

Comunicación

**DETERMINACION DE ABUNDANCIAS FOTOMETRICAS Y
SELECCION DE MIEMBROS FISICOS DE ALTA LUMINOSIDAD
EN 11 CUMULOS ABIERTOS**

J.J. Clariá*

Observatorio Astronómico de Córdoba

Resumen: Se analizan y discuten nuevos datos fotoeléctricos de alta precisión de estrellas G y K de los siguientes cúmulos: NGC 2232, NGC 2264, NGC 2335, NGC 2343, Ruprecht 19, NGC 2451, Ruprecht 46, NGC 2527, NGC 2546, NGC 2548 y NGC 2567. La discriminación entre posibles miembros físicos y estrellas del campo galáctico se llevó a cabo usando dos criterios fotométricos independientes. Contrariamente a lo sugerido por algunos autores, se encuentra que los cúmulos jóvenes NGC 2232, NGC 2264 y NGC 2451 muy probablemente no poseen gigantes rojas. Usando métodos apropiados y recientes calibraciones del sistema DDO, se determinaron excesos de color, distancias, abundancia de elementos pesados, temperaturas efectivas, gravedades superficiales y masas de las

* Miembro de la Carrera del Investigador Científico del CONICET.

gigantes rojas. Se presentan nuevas evidencias observacionales del efecto de pérdida de masa en la mayoría de los cúmulos estudiados. Las abundancias determinadas fotométricamente oscilan entre $[Fe/H] \approx -0.2$ en Ruprecht 46 y $[Fe/H] \approx +0.3$ en NGC 2546.

I. INTRODUCCION

El estudio de la metalicidad en estrellas tardías evolucionadas de cúmulos estelares ha permitido develar gran parte del enigma que durante muchos años representó la evolución de la composición química del disco galáctico. Por otra parte, este tipo de estudio ha permitido detectar la existencia de gradientes de metalicidad, tanto radial como axial, en nuestra galaxia. Sin embargo, cuando sólo se consideran cúmulos abiertos y en particular jóvenes, los estudios de metalicidad de estrellas tardías evolucionadas se ven severamente limitados por el hecho de que la mayoría de estos agregados sólo contienen un número comparativamente pequeño de estrellas G y/o K evolucionadas. Esto hace que sólo en unos pocos casos puedan efectuarse comparaciones detalladas de secuencias evolutivas teóricas y observadas. Además, la gran dispersión en magnitudes existente en las ramas evolucionadas de los cúmulos abiertos complica aún más el panorama ya que objetos del campo galáctico pueden fácilmente confundirse con estrellas tardías evolucionadas.

Precisamente, el presente trabajo persigue los siguientes objetivos principales: (1) examinar la probabilidad de que un cierto número de estrellas tardías ubicadas en la región de varios cúmulos seleccionados puedan ser miembros gigantes o supergigantes; (2) determinar abundancias fotométricas de los miembros de alta luminosidad y otras variables

astrofísicas fundamentales, tales como T_{ef} , gravedades superficiales, luminosidades y masas. Las dos primeras variables son importantes porque permiten ubicar las estrellas en un diagrama HR teórico y, por lo tanto, permiten efectuar comparaciones con la teoría.

Presentaremos aquí sólo los principales resultados obtenidos con relación a este proyecto. Las observaciones individuales, los errores medios involucrados y un análisis minucioso de los resultados obtenidos en cada cúmulo, pueden verse en una versión más completa y detallada del presente estudio (Clariá 1984).

II. MATERIAL OBSERVACIONAL

El material observacional seleccionado en este trabajo consiste en fotometría fotoeléctrica DDO-UBV obtenida íntegramente con los telescopios de 41 cm y 91 cm del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo (Chile). Las estrellas de tipos G y/o K observadas se encuentran en las regiones de 11 cúmulos abiertos indicados en la Tabla 1. Tal como se aprecia en dicha tabla, la muestra incluye cúmulos abiertos seleccionados en la región $200^{\circ} \leq l \leq 260^{\circ}$ y $-8^{\circ} \leq b \leq +6^{\circ}$, con edades que oscilan entre 3 y 1000 millones de años.

TABLA 1
POSICIONES Y EDADES DE LOS CUMULOS SELECCIONADOS

CUMULO	l	b	Edad (años)
NGC 2232	214.2	-8.0	2×10^7
NGC 2264	202.9	+2.2	3×10^6
NGC 2335	223.6	-1.1	10^8
NGC 2343	224.3	-1.2	6×10^8
Ruprecht 18	239.9	-4.9	6×10^7
NGC 2451	252.1	-4.0	2×10^7
Ruprecht 46	238.4	+5.9	10^9
NGC 2527	246.1	+1.9	10^9
NGC 2546	254.9	-2.0	3×10^7
NGC 2548	227.9	+15.3	2×10^8
NGC 2567	249.8	+3.0	10^8

III. SELECCION DE MIEMBROS FISICOS DE ALTA LUMINOSIDAD

Con relación al primero de los objetivos propuestos, se decidió hacer uso de una ventajosa posibilidad que ofrece la combinación de datos obtenidos en los sistemas UBV y DDO para determinar enrojecimiento interestelar de estrellas tardías.

De la misma manera que se define el parámetro Q de Johnson, pueden definirse en el sistema DDO tres parámetros libres de enrojecimiento interestelar, a saber:

$$Q_{42/45} = C(42-45) - \frac{E [C(42-45)]}{E(B-V)} (B-V), \quad (1)$$

$$Q_{45/48} = C(45-48) - \frac{E(C(45-48))}{E(B-V)} (B-V), \quad (2)$$

$$Q_{41/42} = C(41-42) - \frac{E(C(41-42))}{E(B-V)} (B-V), \quad (3)$$

en las cuales los coeficientes $E(C(i-j)) / E(B-V) = \alpha_{i,j}$ pueden obtenerse a partir de algunas de las versiones conocidas de la curva de enrojecimiento (Whitford 1958, Whiteoak 1966, Nandy et al. 1975, Schild 1977).

Por otra parte, si se comparan los colores DDO de estrellas G y K ubicadas a distancias menores que 50 pc del sol (estrellas prácticamente no enrojecidas) se encuentra que, para las gigantes clase III, la relación entre los índices de color intrínsecos $C_0(42/45)$ y $C_0(45-48)$ es prácticamente lineal. Algo similar ocurre entre las variables $Q_{42/45}$ y el color $(B-V)_0$ de Johnson. Las ecuaciones resultantes son:

$$C_0(42-45)_{III} = 2.222 C_0(45-48) - 1.761, \quad (4)$$

$$Q_{42/45}^{III} = B_1 (B-V)_0 + B_2, \quad (5)$$

siendo B_1 y B_2 ligeramente dependientes de la curva de enrojecimiento elegida. Para el caso particular de la curva de Whitford (1958), resultan $B_1 = 0.639$ y $B_2 = -0.018$.

Es evidente que no todas las estrellas de la clase III caen sobre las líneas rectas en ambos diagramas. No obstante ello, si denotamos δ_1 y δ_2 a las correspondientes desviaciones en abscisas respecto de las líneas rectas en ambos diagramas, se encuentra que dichas desviaciones están a su vez correlacionadas de la siguiente manera:

$$\delta_1 = 2.33 \delta_2, \quad (6)$$

siendo:

$$\delta_1 = C_0(42-45) - C_0(42-45)_{III}, \quad (7)$$

$$\delta_2 = Q_{42/45} - Q_{42/45}^{III}. \quad (8)$$

Combinando algebraicamente todas estas expresiones y eliminando las variables $Q_{42/45}^{III}$, δ_1 y δ_2 , es fácil mostrar

que $(B-V)_0$ y, en consecuencia también $E(B-V)$, admite una expresión lineal en términos de los colores $(B-V)$, $C(42-45)$ y $C(45-48)$ observados. La ecuación resultante para el exceso de color es:

$$E(B-V) = A_1(B-V) + A_2C(45-48) + A_3C(42-45) + A_4 \dots \quad (9)$$

Los coeficientes A_i de (9) han sido originalmente obtenidos por McClure y Bacine (1969) usando la curva de enrojecimiento de Whitford. Los valores encontrados son: $A_1 = 2.175$, $A_2 = -1.420$, $A_3 = -2.380$ y $A_4 = 1.841$. Estos coeficientes cambian relativamente poco en función de la curva de enrojecimiento utilizada. Más recientemente, Janes (1977) usando básicamente estas mismas ideas describió un método iterativo para calcular excesos de color de estrellas tardías, con un rango de aplicabilidad mayor.

Para analizar la probabilidad de pertenencia a un cúmulo de cada estrella observada, hicimos uso del método de Janes para calcular el exceso de color, denotando $E(B-V)_{GK}$ y computamos también la desviación standard σ_E de dicho exceso a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_E = \left[A_1^2 \sigma_{BV}^2 + A_2^2 \sigma_{45/48}^2 + A_3^2 \sigma_{42/45}^2 \right]^{1/2}, \quad (10)$$

en la cual σ_{BV} , $\sigma_{45/48}$ y $\sigma_{42/45}$ representan desviaciones standard y los coeficientes A_i han sido obtenidos por McClure y Racine (1969). Formamos luego la diferencia

$\delta E(B-V) = |E(B-V)_{GK} - E(B-V)_{SP}|$, en la cual $E(B-V)_{SP}$ es el enrojecimiento obtenido para las estrellas de la secuencia principal y, coherente con lo definido en un trabajo anterior (Clariá y Lapasset 1983), cuando la estrella verifica alguna de las 3 relaciones siguientes:

$\delta E(B-V) \leq \sigma_E$; $\sigma_E < \delta E(B-V) \leq 2 \sigma_E$; $\delta E(B-V) > 2 \sigma_E$. Interpretamos ese resultado admitiendo que la misma tiene una alta, mediana, o muy baja probabilidad de ser miembro del cúmulo, respectivamente. Simbolizamos estas 3 posibilidades como es usual con las notaciones m, pm y nm, respectivamente.

Por otra parte, dado que los cúmulos seleccionados tienen distancias bien conocidas, comparamos la clase de luminosidad derivada de los índices DDO, previamente desenrojecidos y desafectados por efectos de metalicidad (Janes 1979), con aquella que le correspondería al objeto si fuera miembro del cúmulo. Para ello formamos la diferencia siguiente: $\delta L = |CL(DDO) - CL(predicha)|$, y denotamos nuevamente con m, pm y nm las tres alternativas siguientes: $\delta L \leq 1/2 CL$; $1/2 CL < \delta L \leq 1 CL$; $\delta L > 1 CL$.

Teniendo en cuenta las diferentes combinaciones que pueden resultar al aplicar dos criterios, decidimos considerar como miembros físicos de los cúmulos sólo aquellas estrellas que resultan ser tales a partir de ambos criterios, o bien cuando un criterio implica pertenencia al cúmulo y el otro probabilidad de pertenencia. Si uno o ambos criterios implican "nm", la estrella se considera un objeto del campo galáctico y, sólo si ambos criterios simultáneamente implican "pm", se la considera un probable miembro del agregado.

IV. RESULTADOS

En la Tabla 2 se ilustran los resultados obtenidos al aplicar los dos criterios fotométricos independientes descritos en la sección anterior. Aproximadamente el 50% de las estrellas tardías observadas resultan con una alta probabilidad de constituir miembros físicos, en tanto que la gran mayoría de las restantes tienen muy baja probabilidad de estar físicamente vinculadas a los cúmulos.

Por otra parte y contrariamente a los resultados obtenidos recientemente por Pastoriza y Röpkke (1983), los cúmulos jóvenes NGC 2232 y NGC 2451 muy probablemente no poseen gigantes rojas. Esta conclusión inferida a partir de los criterios fotométricos se ve reforzada con otros argumentos adicionales. En efecto, en el caso de NGC 2232, la única posible gigante roja (HD 45398) de acuerdo al diagrama HR obtenido por Clariá (1972), tiene una velocidad radial de $(+77 \pm 0.5)$ km/seg medida con el CORAVEL por Mermilliod (1984). Si comparamos este valor con la velocidad radial del cúmulo de (16 ± 4) km/seg definida por las 3 estrellas tempranas más brillantes de la secuencia principal, debemos desechar a HD 45398 como posible miembro evolucionado, lo que refuerza el presente resultado fotométrico. Con respecto a NGC 2451, nuestros resultados también se ven reforzados por el hecho de que: (1) las distancias individuales (ver Tabla 3) difieren significativamente de los valores publicados por varios autores para el cúmulo (Williams 1967a, 1967b, Feinstein 1966, Eggen 1974, Lynga y Wramdemark 1984); (2) las masas individuales determinadas siguiendo el procedimiento descrito por Clariá y Lapasset (1983), resultan considerablemente diferentes de las que deberíamos esperar para objetos de la rama gigante de NGC 2451, teniendo en cuenta la edad del cúmulo (ver Tabla 3).

TABLE 2

SELECCION DE MIEMBROS FISICOS

CUMULO	ESTRELLA	E(B-V) _{6K}	MK(DDO)	CRITERIOS CLASIFICACION		
				(A)	(B)	
NGC 2232	4	0.06	K3-4 III-IV	na	pa	na
NGC 2264	37	0.08	K4 III-IV		na	na
	69	0.09	K3-4 III-IV		na	na
	73	0.04	G2-5 IV		na	na
	229	0.07	K1-2 III-IV		na	na
	237	0.43	G9 III		pa	pa
	238	0.08	K2-3 III		a	a
	239	0.09	K1 III-IV		pa	pa
NGC 2335	4	0.47	G5-B II	pa	a	a
	9	0.07	-	na	-	na
NGC 2343	2	0.29	B5 II	pa	a	a
Ruprecht 18	15	0.62	G9 III	a	a	a
NGC 2451	154	0.08	K5 IV	pa	na	na
	163	0.09	K0 IV	pa	na	na
	191	0.08	K0 III-IV	a	na	na
	223	0.19	G5-B III	na	a	na
	254	0.18 ^a	K4 Ib	na	a	na
	269	0.00	K4 III-IV	a	na	na
	306	0.27	G5-B III	na	pa	na
Ruprecht 46	2	0.07	G9 III	a	a	a
NGC 2527	10	0.08	G8 III	a	a	a
	124	0.10	G8 III	a	a	a
NGC 2546	356	0.14	K0 Ib-II	a	a	a
NGC 2548	8	0.11	G9 II-III	pa	a	a
	15	0.02	G8 II	a	pa	a
	58	0.05	G5-B III	a	a	a
	66 ^b	0.07	G2-5 V	a	na	na?
	108	0.04	K0 II	a	pa	a
NGC 2567	16 ^c	0.00	G5 II-III	na	pa	na?
	54 ^c	0.14	G2-5 II	a	a	a
	61	0.00	K0-1 III	na	a	na

a: exceso de color determinado a partir del tipo espectral (K5 IIa) asignado por Levato y Malaroda (1975).

b: binaria espectroscópica (Mermilliod 1984).

c: estrella doble, ambas componentes se midieron simultáneamente.

TABLA 3
ABUNDANCIAS, DISTANCIAS Y MASAS DERIVADAS

CUMULO	Estrella	[Fe/H]	M_V	$V_0 - M_V$	Masa(%)	Clasificación
NGC 2232	4	-0.14	-2.0 ^a	8.7	18.6	nm
NGC 2264	37	-0.14	1.0	6.9	9.1	nm
	69 ^c	-0.15	1.3	7.0	8.7	nm
	73 ^c	-	-	-	12.3	nm
	229	+0.04	1.5	6.8	12.7	nm
	237	+0.19	0.6	7.6	3.2	pm
	238	+0.16	0.9	8.8	1.6	n
	239	-0.04	1.7	7.4	5.5	pm
NGC 2335	4	+0.22	-2.0 ^b	10.3	11.4	n
NGC 2343	2	-0.15	-2.0 ^b	9.9	3.6	n
Ruprecht 18	15	+0.02	0.6	9.1	1.8	n
NGC 2451	154	-0.05	-	-	1.3	nm
	163	+0.04	2.1	3.9	1.5	nm
	191	+0.05	1.8	4.7	15.5	nm
	223	+0.41	1.1 ^b	5.3	-	nm
	254	-0.74	-2.0 ^b	5.1	2.0	nm
	269	-0.35	1.4	4.9	0.9	nm
	306	+0.25	0.2	6.3	1.3	nm
Ruprecht 46	2	-0.22	1.0	10.0	1.0	n
NGC 2527	10	+0.30	1.5	8.0	3.2	n
	124	-0.02	1.0	9.0	1.0	n
NGC 2546	356	+0.26	-2.0	10.0	1.2	n
NGC 2548	8	+0.20	-0.1	8.0	2.6	n
	15	+0.05	-0.4	9.0	0.7	n
	58 ^c	+0.18	1.4	8.1	2.8	n
	66 ^c	-	-	-	-	nm?
	108	-0.42	0.2	9.4	0.5	n?
NGC 2567	16 ^d	-0.03	0.3	11.5	2.1	nm?
	54 ^d	+0.22	-0.5	10.9	2.2	n?
	61	+0.10	0.7	10.3	0.5	nm

a: magnitud absoluta espectroscópica (Clariá 1972).
b: magnitud absoluta determinada a partir de la calibración de Schmidt-Kaler (1965).
c: índices DDO fuera del rango de calibración de Janes.
d: V_0 fue corregida en 0.75 debido a la presencia de una compañera.

Con relación a NGC 2264 debemos aceptar que la reconocida existencia de enrojecimiento diferencial en la región (Strom et. al. 1972, Young 1978) dificulta la discriminación entre miembros y no miembros. Aún así, la aplicación del segundo

criterio fotométrico sugiere sólo las estrellas Nos. 237, 238 y 239 tienen probabilidad de pertenecer al adregado; las restantes exhiben muy baja probabilidad de pertenencia. Sin embargo, las 3 estrellas mencionadas se encuentran muy alejadas del centro del cúmulo y tienen masas demasiado diferentes en comparación a las masas de las gigantes rojas del grupo I de Harris (1976), al cual pertenece por edad NGC 2264. Es pues muy probable que, al igual que NGC 2232 y NGC 2451, el cúmulo abierto NGC 2264 de extremada juventud tampoco posea gigantes rojas.

TABLA 4

COMPARACION DE PARAMETROS OBTENIDOS A PARTIR DE
GIGANTES ROJAS Y ESTRELLAS DE LA SECUENCIA
PRINCIPAL

CUMULO	E(B-V)	$V_0 - M_V$	[Fe/H]	M/M_0
NGC 2335	(0.40) 0.47	(10.05) 10.30	+0.22	2.4 (3-4)
NGC 2343	(0.20) 0.26	(9.91) 9.89	-0.15	3.6 (3-4)
Ruprecht 18	(0.67) 0.62	(10.06) 9.60	+0.02	1.8 (~ 5)
Ruprecht 46	(0.07) 0.07	(9.40) 9.90	-0.28	1.0 (~ 2)
NGC 2527	(0.10) 0.08	(8.70) 8.85	0.00	1.6 (~ 2)
NGC 2546	(0.17) 0.14	(9.96) 9.98	+0.28	1.2 (6-8)
NGC 2548	(0.04) 0.06	(9.00) 8.68	+0.14	1.6 (3-4)
NGC 2567	(0.12) 0.14	(11.15) 10.91	+0.22	2.2 (3-4)

En la Tabla 4 se consignan valores medios de los excesos de color, módulos de distancia, abundancias de hierro y masas obtenidas para las gigantes rojas reconocidas en cada cúmulo. Las cantidades entre paréntesis corresponden a

los parámetros determinados a partir de estrellas de la secuencia principal. Se aprecia en general un buen acuerdo entre los excesos de color y las distancias medias derivadas usando uno y otro tipo de estrellas. Las razones hierro a hidrógeno han sido derivadas a partir de las anomalías de δ cianógeno, usando la calibración (Fe/H) versus CN recientemente obtenida por Clariá y Lapasset (1983). Los valores de (Fe/H) encontrados oscilan entre +0.28 y -0.28 en NGC 2546 y Ruprecht 46, respectivamente.

Finalmente, cabe mencionar que si bien las masas individuales se han determinado con un error de ± 0.2 en el log η , los valores derivados para las gigantes rojas en cada cúmulo son en general algo más bajos que los valores teóricos esperados (indicados entre paréntesis en la Tabla 4), de acuerdo a la edad de cada agregado. Esta tendencia, usualmente interpretada como debida al fenómeno de pérdida de masa, ha sido igualmente detectada en muchos otros cúmulos abiertos (Dawson 1978, Clariá 1979 y Clariá y Lapasset 1983).

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Director del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, Dr. Patrick Osmer, por haberle permitido disponer de las facilidades de ese Observatorio. Este trabajo ha sido en parte financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) de la República Argentina.

REFERENCIAS

- Clariá, J.J. 1972, *Astron. Astrophys.* **19**, 303.
Clariá, J.J. 1979, *Astrophys. Space Sci.* **66**, 201.

- Clariá, J.J. 1984, *Astron. Astrophys. Suppl.* (en prensa).
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1983, *J. Astrophys. Astron.* **4**, 117.
- Dawson, D.W. 1978, *Astron. J.* **83**, 1424.
- Eugen, O.J. 1974, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **86**, 960.
- Feinstein, A. 1966, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **78**, 301.
- Harris, G.L.H. 1976, *Astrophys. J. Suppl.* **30**, 451.
- Janes, K.A. 1977, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **89**, 576.
- Janes, K.A. 1979, *Astrophys. J. Suppl.* **39**, 135.
- Levato, H. y Malaroda, S. 1975, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **87**, 823.
- Lynga, G. y Wrandemark, S. 1984, *Astron. Astrophys.* **132**, 58.
- McClure, R.D. y Racine, R. 1969, *Astron. J.* **74**, 1000.
- Mermilliod, J.C. 1984, Comunicación privada.
- Nandy, K., Thompson, G.I., Jamar, C., Monfils, A. y Wilson, E. 1975, *Astron. Astrophys.* **44**, 195.
- Pastoriza, M.G. y Röpke, U. 1983, *Astron. J.* **88**, 1769.
- Schild, E.E. 1977, *Astron. J.* **82**, 337.
- Schmidt-Kaler, Th. 1965, *Landolt Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Group VI, I, Voigt (ed.), p. 302.*
- Strom, S.E., Strom, K.M., Brooke, A.L., Bregman, J., Yost, J. 1972, *Astrophys. J.* **171**, 267.
- Whiteoak, J.B. 1966, *Astrophys. J.* **144**, 305.
- Whitford, A.E. 1958, *Astron. J.* **63**, 201.
- Williams, P.M. 1967a, *Monthly Notes Astron. Soc. Southern Africa* **26**, 30.
- Williams, P.M. 1967b, *Monthly Notes Astron. Soc. Southern Africa* **26**, 139.
- Young, A. 1978, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **90**, 141.