



# Informe Final

Trabajo Tutorial Básico

Integrantes:	Diego Espinoza
Profesor:	Ricardo Muñoz
Fecha de entrega:	21 de junio de 2023
	Santiago, Chile

# Índice de Contenidos

1. Introducción	1
2. Metodología	2
3. Resultados	4
4. Discusión	11

# Índice de Figuras

1.	A la izquierda y a la derecha respectivamente, se muestra el Diagrama Color g-r vs la Magnitud aparente g, antes de la sustracción mediante los criterios descritos antes. En un círculo rojo se muestra el radio de Jacobi. . . . .	4
2.	Gráfico a la izquierda del parámetro Sharp vs la magnitud aparente G y a la derecha el parámetro Chi vs la misma. Esto es antes de sustraer datos. . . . .	5
3.	A la izquierda los puntos azules son estrellas y los rojos son otras cosas, mientras que a la derecha los puntos que están en la fila horizontal son en su mayoría estrellas del cúmulo, mientras que la columna izquierda y derecha son galaxias y/o estrellas de campo, y la parte derecha de la fila horizontal son artefactos. Primero se hizo el filtro de la izquierda y luego el de la derecha, pues haciendo esto se mantuvo la mayor cantidad posible de estrellas. . . . .	5
4.	Diagrama Color Magnitud (CMD) para el cúmulo NGC 5694. En rojo los objetos que quedaron excluidos después de limitar tanto al parámetro Chi como al parámetro sharp. Se puede apreciar tanto la Rama Horizontal como la secuencia principal a la izquierda y al medio respectivamente. A la derecha gráfico Sharp-Chi. . . . .	6
5.	De izquierda a derecha arriba y abajo, se muestran respectivamente la extinción en la magnitud aparente G, la extinción en la magnitud aparente R y el Enrojecimiento. Estos mapas de extinción y enrojecimiento son para toda la extensión de la imagen. . . . .	6
6.	Diagrama de Hess para todos los cuadrantes del cúmulo NGC 5694. En este diagrama, se muestra la secuencia principal con forma de 's' al medio, la rama horizontal, la columna vertical con estrellas del campo que se cree que son de la vía láctea y las estrellas u objetos de fondo. Aquí se muestra la densidad de estrellas por densidad en el diagrama de color magnitud. . . . .	7
7.	Diagrama de Hess para diferentes anillos de distintos radios consecutivos, siguiendo la prescripción de Correnti et al. (2011). Evidentemente, se toma en consideración mas o menos hasta donde se cree que se termina el cúmulo. . . . .	8
8.	A la izquierda y derecha se muestran contornos de densidad y los objetos que quedaron dentro de un contorno particular respectivamente. Los contornos se hicieron desde 0.05 hasta 1 (del total) con un aumento de 0.05, para poder determinar cuál era más conveniente. Evidentemente, fue necesario usar diferentes máscaras para tomar tanto los puntos que caían dentro de la isocrona como dentro de la rama horizontal. . . . .	9

9.	Ajuste de Isocrona a la secuencia principal en rojo, con una edad de 14 Giga años, metalicidad $[Fe/H] = -2.2$ , $Y = 0.2452$ y $[\alpha/Fe] = 0$ . Se corrigió conforme a la extinción, aunque en teoría, no era necesario, pues representaba un cambio muy pequeño para la magnitud (tanto para la banda verde o g como para la roja o r) y por ende para el color. Además, el RMS de la isocrona con respecto a los puntos de la secuencia principal fue de 0.6958, la menor de todas para estas abundancias, es decir, el mejor ajuste. . . .	9
10.	A la izquierda: ajuste de King (línea continua negra) para el perfil de densidad superficial radial (puntos en azul), tanto con el radio de corte (verde), radio tidal (rojo) y radio de Jacobi según Muñoz, Majewski & Johnston (2008) (azul). A la derecha histograma antes y después de la sustracción en funcion del radio. . . . .	10
11.	A la izquierda arriba y abajo, respectivamente, tanto la dispersión de velocidad como la pendiente del perfil de densidad radial superficial para cúmulos globulares con diferentes proporciones de materia visible a materia oscura, tomado de Peñarrubia et al. (2017). A la derecha, el perfil de densidad ajustado según una parábola para el cúmulo NGC 5694. 10	
12.	Cantidad de objetos del cúmulo según el índice de color G-R y la magnitud G respectivamente. . . . .	11

## Índice de Tablas

1.	Parámetros astrométricos del cúmulo globular NGC5694 tomados de Bajkova & Bobylev (2022): $D$ y $e$ son respectivamente la distancia galactocéntrica y la excentricidad. Los 4 parámetros siguientes, de izquierda a derecha son: la relación masa-luminosidad del cúmulo, la luminosidad, la masa de la galaxia encerrada por el cúmulo y el radio de Jacobi. 4	
2.	En esta tabla se muestran los parámetros óptimos para el ajuste de King de la figura 10. $R_c$ , $R_t$ , $k$ y $R_J$ son respectivamente; el radio de núcleo (core), el radio tidal de King, una constante proporcional a la densidad superficial central y el Radio de Jacobi. . . .	11

# 1. Introducción

Aquí nos centraremos en determinar si es posible deducir, bajo ciertas suposiciones bien sólidas, la existencia de materia oscura o al menos su influencia sobre la envoltura que se extiende más allá del radio de marea (tidal radius) en el cúmulo NGC 5694 ubicado en el halo exterior de la Vía Láctea, para eso explicaremos lo que es un cúmulo globular, las teorías de formación de los mismos, la relación con la materia oscura y el radio de Jacobi, radio tidal, etc.

Primero que todo, remontémonos a lo que se cree que son las pruebas de la existencia de materia oscura, que son independientes. Casi todas, si es que no todas, son pruebas indirectas de su existencia. Usaré en parte la descripción dada en Vitral & Boldrini 2022. La primera vez que se postuló la existencia de materia o masa no visible fue cuando Zwicky en 1933 y 1937 propuso alguna clase de ese tipo de materia que podría ser parte de la masa requerida para explicar la diferencia entre las mediciones de masa del cúmulo (de galaxias) de Coma basadas en el teorema Virial y basadas en el brillo y número de sus galaxias.

Hoy por hoy, las mediciones de la Planck Collaboration XIII (2016) y de Planck Collaboration (2020) que entrega ajustes bien robustos para el fondo cósmico de micro ondas (CMB) usando el bien conocido modelo  $\Lambda$ -cold dark matter ( $\Lambda$ CDM) que predice la existencia de la materia oscura, en particular, aproximadamente un 23 por ciento de la materia total del universo. Otra línea de evidencia fue aportada por Rubin & Ford (1970) y Rubin et al. (1980) que mostró que las curvas de rotación en la parte exterior no seguía lo esperado por el modelo, y que en vez de decrecer la velocidad hacia tales partes de las galaxias cercanas, se mantenía casi constante, lo que indicaba la existencia de algún tipo de materia que jalaba estas estrellas.

Además, estudios de lentes gravitacionales (por ejemplo de Taylor et al. 1998) también han confirmado que la cantidad de masa total en muchos cúmulos de galaxias corresponde a las mediciones que dan cuenta de la existencia de materia oscura. Ya que estas son pruebas son independientes, dan un argumento muy robusto para creer que hay materia oscura, más allá de pensar que puede ser un artificio conveniente para explicar los cuatro fenómenos ya mencionados.

Ahora bien, en cuanto a las teorías de formación de los cúmulos globulares, hay simulaciones cosmológicas que indican mecanismos mediante los cuales todos los siguientes escenarios pueden suceder juntos al mismo tiempo, y por lo tanto haciendo plausible la idea de Trenti et al. (2015) de que éstos se forman de diversas maneras: a partir de Galaxias enanas acretadas, a partir de sus propios minihalos de materia oscura, a partir de nubes de gas no ligadas, a partir de fragmentos de galaxias libres de materia oscura, a partir de reliquias de cúmulos masivos y jóvenes que se formaron en el universo de alto corrimiento al rojo, o simplemente que se formaron in situ junto con su galaxia hospedadora.

Ahora bien, las dificultades para determinar la vía de formación de las galaxias son: la multiplicidad de soluciones antes mencionadas, que muchos de los efectos de tales canales de formación son mejor observados donde hay menor calidad de los datos (los exteriores de los Cúmulos Globulares) y el alto costo computacional de simular un sistema GC+DM (cúmulo globular y materia oscura juntos). En cuanto al radio tidal, corresponde aproximadamente a la distancia del objeto que rota (cúmulo globular) a un centro (galaxia) que en ciertos casos es casi igual al radio de Jacobi. Mas o menos, más allá de esta distancia es donde las estrellas del cúmulo tienen más probabilidad de ser

arrancadas por un objeto más masivo como lo es la vía Láctea. Además, el apocentro y pericentro son las distancias máximas y mínimas respectivamente del cúmulo al centro de la órbita elíptica que siguen.

Ahora bien, se cree que NGC 5694 (que pertenece a nuestra vía Láctea, y está a una distancia de ) es como las reliquias de galaxias total o parcialmente desgarradas a las cuales pertenecían (M. Correnti et al. 2011). Estudios de población estelar indican que este tiene una edad mayor o igual a 12.5 mil millones de años aproximadamente, comparable a las edades de cúmulos globulares viejos (Ortolani & Gratton, 1990). Las metalicidades de  $[Fe/H] = -1.65, -1.87, -1.93$  fueron tomadas por Ortolani & Gratton 1990, Geisler et al 1995 y Lee, López-Morales & Carney 2006. En Correnti et al. 2011, tanto los modelos de king como el de Wilson para los perfiles de densidad superficial radial se ajustan bien pero solamente hasta antes del radio tidal o radio de Jacobi.

De acuerdo con Peñarrubia et al. (2017), el perfil radial de densidad superficial en presencia de un mini-halo de materia oscura debería tomar una relación de radio a la potencia -4, mientras que en ausencia de el halo se espera una potencia de -3.5. Así, lo que se espera en este trabajo de investigación es determinar no solo si se acerca más la potencia a -4 o -3.5, sino también analizar si existe alguna asimetría que nos permita concluir con la existencia de algun envelope más allá del radio tidal, de alguna cola de marea (tidal tail) o de cualquier otra anomalía, ya sea en el diagrama color magnitud para diferentes isocronas. También veremos cómo determinar qué estrella o punto de luz forma parte del cúmulo, suponiendo desde el principio que a menor distancia del mejor ajuste a la isocrona, representa una mayor probabilidad y por tanto un punto más deseable. Además, usando los parámetros  $\chi$  y sharp se excluirán fuentes como: galaxias, artefactos o estrellas del campo de visión (field stars). Aún así, usando criterios como los de diseccionar por cuadrantes la imagen y analizando el diagrama color magnitud se puede analizar si existen dichas estructuras extendidas (tidal tails, etc).

## 2. Metodología

En este estudio, se toman datos de MEGACaM del observatorio las campanas, de un catálogo fotométrico de 54 objetos diferentes, entre ellos NGC 5694 y NGC 5824. Se seguirán los siguientes pasos: 1) Determinar el radio teórico de Jacobi siguiendo datos de Bajkiva & Bobylev (2022): aquí se asume la fórmula (4) dada por Muñoz, Majewski & Johnston (2008) para el radio de Jacobi en un potencial logarítmico:

$$R_J = a \left( \frac{M_C}{M_G} \right)^{1/3} \left( \frac{(1-e)^2}{\left[ \frac{(1+e)^2}{2e} \ln[(1+e)/(1-e)] + 1 \right]} \right)^{1/3}$$

donde  $a$  es el semieje mayor,  $M_C$  es la masa del cúmulo,  $M_G$  la masa de la galaxia y  $e$  es la excentricidad de la órbita. El parámetro  $a$  se obtiene de Bajkiva & Bobylev 2022, tomando la suma entre el apocentro y el pericentro dividida entre dos:  $a_{NGC5694} = \frac{a_p + p_e}{2}$  donde  $a_p$  o apocentro es 71 kiloparsecs y  $p_e$  o pericentro 28 kiloparsecs. Usando que la luminosidad del cúmulo es  $L_{NGC5694} = 10^{5.107} L_\odot$  (la última parte de la ultima expresion es la luminosidad del sol). Además, la relación masa-luminosidad asumida para el cúmulo es  $M_C/L_C = 3M_\odot/L_\odot$  (de donde se determina la masa  $M_C$ ). La masa de la galaxia (que está encerrada hasta mas o menos donde se ubica el cúmulo, es decir, como una masa

acumulada) se determina usando la fórmula de X. X. Xue (2008):  $M_G = 1.1 \cdot 10^{12} D_{NGC5694} M_\odot$  donde se asume un potencial logarítmico y donde  $D_{NGC5694}$  es la distancia galactocéntrica. La elipticidad de Bajkiva & Bobylev (2022) se usa (valor igual a 0.92). Los resultados se muestran tanto para NGC 5694 como para NGC 5824 en la tabla 1. La imagen que corresponde al cúmulo con el radio de Jacobi aparece en la figura 1. 2) Ajustar una función adecuada para sustraer en los parametros  $\chi$  y sharp los objetos que no pertenecen al cúmulo, como galaxias, artefactos y estrellas de campo. En las figuras 2, 3 y 4 se pueden ver el grafico  $\chi$ -sharp, el grafico  $\chi$ -sharp siendo sustraído y luego los resultados de tal sustracción, respectivamente. Es importante mencionar que estos dos parámetros son medidas estadísticas que sirven para clasificar estrellas del cúmulo y estrellas que no son parte del mismo. Este método de sustracción es análogo al utilizado en Carlson et al. (2018), Davis et al. (2021) y Han et al. (2020) para cúmulos globulares.

3) Visualizar los mapas de extinción y enrojecimiento para todas las magnitudes aparentes. Estos aparecen en la figura 5. Esto lo hacemos para poder ver si es necesario corregir los datos por reddening o por extincion. 4) Visualizar el diagrama color magnitud (color R-G y magnitud aparente G) para todos los cuadrantes, así como los diagramas de Hess de los mismos, para poder distinguir si existen diferencias sustanciales entre cuadrantes y por ende si existen o no estructuras que a simple vista no se puedan ver. Esto es importante, porque son principalmente las estrellas de la secuencia principal en este diagrama que pertenecen al cúmulo, así como las de la rama horizontal. La prescripción que se escogió fue la misma de la figura 1 de Correnti et al. 2011, porque el radio tidal de ellos asumiendo un perfil de king fue de 4.8 arcmin (en nuestro caso de 5.933 arcmin). Ver figura 6, para los diagramas de Hess por cuadrantes y figura 7 para la prescripción análoga de Correnti et al (2011).

Aquí es evidente que no es necesario ver el diagrama de Hess excluyendo las estrellas de fondo, porque lo único que es de interés es visualizar en qué momento desaparece la secuencia principal. 5) Usar contornos de densidad para extraer los puntos que más probablemente sean pertenecientes al cúmulo. Esto es necesario porque es la manera más simple de obtener los puntos pertenecientes a la secuencia principal, además de la rama horizontal. Ver figura 8. 6) Obtener datos de internet para ajustar una isocrona para cierta metalicidad y por ende cierta edad para el cúmulo. Se usó el sistema fotométrico SDSS y de entre muchas isocronas la que tenía menor RMS con respecto a los datos, ésa fue elegida. Ver figura 9. 7) Extraer el perfil de densidad superficial radial. Esto lo hacemos ajustando un perfil de king como el descrito en los resultados de Kuzma et al. (2016), cuya fórmula es :

$$n(r) = k \left( \frac{1}{\sqrt{1 + (r/r_c)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + (r_t/r_c)^2}} \right)^2$$

donde  $k$  es una constante con valor de densidad de superficial radial,  $r$  es el radio desde el centro del cúmulo,  $r_t$  es el radio de King y  $r_c$  es el radio de corte. Además, obtendremos la pendiente de la curva de densidad superficial radial para ver si es posible inferir la presencia de materia oscura según lo que se describe en Peñarrubia et al. (2017), donde se dice que la pendiente de la curva de densidad  $\gamma = \frac{\log(\rho)}{\log(r)} = \frac{\Delta \log(\Sigma)}{\Delta \log(R)}$  debe ser como la que se muestra en la figura 11. De hecho, tal artículo menciona que es posible que cúmulos globulares con materia oscura tienen un perfil de densidad que no es tan profundo, hablamos para una distancia del centro del cumulo de aproximadamante 10 parsecs  $\gamma \simeq -2.6$  o  $-2.3$ , mientras que aquellos que carecen de materia a esa misma distancia  $\gamma \simeq -3$ . Por ende, es necesaria la comparación. Es decir, lo que se plantea allí es que en la envoltura del cúmulo debe haber materia oscura bajo esas condiciones, asumiendo un potencial de Plummer para el compo-

nente estelar, y un potencial de Hernquist (1990) para el componente de materia oscura. Ver figura 10.

### 3. Resultados

En esta sección mostramos los resultados de la serie de pasos descrita anteriormente. La siguiente tabla contiene los parámetros orbitales necesarios para calcular el Radio de Jacobi y por ende, una vía de detectar una potencial envoltura del cúmulo.

Tabla 1: Parámetros astrométricos del cúmulo globular NGC5694 tomados de Bajkova & Bobylev (2022):  $D$  y  $e$  son respectivamente la distancia galactocéntrica y la excentricidad. Los 4 parámetros siguientes, de izquierda a derecha son: la relación masa-luminosidad del cúmulo, la luminosidad, la masa de la galaxia encerrada por el cúmulo y el radio de Jacobi.

Cúmulo	$D$ [Kpc]	$e$	$M_C/L_C$ [ $M_\odot/L_\odot$ ]	$L_C$ [ $L_\odot$ ]	$M_G$ [ $10^{41}$ kg]	$R_J$ [pc]
NGC 5694	29.1	0.92	3	$10^{5.107}$	6.366	50.228
NGC 5824	25.3	0.46	3	$10^{5.648}$	5.535	187.434

La figura 1 muestra el diagrama color magnitud (magnitud aparente  $g$  versus color  $g - r$ ). Sin embargo, aún no se realiza la sustracción de objetos que no son del cúmulo, por eso aparecen objetos tanto entre las columnas como en la columna vertical derecha. Es de esperar que esta columna derecha sea la secuencia principal de las estrellas del campo de visión de la Vía Láctea, de ahí que, si se hiciese una corrección por la fórmula de magnitud a flujo, se podría obtener la forma de esta secuencia. Es decir, debería tener aproximadamente la misma forma que la secuencia principal de la izquierda, que se presupone es del cúmulo NGC 5694.

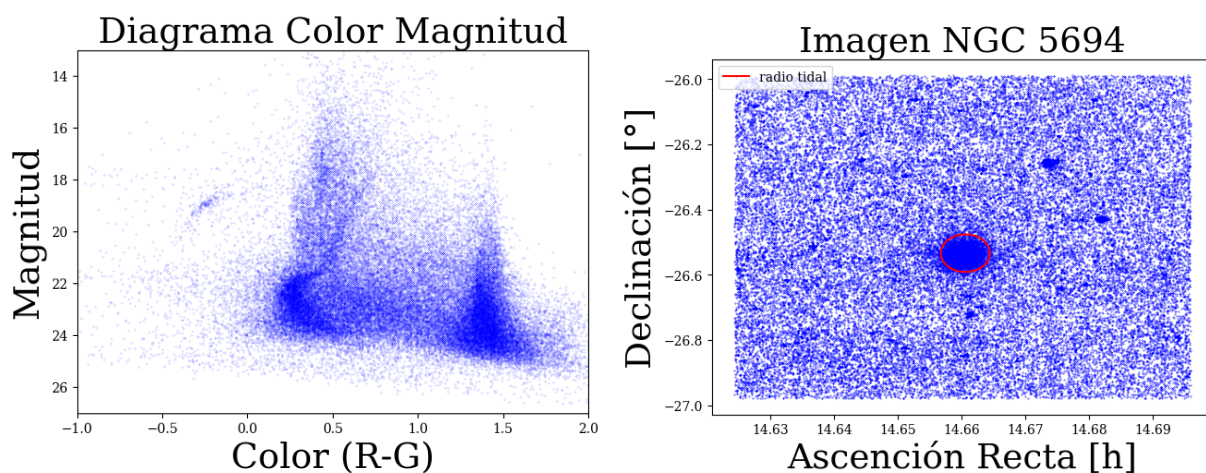


Figura 1: A la izquierda y a la derecha respectivamente, se muestra el Diagrama Color  $g-r$  vs la Magnitud aparente  $g$ , antes de la sustracción mediante los criterios descritos antes. En un círculo rojo se muestra el radio de Jacobi.

En la figura 2 como en la figura 3 se muestra el grafico Sharp vs Magnitud  $G$  y vs Magnitud  $G$ , en la primera imagen sin sustracción, en la segunda aplicando dos polinomios que ajustan bien a la

zona donde se espera que exista mayor concentracion de estrellas del cumulo. Se aplica un filtro a la variable Sharp porque si se aplica primero a se escluyen muchos datos, y luego de esto, se aplica este filtro de Sharp al gráfico de . En rojo se muestran los puntos que quedaron afuera de la zona entre polinomios, mientras que en azul los de adentro.

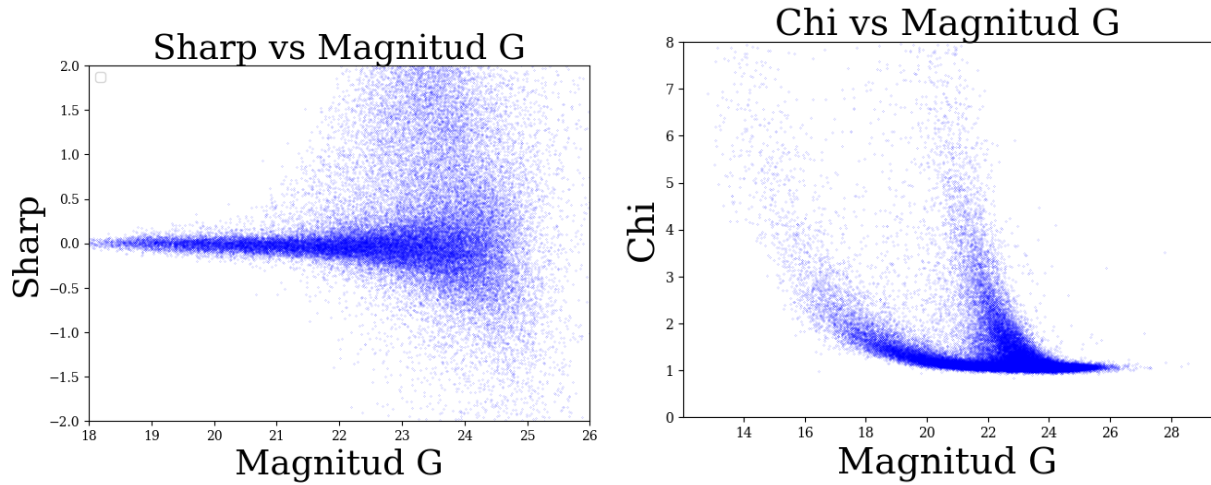


Figura 2: Gráfico a la izquierda del parámetro Sharp vs la magnitud aparente G y a la derecha el parámetro Chi vs la misma. Esto es antes de sustraer datos.

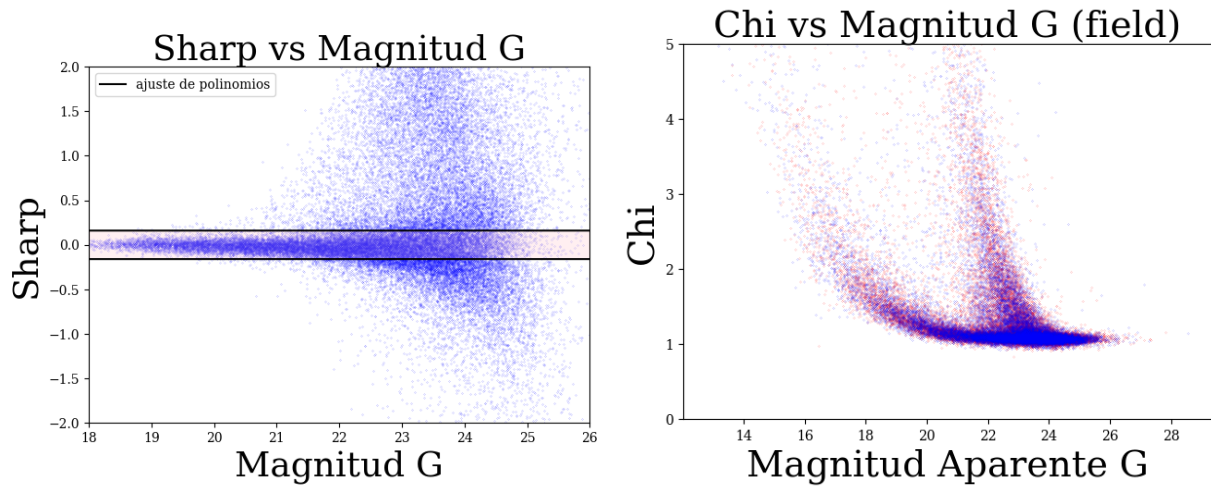


Figura 3: A la izquierda los puntos azules son estrellas y los rojos son otras cosas, mientras que a la derecha los puntos que están en la fila horizontal son en su mayoría estrellas del cúmulo, mientras que la columna izquierda y derecha son galaxias y/o estrellas de campo, y la parte derecha de la fila horizontal son artefactos. Primero se hizo el filtro de la izquierda y luego el de la derecha, pues haciendo esto se mantuvo la mayor cantidad posible de estrellas.

Lo mismo que antes, se muestra ahora, excluyendo según el criterio Sharp-, pero para el diagrama color magnitud.



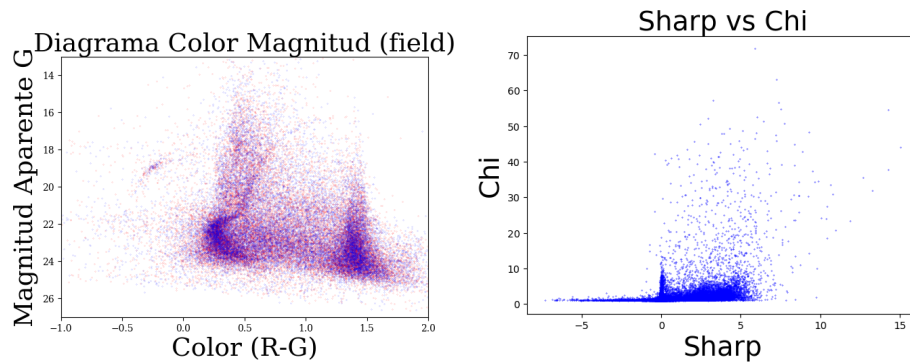


Figura 4: Diagrama Color Magnitud (CMD) para el cumulo NGC 5694. En rojo los objetos que quedaron excluidos después de limitar tanto al parámetro Chi como al parámetro sharp. Se puede apreciar tanto la Rama Horizontal como la secuencia principal a la izquierda y al medio respectivamente. A la derecha gráfico Sharp-Chi.

A continuación se muestran los mapas de extinción para las magnitudes aparentes G y R respectivamente y el mapa de enrojecimiento, según la declinación y la ascensión recta, es decir, la posición en el cielo. Esto era importante pues siempre debemos estar dispuestos a corregir por extinción si ésta es grande o no, pues puede afectar a nuestras mediciones de magnitudes.

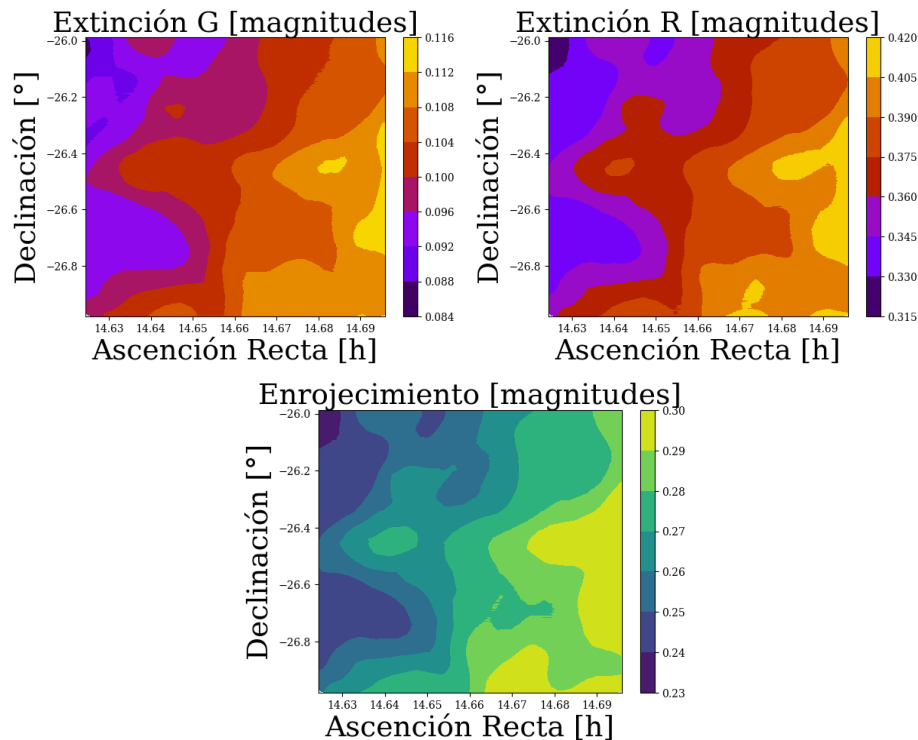


Figura 5: De izquierda a derecha arriba y abajo, se muestran respectivamente la extinción en la magnitud aparente G, la extinción en la magnitud aparente R y el Enrojecimiento. Estos mapas de extinción y enrojecimiento son para toda la extensión de la imagen.

Ahora, se muestra el diagrama de Hess para los 4 cuadrantes, para, como ya se dijo antes, verificar si en efecto existe alguna diferencia apreciable entre alguno de ellos y por ende alguna asimetría o simetría que indique potencialmente la existencia de alguna estructura como cola de marea, brazos o alguna combinación de ambas.

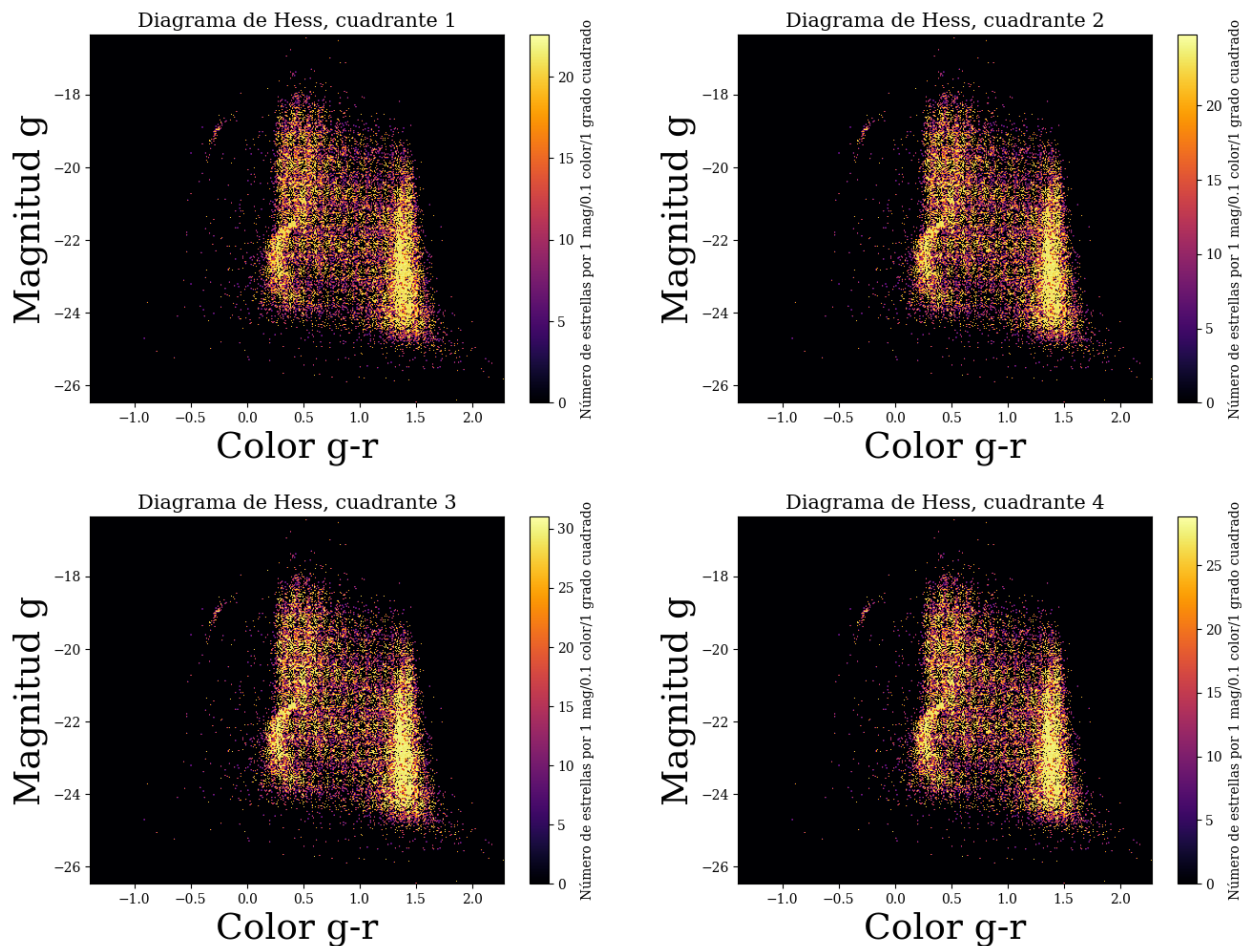


Figura 6: Diagrama de Hess para todos los cuadrantes del cúmulo NGC 5694. En este diagrama, se muestra la secuencia principal con forma de 's' al medio, la rama horizontal, la columna vertical con estrellas del campo que se cree que son de la vía láctea y las estrellas u objetos de fondo. Aquí se muestra la densidad de estrellas por densidad en el diagrama de color magnitud.

En la figura 7 se muestra, según la prescripción de Correnti et al (2011), el diagrama de Hess (en vez del diagrama color magnitud) para diferentes anillos, que se indican en la figura. Se usó como límite de extensión del cúmulo 9 arcmin, como en dicha referencia. Además, se hizo el mismo gráfico desde el principio hasta el término de la extensión del cúmulo, para ver en qué punto mas o menos desaparecía la secuencia principal y por ende el cúmulo y su envoltura.

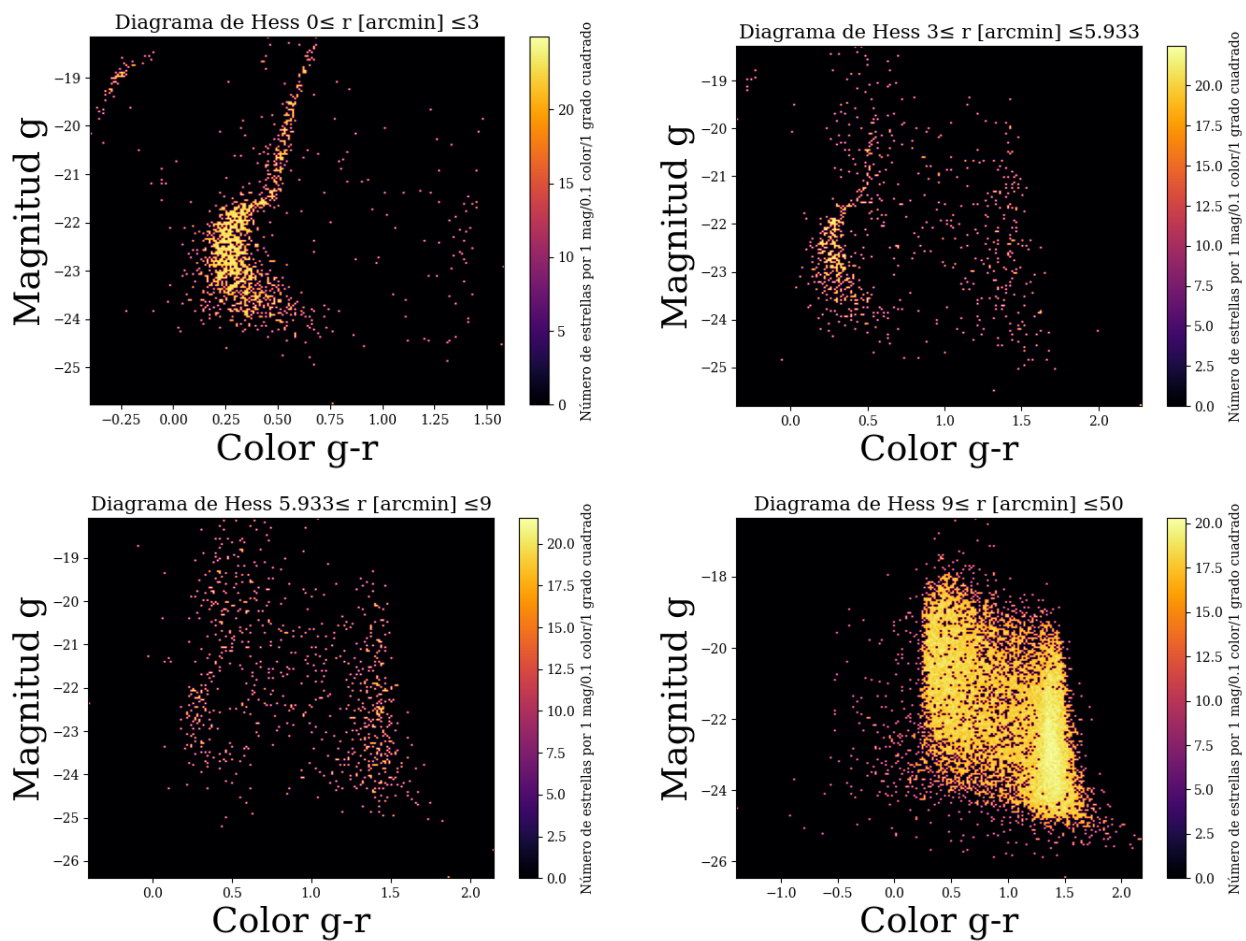


Figura 7: Diagrama de Hess para diferentes anillos de distintos radios consecutivos, siguiendo la prescripción de Correnti et al. (2011). Evidentemente, se toma en consideración mas o menos hasta donde se cree que se termina el cúmulo.

En el gráfico de contornos, se muestra una forma de seleccionar las estrellas del cúmulo y excluir las que no, mediante esta serie de contornos. Otra forma de encontrar estas estrellas era encontrar funciones que encerraran la secuencia principal y la rama horizontal, pero era más simple hallarlas por medio de contornos, pues es más rápido. Es decir, con todos los criterios de exclusión anteriores, no era suficiente si no teníamos algún tipo de función que nos diera las estrellas del cúmulo. A la derecha el resultado de esta selección.

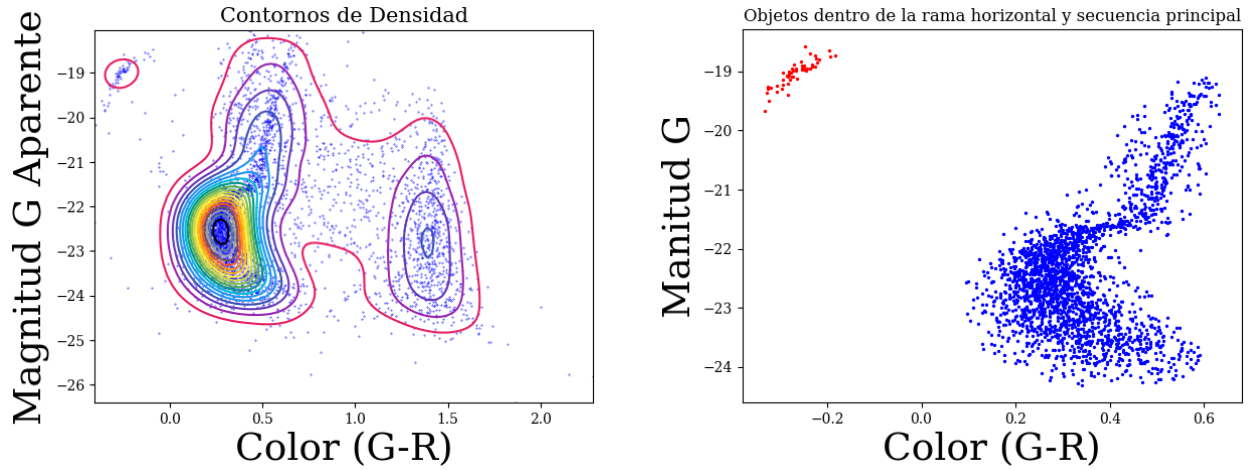


Figura 8: A la izquierda y derecha se muestran contornos de densidad y los objetos que quedaron dentro de un contorno particular respectivamente. Los contornos se hicieron desde 0.05 hasta 1 (del total) con un aumento de 0.05, para poder determinar cuál era más conveniente. Evidentemente, fue necesario usar diferentes máscaras para tomar tanto los puntos que caían dentro de la isocrona como dentro de la rama horizontal.

En la figura 9 se muestran diferentes ajustes de isocronas para diferentes edades, según el RMS entre las isocronas y los datos, en la izquierda solo 2 que son los más probables y a la derecha ajustes de diversas edades, demostrando que no cualquier edad es suficiente para ajustar bien al cúmulo, o en otras palabras, que necesitan mucho tiempo los cúmulos para evolucionar al estado de NGC 5694.

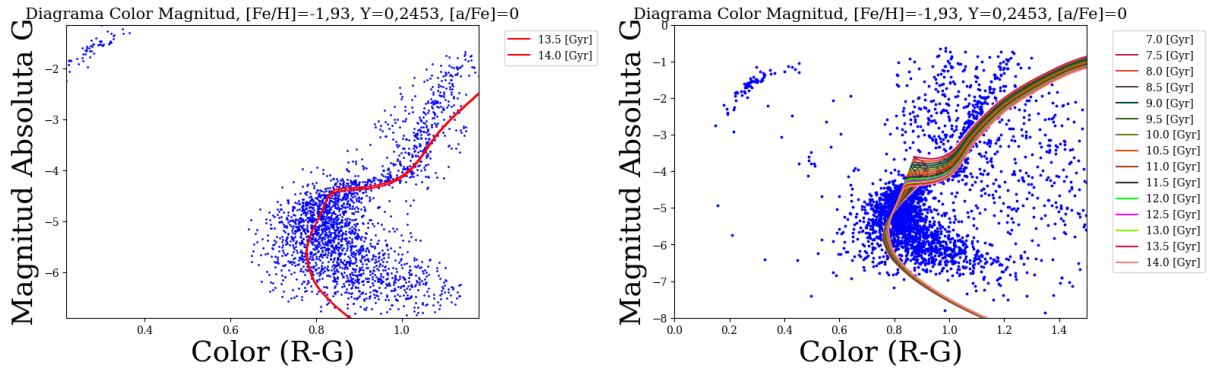


Figura 9: Ajuste de Isocrona a la secuencia principal en rojo, con una edad de 14 Giga años, metalicidad  $[Fe/H] = -2.2$ ,  $Y = 0.2452$  y  $[\alpha/Fe] = 0$ . Se corrigió conforme a la extinción, aunque en teoría, no era necesario, pues representaba un cambio muy pequeño para la magnitud (tanto para la banda verde o g como para la roja o r) y por ende para el color. Además, el RMS de la isocrona con respecto a los puntos de la secuencia principal fue de 0.6958, la menor de todas para estas abundancias, es decir, el mejor ajuste.

El perfil de densidad con su ajuste de King se muestran a continuación, aunque los datos no se encuentran de manera tan lineal o apretujada. Como se ve de la figura, tanto el radio tidal como el

de Jacobi es casi el mismo, mientras que el radio de núcleo marca mas o menos donde se produce la inflexión en el perfil de King.

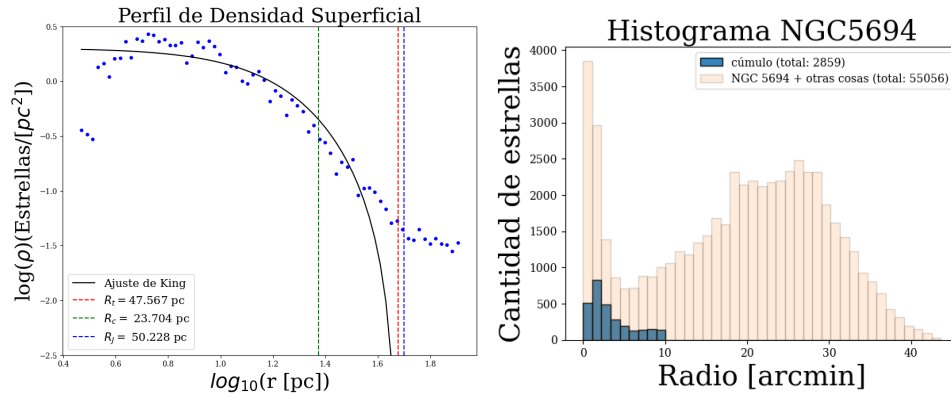


Figura 10: A la izquierda: ajuste de King (línea continua negra) para el perfil de densidad superficial radial (puntos en azul), tanto con el radio de corte (verde), radio tidal (rojo) y radio de Jacobi según Muñoz, Majewski & Johnston (2008) (azul). A la derecha histograma antes y después de la sustracción en función del radio.

En la figura 11 se muestra la diferencia entre objetos sin materia oscura (rojo) y con materia oscura (amarillo/verde) a la izquierda que muestra mas o menos cómo se comporta la curva de densidad superficial, mientras que a la derecha esta misma en pendiente pero reconociendo que no sigue necesariamente una función polinómica simple. Pero al menos se asume que una función parabólica es lo que mejor la describe, asumiendo menos parámetros (dos). Además, los parámetros de la figura anterior se muestran en la última tabla.

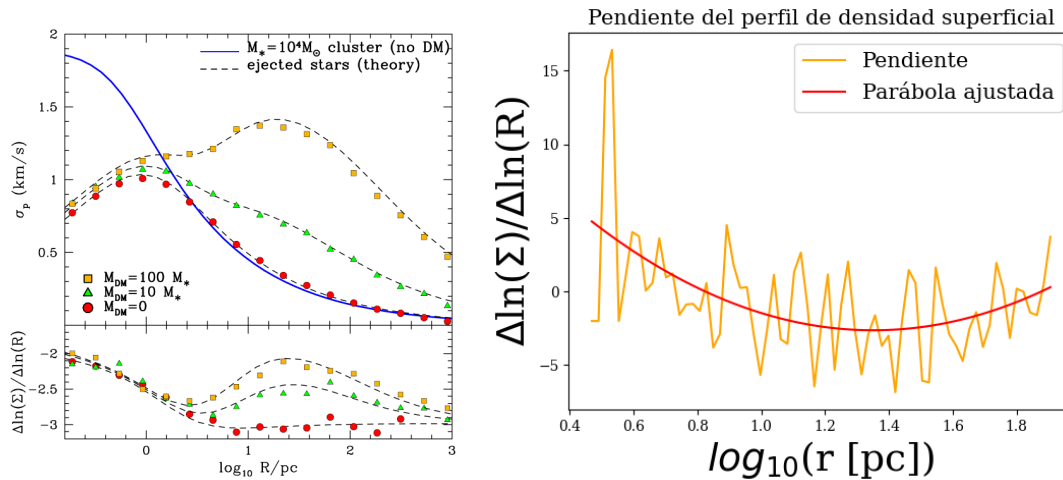


Figura 11: A la izquierda arriba y abajo, respectivamente, tanto la dispersión de velocidad como la pendiente del perfil de densidad radial superficial para cúmulos globulares con diferentes proporciones de materia visible a materia oscura, tomado de Peñarrubia et al. (2017). A la derecha, el perfil de densidad ajustado según una parábola para el cúmulo NGC 5694.

Tabla 2: En esta tabla se muestran los parámetros óptimos para el ajuste de King de la figura 10.  $R_c$ ,  $R_t$ ,  $k$  y  $R_J$  son respectivamente; el radio de núcleo (core), el radio tidal de King, una constante proporcional a la densidad superficial central y el Radio de Jacobi.

$R_c$ [pc]	$R_t$ [pc]	$k$ [Estrellas/[ $pc^2$ ]]	$R_J$ [pc]
23.704	47.567	6.533	50.228

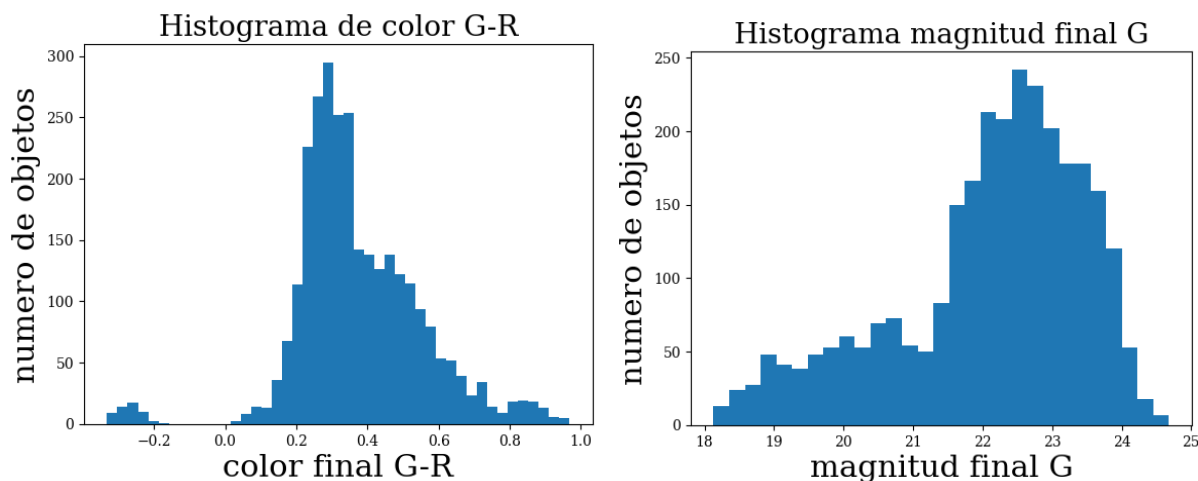


Figura 12: Cantidad de objetos del cúmulo según el índice de color G-R y la magnitud G respectivamente.

## 4. Discusión

En esta sección analizaremos los resultados de la parte anterior. Como parte de la teoría de formación de cúmulos globulares, es claro que es necesario analizar el diagrama color magnitud, debido a la necesidad de analizar la secuencia principal que define los límites del cúmulo. Sin embargo, no fue necesario analizar el diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R) pues lo único que queríamos era determinar los límites ya sea en el interior del cúmulo o bien su envoltura, los cuales se incluyen en la secuencia principal, la cual se puede analizar sin dificultad en el diagrama de magnitudes aparentes del diagrama color magnitud. Este diagrama sin embargo, casi la única diferencia que presenta con el diagrama H-R es la presencia de magnitudes aparentes, verde y roja, que al parecer necesitarían ser convertidas a magnitudes absolutas. Pero esto era una limitación porque no se conocen las distancias a todos los objetos que no eran parte del cúmulo, y por ende no se consideró como algo necesario. Más bien, no se consideró como un elemento que pudiera impedir la distinción entre objetos del cúmulo y objetos del campo de la vía láctea u otras galaxias.

Aclarado esto, en la figura 1, se puede ver tres elementos principales, de izquierda a derecha: la rama horizontal y la secuencia principal del cúmulo y la secuencia principal de las estrellas de la vía Láctea. Ahora bien, la suposición principal de este estudio es que todas las estrellas de los dos primeros conjuntos delineados, tienen el mismo origen y por tanto definen al cúmulo. Esto es razonable hasta donde sea posible ajustar una isocrona de cierto conjunto de abundancias, como las

de la figura 9. Esto lo analizaremos más adelante. De esta figura 1 vemos la imperiosa obligación de sustraer todos o al menos la mayoría de objetos que no sean originalmente parte del cúmulo, ya sea un objeto astrofísico o bien un artefacto (con artefacto, aquí nos referimos a algún tipo de señal u objeto que no es de manera natural un objeto astronómico definido, sino que puede ser por ejemplo un artefacto debido a ruido o bien debido a luz del cielo que hace que el CCD de la cámara se sature).

En la imagen del cúmulo podemos ver cómo se encierra un círculo rojo el radio de Jacobi siguiendo la fórmula (4) de Muñoz, Majewski & Johnston (2008).

De las figuras 2 y 3, podemos ver el uso que se le da a los parámetros estadísticos o morfológicos  $\chi$  y sharp, antes y después de la sustracción respectivamente. Es evidente que este criterio no pudo remover muchos objetos que no son del cúmulo. Esto quizá sucede debido al ajuste de polinomio que se usó para el Sharp vs Magnitud G, que a diferencia de otros análisis, no consistió en crear una red cuadrada en el gráfico  $\chi$ -sharp (ver figura 4), sino más bien en crear primero una máscara para sharp y luego aplicársela a  $\chi$ .

En la figura 5 podemos ver que existen regiones en los mapas de extinción y de enrojecimiento que deberían modificar las magnitudes aparentes  $g$  y  $r$ , pero a lo más por ejemplo en 0.116, 0.420 y 0.30, mientras que lo que modificaría son magnitudes del orden de -26, por lo que no es necesario aplicar corrección por extinción y/o enrojecimiento. Es de notar sin embargo, que estas regiones probablemente corresponden a regiones de la vía Láctea, y no del cúmulo en cuestión, debido a la extensión y degradación de las mismas en relación a la ubicación del cúmulo.

De la figura 6 se puede deducir una pequeña estructura tanto en el tercero como cuarto cuadrantes, pero no es suficiente esto para deducir la existencia de alguna estructura que afecte sustancialmente al cúmulo en cuanto a su simetría, pues en tales figuras se muestra tanto estrellas del cúmulo como estrellas del fondo. Mas bien, esto podría deberse a la presencia de otros objetos o galaxias alrededor de la imagen. Por ende, no es tan fácil descartar la existencia de colas o brazos de marea en el cúmulo. Otro elemento interesante de estos diagramas de Hess son las líneas horizontales semi violetas presentes en los cuatro, quizá se debe a la construcción del diagrama mismo, o bien la causa es desconocida.

En cuanto a la 7, nos damos cuenta de que el cúmulo termina aproximadamente en torno a los 10 arco minutos, concordando muy bien con lo predicho por Correnti et al (2011), puesto que luego de eso ya no es visible la secuencia principal. Sin embargo, la secuencia principal de las estrellas de campo sí persiste, pues evidentemente las estrellas de la vía Láctea están presentes envolviendo por todos lados y en todas direcciones la imagen del cúmulo.

Si nos fijamos en la figura 8 la elección de los contornos de iso-densidad nos permite seleccionar tanto los elementos de la secuencia principal como los de la rama horizontal. Por ejemplo, si lo hubiésemos hecho por medio de algún otro método como ajustar alguna curva, en realidad tendríamos que haber ajustado varias curvas y como mínimo un polinomio de alto grado para poder encontrar estos puntos del cúmulo, lo cual se evita usando los contornos.

Es claro de la figura 9 que si asumimos como el mejor ajuste del cúmulo para esas metalicidades, la edad sería entre 13.5 y 14 Giga años, mientras que podemos ver una desviación en la parte superior de ambas isocronas, que es de esperar tal y como sucede en Ortolani & Gratton (1989), aunque en el caso de ellos, la edad del cúmulo dio 17.5 Giga años. Esto lo vemos más claramente cuando vemos

que para 15 distintas isocronas de la misma metalicidad y abundancias químicas, la desviación arriba es grande. Esto, como ya se infiere de lo dicho, es debido sino exclusivamente, sí a la abundancia de metales.

Debido a la forma del perfil de King de la figura 10 podemos inferir no solamente lo ya dicho por muchos autores, de que se desvía del perfil de densidad real, sino que además el radio de Jacobi es aproximadamente el mismo que el radio Tidal, en nuestro caso de aproximadamente 50 parsecs o 10 arco minutos. Esto se refleja en la cantidad de estrellas que hay en el histograma, donde en azul están las estrellas del cúmulo (2859) y en total más de 55 mil. Por ende, debemos concluir que el cúmulo se extiende más allá del radio tidal, y por ende, existe una envoltura. Existe un pico en la cantidad de estrellas del cúmulo en torno a 1 o 2 arco minutos debido quizá al filtro hecho sobre sharp y chi.

Como se ve de la figura 11, la pendiente del perfil de densidad superficial nos permite inferir que es muy plausible la presencia de materia oscura, cuanto sea posible usar el mismo potencial gravitacional para el componente estelar, como se hace en Peñarrubia et al. (2017). De manera que, se hace imperiosa la necesidad de buscar algún tipo de simulación gravitacional del componente de materia oscura, o bien conocer el perfil de dispersión de velocidad. No se puede extrapolar la cantidad de materia oscura, mas bien se debe pensar que al menos en un orden de magnitud (10 a 1, relación de masa oscura a materia visible como se puede ver).

Finalmente, se puede decir que existe una sola población estelar en el cúmulo NGC 5694, aunque en el histograma de la figura 12 se puedan apreciar varios conjuntos de magnitudes y índices de color. De manera que, se puede decir que es aún más clara la distinción entre la rama horizontal y la secuencia principal, indicando no solo que son diferentes, sino que lo son porque están en diferentes etapas de evolución estelar.

En suma, el Cúmulo NGC 5694 tiene una envoltura más allá de su radio tidal de 50 arcmin, hasta aproximadamente 100 pc, con una edad mínima de 13.5 Giga años, metalicidad  $[Fe/H] = -1.93$ , al menos 2800 estrellas, pendiente de su perfil de densidad mayor a -3 y una sola población estelar con la mayoría de objetos en 0.3 magnitud de índice de color g-r. Es muy plausible la existencia de materia oscura en el mismo.

## Referencias

- <sup>1</sup> Russell, E. & Boldrini, P. (2022). Properties of globular clusters formed in dark matter mini-halos. *A & A*, 667, 18.
- <sup>2</sup> Rubin, V. C. & Ford, K. (1970). Rotation of the Andromeda Nebula from a spectroscopic survey of emission regions. *The Astrophysical Journal*, Vol. 159.
- <sup>3</sup> Rubin, V. C. et al. (1980). Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 to UGC 2885. *The Astrophysical Journal*, Vol. 159.
- <sup>4</sup> Trenti, M. et al. (2015). The Relative and Absolute Ages of Old Globular Clusters in the LCDM Framework. *The American Astronomical Society* 808 L35.
- <sup>5</sup> Ortolani, S. & Gratton, R. (1990). Deep Photometry of globular clusters. XII. The metal-poor clusters NGC 5694 and Terzan 8. *Astronomy & Astrophysics, Suppl. Ser.*, Vol. 82, p. 71-112.



- <sup>6</sup> Geisler, D., Piatti, A.E., Claria, J.J., and Minniti, D. (1995). Lower Metallicity Limit of the Galactic Globular Cluster System: Calcium Triplet Spectroscopy of Metal-poor Globular Cluster Giants. *Astrophysical Journal* 109, 605.
- <sup>7</sup> Lee, J-W., López-Morales, M & Carney, B. W. (2006). A Chemical Abundance Study of One Red Giant Star in NGC 5694: A Globular Cluster with a Dwarf Spheroidal Chemical Signature?. *The Astrophysical Journal*, Vol. 646, Issue 2, pp.L119-L122.
- <sup>8</sup> Peñarrubia, J. et al. (2017). Stellar envelopes of globular clusters embedded in dark mini-haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Vol. 471, Issue 1, p.L31-L35.
- <sup>9</sup> Bajkiva, A. T. & Bobylev, V. V. (2022). A New Catalog of orbits of 152 Globular Clusters from Gaia EDR3. *IzvPulkovo*, Issue 227.
- <sup>10</sup> Muñoz, R., Majewski, S. R. & Johnston, K. V. (2008). Modeling the Structure and Dynamics of Dwarf Spheroidal Galaxies with Dark Matter and Tides. *The Astrophysical Journal*, Vol. 679, Issue 1, pp. 346-372.
- <sup>11</sup> Xue X. X. et al.(2008). The Milky Way's Circular Velocity Curve to 60 kpc and an Estimate of the Dark Matter Halo Mass from the Kinematics of 2400 SDSS Blue Horizontal-Branch Stars. *The Astrophysical Journal*, Volume 684, Issue 2, pp. 1143-1158.
- <sup>12</sup> Carlson, N. L. et al. (2018). Globular Cluster population of the HST Frontier Fields galaxy J07173724+3744224. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 480, Issue 2, p. 1956-1972.
- <sup>13</sup> Davis, B. D. et al. (2022). A Census of Above-horizontal-branch Stars in Galactic Globular Clusters. *The Astrophysical Journal*, Vol. 926, Issue 1, id.99, 27 pp.
- <sup>14</sup> Han, Sang-II et al. (2020). Narrowband Ca Photometry for Dwarf Spheroidal Galaxies. I. Chemostructural Study on Draco, Sextans, and Canes Venatici I. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 247, Issue 1, id.7, 13 pp.
- <sup>15</sup> Correnti, M. et al. (2011). A low surface brightness halo surrounding the globular cluster NGC 5694. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 417, Issue 4, pp. 2411-2416..
- <sup>16</sup> Kuzma, P. B. et al. (2016). The outer envelopes of globular clusters – I. NGC 7089 (M2). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 461, Issue 4, p.3639-3652.
- <sup>17</sup> Gratton, R. G. & Ortolani, S. (1989). *Astronomy Astrophysics*. 169, 208.