

CÚMULOS ESTELARES RELATIVAMENTE VIEJOS EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES: DOS NUEVOS CANDIDATOS IDENTIFICADOS

Andrés E. Piatti

Instituto de Astronomía y Física del Espacio, Casilla de Correo 67, Sucursal 28, 1428, Ciudad de Buenos Aires;
E-mail: andres@iafe.uba.ar

Resumen

Cúmulos estelares relativamente viejos en la Nube Menor de Magallanes: Dos nuevos candidatos identificados. En este trabajo presentamos resultados sobre las edades y contenido metálico de los cúmulos estelares de la Nube Menor de Magallanes (NMM) L110, L112 y L113, obtenidos a partir de observaciones fotométricas CCD CT_1 del sistema de Washington. Confirmamos que L113 es un cúmulo relativamente viejo y pobre en metales, y reportamos por vez primera que L110 y L112 son también cúmulos relativamente viejos ($t \sim 6.5 \times 10^9$ años). Las edades que derivamos refuerzan resultados previos que muestran que los cúmulos más viejos y pobres en metales se encuentran, con cierta dispersión, más alejados del centro de la galaxia. Por otra parte, el modelo de formación por *burst* aún resulta ser el paradigma más probable para describir la historia de formación estelar en la NMM. En este sentido, llamamos la atención sobre un posible segundo *burst* ocurrido hace $\sim 6-7 \times 10^9$ años, además del conocido y más reciente *burst* de hace $\sim 3 \times 10^9$ años.

Palabras clave: técnicas: fotométricas - galaxias: individual: NMM - galaxias: cúmulos estelares.

Abstract

Relatively old star clusters in the small magellanic cloud: two newly identified candidates. We present the results on the age and metallicity estimates of the Small Magellanic Cloud (SMC) clusters L110, L112 and L113 obtained from CCD Washington CT_1 photometry. We confirm L113 as a relatively old and metal-poor cluster, and report for the first time that L110 and L112 are also relatively old clusters ($t \sim 6.5$ Gyr). Their derived ages and metallicities reinforce previous suggestions that the further a cluster is from the centre of the galaxy, the older and more metal-poor it is, with some dispersion. In addition, the bursting star formation model still appears to be the most probable paradigm to describe the SMC's star formation history. We call attention to a second possible burst at $\sim 6-7$ Gyr, besides the known burst at ~ 3 Gyr.

Key words: techniques: photometric - galaxies: individual: SMC - galaxies: star clusters.

1. Introducción

La Nube Menor de Magallanes (NMM) alberga una población estimada de ~ 2000 cúmulos estelares. Chiosi et al. [4] han derivado edades a partir del ajuste de isócronas teóricas en los diagramas color-magnitud (DCM) para la mayor muestra de cúmulos estudiados hasta el presente (311) en la parte central de la galaxia. Otros estudios recientes han considerado muestras de cúmulos más pequeñas con alguna superposición entre ellos: Rafelski & Zaritsky [27] presentaron edades para 195 cúmulos estelares basadas en

una comparación de colores integrados con modelos estelares sencillos; Pessev et al. [17] han construido una nueva base de datos de magnitudes infrarrojas *JHK* para 75 cúmulos estelares; Piatti et al. [26] analizaron DCM de una muestra de 44 cúmulos estelares compuesta predominantemente por objetos con datos adquiridos por nuestro grupo. Como resulta claro de los resultados mencionados, si bien las edades y abundancias metálicas de los cúmulos estelares pueden derivarse de una manera relativamente expeditiva a partir de los DCM, aún resta mucho traba-

jo por hacer antes de disponer de una imagen completa de la historia de formación y evolución del sistema de cúmulos estelares de la NMM.

Distintos autores han abordado durante las últimas décadas diferentes cuestiones relativas a la historia de formación estelar en la NMM, su enriquecimiento metálico y parámetros estructurales. Da Costa & Hatzidimitriou [6] obtuvieron espectros para 7 cúmulos de la NMM con el fin de derivar abundancias metálicas precisas y sus dispersiones de velocidad, de modo de estudiar la relación edad-metalicidad (REM) y la dinámica de los cúmulos; Mighell, Sarajedini & French [12] analizaron datos de archivo del telescopio espacial Hubble de 5 cúmulos estelares viejos para investigar la secuencia de edad, con el objetivo de mejorar nuestro conocimiento acerca de la cronología en la formación estelar de la NMM; Rich et al. [28] reportaron edades para 7 objetos a partir de imágenes del telescopio Hubble, las cuales combinadas con datos previamente publicados, mostraron la existencia de dos grupos de edad entre los cúmulos estudiados; y Crowl et al. [5] utilizando las edades, las abundancias metálicas y las posiciones de 12 cúmulos tomados como patrones, determinaron el espesor de la galaxia en la línea de la visual hacia ella.

Durante los últimos años, nuestro grupo ha estado conduciendo un relevamiento de cúmulos estelares en la NMM con el objetivo de ampliar la muestra de objetos bien estudiados con edades y abundancias metálicas referidas a una escala homogénea [19, 23, 24, 25, 26]. Este programa y su progresiva continuación nos han ayudado a mejorar nuestro conocimiento acerca de la evolución química de la NMM. En la medida que el proyecto fue produciendo sus primeros resultados [19], resultó más claro que la NMM no se formó como en una perfecta caja cerrada, y que existen al menos dos épocas de formación de cúmulos, la primera hace $\sim 6 \times 10^9$ años y una más reciente hace $\sim 3 \times 10^9$ años, cualitativamente en concordancia con los resultados de Rich et al. [28].

Evidencias que favorecen una historia de formación de tipo *burst* han ido repetidamente confirmando este mecanismo de formación en subsecuentes trabajos; en particular, Piatti et al. [23, 26] mostraron la existencia de dos episodios principales. El *burst* más reciente parece estar en concordancia con un encuentro cercano entre ambas Nubes de Magallanes (NM) y la Vía Láctea [1], y con sus respectivas REM que muestran una marcada complementariedad [20]. Más aún, hemos mostrado [23] que la NMM ha permanecido notablemente inhomogénea a través de toda su extensión –químicamente hablando–, desde su

nacimiento hasta hace aproximadamente 1×10^9 años. Tal inhomogeneidad parece estar de acuerdo con un resultado posterior [24], respecto de que la actual relación edad-posición para los cúmulos de la NMM en el disco interior sugiere no sólo la posibilidad de que los cúmulos se hayan formado en un escenario *outside-in*, como en un colapso relativamente rápido, sino que además el disco interior pudo haberse formado durante un escenario de formación tipo *burst*. La combinación de una población de cúmulos más vieja y pobre en metales distribuida por toda la NMM, y una población de cúmulos más joven y rica en elementos pesados principalmente formados en el disco interior –como también muestran Piatti et al. [25]–, sugiere la presencia de un gradiente radial y otro de edad para el disco de la NMM, con alguna dispersión. Esta tendencia resulta más marcada para las edades de los cúmulos que para sus abundancias metálicas [25, 26].

En este trabajo, presentamos resultados sobre tres cúmulos (L110, L112, y L113), dos de los cuales (L110 y L112) no habían sido estudiados en detalle hasta el presente, y que resultaron ser cúmulos relativamente viejos, como L113. La próxima Sección describe las observaciones obtenidas y la reducción de los datos recolectados. La Sección 3 presenta el procedimiento seguido para estimar los parámetros estructurales de los cúmulos, mientras que la Sección 4 trata sobre la estimación de las edades y abundancias metálicas de los cúmulos a partir de los DCM. El análisis lo continuamos en la Sección 5 con una discusión de los resultados y sus implicaciones. Finalmente, nuestros resultados se resumen en la Sección 6.

2. Observaciones y reducción

Las observaciones fotométricas de L110, L112 y L113 fueron realizadas con la *Danish Faint Object Spectrograph and Camera* (DFOSC) del telescopio de 1.54 m del Observatorio Europeo Austral (ESO, La Silla, Chile). Para guardar consistencia con nuestros anteriores trabajos, empleamos los filtros *C* y *TI* del sistema de Washington [3]. Y como en ocasiones anteriores, sustituimos el filtro original *TI* por un filtro R_{KC} que tiene una eficiencia tres veces mayor [7]. El campo de la DFOSC es de 13.7×13.7 minutos de arco con una escala de placa de $0.42''/\text{pixel}$. La Tabla I muestra la planilla de observación con los filtros, los tiempos de exposición, las masas de aire y la calidad de las imágenes estimada (seeing). Todos los datos fueron adquiridos en condiciones fotométricas. Estrellas standard de la lista de Geisler [7] fueron observadas para obtener la transformación de las observaciones al sistema standard.

Tabla I. Planilla de observación

Cúmulo	Ascensión Recta (h m s)	Declinación (° ' ")	l (°)	b (°)	fecha	filtro (s)	exposición de aire	masa (")	seeing
L110	01 34 26	-72 52 28	298.56	-43.89	5-XI-1999	<i>C</i>	1800	1.46	1.6
						<i>R</i>	600	1.46	1.4
L112	01 35 58	-75 27 28	299.23	-41.35	4-XI-1999	<i>C</i>	1800	2.10	1.8
						<i>R</i>	600	2.16	1.4
L113	01 49 28	-73 43 42	297.44	-42.78	29-XII-1999	<i>C</i>	1800	1.43	1.7
						<i>R</i>	600	1.62	1.6

Las características instrumentales (por ejemplo, nivel del punto cero, variación en la sensibilidad pixel a pixel) en las imágenes CCD fueron removidas usando las tareas standard en IRAF. Las magnitudes fotométricas fueron obtenidas usando rutinas de identificación de estrellas y ajustes del perfil de intensidad de los programas DAOPHOT/DAOMASTER [31]. Correcciones de apertura por variaciones radiales se aplicaron a todas las imágenes. Las magnitudes instrumentales resultantes se transformaron al sistema standard empleando ecuaciones similares a las utilizadas por Piatti et al. [18]. Las desviaciones cuadráticas medias de los ajustes realizados resultaron siempre menores a 0.015 mag. Los errores típicos resultaron ser en promedio: $\sigma T1 < 0.01$ mag para $T1 = 19$, ~ 0.05 mag para $T1 = 21$, y ~ 0.15 mag para $T1 = 22.5$; $\sigma(C-T1) < 0.01$ para $T1 = 19$, ~ 0.07 mag para $T1 = 21$, y ~ 0.17 mag para $T1 = 22.5$.

3. Parámetros estructurales de los cúmulos

El conocimiento de las coordenadas centrales de los cúmulos, sus perfiles de densidad estelar y las principales características de sus campos circundantes son valiosos para desentrañar las características propias del cúmulo de aquellas que corresponden al campo. Para determinar las posiciones centrales de los cúmulos, computamos primero el número de estrellas distribuidas a lo largo de las direcciones x e y de las imágenes atravesando los cúmulos dentro de franjas de 150 pixeles de ancho. El ancho de las franjas se fijó de modo de incluir estrellas ubicadas bien lejos de los cúmulos y, al mismo tiempo, minimizar el número de estrellas del propio campo, lo que solamente aumenta el nivel del fondo estelar en los perfiles de densidad estelar proyectados. Asimismo, los conteos se realizaron utilizando intervalos de 25, 50 y 75 pixeles con el propósito de evaluar la influencia de las resoluciones espaciales consideradas en la determinación de los centros de los cúmulos. Una vez que obtuvi-

mos las distribuciones proyectadas en las direcciones x e y , realizamos ajustes de funciones de Gauss usando la rutina NGAUSSFIT del paquete STSDAS de IRAF. Adoptamos una única función de Gauss, y fijamos el valor de la constante (es decir, asumimos una densidad estelar del campo uniforme) y del término lineal de la función de Gauss al valor correspondiente de la densidad del fondo del cielo y cero, respectivamente. El centro de la función de Gauss, su amplitud y su ancho máximo a mitad de altura actuaron como variables. Iteramos el procedimiento de ajuste una vez en promedio, luego de eliminar un par de puntos discrepantes. Las fuentes más importantes de error en el establecimiento de los centros de los cúmulos provino del relativamente pequeño cociente entre el número de estrellas de los cúmulos y de los campos circundantes, y de las fluctuaciones en el número de estrellas dentro de la región de los cúmulos, debido a variaciones en la densidad estelar del propio cúmulo y del campo. Las posiciones centrales de los cúmulos se determinaron finalmente con una precisión de ± 20 pixeles en todos los casos.

Luego, construimos los perfiles radiales de los cúmulos a partir de los cuales estimamos sus radios –generalmente utilizados como indicadores de la extensión del cúmulo–, y establecimos las áreas sobre las cuales las estrellas del campo prevalecen. La posibilidad de disponer de un área de estrellas del campo es muy importante para separar la secuencia fiducial del cúmulo de la del campo, y apropiadamente medir la contaminación de estrellas del campo en los DCM de los cúmulos. Los perfiles radiales de la densidad estelar de los cúmulos se construyen generalmente realizando recuentos estelares en anillos concéntricos alrededor del centro del cúmulo y normalizando los conteos en cada anillo a la unidad de área. Este procedimiento permite trazar el perfil radial hasta el círculo más grande a partir del cual los restantes comienzan a caer fuera del campo observado. Sin embargo, con la intención de ir aún más lejos del centro del cúmulo,

decidimos seguir otro método basado en el conteo de estrellas ubicadas en cuadrados de 50 pixeles de lado, distribuidos por todo el campo. Así, el número de estrellas por unidad de área para un dado radio r se puede calcular directamente a través de la expresión:

$$(n_{r+25} - n_{r-25}) / ((m_{r+25} - m_{r-25}) \times 50^2),$$

donde n_j and m_j representan los números de estrellas contadas y cuadrados incluidos dentro de un círculo de radio r , respectivamente. Vale la pena notar que este método no requiere de un círculo completo de radio r dentro del campo observado para ser capaz de estimar la densidad media a esa distancia. Más aún, obtuvimos perfiles radiales de densidad estelar que se extienden un 50% más (en distancia al centro del cúmulo) de los que hubiesemos obtenido considerando círculos completos dentro de los campos observados.

4. Características físicas de los cúmulos

Confeccionamos varios DCM para cada cúmulo basados en diferentes extracciones circulares, para conseguir aislar apropiadamente las estrellas de los cúmulos de las de sus respectivos campos circundantes. Claramente, los DCM de las regiones más interiores no contienen solamente

estrellas de los cúmulos, pero minimizan bastante la influencia de estrellas del campo en las secuencias principales del cúmulo. Los DCM de los campos circundantes que minimizan la contaminación de estrellas de los cúmulos se construyeron a partir de las extracciones circulares más externas. Estas áreas se eligieron de modo que yacieran bien alejadas de la extensión visible de los cúmulos. La Figura 1 muestra los DCM adoptados para los cúmulos (paneles superiores) y de los campos de estrellas circundantes (paneles inferiores). La elección de los distintos radios para los cúmulos resultó un proceso iterativo y ligeramente subjetivo. Utilizamos como referencia los anchos máximos a mitad de altura de las funciones de Gauss ajustadas a los perfiles radiales de densidad estelar de los cúmulos, como hicimos en trabajos previos de esta serie (ver, por ejemplo, [26] y la referencia allí). Basados también en trabajos anteriores, estimamos que la contaminación de estrellas del campo en los DCM de los cúmulos que adoptamos es inferior al 10% en todos los casos.

Nuestro interés primeramente consiste en determinar edades y abundancias metálicas de cada cúmulo de la muestra. Con el fin de mantener consistencia, hemos utilizado las mismas téc-

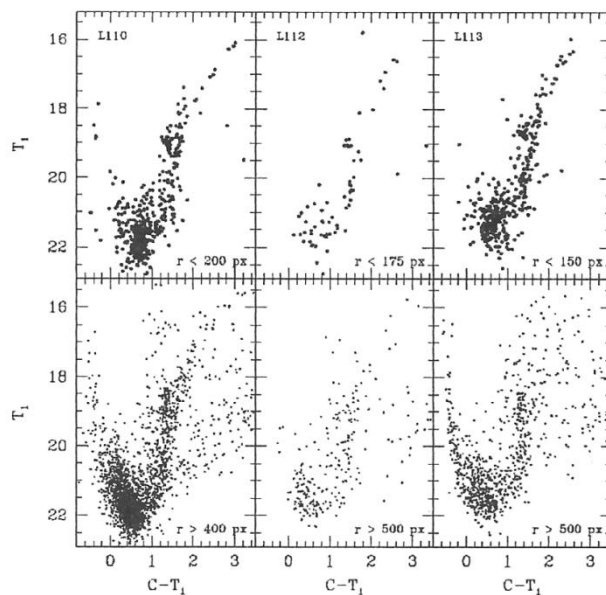


Fig. 1. Diagramas color-magnitud T_1 vs $C-T_1$ para las estrellas medidas en los tres campos de los cúmulos observados. Los radios de extracción utilizados (en pixeles) se indican en cada panel.

nicas para medir estas cantidades que empleamos en estudios anteriores de cúmulos de la NMM [19, 23]. Primero, adoptamos un módulo de distancia de $(m-M)_0 = 18.77 \pm 0.06$ mag [5] conjuntamente con las siguientes ecuaciones: $E(C-T_1) = 1.97 \times E(B-V)$ y $MT_1 = T_1 - 2.62 \times E(B-V) - 18.77$ de Geisler & Sarajedini [9]. Los valores de los enrojecimientos los tomamos de los mapas de extinción de Burstein & Heiles [2] y Schlegel, Finkbeiner, & Davis [29]. Dado que las estimaciones de enrojecimiento difieren solamente en algunos centésimos, adoptamos el valor promedio de ambos excesos de color (ver Tabla II).

Las edades se calculan determinando la diferencia en magnitud δT_1 entre el *clump* de las gigantes y el *turnoff* de la Secuencia Principal a partir de los DCM de los cúmulos, y utilizando la ecuación (4) de Geisler et al. [8] para obtener las edades. Vale la pena notar que esta técnica de medición de edades no requiere de fotometría absoluta. Las diferencias δT_1 se listan en la Tabla II; sus incertezas $s(\delta T_1)$ provienen de considerar los errores fotométricos para las magnitudes T_1 correspondientes al *clump* de las gigantes y para el *turnoff* y/o la dispersión intrínseca de los DCM. Luego, a partir de la ecuación (4) de Geisler et al. [8] obtuvimos para L110, L112 y L113 edades de 5.1 ± 0.9 , 5.4 ± 0.9 , y 4.0 ± 0.7 mil millones de años, respectivamente. Los errores en las edades derivadas provienen de la propagación de errores a través de la ecuación (4) de Geisler et al.

Todas nuestras determinaciones previas de edades de cúmulos de la NMM [19, 23, 24, 25] están referidas a una escala de edad donde Lindsay 1 tiene una edad de 9×10^9 años [15]. En dicha escala, L113 tiene una edad de 5.3 ± 1.3 mil millones [12], de modo que hemos adicionado 1.3×10^9 años a las edades que derivamos arriba. Los errores de las edades finalmente adoptadas resultaron ligeramente más grandes que los calculados previamente, ya que hemos tenido en cuenta el error en la determinación de la edad de L113 estimado por Mighell et al. [12]. En la Tabla II listamos las edades finales de los cúmulos. En cualquier caso, L110 y L112 son claramente más viejos que L113 y por lo tanto resultan dos

nuevos cúmulos relativamente viejos descubiertos en la NMM.

Las abundancias metálicas de los cúmulos fueron estimadas a partir de la comparación de las ramas de las estrellas gigantes rojas de los cúmulos con las ramas de gigantes rojas fiduciales de cúmulos globulares obtenidas por Geisler & Sarajedini [9]. La dispersión de los datos en el plano $[MT_1, (C-T_1)_0]$ -con las diferentes líneas de isoabundancia superpuestas- se utilizó para asignar los errores a los valores de las abundancias metálicas derivados. Las abundancias metálicas obtenidas a partir de esta comparación se corrigieron luego por efectos de edad vía las prescripciones dadas por Geisler et al. [10]. Hacemos notar que las abundancias químicas derivadas de esta manera están en buen acuerdo con aquellas derivadas a partir de la comparación con las apropiadas isócronas teóricas (ejemplo, [12, 21, 22]). En la Tabla II listamos las abundancias metálicas resultantes, donde hemos tenido en cuenta los errores asociados con la corrección por efecto de edad mencionada arriba. Finalmente, comparamos las edades derivadas con las que se obtienen ajustando los DCM de los cúmulos con las isócronas teóricas de Girardi et al. [11]. Empleamos isócronas para $Z = 0.001$ y 0.004 , ya que no existen isócronas para $Z = 0.002$, y confirmamos las edades derivadas de la Tabla II.

5. Análisis y discusión

Tan lejos como podemos asegurar, L113 es el único cúmulo de la muestra con estimaciones previas de su edad y su abundancia metálica. Mould et al. [13] obtuvieron una edad de 5×10^9 años a partir de datos fotométricos CCD *BR*, adoptando un módulo de distancia y una razón hierro a hidrógeno de $(m-M)_0 = 18.8$ y $[Fe/H] = -1.4 \pm 0.2$, respectivamente. Luego, Seidel, Da Costa & Demarque [30] reanalizaron la fotometría de Mould et al. [13] y derivaron una edad de $(5 \pm 1) \times 10^9$ años con $(m-M)_0 = 18.8$, y de $(4 \pm 1) \times 10^9$ años con $(m-M)_0 = 19.3$ -en ambos casos adoptaron una abundancia química de $[Fe/H] = -1.4 \pm 0.1$ -. Da Costa & Hatzidimitriou [6] emplearon datos espectroscópicos centrados en el

Tabla II. Parámetros fundamentales de cúmulos estelares de la NMM

Cúmulo	$\langle E(B-V) \rangle$ (mag)	T_1 (MSTO) (mag)	T_1 (RC) (mag)	$\sigma \delta T_1$ (mag)	Edad ($\times 10^9$ años)	[Fe/H]	R ($^\circ$)
L110	0.030 ± 0.005	21.60 ± 0.10	19.05 ± 0.05	2.55 ± 0.15	6.4 ± 1.1	-1.15 ± 0.25	3.07
L112	0.060 ± 0.010	21.60 ± 0.10	19.00 ± 0.05	2.60 ± 0.15	6.7 ± 1.1	-1.10 ± 0.25	3.94
L113	0.030 ± 0.010	21.10 ± 0.10	18.75 ± 0.05	2.35 ± 0.15	5.3 ± 1.0	-1.40 ± 0.25	4.17

triplete del Ca II de estrellas gigantes de L113 para medir su abundancia metálica. Ellos obtuvieron una razón hierro a hidrógeno de $[Fe/H] = -1.44 \pm 0.16$, lo cual conduce a una edad de $t = (6 \pm 1) \times 10^9$ años. El contenido metálico derivado por Da Costa & Hatzidimitriou está referido a la escala de abundancias metálicas definida por Zinn & West [32], que es a su vez la misma escala de abundancias metálicas utilizadas por Geisler & Sarajedini [9] para trazar sus ramas gigantes standard, y que nosotros empleamos para determinar las abundancias metálicas de la presente muestra de cúmulos.

Más recientemente, Mighell, Sarajedini & French [12], a partir de observaciones realizadas con la Cámara de Gran Campo del Telescopio Espacial, estimaron la edad y la abundancia metálica de L113 en $(5.3 \pm 1.3) \times 10^9$ años y -1.24 ± 0.11 , respectivamente. Estas determinaciones previas de edad y de abundancia química de L113 están en buen acuerdo con nuestros valores presentes. Por lo tanto, confirmamos que L113 es un cúmulo relativamente viejo de la NMM, pobre en elementos pesados, y un sólido control en la estimación de las edades y abundancias metálicas de los cúmulos L110 y L112, los cuales no habían sido estudiados hasta el presente.

Nuestros resultados muestran que L110 y L112 son cúmulos de la NMM relativamente viejos ($t \sim 6.5 \times 10^9$ años) con razones hierro a hidrógeno ~ 0.3 décimas más altas –más ricos en metales– que los cúmulos de la NMM previamente conocidos con edades similares (ver Tabla III de Da Costa & Hatzidimitriou [6]). Más aún, hasta el presente existen solamente nueve cúmulos conocidos en la NMM con edades mayores que $\sim 5 \times 10^9$ años –incluido L113–; los restantes cúmulos estudiados en la galaxia son más jóvenes que 3×10^9 años. Por lo tanto, incorporar dos nuevos cúmulos a la lista de los cúmulos más viejos de la NMM es de fundamental importancia para mejorar nuestro conocimiento de la evolución química de esta galaxia satélite. Además, el hecho de que sus contenidos metálicos sean más elevados que los de los otros cúmulos de la NMM con edades similares, puede arrojar una nueva luz sobre los posibles escenarios de formación y evolución de la galaxia.

Incluyendo estos tres cúmulos, hemos investigado el enriquecimiento químico de la NMM empleando edades y metalicidades de 44 cúmulos estelares, puestos estos parámetros físicos en una escala homogénea [20, 23, 24, 25]. Para facilitar el estudio de las edades y abundancias metálicas de los cúmulos en relación a su distribución espacial, adoptamos un sistema de referencia elíptico con su eje mayor orientado en

dirección con el cuerpo principal de la galaxia y con un cociente b/a de 0.5. La Figura 2 muestra las posiciones de los 44 cúmulos relativas al centro óptico de la NMM –asumimos como coordenadas centrales: $00^h 52^m 45^s$, $-72^\circ 49' 43''$ (J2000) [5]–. Los 41 cúmulos provenientes de nuestros anteriores trabajos están graficados con círculos abiertos pequeños; L110 y L112 se muestran con círculos llenos grandes, mientras que L113 está representado con un círculo abierto grande. Los semiejes mayores de las elipses trazadas en la figura tienen radios de 2 y 4 grados, respectivamente. Por completitud, incluimos en la última columna de la Tabla II las distancias galactocéntricas proyectadas (R) que calculamos para cada cúmulo.

Con la finalidad de examinar cómo varían las edades y las abundancias metálicas de los cúmulos en función de la distancia al centro de la NMM, computamos para cada cúmulo el valor del semieje (a) que una elipse tendría si ésta estuviera centrada en el centro de la NMM, tuviera un cociente b/a de 0.5, y uno de los puntos de su trayectoria coincidiera con la posición del cúmulo. En este escenario, un mismo valor de semieje mayor correspondería a todos los cúmulos ubicados sobre una misma elipse. En las Figuras 3 y 4 graficamos los semiejes calculados en término de las edades y las abundancias metálicas.

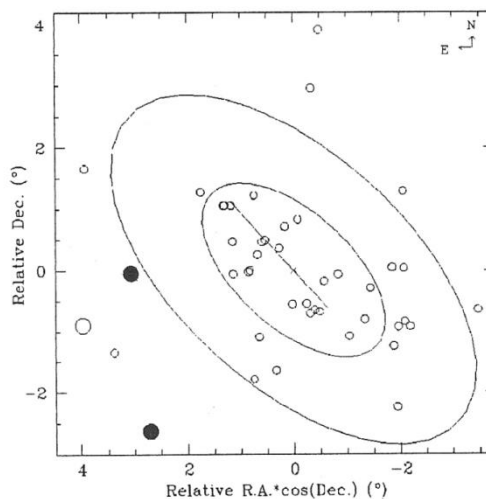


Fig. 2. Posiciones de los campos de L110 y L112 (círculos llenos grandes) y L113 (círculo abierto grande) respecto del cuerpo principal de la NMM (línea recta) y su centro óptico (cruz). Las posiciones de los 41 cúmulos estelares incluidos en [26] también se muestran con círculos abiertos pequeños.

cas de los cúmulos, respectivamente, donde los cúmulos del presente estudio y aquéllos provenientes de la literatura los representamos con cuadrados grandes (L110, L112 = llenos, L113 = abierto) y pequeños, respectivamente. Las posiciones de L110, L112 y L113 en estas figuras confirman que existe una tendencia clara -más notable en la Figura 3-, en el sentido de que los cúmulos más alejados del centro de la galaxia son más viejos y pobres en metales, con alguna dispersión, tal como también lo muestran los resultados de Noel et al. [14]. En consecuencia, el gradiente de abundancia metálica de la Figura 4 parece más bien reflejar la combinación de una población de cúmulos más viejos y pobres en metales distribuidos por toda la NMM y una población más joven y rica en elementos químicos mayormente formados en el disco interior.

En la Figura 5 mostramos la relación edad-metalicidad que construimos a partir de la muestra ampliada de 44 cúmulos. Hemos superpuesto también dos modelos de formación estelar con el propósito de compararlos con los resultados observacionales. La línea sólida representa la historia de formación de la NMM de acuerdo al modelo de tipo *burst* de Pagel & Tautvaivien   [16], mientras que la línea a trazos representa una galaxia simple y cerrada con formación estelar continua, asumiendo homogeneidad química [6]. La apariencia de la Figura 5 aún confirma que el modelo de formación de tipo *burst* sigue siendo el paradigma más probable para describir la formación estelar en la NMM. Sin embargo, la dispersión en la abundancia metálica para el rango de edades de entre 6 y 7 mil millones de años -L110 y L112 son los cúmulos más ricos en elementos pesados- sugiere otro posible *burst* -primeramente mostrado por Rich et al. [28]-, además del claro *burst* en la formación de cúmulos hace 3×10^9 años. Mucho más trabajo se requiere para clarificar y cuantificar estas tendencias sugeridas.

6. Resumen

En este trabajo presentamos resultados obtenidos a partir de observaciones fotométricas CCD en el sistema de Washington, utilizando las bandas C y T_1 , en los campos de los cúmulos estelares L110, L112 y L113 de la NMM. El análisis de los datos fotométricos conduce a las siguientes conclusiones principales:

- i) L110 y L112 resultan ser cúmulos relativamente viejos ($t \sim 6.5 \times 10^9$ años), los cuales ahora se agregan a la lista de los otros nueve cúmulos más viejos conocidos en esta galaxia. L113 es confirmado también en este grupo de cúmulos.
- ii) Las edades y las abundancias metálicas de L110, L112 y L113 refuerzan sugerencias

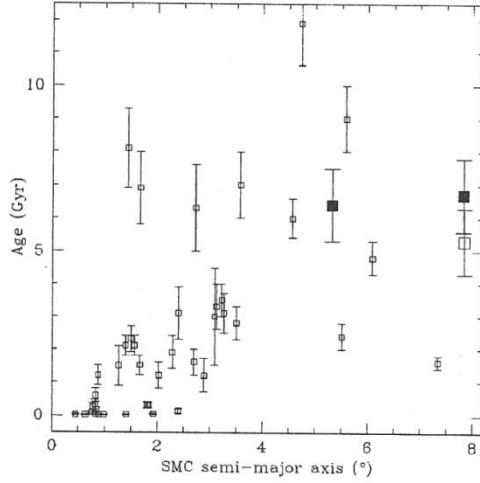


Fig. 3. Edades de los cúmulos en función de los semiejes mayores de las   lipses con $b/a = 0.5$, centradas en el centro óptico de la NMM, alineadas a lo largo del cuerpo principal de la NMM, que pasan a través de las posiciones de los cúmulos. Los cuadrados llenos más chicos representan los 41 cúmulos incluidos en [26]. L110 y L112 están representados con cuadrados llenos grandes, mientras que L113 por un cuadrado abierto grande.

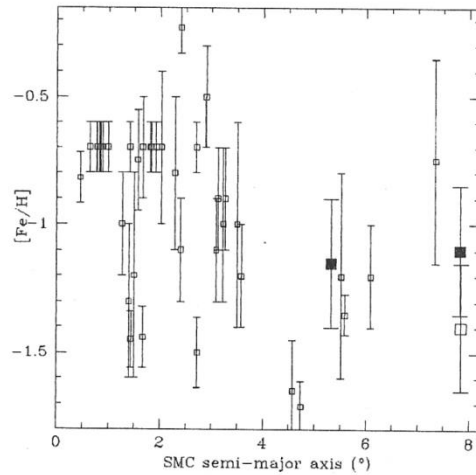


Fig. 4. Abundancias metálicas de los cúmulos en función de los semiejes mayores de las   lipses con $b/a = 0.5$, centradas en el centro óptico de la NMM, alineadas a lo largo del cuerpo principal de la NMM, que pasan a través de las posiciones de los cúmulos. Los símbolos son como en la Figura 3.

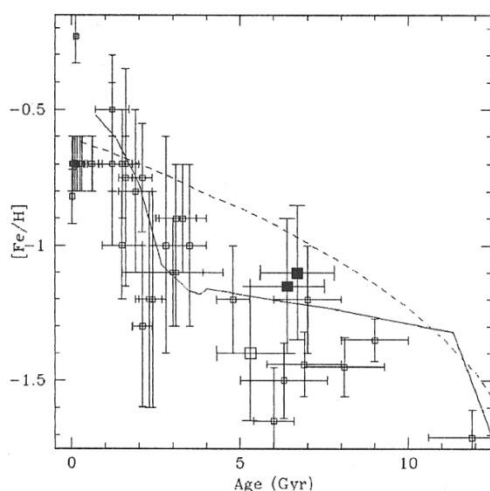


Fig. 5. Relación edad-metalicidad para los cúmulos estelares de la NMM. Los símbolos son como en la Figura 3.

previas con respecto a la evolución química de la NMM, en el sentido de que los cúmulos más alejados del centro de la galaxia son más viejos y pobres en elementos pesados. Esta tendencia es más notable para las edades de los cúmulos que para sus abundancias metálicas.

iii) Además, el modelo de formación estelar de tipo *burst* continúa siendo el más probable paradigma para describir la formación de la NMM. En este contexto, hacemos notar la existencia de un posible *burst* hace $\sim 7 \times 10^9$ años, además del ya bien conocido *burst* de hace $\sim 3 \times 10^9$ años.

Referencias

- [1] Bekki K., Couch W.J., Beasley M.A., Forbes D.A., Chiba M., Da Costa G.S., *The Astrophysical Journal*, 610, L93 (2004)
- [2] Burstein D., Heiles C., *The Astronomical Journal*, 87, 1165 (1982)
- [3] Canterna R., *The Astronomical Journal*, 81, 228 (1976)
- [4] Chiosi E., Vallenari, A., Held, E.V., Rizzi, L., Moretti, A., *Astronomy & Astrophysics*, 452, 179 (2006)
- [5] Crowl H.H., Sarajedini A., Piatti A.E., Geisler D., Bica E., Clariá J.J., Santos Jr., J.F.C., *The Astronomical Journal*, 122, 220 (2001)
- [6] Da Costa G.S., Hatzidimitriou D., *The Astronomical Journal*, 115, 1934 (1998)
- [7] Geisler D., *The Astronomical Journal*, 111, 480 (1996)
- [8] Geisler D., Bica E., Dottori H., Clariá J.J., Piatti A.E., Santos Jr., J.F.C., *The Astronomical Journal*, 114, 1920 (1997)
- [9] Geisler D., Sarajedini A., *The Astronomical Journal*, 117, 308 (1999)
- [10] Geisler D., Piatti A.E., Bica E., Clariá J.J., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 341, 771 (2003)
- [11] Girardi L., Bertelli G., Bressan A., Chiosi C., Groenewegen M.A.T., Marigo P., Salasnich B., Weiss A., *Astronomy & Astrophysics*, 391, 195 (2002)
- [12] Mighell K.J., Sarajedini A., French R.S., *The Astronomical Journal*, 116, 2395 (1998)
- [13] Mould J.R., Da Costa, G.S., Crawford M.D., *The Astrophysical Journal*, 280, 595 (1984)
- [14] Noel, N.E.D., Gallart, C., Costa, E., Mendez, R.A., *The Astronomical Journal*, 133, 2037 (2007)
- [15] Olszewski E.W., Suntzeff N.B., Mateo M., *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 34, 511 (1986)
- [16] Pagel B.E.J., Tautvaišien G., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 299, 535 (1998)
- [17] Pessev P.M., Goudfrooij P., Puzia Th.H., Chandar R., *The Astronomical Journal*, 132, 781 (2006)
- [18] Piatti A.E., Geisler D., Bica E., Clariá J.J., Santos Jr., J.F.C., Sarajedini A., Dottori H., *The Astronomical Journal*, 118, 2865 (1999)
- [19] Piatti A.E., Santos Jr., J.F.C., Clariá J.J., Bica E., Sarajedini A., Geisler D., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 325, 792 (2001)
- [20] Piatti A.E., Sarajedini A., Geisler D., Bica E., Clariá, J.J., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 329, 556 (2002)
- [21] Piatti, A.E., Clariá, J.J., Ahumada, A.V., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 340, 1249 (2003a)
- [22] Piatti A.E., Geisler D., Bica E., Clariá J.J., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 343, 851 (2003b)
- [23] Piatti A.E., Sarajedini A., Geisler D., Seguel, J., Clark, D., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 358, 1215 (2005a)
- [24] Piatti, A.E., Santos Jr., J.F.C., Clariá J.J., Bica, E., Ahumada, A.V., Parisi, M.C., *Astronomy & Astrophysics*, 440, 111 (2005b)
- [25] Piatti A.E., Sarajedini A., Geisler D., Clark, D., Seguel, J., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 377, 300 (2007a)
- [26] Piatti A.E., Sarajedini A., Geisler D., Gallart D., Wischnjewsky M., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, (2007b) (en prensa)
- [27] Rafelski M., Zaritsky D., *The Astronomical Journal*, 129, 2701 (2005)
- [28] Rich, R.M., Shara, M., Fall, S.M., Zurek, D., *The Astronomical Journal*, 119, 197 (2000)
- [29] Schlegel D.J., Finkbeiner D.P., Davis M., *The Astrophysical Journal*, 500, 525 (1998)
- [30] Seidel E., Da Costa G.S., Demarque P., *The Astrophysical Journal*, 313, 192 (1987)
- [31] Stetson P.B., *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 106, 250 (1994)
- [32] Zinn R., West M.J., *The Astrophysical Journal Supplement*, 55, 45 (1984)

Manuscrito recibido el 2 de agosto de 2007.

Aceptado el 27 de setiembre de 2007.