmulo, mayor será el rango de masas estelares cuyo tiempo de vida es menor). La posición del cúmulo completo en el diagrama es a su vez dependiente de la metalicidad, por lo que la posición del turn-off point de un cúmulo estelar nos permite conocer tanto su metalicidad como su edad.

El estudio de la metalicidad y edad de un cúmulo requiere, pues, de unos datos astrométricos que nos permitan conocer la temperatura efectiva y luminosidad de las estrellas observadas en un cúmulo con un margen de error suficientemente pequeño, para así poder representarlo fielmente en un diagrama HR. Para esto es necesario poseer medidas precisas del paralaje y la magnitud en distintas bandas para las distintas estrellas.

En este trabajo se han usado datos astrométricos captados por el observatorio espacial Gaia. Gaia DR2 posee mediciones de magnitudes aparentes y paralaje para más de mil millones de objetos astronómicos, por lo que su base de datos es perfecta para la construcción de diagramas HR fiables.

Para la determinación de la edad y la metalicidad necesitamos ajustar una isócrona; es decir, una curva definida en el diagrama HR que simula una población estelar cuyas estrellas han nacido exactamente al mismo tiempo, tienen la misma metalicidad, y se han formado según una función inicial de masas dada. El ajuste de esta curva a un cúmulo estelar nos indica la edad y metalicidad del cúmulo. En este trabajo se han usado las isócronas calculadas por PARSEC [A. Bressan et. al., 2012].

Nuestro objetivo es realizar un ajuste de isócronas al cúmulo abierto Hyades y al cúmulo globular 47 Tucanae. En la sección 2 se toma una muestra de estrellas de la vecindad solar y exploran los parámetros ofrecidos por GAIA y sus errores a fin de establecer unos criterios para el tratamiento de datos. En la sección 3 se expone la metodología seguida para el estudio de ambos cúmulos globulares. En la sección 4 se presentan los resultados obtenidos. Finalmente, se discuten dichos resultados en la sección 5.

II. CONSTRUYENDO UN DIAGRAMA HR CON GAIA

Los datos fotométricos de Gaia DR2 consisten en magnitudes medias ponderadas (junto con sus errores estimados) para tres bandas, G, G_{BP} y G_{RP} . El color $G_{BP} - G_{RP}$ es una buena medida para la temperatura efectiva. La magnitud en la banda G está relacionada con la luminosidad de la fuente, pero para conocerla es necesario conocer la magnitud absoluta de la misma. Se cumple:

$$M = m - 5 \log \left(\frac{d}{10 \text{ pc}} \right). \quad (1)$$

Por tanto, necesitamos conocer también la distancia a la estrella. Uno de los parámetros astrométricos que ofrece Gaia DR2 es el paralaje y su error estimado. La unidad utilizada por Gaia para las medidas de paralaje es el miliarcosegundo, por lo que podemos obtener la distancia en parsecs mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{1000}{\omega}, \quad (2)$$

siendo ω el paralaje medido por Gaia para una estrella dada.

Las estimaciones de errores de los parámetros medidos permiten hacer una limpieza de datos para considerar solo las estrellas cuya posición en el diagrama color-magnitud (a partir de ahora, CMD) sea fiable.

Gaia DR2 ofrece una estimación del error astrométrico mediante el parámetro *astrometric_excess_noise*, una medida angular en unidades de miliarcosegundos que mide el desacuerdo entre los parámetros astrométricos observados por Gaia y el modelo astrométrico de mejor ajuste (más información sobre el cálculo concreto del exceso de ruido astrométrico en [L. Lindegren et. al., 2011]). A su vez, podemos usar el parámetro *phot_bp_rp_excess_factor* como medida del error fotométrico: este parámetro indica el ratio entre la suma integrada del flujo en las bandas G_{BP} y G_{RP} y el flujo integrado en la banda G. En una detección ideal de los flujos, su valor debería ser muy cercano a uno, y un exceso elevado es signo de errores sistemáticos en los flujos captados para las bandas G_{BP} y G_{RP} . Finalmente, para descartar las estrellas cuya distancia tiene demasiada incertidumbre (haciendo poco fiable nuestro cálculo de la magnitud absoluta y por ende su altura en el diagrama) podemos simplemente exigir que el error en el paralaje sea un número de veces dado inferior al valor medido.

Si graficamos en un CMD una muestra de estrellas detectadas en un radio alrededor del sol inferior a 100 parsecs lo que esperamos obtener es una secuencia principal gruesa (debido a que habrá numerosas poblaciones estelares representadas conjuntamente) y una línea inferior clara, donde se concentran las enanas blandas. Cierta número de estrellas dejando la secuencia principal hacia luminosidades mayores es también algo esperable.

En la figura 1 puede observarse el CMD correspondiente a todas las estrellas con datos astrométricos y fotométricos en Gaia DR2 cuyo error en la medida de paralaje y de flujo en las bandas G_{BP} y G_{RP} es al menos 10 veces menor al valor medido. Se observan con claridad las líneas correspondientes a la secuencia principal y a

las enanas blancas, pero hay un scatter notorio, lo cual indica que efectivamente es necesario aplicar criterios extra de limpieza para hacer desaparecer las fuentes con medidas incorrectas.

La limpieza por error astrométrico y una exigencia de menor incertidumbre en el paralaje (un error como mínimo 50 veces menor al valor medido) reduce notoriamente el scatter del diagrama y libera las zonas donde no esperamos encontrar estrellas. La limpieza fotométrica tiene un menor efecto en las estrellas falsamente encontradas en luminosidades intermedias entre la secuencia principal y las enanas blancas, pero elimina casi todas las estrellas con luminosidades inferiores a las observadas en enanas blancas, revelando que esas medidas se deben principalmente a errores sistemáticos en las medidas de los flujos.

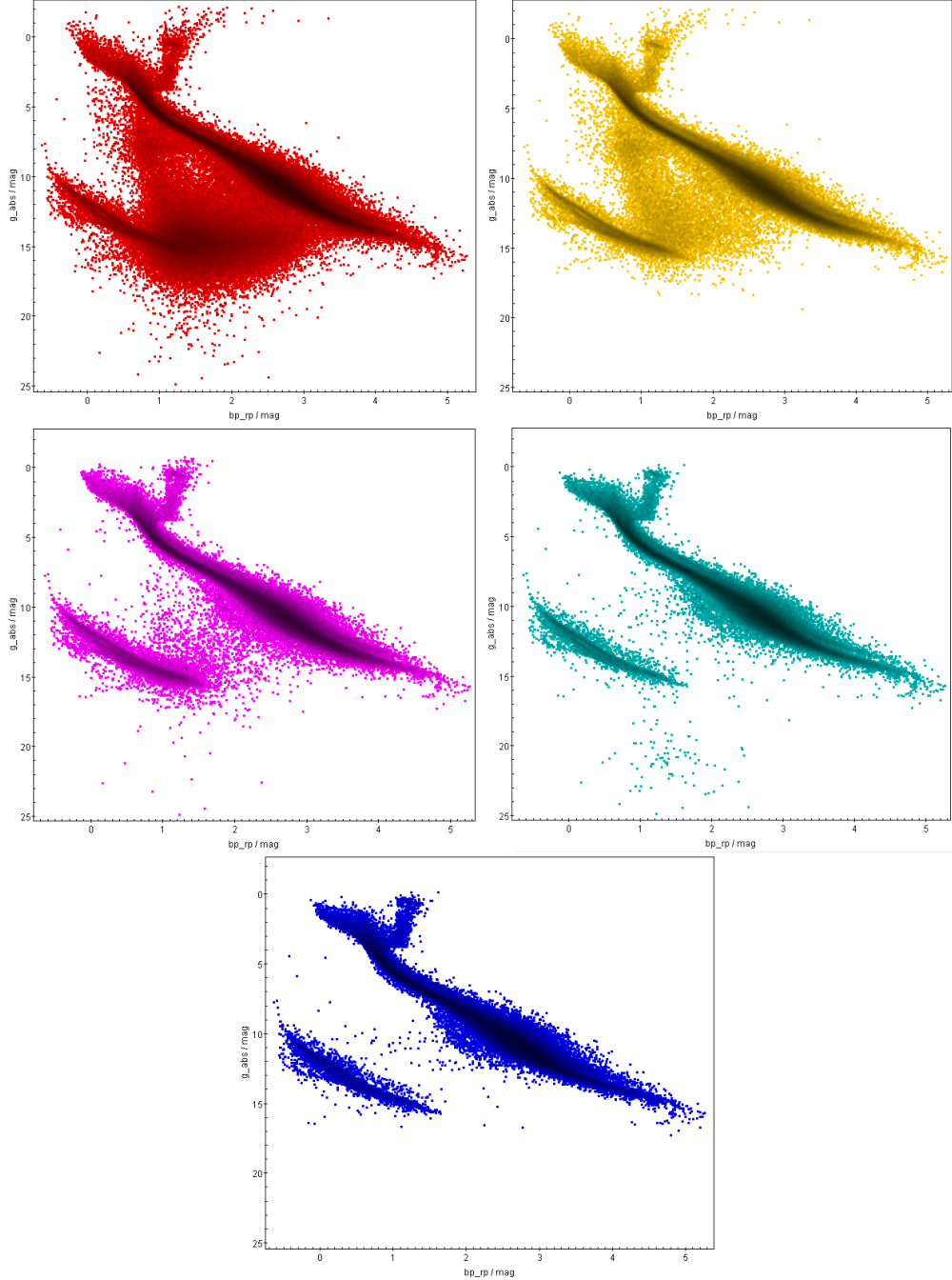


Figura 1: CMDs de un conjunto de estrellas tomadas de la vecindad solar en direcciones arbitrarias a menos de 100 pc. Todos los diagramas contienen estrellas cuyo error en la medida de paralaje y de flujo en las bandas B y R es al menos 10 veces menor al valor medido. Rojo: Diagrama completo sin limpiar. Amarillo: Diagrama con únicamente las estrellas con poco error fotométrico. Rosa: Diagrama con únicamente las estrellas con error astrométrico inferior a 1. Turquesa: Diagrama con únicamente las estrellas cuyo error en la medida de paralaje es al menos 50 veces menor al valor medido. Azul: Diagrama que contiene únicamente las estrellas encontradas en todos los diagramas anteriores.

El rango de distancias admitido a la hora de tomar datos es muy relevante en el resultado final del diagrama. En la figura 2 puede observarse cómo una reducción de la distancia máxima a la que captamos estrellas reduce el scatter significativamente al reducir el número de poblaciones estelares representado. Eso significa que tendremos menor variedad de metalicidades y edades, llevando a secuencias principales y curvas de enanas blancas más finas.

Para la representación adecuada de un cúmulo estelar es necesario definir correctamente la dirección y la distancia a las cuales se toman datos, a fin de solo tomar datos de las estrellas pertenecientes a ese cúmulo concreto.

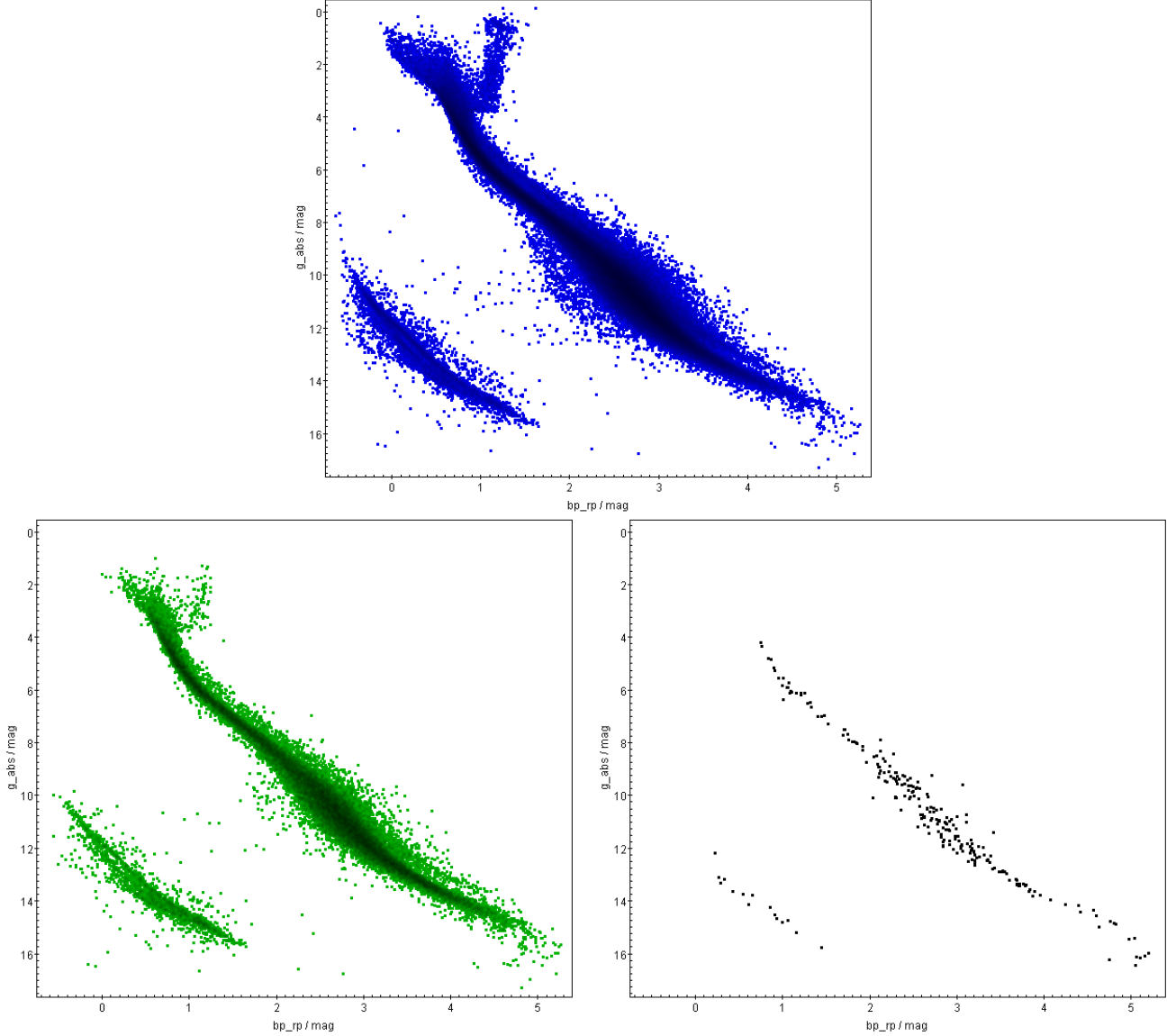


Figura 2: CMDs de conjuntos de estrellas de la vecindad solar a distintas distancias del sol. Los diagramas contienen únicamente estrellas con poco error fotométrico, error astrométrico inferior a 1 y un error en la medida de paralaje al menos 50 veces inferior al valor del mismo. Azul: Diagrama con las estrellas a menos de 100 pc del sol. Verde: Diagrama con las estrellas a menos de 50 pc del sol. Negro: Diagrama con las estrellas a menos de 10 pc del sol.

III. TRATAMIENTO DE DATOS

Hyades se encuentra a una distancia de aproximadamente 47 parsecs, el radio de su núcleo es de aproximadamente 2.7 parsecs y su posición en el cielo corresponde a una ascensión recta de 4h 27m 0s y una declinación de 15° 52' 12".

El ángulo que conforma es, por tanto: $\arctan\left(\frac{5.4}{47}\right) \approx 6.3$ grados. Se han buscado estrellas dentro de ese rango angular en dirección al cúmulo. La muestra se ha limpiado posteriormente con los métodos expuestos en la sección 2, con un exceso de error astrométrico inferior a 1, un error fotométrico pequeño y un error relativo en el paralaje inferior a 1/50. Se ha exigido a su vez que las estrellas se encuentren entre 40 y 55 parsecs de distancia al Sol.

47 Tucanae se encuentra a una distancia de aproximadamente 4.5 kpc[Gaia Collaboration, 2018], el radio de su núcleo es de aproximadamente 18.4 parsecs y su posición en el cielo corresponde a una ascensión recta de 24m 05.67s y una declinación de $-72^{\circ} 04' 52.6''$.

El ángulo que conforma es $\arctan\left(\frac{18.4}{4500}\right) \approx 30$ arcmin. La muestra se ha limpiado exigiendo un error astrométrico inferior a 1, un error fotométrico pequeño y un error relativo en el paralaje inferior a la unidad. Debido a los elevados errores en la medida del paralaje, derivados de la distancia a la que se encuentra el cúmulo, se ha decidido representar el CMD calculando la magnitud absoluta de las estrellas considerando una distancia equivalente para todas, en vez de usar los datos individuales de paralaje, puesto que la distancia relativa entre las estrellas del cúmulo será despreciable frente a la distancia del mismo al sol.

Para el ajuste de isócronas es necesario tener en cuenta el efecto de la extinción de las estrellas del cúmulo. La extinción de Hyades es de $A_v = 0.0031$ y la de 47 Tucanae es de $A_v = 0.124$.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 3 podemos ver el CMD de Hyades sobre el cual se ha graficado la isócrona de mejor ajuste. Esta corresponde a una edad de 630 Myr y una metalicidad $Z = 0.02$.

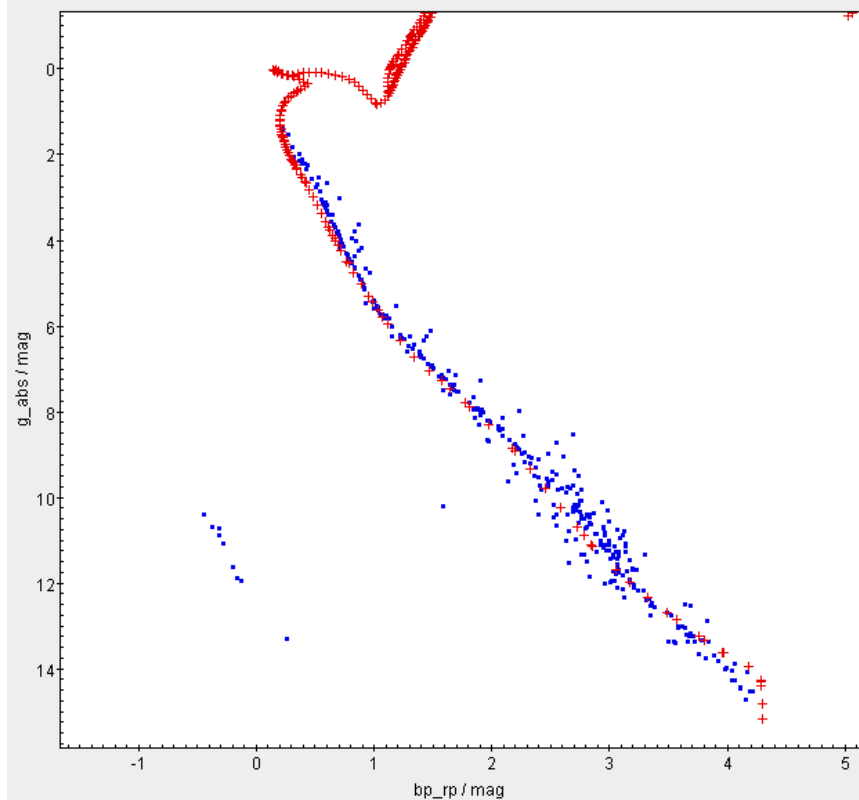


Figura 3: CMD del cúmulo abierto Hyades junto con la isócrona de PARSEC de mejor ajuste. Se han tomado estrellas en un radio máximo de 6.3 grados. Las distancias de las estrellas individuales se han calculado con los paralajes medidos por GAIA. La isocrona corresponde a una extinción $A_v = 0.0031$, una edad de 630 Myr y una metalicidad $Z = 0.02$.

En la figura 3 podemos ver el CMD de 47 Tucanae sobre el cual se ha graficado la isócrona de mejor ajuste.

Esta corresponde a una edad de 12.75 Gyr y una metalicidad $Z = 0.0045$. El cúmulo parece presentar cierta dispersión de edades en su población, por lo que este ajuste posee una incertidumbre resaltable, del orden de 1 Gyr.

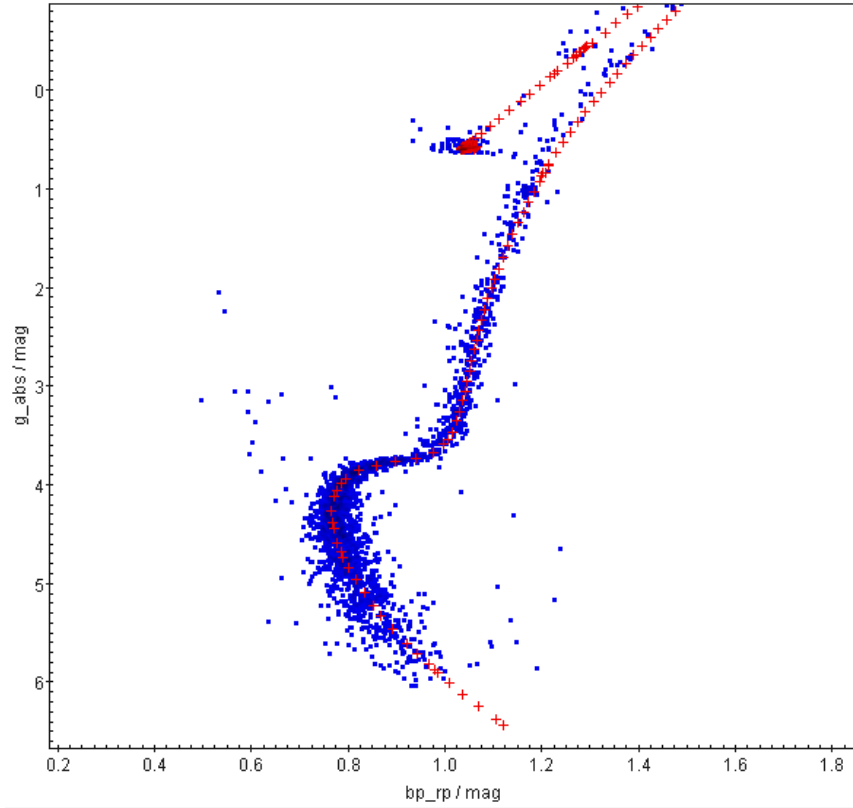


Figura 4: CMD del cúmulo cerrado 47 Tucanae junto con la isócrona de PARSEC de mejor ajuste. Se han tomado estrellas en un radio máximo de 30 arcmin. Se ha considerado una misma distancia para todas las estrellas con $DM = 13.266$. La isocrona corresponde a una extinción $A_v = 0.124$, una edad de 12.75 Gyr y una metalicidad $Z = 0.0045$.

Los resultados obtenidos concuerdan con los encontrados por otros investigadores usando los datos de Gaia DR2 [Gaia Collaboration, 2018]. También son coherentes con nuestros conocimientos actuales sobre cúmulos estelares: los cúmulos globulares son cúmulos viejos y densos de estrellas que se han mantenido ligadas gravitacionalmente, mientras que los cúmulos abiertos, como Hyades, son más pequeños y están compuestos principalmente por estrellas jóvenes.

REFERENCIAS

- [A. Bressan et. al., 2012] PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 427, Issue 1, pp. 127-145.
- [Gaia Collaboration, 2018] Gaia Data Release 2: Observational Hertzsprung-Russell diagrams, A&A, Gaia Data Release 2 special issue.
- [L. Lindegren et. al., 2011] The astrometric core solution for the Gaia mission. Overview of models, algorithms and software implementation, arXiv:1112.4139