

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
OBSERVATORIO ASTRONÓMICO CENTROAMERICANO DE SUYAPA

MAESTRÍA EN ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA



PROPIEDADES ESPECTRALES INTEGRADAS DE CÚMULOS ESTELARES
EN LAS NUBES DE MAGALLANES

Lic. Martha Lorena Talavera Briones
Máster en Astronomía y Astrofísica

Tutora: *Dra. Andrea Verónica Ahumada*

Ciudad Universitaria, Tegucigalpa M.D.C., Honduras C.A
Julio 2008

AUTORIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS

JORGE ABRAHAM ARITA LEÓN
RECTOR

RUTILIA CALDERÓN
VICE-RECTORA ACADÉMICA

ERNESTO PAZ
VICE-RECTOR DE RELACIONES INTERNACIONALES

AMÉRICA ALVARADO
VICE-RECTORA DE ORIENTACIÓN Y ASUNTOS ESTUDIANTILES

EMMA VIRGINIA RIVERA MEJÍA
SECRETARIA GENERAL

ROLANDO AGUILERA
DIRECTOR DEL SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

MARÍA CRISTINA PINEDA DE CARÍAS
DIRECTORA
OBSERVATORIO ASTRONÓMICO CENTROAMERICANO DE SUYAPA
MAESTRÍA EN ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

TRIBUNAL EXAMINADOR

MERCEDES GOMÉZ
PROFESORA VISITANTE OACS/UNAH
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, ARGENTINA

MARÍA VICTORIA ALONSO
PROFESORA VISITANTE OACS/UNAH
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, ARGENTINA

MARÍA CRISTINA PINEDA DE CARÍAS
PROFESORA
OBSERVATORIO ASTRONÓMICO CENTROAMERICANO DE SUYAPA
MAESTRÍA EN ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

Dedicada:

*A los tesoros más bellos
que Dios ha puesto en mi vida*

*Mi mamá, por todo el amor
entregado y por estar pendiente
de mis luchas diarias.*

*Mis hermanas María Elena, Karmen,
Jamileth y Naraya por apoyarme,
acompañarme siempre
y por tratarme como hija.*

*Mis sobrinos por todo
el apoyo brindado.*

AGRADECIMIENTOS

La culminación de este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de algunas personas e instituciones. Me es grato dar mis más sinceros agradecimientos a ellos.

Doctora Andrea Verónica Ahumada del Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, por permitirme trabajar con ella, por todo el apoyo, la disposición y paciencia que siempre mostró para atender, enseñar y aclarar mis dudas, por acompañarme siempre desde el inicio hasta la culminación de este trabajo.

Doctor Juan José Clariá del Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, por todo el tiempo dedicado para expresar sus excelentes y oportunas explicaciones, pilares fundamentales de este trabajo.

Doctora Mercedes Gómez del Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, por su orientación en el campo a trabajar y por su ayuda para realizar el contacto con la Dra. Andrea Ahumada, pues de no ser por su valiosa colaboración esto no se hubiese concretado, además por todo el apoyo brindado durante mi estadía en Córdoba.

Doctora Silvia Fernández del Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, por la ayuda brindada para realizar el contacto con la Dra. Andrea Ahumada.

Doctor Emilio Lapasset por brindarme el espacio físico y el equipo necesario en el Observatorio Astronómico de Córdoba, donde realizar este trabajo.

Ing. Simón Anún, por su disponibilidad y amabilidad cuando le solicite ayuda para resolver los problemas técnicos de la computadora.

Doctora María Victoria Alonso por su oportuna ayuda en la etapa final de este trabajo.

A todo el personal del Observatorio Astronómico de Córdoba, Argentina por toda su hospitalidad, muestras de cariño y aliento. Mi agradecimiento es también para el personal del CASLEO, por el buen trato durante mis turnos de observación.

A la profesora María Cristina Pineda de Carías por toda la ayuda brindada durante mi formación como Astrónoma, agradezco también a las personas del OACS/UNAH que siempre me brindaron su apoyo y colaboración durante mis estudios en dicha institución.

A la IAU “grant for exchange” por otorgarme el pasaje aéreo para realizar mi viaje a Córdoba, Argentina, lugar donde desarrolle este trabajo.

A la Red de Macrouniversidades de America Latina y el Caribe (segunda convocatoria) por la beca de manutención otorgada.

RESUMEN

Los cúmulos estelares de la Nube Mayor y de la Nube Menor de Magallanes, por su proximidad, riqueza y diversidad constituyen excelentes laboratorios para examinar los procesos de formación estelar y evolución química en estas dos galaxias satélites de la Vía Láctea.

En este trabajo presentamos espectros integrados en el rango óptico (3600-6800) Å usando la técnica de espectroscopía integrada, correspondientes a 42 cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes; 13 pertenecen a la Nube Menor y 29 a la Nube Mayor. Estimamos enrojecimientos a partir del método de ajuste de plantillas y usando los mapas de extinción interestelar en la región de los cúmulos, determinamos edades por estos mismos métodos; ajuste de plantilla y de los anchos equivalentes (AEs). Para este último caso también utilizamos calibraciones empíricas en función de la edad, juntamente con diagramas de diagnósticos que involucran la suma de los AEs de características espectrales seleccionadas. De los 42 cúmulos, 21 no presentaban estudios previos de este tipo. Las edades derivadas para estos cúmulos oscilan: para la Nube Mayor entre ~5 y 800 millones de años, para la Nube Menor entre ~ 4 y 400 millones de años. Los espectros obtenidos mejoran y completan la librería espectral que actualmente se tiene de estas dos Nubes.

Palabras Clave: *Nubes de Magallanes, cúmulos estelares, espectroscopía integrada.*

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN	10
<i>CAPÍTULO I PROPIEDADES ESPECTRALES INTEGRADAS DE CÚMULOS ESTELARES EN LAS NUBES DE MAGALLANES.....</i>	<i>13</i>
1.1 Las Nubes de Magallanes.....	13
1.1.1 La Nube Mayor de Magallanes	13
1.1.2 La Nube Menor de Magallanes	14
1.2 Los cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes	15
1.2.1 Clasificación de los cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes	16
1.2.2 Distribución de los cúmulos en las Nubes de Magallanes.....	18
1.2.3 Distribución de la edad de los cúmulos estelares en las Nubes	19
1.3 Espectroscopía Integrada	20
1.3.1 Principales propiedades espectrales integradas de cúmulos estelares	21
1.3.2 Selección de ventanas espectrales.....	24
1.3.3 Variación de anchos equivalentes en función de la edad.....	25
1.4 Bases disponibles de espectros templates	26
1.5 Planteamiento del problema y Justificación	29
1.6 Objetivos de la investigación	30
1.6.1 Objetivo general.....	30
1.6.2 Objetivos específicos.....	30
<i>CAPÍTULO II CÚMULOS ESTELARES EN LAS NUBES DE MAGALLANES</i>	
<i>METODOLOGÍA.....</i>	<i>31</i>
2.1 Introducción.....	31
2.2 Observaciones espectroscópicas realizadas.....	34
2.3 Reducción de datos	37
2.3.1 Preparación de las imágenes de calibración	38
2.3.2 Procesamiento de las imágenes de calibración	41
2.3.3 Extracción del espectro unidimensional	45
2.3.4 Calibración de los espectros en longitud de onda	48
2.3.5 Construcción de la función sensibilidad	49
2.3.6 Calibración de los espectros en unidades de flujo	50
2.3.7 Eliminación de rayos cósmicos y combinación de espectros individuales	52
2.4 Programa SPEED.....	53

2.5	Medida de los anchos equivalentes.....	54
2.6	Determinación de la edad y enrojecimiento	57
<i>CAPÍTULO III CÚMULOS ESTELARES DE LA NUBE MENOR DE MAGALLANES</i>		62
3.1	Introducción	62
3.2	Análisis y discusión de los resultados obtenidos	65
3.2.1	NGC 242	66
3.2.2	NGC 256	69
3.2.3	NGC 265	71
3.2.4	Bruck 50	72
3.2.5	Kron 34	74
3.2.6	IC 1611	76
3.2.7	IC1626	78
3.2.8	IC 1641	80
3.2.9	Lindsay 95	82
3.2.10	Bruck 164	84
3.2.11	HW 85	86
3.2.12	WG 1	87
3.2.13	NGC 796	89
3.3	Parámetros obtenidos.....	91
3.4	Síntesis	95
<i>CAPÍTULO IV CÚMULOS ESTELARES DE LA NUBE MAYOR DE MAGALLANES</i>		96
4.1	Introducción	96
4.2	Análisis y discusión de los resultados individuales	99
4.2.1	SL 14	100
4.2.2	NGC 1695	102
4.2.3	SL 56	103
4.2.4	SL 58	105
4.2.5	SL 79	106
4.2.6	SL 76	108
4.2.7	NGC 1732	110
4.2.8	SL 116	111
4.2.9	SL 168	113
4.2.10	NGC 1822	115
4.2.11	HS 109	117
4.2.12	SL 234	118
4.2.13	SL 255	120
4.2.14	NGC 1887	122
4.2.15	SL 364	123
4.2.16	SL 360	125
4.2.17	SL 386	126

4.2.18	NGC 1944	128
4.2.19	SL 463	130
4.2.20	SL 477	131
4.2.21	NGC 1972	133
4.2.22	NGC 2000	134
4.2.23	NGC 1986	136
4.2.24	SL 551	137
4.2.25	SL 566	139
4.2.26	NGC 2053	141
4.2.27	SL 763	142
4.2.28	NGC 2137	144
4.2.29	NGC 2140	145
4.3	Discusión de los parámetros obtenidos.....	147
4.4	Síntesis	153
	CONCLUSIONES.....	154
	ANEXOS.....	157
	Anexo A1	
	Plantillas para síntesis de población.....	157
	Anexo A2	
	Rango de edades de los plantillas creados por Santos et al (1995)	158
	Anexo A3	
	Espectros plantillas para diferentes grupos de edad	159
	Anexo A4	
	Diagrama diagnóstico para determinar edades de cúmulos estelares Galácticos y extragalácticos. Santos & Piatti (2004).	160
	BIBLIOGRAFÍA.....	161

INTRODUCCIÓN

El estudio de sistemas estelares extragalácticos proporciona información relevante sobre la formación estelar y la historia química de las galaxias que los albergan. A pesar de las múltiples observaciones realizadas en los últimos años, nuestro conocimiento actual, tanto sobre los procesos de formación estelar y la historia química de las galaxias, es en general incompleto. Aun en las galaxias del Grupo Local nuestro conocimiento es definitivamente limitado.

La diversidad y proximidad de los sistemas de cúmulos estelares de las dos Nubes de Magallanes, hacen que estas dos galaxias satélites de la Vía Láctea (VL) sean excelentes laboratorios para examinar con cierto detalle los procesos de formación estelar y enriquecimiento químico. Esto es así simplemente porque en estas dos galaxias comparativamente cercanas es posible aplicar con cierto detalle las variadas técnicas observacionales (fotométricas, espectroscópicas, etc.) desarrolladas en los últimos años. La composición química media actual de una y otra Nube de Magallanes no sólo es diferente, sino que además difiere considerablemente del contenido metálico solar, característico de la gran mayoría de los cúmulos abiertos galácticos. En consecuencia, los sistemas estelares de estas dos galaxias satélites se presentan como excelentes candidatos para formar parte de una base de espectros *templates*, con un amplio rango de edades y una composición química diferente a la solar.

El principal objetivo del presente trabajo consiste en obtener espectros integrados de cúmulos estelares pertenecientes a las Nubes de Magallanes (NM), a partir de los cuales sea posible determinar parámetros fundamentales, tales como edades y enrojecimientos de la muestra seleccionada. Estos espectros serán, sin lugar a dudas, fundamentales para construir nuevos espectros patrones o *templates* que permitan

complementar las librerías de *templates* existentes. Estas librerías podrán ser utilizadas en futuros trabajos de investigación para determinar parámetros astrofísicos fundamentales de poblaciones estelares compuestas, con diversas edades y metalicidades, particularmente galaxias, e incluso regiones específicas de algunas galaxias, tales como sus núcleos, sus regiones de formación estelar, y otros. Esta nueva biblioteca de espectros *templates* podrá utilizarse en combinación con los grandes telescopios del siglo XXI para extender significativamente el conocimiento que hoy tenemos acerca del Universo.

En este trabajo se realiza un estudio de las propiedades espectrales integradas de 42 cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes, usando la técnica de espectroscopía integrada. Las observaciones se llevaron a cabo en el Complejo Astronómico el Leoncito (CASLEO), San Juan, Argentina, utilizando el telescopio de 2.15m.

En el Capítulo I se presenta un panorama general de las propiedades de las Nubes de Magallanes y de sus cúmulos estelares. Se brinda información acerca de la técnica de espectroscopía integrada utilizada para la obtención de los datos del presente trabajo, se presenta una descripción de las bases de espectros patrones conocidas, además se describe el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos a cumplir en este trabajo.

En el capítulo II se describe la metodología seguida para lograr los objetivos planteados. Se presenta la manera en que se determinaron edades y enrojecimientos de los sistemas estelares observados; la misma se realizó a partir de los anchos equivalentes de las líneas de Balmer y de tres líneas metálicas en absorción. Seguidamente se eligió el espectro patrón de las bases de espectros *templates* disponibles actualmente con características similares a las del espectro observado; finalmente se modificó el enrojecimiento interestelar del espectro observado hasta obtener el mejor ajuste del

continuo y de las líneas de absorción con el template elegido; el enrojecimiento también se determinó a través de los mapas de enrojecimiento interestelar. También se muestran las características de los cúmulos estelares seleccionados, así como el detalle de las observaciones espectroscópicas llevadas a cabo, se examina la determinación de los anchos equivalentes para la muestra observada.

En el capítulo III detallamos los resultados obtenidos para 13 cúmulos estelares de la Nube Menor de Magallanes, el análisis y la discusión de estos. En el capítulo IV se presentan los resultados correspondientes a los 29 cúmulos estudiados pertenecientes a la Nube Mayor de Magallanes, con el análisis y la respectiva discusión de estos. Finalmente presentamos las conclusiones del trabajo.

Es importante señalar que por primera vez se determinan edades y enrojecimientos para el 67 % de la muestra presentada en este trabajo, lo que permitirá ampliar el conocimiento que actualmente se tiene sobre estos y por ende de las Nubes.

CAPÍTULO I

PROPIEDADES ESPECTRALES INTEGRADAS DE CÚMULOS ESTELARES EN LAS NUBES DE MAGALLANES

1.1 Las Nubes de Magallanes

Las Nubes de Magallanes son dos galaxias cercanas a la Vía Láctea, que al igual que ésta forman parte del Grupo Local al que pertenecen aproximadamente otras 40 galaxias más. El interés en estas dos galaxias, conocidas desde hace miles de años por los habitantes del hemisferio Sur, ha crecido notablemente en las últimas cinco décadas, período en el cual se han llevado a cabo numerosas investigaciones, interpretaciones y especulaciones con respecto a su origen, evolución, estructura y contenido.

1.1.1 La Nube Mayor de Magallanes

La Nube Mayor de Magallanes (NMM) es a menudo considerada como una galaxia irregular, sin embargo contiene una prominente barra en su centro (cubre $\sim 3^\circ \times 1^\circ$ en el cielo), la que sugiere que podría haber sido previamente una galaxia espiral barreada, y que debe su apariencia irregular a las interacciones tidales con la Vía Láctea y con la Nube Menor de Magallanes (NmM). La base de datos “*NASA/IPAC Extragalactic Database*” (NED) clasifica a la NMM como una galaxia del tipo SB(s)m. En la zona de la barra se encuentran las poblaciones más jóvenes, en tanto que en la zona de lo que sería el disco se encuentran las poblaciones más viejas.

Según el trabajo de recopilación de datos sobre las Nubes de Magallanes realizado por Westerlund (1997), el módulo de distancia de la NMM es de 18.48 magnitudes, luego de promediar los módulos de distancias obtenidos a partir de diferentes tipos de objetos. Es decir que esta galaxia se encuentra a una distancia lineal de 50 kpc de la Vía Láctea. De acuerdo a NED las coordenadas ecuatoriales de la NMM son: $(\alpha; \delta)_{J2000} = (05:23:34.5; -69:45:22)$, en tanto que sus coordenadas galácticas corresponden a: $(l; b) = (280.4653; -32.8883)$.

1.1.2 La Nube Menor de Magallanes

La estructura de la Nube Menor de Magallanes ha sido difícil de definir, debido a que posee un alto grado de inclinación respecto a la visual, el cual alcanza los 90° . La misma presenta una apariencia asimétrica con una barra irregular, en tanto que en la NED se la encuentra como una galaxia peculiar de tipo SB(s)m. Al igual que en la NMM, en la zona de la barra y las alas se encontrarían las poblaciones más jóvenes, en tanto que en la zona central y el halo (de haberlo) harían lo propio las poblaciones más viejas. Con un módulo de distancia promedio equivalente a 18.94 magnitudes, esta galaxia se encontraría a 60 kpc de la Vía Láctea, es decir 10 kpc más alejada que la NMM (Westerlund, 1997). Las coordenadas ecuatoriales y galácticas de la NmM son: $(\alpha; \delta)_{J2000} = (00:52:44.8; -72:49:43)$ y $(l; b) = (302.7969; -44.2992)$, respectivamente (NED).

1.2 Los cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes

La importancia de los cúmulos estelares en general, radica en que los mismos pueden considerarse verdaderas unidades de población estelar, caracterizadas por una determinada edad y composición química. Las Nubes de Magallanes contienen cúmulos estelares de todas las edades, que abarcan un rango de edad que cubre toda la vida de estas galaxias, por lo que se vuelven muy importantes a la hora de estudiar los procesos de formación y evolución estelar.

En la Vía Láctea la separación entre cúmulos globulares y abiertos no es problemática, sin embargo en las Nubes de Magallanes, debido a la diferente composición de los sistemas estelares, las definiciones no son muy claras. Existen verdaderos cúmulos globulares en el sentido galáctico o sea con edades superiores a los 10000 millones de años, que poseen gigantes rojas entre sus estrellas más luminosas, pero son los menos. Por el contrario, hay un número considerable de grandes cúmulos con forma de globulares, pero que están dominados por estrellas azules, y en algunos casos contienen estrellas amarillas evolucionadas y estrellas rojas.

Desde 1847 se han realizado numerosos *surveys* de cúmulos estelares pertenecientes a las Nubes de Magallanes, a partir de los cuales se han construido diferentes catálogos, tales como los realizados por *Kron* (1956), *Lindsay* (1958), *Westerlund & Glaspey* (1971), *Hodge & Wright* (1974), *Bruck* (1975, 1976), y más recientemente *Lauberts* (1982), *Pietrzyński & Udalski* (1999), *Bica & Schmitt* (1995) y *Bica & Dutra* (2000) para los cúmulos estelares de la NmM; en tanto que para la NMM se encuentran los catálogos de *Shapley & Lindsay* (1963), *Lynga & Westerlund* (1963), *Hodge & Sexton* (1966) y *Hodge* (1988c), y más recientemente *Kontizas et al.* (1990, KMHK), *Pietrzyński & Udalski* (1999) y *Bica et al.* (1999).

La distribución que presentan los miles de cúmulos de las Nubes de Magallanes se muestra en la Fig. 1.1 tomada del trabajo de Irwin (1991). Los análisis estadísticos de los cúmulos catalogados muestran que hay relativamente más cúmulos viejos abiertos en las Nubes de Magallanes que en la Vía Láctea. La edad promedio de los cúmulos de la NmM es de 9×10^8 años, de 1.1×10^9 años de aquellos que pertenecen a la NMM, en tanto que en la Vía Láctea el promedio de edades ronda los 2×10^8 años.

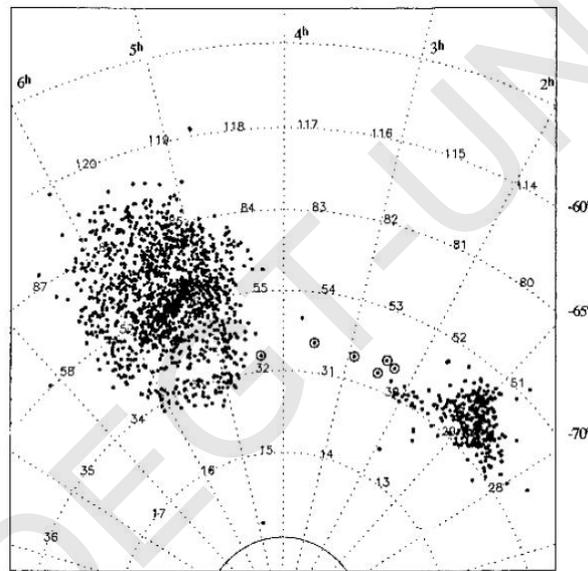


Fig. 1.1 Distribución de los cúmulos en las Nubes de Magallanes. Los puntos representan los cúmulos estelares y en círculo se muestran las asociaciones de la InterNube. Figura tomada de Irwin (1991).

1.2.1 Clasificación de los cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes

Los cúmulos de las Nubes de Magallanes podrían dividirse utilizando el mismo criterio que se aplica a los cúmulos de la Vía Láctea: cúmulos viejos (globulares) y cúmulos jóvenes (abiertos). Sin embargo, mientras que los cúmulos de la Vía Láctea son fácilmente separados por su apariencia, esto no ocurre en las Nubes de Magallanes, tal

como se indicó anteriormente. Las propiedades de los sistemas estelares de estas dos galaxias han sido consideradas de fundamentales para comprender la dinámica y la evolución química de las mismas. Aunque se puede derivar la información de los cúmulos a través de estudios fotométricos y espectroscópicos de sus componentes estelares, resulta difícil realizarlo para un número considerable de cúmulos. En lugar de ello, se debe hacer un estudio fotométrico y espectroscópico de las características integradas de los cúmulos y cuantificarlo de manera que los grupos puedan organizarse en uno o dos dimensiones.

Un sistema de clasificación de este tipo fue introducido por Searle et al. (1980, SWB), mostrado en la Fig. 1.2. Esta clasificación es dividida en segmentos, los tipos SWB I-VII, donde los cúmulos más viejos están en el tipo SWB VII, los de edad intermedia se encuentran entre el tipo SWB IV-VI, si tienen edades $\geq 1 \times 10^9$ años, y entre el tipo SWB II-III, si tienen edades entre 0.7×10^9 y 0.2×10^9 años. Los cúmulos más jóvenes pertenecen al tipo SWB I.

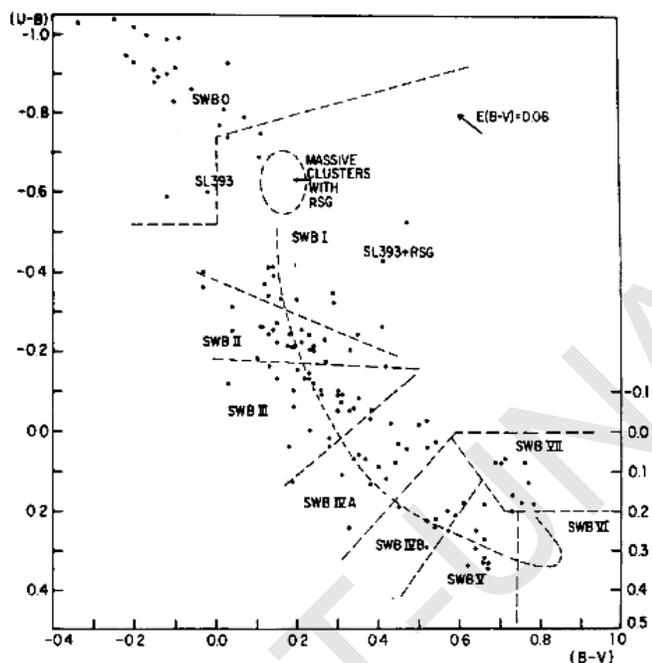


Fig. 1.2 La secuencia SWB en un diagrama (U-B), (B-V), donde se muestran las zonas correspondientes a los tipos originales de SWB (I-VII) y el tipo 0 introducido por Bica et al. (1992). Los cúmulos graficados son de Bica et al. (1992). Figura tomada de Bica et al. (1992).

1.2.2 Distribución de los cúmulos en las Nubes de Magallanes

La distribución de los cúmulos brillantes jóvenes de la NMM, con edades inferiores a los 4 millones de años, es muy similar a la constelación de Shapley¹ (van den Bergh, 1981); los cúmulos con edades entre los 4 - 200 millones de años, aparecen al Oeste hacia el final de la barra y más allá de esta, y al Este de 30 Dorados; en tanto que los cúmulos más viejos que los 1000 millones de años se encuentran dispersos sobre la Nube Mayor con el centroide muy al Oeste del centro de la barra. Por otra parte, en la

¹ Agregaciones estelares de gran tamaño, Shapley (1956)

Nube Menor los cúmulos brillantes más jóvenes, algunos de los cuales son miembros de asociaciones, se encuentran al Nor-Este al final de la barra y en las alas; es decir que los objetos jóvenes se concentran a lo largo de la barra y los cúmulos más viejos se encuentran ampliamente dispersos.

1.2.3 Distribución de la edad de los cúmulos estelares en las Nubes

Los numerosos trabajos acerca de la relación “edad-abundancia química”, las distribuciones de edades y las funciones iniciales de masas de las estrellas en los cúmulos estelares en las Nubes de Magallanes han sido de gran interés en las últimas décadas. El objetivo principal de los mismos consiste en determinar la historia evolutiva de las Nubes, su actividad de formación de estrellas y el enriquecimiento metálico en el pasado y en el presente.

En un trabajo pionero en la materia, Da Costa (1991) comparó una muestra de cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes, para los que derivó sus edades a partir del *turn-off* de la secuencia principal de cada cúmulo. Encontró que la NMM posee una gran población de cúmulos con edades que oscilan entre los 1000-3000 millones de años, así como también un número de verdaderos cúmulos globulares con edades superiores a los 12000 millones de años. Solamente encontró un cúmulo (ESO 121-SC03) con una edad entre estos dos grupos. La muestra indica que la tasa de producción de cúmulos estelares en la Nube Mayor aumentó considerablemente hace alrededor de 3000 millones de años.

Inversamente a lo que ocurre en la Nube Mayor de Magallanes, en la Nube Menor los cúmulos cubren un amplio rango de edades, que se extiende hasta los 10000 millones de años, pero incluiría sólo un cúmulo realmente viejo: NGC 121, el cual no es tan viejo como los verdaderos cúmulos viejos de la Nube Mayor.

La principal diferencia entre la Nube Mayor y la Nube Menor es que la producción de cúmulos en la Nube Menor de Magallanes parece haber empezado unos mil millones más tarde, pero que siguió el mismo curso.

1.3 Espectroscopía Integrada

Una de las técnicas observacionales existentes en la actualidad para estudiar sistemas estelares de pequeño diámetro angular es la espectroscopía integrada. La diferencia fundamental entre la espectroscopía individual de una estrella y la espectroscopía integrada de un sistema estelar, radica en que en el primer caso se enfoca el telescopio hacia una única estrella y se hace incidir la luz de esa única estrella sobre la ranura del espectrógrafo. La imagen iluminada de la ranura del espectrógrafo pasa a través de los distintos elementos ópticos del espectrógrafo e incide sobre el *CCD*, formando el espectro de esa única estrella. El espectro así obtenido es pues la imagen de la ranura del espectrógrafo, iluminada por esa única estrella, distribuida en sus distintas frecuencias o longitudes de onda. Cada línea en el espectro es una imagen de la ranura del espectrógrafo iluminada por la estrella, correspondiente a una determinada frecuencia o longitud de onda.

En el caso de la técnica de espectroscopía integrada, se enfoca el telescopio hacia un sistema estelar, por lo general compacto y de muy pequeño diámetro angular y, moviendo levemente el telescopio, se pasea ligeramente la ranura del espectrógrafo en toda la extensión angular del objeto. Lo que se obtiene entonces en el *CCD* es el espectro de la luz integrada de todo el sistema estelar y no de una única estrella.

Por lo expresado precedentemente, la técnica de espectroscopía integrada se basa entonces en el concepto de síntesis de poblaciones estelares. Cuando esta técnica se aplica en combinación con telescopios de mediana abertura (típicamente por encima de

los 2.0 m) como el telescopio “Jorge Sahade” del Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO), ubicado en San Juan (Argentina), la misma permite determinar una variedad de propiedades astrofísicas de cúmulos estelares tanto de la Vía Láctea, como de las galaxias del Grupo Local e incluso de las denominadas galaxias distantes, ubicadas más allá del Grupo Local. En efecto, en base a esta técnica es posible estimar por ejemplo la edad de un cúmulo estelar ubicado en galaxias muy lejanas a la nuestra; también se puede determinar la absorción en magnitudes que provoca el material interestelar interpuesto entre ese agregado y la Tierra; determinar aproximadamente la composición química de las atmósferas de las estrellas de dicho sistema y otras propiedades. Esto se debe simplemente a que esta técnica permite analizar poblaciones estelares compuestas, usando por ejemplo una base de cúmulos estelares y una grilla de propiedades espectrales integradas, parametrizada en función de la edad y de la metalicidad.

1.3.1 Principales propiedades espectrales integradas de cúmulos estelares

En 1986, Bica & Alloin (1986a, en adelante BA86a) examinaron las características espectrales de una variedad de poblaciones estelares, utilizando espectros integrados de cúmulos estelares, en lugar de los espectros de sus respectivas estrellas individuales. La principal ventaja de este método sobre los convencionales, es la reducción del número de variables, pues una base de estrellas está esencialmente descrita por tres parámetros, temperatura, gravedad y metalicidad (T , g y Z) mientras que en el caso de los cúmulos estelares se requieren sólo dos variables, la edad y la metalicidad.

Los mencionados autores examinaron las propiedades integradas de un conjunto de 63 cúmulos estelares, de la VL y de las NM, con enrojecimientos, edades y metalicidades bien determinadas. Esta muestra incluye cúmulos con edades entre un millón y algo más de 13 ó 14 millones de años y metalicidades $[Z/Z_0]$ que oscilan entre

+0.1 y -2.1, es decir objetos con abundancia levemente por encima de la solar, hasta objetos con menos de una centésima de la abundancia de metales que existe en el Sol. Los espectros utilizados en este trabajo fueron obtenidos en el Observatorio Europeo del Sur (La Silla, Chile), con una dispersión media de 220 Å/mm y una resolución espectral de 11 Å, en la región azul-visible: (3780-7700) Å. Luego corrigieron estos espectros por enrojecimiento interestelar usando la ley normal de Seaton (1979) y el valor de 3.0 para la razón R entre la absorción total y selectiva.

En la Fig. 1.3, se presenta una secuencia de espectros integrados decrecientes en edad de abajo hacia arriba, correspondientes a un cúmulo abierto galáctico y a 9 cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes, comenzando con NGC 121 de la Nube Menor el cual tiene unos 12 mil millones de años, hasta la conocida región HII gigante NGC 2070, que tiene un par de millones de años (las edades y metalicidades se indican a la derecha de la figura). Se puede ver como aumenta el continuo al azul en los cúmulos más jóvenes. Este es un efecto de edad y se debe a que al disminuir la edad, el punto de desvío de la secuencia principal se vuelve más brillante y al mismo tiempo más azul. En el panel izquierdo se muestra una secuencia de espectros integrados de cúmulos globulares de la Vía Láctea, ordenados en el sentido de las metalicidades crecientes de abajo hacia arriba (nombres de los cúmulos se indican arriba de cada espectro). Lo primero que se advierte es como se intensifican con la metalicidad algunos rasgos espectrales bien destacados en esta dispersión y en esta región del espectro. Nótese además como cambian las pendientes del continuo en las regiones azul y roja del espectro. En efecto, la razón entre el continuo azul y el continuo rojo disminuye claramente a medida que aumenta la metalicidad. Este efecto se debe a que a medida que uno se desplaza hacia espectros más metálicos, aumenta el efecto *blanketing*² en el azul y a la vez disminuye la contribución de estrellas azules de la rama horizontal.

² Incremento en el efecto total que producen las líneas de absorción sobre el continuo

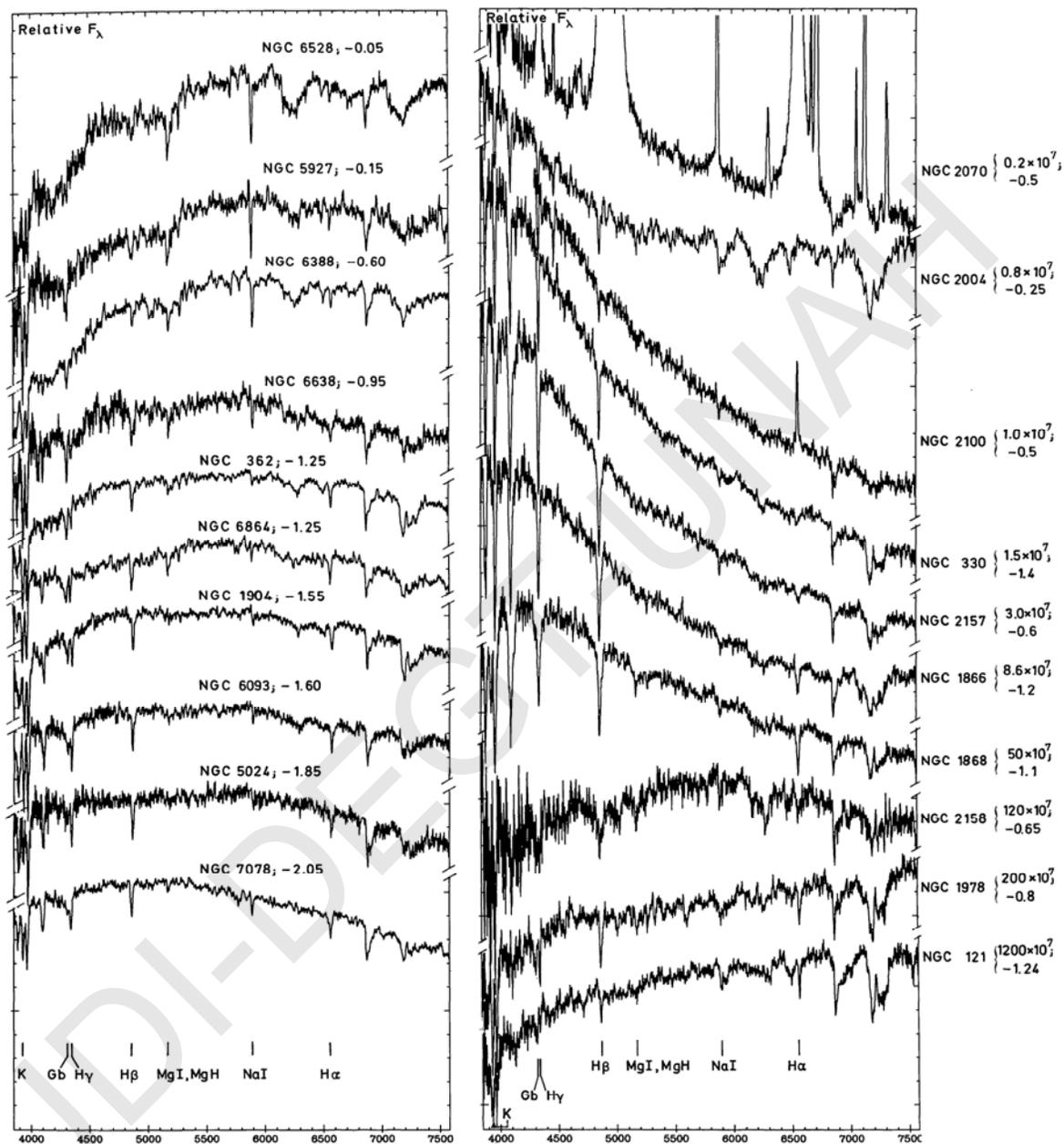


Fig.1.3 Espectros integrados de cúmulos estelares. Panel izquierdo, cúmulos globulares galácticos, panel derecho, secuencia de edad de cúmulos jóvenes de las Nubes de Magallanes. Figura tomada de Bica & Alloin (1986a).

Si se comparan las secuencias presentadas en el panel izquierdo y derecho de la Fig. 1.3, se puede comprobar que los cúmulos más jóvenes que unos 1000 millones de años tienen el continuo en el azul claramente más intenso que el de los cúmulos más viejos que esta edad, aún en aquellos cuyas deficiencias metálicas extremas incrementan fuertemente el continuo (M 15=NGC 7078). Por lo que se advierte que la distribución del continuo en el azul es un excelente discriminador de edades de poblaciones estelares, pues permite distinguir poblaciones estelares jóvenes de poblaciones estelares viejas pobres en metales en galaxias en general. Como se mostrará más adelante, este rasgo es mejor indicador de edad que los anchos equivalentes³ (AEs) de las líneas de Balmer. Puede resultar conveniente aclarar que el notable cambio en la distribución del continuo de los dos objetos más jóvenes del panel derecho de la Fig.1.3, particularmente en la porción roja del espectro, se debe en el caso de la región HII NGC 2070 al enrojecimiento interno, y en NGC 2004 al efecto de rápida evolución estelar, efecto que es típico en los objetos con edades del orden de los 10 millones de años. Este efecto de la rápida evolución estelar tiende a decrecer la evolución del continuo, debido al desarrollo de una importante población supergigante roja. Después de los 10 millones de años, los cúmulos aparentan estar libres de polvo y en consecuencia presentan un continuo muy

1.3.2 Selección de ventanas espectrales

Para analizar con más detalle los espectros integrados, BA86a dividieron este rango espectral en 70 regiones o ventanas de amplitud variable y reconocieron los principales elementos absorbedores en cada una de ellas. Además de las bien conocidas líneas y bandas de absorción existentes en la región espectral considerada, detectaron varias características espectrales débiles en la región visual, debidas en su mayoría a bandas moleculares en estrellas tardías. Estas características aparecen no sólo en los

³ Medida del ancho de una línea espectral.

cúmulos viejos o de edades intermedias, sino también en los cúmulos jóvenes con supergigantes rojas.

1.3.3 Variación de anchos equivalentes en función de la edad

BA86a midieron cuidadosamente los AEs en las 70 ventanas espectrales antes mencionadas y la distribución del continuo, normalizados a la unidad en 5780 Å en los espectros de los 63 cúmulos de su muestra. Acá se presentan parte de los principales resultados obtenidos. En la Fig. 1.4 se puede apreciar cómo cambia el AE de la línea H_δ de Balmer en función de la edad. Los mayores valores para los AEs de H_δ ocurren para edades del orden de los 400 millones de años, en esta edad el punto de desvío de la secuencia principal está dominado por estrellas A tempranas, en las cuales las líneas de Balmer alcanzan el máximo de intensidad. El espectro integrado refleja esta característica al maximizar el AE de H_δ en esta edad. Sin embargo el AE de H_δ no es una función unívoca de la edad y, en particular, los AEs de H_δ de cúmulos viejos y pobres en metales se superponen con los de cúmulos más jóvenes que unos 50 millones de años. Los efectos de metalicidad son débiles o indetectables dentro de los errores, pero en la práctica existen criterios simples que permiten reconocer cuando se está a la derecha o la izquierda del máximo en este diagrama. Las líneas H_β y H_γ se comportan de manera muy similar, lo mismo H_α que el AE de esta última línea es sensiblemente menor, debido a que H_α está en una región en la cual las estrellas tardías contribuyen al continuo y no a la línea.

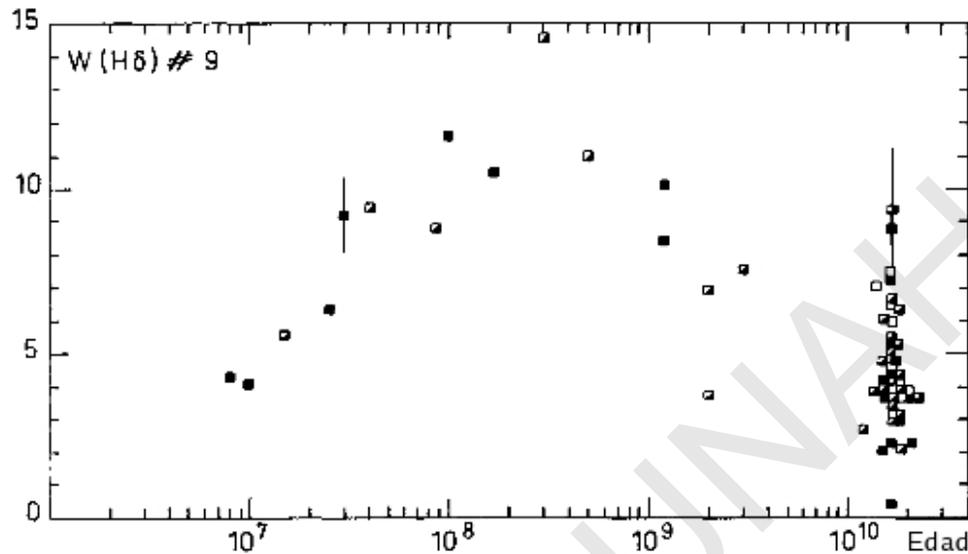


Fig.1.4 Anchos equivalentes de $H\delta$ en función de la edad. Los cuadros vacíos corresponden a cúmulos con metalicidades inferiores a -1.5 , los semilleno a metalicidades entre $(-1.5, -0.75)$ y los llenos representan cúmulos con metalicidades mayores que -0.75 . Figura tomada de Bica & Alloin (1986a).

1.4 Bases disponibles de espectros templates

Las bases de datos de espectro patrones que se conocen en la actualidad son: Bica (1988); Bica, Alloin & Santos (1990); Santos et al. (1995) y Piatti et al. (2002). Ver anexos A1, A2 y A3.

- Bica (1988), realizó una síntesis poblacional de núcleos galácticos creando para ello una base de cúmulos estelares. Esta base la estableció principalmente con los espectros integrados que el mismo utilizó para estudiar la región visible e infrarroja del espectro. Bica también realizó combinaciones de espectros con edades y metalicidades conocidas, para formar esencialmente templates correspondientes a 4 grupos espectrales: cúmulos globulares, cúmulos de edad intermedia, cúmulos jóvenes y regiones HII.

El grupo más joven del trabajo de Bica (1988) está conformado por los *templates* Y1, Y2, Y3 e Y4 (Y denota young o joven). Y1 tiene una edad aproximada de 10^7 años, correspondiente a la edad de gigante roja, Y2 e Y3 con edades entre los 5×10^7 y 10^8 años, respectivamente. El *template* Y3 fue dividido en dos llamados Y3A e Y3B, donde el primero se diferencia del segundo porque tiene incrementada la población de estrellas masivas pertenecientes a la rama asintótica. Y el último *template* de este grupo Y4 con una edad de 5×10^8 años. El grupo que corresponde a los espectros patrones de edad intermedia incluye también los *templates* denominados I1 e I2, los cuales corresponden a edades mucho mayores de 10^9 y 2×10^9 años respectivamente y el grupo más viejo incluye los *templates* denominados G1, G2, G3, G4 y G5. Estos *templates* corresponden a cúmulos globulares con edades superiores a 12×10^9 años y con metalicidades que varían entre $[z/z_0]=0.0$ y 2.0 .

Bica, Alloin & Santos (1990) mejoraron y redefinieron los *templates* correspondientes a los tipos Y1 e Y4 de Bica (1988). Para ello crearon espectros patrones (Y_A , Y_B , Y_C , Y_D , Y_E , Y_F , Y_G e Y_H) definidos en la región del infrarrojo cercano. El *template* Y_A con una edad entre los 5×10^6 y 7×10^6 años, es representativo de la etapa intermedia entre la fase de región HII pura y la correspondiente a supergigante roja, el *template* Y_B (originalmente Y1 en Bica (1988)) con una edad que esta entre 7×10^6 y 1.2×10^7 años, corresponde a la fase de supergigante roja propiamente. Este *template* al igual que Y_C de 2×10^7 años presenta una fuerte emisión en la línea H_α cuyo origen es estelar (tipo estrella Be) y no gaseoso.

En el *template* denominado Y_D con edad entre los 3.5×10^7 y 5×10^7 años, las absorciones y emisiones de la línea H_α se cancelan, lo que sugiere la finalización de la etapa Be en la evolución del cúmulo. Para edades mayores, las líneas de emisión de origen estelar o gaseoso desaparecen.

Los restantes *templates* denominados Y_E , Y_F , Y_G e Y_H corresponden a edades de $(5-8.5) \times 10^7$, $(8.5-1.3) \times 10^7$, $(1.3-2.5) \times 10^8$ y $(2.5-7.5) \times 10^8$ años, respectivamente.

- Años más tarde Santos et al. (1995) realizaron un estudio detallado sobre la evolución espectral integrada en la región azul-violeta del espectro de cúmulos estelares jóvenes pertenecientes a las Nubes de Magallanes. Obtuvieron espectros CCD integrados entre aproximadamente 3500 Å y 5800 Å de 83 cúmulos jóvenes de la Nube Mayor y 14 de la Nube Menor. Todos ellos se calibraron en longitud de onda y fueron corregidos por *redshift* y por enrojecimiento interestelar. Esta última corrección se llevó a cabo usando la conocida ley de Seaton (1979). Además, todos los espectros fueron normalizados a la unidad en $\lambda = 4020$ Å. En esta muestra de 97 objetos observados se distinguen 3 tipos básicos de espectros: aquellos en los cuales el gas en emisión domina sobre la radiación estelar; aquellos en los que las líneas de emisión tienen su origen estelar y en particular se deben a fases tipo Be, Wolf Rayet (WR), o variable luminosa azul (BLV), y aquellos en los que sólo se advierten características en absorción.

Para crear los espectros *templates* representativos de diferentes estados evolutivos, Santos et al. (1995) sumaron espectros similares, pesándolos y tomando en cuenta las correspondientes razones señal ruido (S/N). La decisión final de promediar espectros de características similares se basó en una serie de criterios específicos que en general hace uso de la semejanza global de los espectros (particularmente la distribución del continuo y la intensidad de las líneas de Balmer), el denominado tipos SWB introducido por Searle, Wilkinson & Bagnuolo (1980) y la proximidad del color integrado.

- La otra base de espectros *templates* es la de Piatti et al. (2002) la cual tiene una buena resolución temporal y representa sin lugar a dudas la mejor y más completa base de espectros templates de metalicidad solar publicada hasta la fecha. Esta base esta conformado por 10 grupos espectrales, los cuales representan las etapas evolutivas de los cúmulos abiertos con edades entre: (2-4, 5-10, 20, 40, 45-75, 100-150, 200-350, 500,

1000, 3000-4000) millones de años respectivamente. Los rangos de edad de estos grupos reflejan básicamente la dispersión de edad de los espectros involucrados en cada caso. Algunos rangos de edad también evidencian la existencia de períodos relativamente cortos en la evolución espectral de los cúmulos, en los cuales algunas estrellas brillantes con características espectrales particulares (Wolf Rayet, estrellas Be, supergigantes rojas, etc.) dominan la luz integrada del agregado.

1.5 Planteamiento del problema y Justificación

El estudio de sistemas estelares extragalácticos en general proporciona información relevante sobre la formación estelar y la historia química de las galaxias que los albergan. A pesar de los numerosos estudios realizados en los últimos años, el conocimiento actual en lo que a estos procesos se refiere es en general incompleto, aún en las galaxias del Grupo Local.

Los cúmulos estelares de la Nube Mayor y de la Nube Menor de Magallanes, por su proximidad, riqueza y diversidad constituyen excelentes laboratorios para examinar los procesos de formación estelar y evolución química en estas dos galaxias satélites de la Vía Láctea. Es por estos motivos que los cúmulos estelares de ambas Nubes de Magallanes se presentan como excelentes candidatos para determinar sus propiedades astrofísicas fundamentales mediante la técnica de la espectroscopía integrada. Dichos espectros integrados permitirán formar parte de una base de espectros patrones (*templates*), con un amplio rango de edades y una composición química diferente a la solar. Estos *templates* serán de gran utilidad para estudiar, por ejemplo, cúmulos estelares en galaxias enanas distantes.

1.6 Objetivos de la investigación

1.6.1 Objetivo general

- Determinar parámetros astrofísicos fundamentales en cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes.

1.6.2 Objetivos específicos

- Determinar edades y enrojecimientos, de los cúmulos estelares seleccionados de la Nube Mayor y la Nube Menor de Magallanes.
- Aportar nuevos datos observacionales que nos permitan construir espectros patrones para mejorar los conocimientos de los sistemas estelares en las Nubes de Magallanes y en otras galaxias.

CAPÍTULO II

CÚMULOS ESTELARES EN LAS NUBES DE MAGALLANES

METODOLOGÍA

2.1 Introducción

En este trabajo buscamos determinar edades y enrojecimientos de cúmulos estelares pertenecientes a las Nubes de Magallanes. Para ello es necesario realizar las observaciones de los cúmulos estelares seleccionados de las *Nubes Mayor y Menor de Magallanes*, los cúmulos se seleccionaron teniendo en cuenta principalmente el brillo superficial y el diámetro angular de manera que pudieran ser observados con el telescopio “*Jorge Sahade*” de 2.15 m del Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO), ubicado en la provincia de San Juan, Argentina. La técnica aplicada para la observación de los mencionados objetos fue la *espectroscopía integrada*. Se observaron en total 13 cúmulos estelares pertenecientes a la *Nube Menor* y 29 correspondientes a la *Nube Mayor de Magallanes*. Seis de los cúmulos seleccionados de la *Nube Menor* no registran estudios previos al momento de realizar este trabajo, en tanto que de los 29 objetos observados en la *Nube Mayor*, los parámetros de 23 de ellos son acá presentados por primera vez.

En las Tablas 2.1 y 2.2 se presentan la lista de los cúmulos seleccionados pertenecientes a las *Nubes Menor y Mayor*, respectivamente. Estas tablas incluyen las designaciones de los objetos en diferentes catálogos, juntamente con sus respectivas coordenadas ecuatoriales (correspondientes al equinoccio 2000.0) y Galácticas.

La identificación de los cúmulos pertenecientes a la *Nube Menor* proviene de Kron (1956, K), Lindsay (1958, L), Pietrzyński & Udalski (1999, SMC_OGLE), Lauberts (1982, ESO), Hodge & Wright (1974, HW) y Westerlund & Glaspey (1971, WG); en tanto que la identificación de los cúmulos pertenecientes a la *Nube Mayor*

corresponden a los trabajos de Shapley & Lindsay (1963, SL), Kontizas et al. (1990, KMHK), Pietrzyński & Udalski (1999, LMC_OGLE) y Hodge & Sexton (1966, HS).

Tabla 2.1: Cúmulos estelares observados *de la Nube Menor de Magallanes*

N°	Cúmulo	α_{2000} (h:m:s)	δ_{2000} (°:':")	l (°)	b (°)
1	NGC 242, K 22, L 29, SMC_OGLE 18	00:43:38	-73:26:38	303.701	-43.673
2	NGC 256, K 23, L 30, ESO29-SC11,	00:45:54	-73:30:24	303.474	-43.616
3	NGC 265, K 24, L 34, ESO29-SC14,	00:47:12	-73:28:38	303.349	-43.648
4	Bruck 50	00:49:03	-73:22:00	303.169	-43.764
5	K 34, L 53, SMC_OGLE 104	00:55:33	-72:49:58	302.508	-44.292
6	IC 1611, K 40, SMC_OGLE 118, L 61,	00:59:48	-72:20:02	302.038	-44.780
7	IC 1626, K 53, L 77, ESO29-SC30	01:06:14	-73:17:51	301.459	-43.788
8	IC 1641, HW 62, ESO51-SC21	01:09:40	-71:46:03	300.907	-45.289
9	L 95	01:15:00	-71:20:00	300.260	-45.670
10	Bruck 164	01:29:30	-73:32:00	299.239	-43.321
11	HW 85	01:42:00	-71:17:00	297.160	-45.270
12	WG 1	01:42:53	-73:20:00	297.902	-43.286
13	NGC 796, L 115, ESO30-SC6	01:54:45	-74:13:00	397.013	-42.149

Tabla 2.2: Cúmulos estelares observados de la *Nube Mayor de Magallanes*

N°	Cúmulo	α_{2000} (h:m:s)	δ_{2000} (°:':")	l (°)	b (°)
1	SL 14, KMHK 28	04:40:28	-69:39:00	281.592	-36.507
2	NGC 1695, KMHK 101, SL 40	04:47:44	-69:22:00	208.996	-36.007
3	SL 56, KMHK 142	04:50:32	-70:04:00	281.715	-35.547
4	SL58, KMHK 153	04:50:59	-69:38:00	281.189	-35.652
5	SL79, KMHK 213	04:52:53	-71:39:00	283.466	-34.842
6	SL76, KMHK 206	04:53:09	-68:12:00	279.444	-35.905
7	NGC 1732, KMHK 209, SL 77	04:53:11	-68:39:00	279.959	-35.772
8	SL 116, KMHK 315	04:56:24	-68:48:00	280.034	-35.448
9	SL168, KMHK 418	05:00:44	-65:27:00	275.918	-35.909
10	NGC 1822, KMHK 513, SL 210	05:05:08	-66:12:00	276.700	-35.299
11	HS 109, LMC_ OGLE 82	05:05:37	-68:43:06	279.661	-34.666
12	SL 234, LMC_ OGLE 113	05:06:54	-68:43:08	279.627	-34.552
13	SL 255, KMHK 573	05:07:55	-70:03:00	281.170	-34.135
14	NGC 1887, KMHK 700, SL 343	05:16:05	-66:19:00	276.560	-34.198
15	SL 364, KMHK 736	05:17:41	-71:03:00	282.113	-33.106
16	SL 360, LMC_ OGLE 328	05:18:11	-69:13:06	279.943	-33.455
17	SL 386, KMHK 770	05:19:50	-65:23:00	275.377	-33.972
18	NGC 1944, KMHK 836, SL 426, ESO33-SC17	05:21:57	-72:29:00	283.684	-32.643
19	SL 463, KMHK 889, LW 213	05:26:15	-66:03:00	283.684	-32.463
20	SL 477, KMHK 911	05:26:23	-71:41:00	282.677	-32.295
21	NGC 1972, LMC_ OGLE 481, SL 480	05:26:48	-69:50:17	280.502	-32.598
22	NGC 2000, KMHK 932, SL 493	05:27:30	-71:52:00	282.868	-32.174
23	NGC 1986, LMC_ OGLE 496, SL 489	05:27:38	-69:58:14	280.643	-32.507
24	SL 551, KMHK 1027	05:32:13	-68:00:00	278.275	-32.393
25	SL 566, KMHK 1061	05:32:50	-70:47:00	278.275	-32.393
26	NGC 2053, KMHK 1154, SL 623	05:37:40	-67:24:00	277.503	-31.948
27	SL 763, KMHK 1448	05:52:53	-69:47:00	280.132	-30.372
28	NGC 2137, KMHK 1495, SL 764	05:53:12	-69:29:00	279.781	-30.363
29	NGC 2140, KMHK 1511, SL 773	05:54:17	-68:36:00	278.754	-30.311

2.2 Observaciones espectroscópicas realizadas

Todos los cúmulos analizados en este trabajo fueron observados desde el CASLEO (Argentina). Las observaciones se llevaron a cabo durante 8 comisiones de observación entre los años 1999 y 2006, con el telescopio “Jorge Sahade” de 2.15 m. En todos los casos se utilizó una cámara CCD con un chip Tektronik de 1024x1024 píxeles, acoplada al espectrógrafo REOSC. Cada píxel tiene un tamaño de 24. El modo de operación utilizado fue de Dispersión Simple (DS). Las exposiciones fueron realizadas utilizando la red # 270 de 300 líneas/mm, con un ángulo fijo en $4^{\circ} 30'$, lo que produjo una dispersión de aproximadamente $3.46 \text{ \AA}/\text{píxel}$. El tamaño de la ranura en el plano focal del telescopio fue de 400μ ($\approx 4.2''$ en el cielo). El ancho total a mitad de altura (FWHM) medido en las líneas de las lámparas de comparación de Cu-Ar-Ne dio lugar a espectros con una resolución típica de $\sim 14 \text{ \AA}$. Para poder realizar la calibración en flujo de los espectros obtenidos, durante cada noche se observaron 3 estrellas estándares espectrofotométricas de la lista publicada por Stone & Baldwin (1983). Dada la importancia de esta calibración, la misma se realizó cuidadosamente.

Luego de cada exposición de un cúmulo y/o de una estrella estándar, se obtuvo un espectro de una lámpara de comparación de Cu-Ar-Ne, para permitir la ulterior calibración de los espectros obtenidos en longitud de onda. Se obtuvieron además durante cada noche las usuales imágenes de calibración, tales como *bias* y distintos tipos de *flat-field*, exposiciones éstas que resultan absolutamente necesarias para llevar a cabo la reducción de los espectros.

En las Tablas 2.3 y 2.4 se detallan las fechas específicas en las cuales fueron observados los cúmulos pertenecientes a la Nube Menor y Mayor respectivamente, los tiempos de exposición usados y el área total barrida al realizar las diferentes observaciones.

Tabla 2.3: Observaciones de los cúmulos estelares de la Nube Menor de Magallanes.

N°	Cúmulo	Fecha	Exposición (segundos)	D (")	V
1	NGC 242	11/10/99	3x300	40	-
2	NGC 256	10/10/05	6x300	60	12.50
3	NGC 265	10/10/05	6x300	98	12.17
4	Bruck 50	10/11/06	6x300	33	10.8
5	K 34	11/12/05 11/11/06	6x300 8x300	74	12.89
6	IC 1611	12/11/06	8x300	82	11.96
7	IC 1626	11/12/05	6x300	30	13.82
8	IC 1641	05/10/02	8x300	45	14.99
9	L 95	13/12/06	12x300	30	-
10	Bruck 164	12/10/99	3x300	19.5	-
11	HW 85	12/11/06	10x300	30	-
12	WG 1	12/11/06	10x300	33	-
13	NGC 796	11/10/99 12/10/99	3x300 6x300	36	-

Tabla 2.4: Observaciones de los cúmulos estelares de la Nube Mayor de Magallanes.

Nº	Cúmulo	Fecha	Exposición (segundos)	D (")	V
1	SL14	13/11/04	8x300	40	13.88
2	NGC 1695	11/10/05	4x300	50	12.16
3	SL 56	14/11/04	8x300	45	12.26
4	SL58	10/11/05	8x300	50	12.50
5	SL79	29/12/05	9x300	50	13.44
6	SL76	11/12/05	3x300	40	12.08
7	NGC 1732	15/11/04	6x300	45	12.30
8	SL 116	13/11/04 12/12/04	8x300 9x300	50	12.25
9	SL168	14/12/06	12x300	50	13.20
10	NGC 1822	16/12/04	9x300	50	13.15
11	HS109	12/12/04 13/12/04	9x300 6x300	50	12.52
12	SL 234	16/11/04	6x300	40	12.44
13	SL255	13/12/04 11/11/06	8x300 9x300	50	12.54
14	NGC 1887	14/12/04	9x300	50	12.72
15	SL364	27/12/05	9x300	50	13.21
16	SL 360	12/11/06	4x300	100	9.54
17	SL386	15/11/04	8x300	24	13.32
18	NGC1944	15/12/06	12x300	61	11.84
19	SL463	14/12/04	6x300	100	12.27
20	SL477	15/11/04	8x300	47	12.70
21	NGC1972	15/12/04 26/12/05	6x300 6x300	39	12.62
22	NGC2000	13/11/04 14/11/04	8x300 8x300	50	12.14
23	NGC 1986	15/12/04	6x300	60	11.07
24	SL 551	11/11/06 16/12/04	8x300 9x300	10	13.25
25	SL 566	14/12/06	12x300	50	12.62
26	NGC 2053	12/12/04 13/12/04	6x300 6x300	100	12.18
27	SL 763	14/12/04 15/12/04	6x300 6x300	38	12.85
28	NGC 2137	15/12/04 10/11/06	6x300 8x300	50	12.66
29	NGC 2140	15/12/04	6x300	100	12.44

2.3 Reducción de datos

La reducción de los datos espectroscópicos se llevó a cabo íntegramente en el Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina), usando el paquete IRAF (Image Reduction and Analysis Facilities) y las facilidades computacionales del Grupo de Astrofísica Estelar de dicho observatorio. Las etapas seguidas durante el procesamiento de las imágenes fueron las siguientes:

- a) Preparación de las imágenes de calibración: *bias*, *flat-field* y *dark*.
- b) Correcciones por las imágenes de calibración (*bias*, *dark* y *flat-field*).
- c) Extracción del espectro unidimensional.
- d) Calibración de los espectros en longitud de onda.
- e) Construcción de la función sensibilidad.
- f) Calibración de los espectros en unidades de flujo.
- g) Eliminación de rayos cósmicos y combinación de espectros finales.

El procedimiento general para la reducción de los espectros consiste en sustraer el *overscan*⁴, recortar las imágenes, sustraer el *bias* y el *dark* y aplicar la corrección por *flat-field*. Las imágenes individuales correspondientes a los *bias*, *dark* y *flat-field*, estas imágenes se combinan para mejorar la calidad de las mismas. Las restantes operaciones consisten en obtener el espectro calibrado en longitud de onda, corregir por extinción atmosférica y realizar la calibración en unidades de flujo. Por último hay que eliminar los rayos cósmicos de cada uno de los espectros individuales y estos se combinan para obtener los espectros finales.

⁴ Filas y columnas a lo largo del borde de la imagen, que no están expuestas a la luz. Por lo que el nivel de cuentas es más bajo

2.3.1 Preparación de las imágenes de calibración

- **Bias**

Los *bias* o zeros son imágenes de tiempo de exposición nulo y representan el nivel cero o nivel de referencia a partir del cual se efectúan las lecturas del CCD. El *bias* representa una cantidad intrínseca de cada CCD que no depende ni del tiempo de exposición, ni de la temperatura del detector (Piatti & Clariá 2002).

Durante cada noche de observación se obtienen un total de 10 *bias*, los cuales se deben examinar cuidadosamente realizando una estadística de las cuentas en los píxeles de cada imagen. Para este fin se emplea la tarea “*imstatistic*” de *IRAF*. Además de indicar el promedio de la distribución de las cuentas y la desviación estándar (σ) de la distribución de píxeles, esta tarea muestra los valores mínimos registrados por los píxeles.

El promedio de las cuentas se realiza sobre todos los píxeles expuestos del CCD, en los cuales se debe obtener un valor próximo a 1020 cuentas en todas las imágenes que se examinen. Tanto el promedio como la desviación estándar deben ser semejantes en cada una de las imágenes *bias* obtenidas. Posteriormente las imágenes se combinan haciendo uso de la tarea “*zerocombine*”, con el algoritmo “*avsigclip*” que permite descartar en cada píxel los valores que no deben tomarse en cuenta por apartarse de la tendencia general. Este algoritmo utiliza un proceso de recorte basado en el valor de σ en cada píxel, el cual se supone proporcional a la raíz cuadrada de la media de los valores a combinar. El resultado mostrado en la imagen final es un promedio casi igual al valor de los *bias* individuales y una desviación estándar mucho menor, permitiendo así mejorar la razón señal ruido (S/N) del *bias* final.

La imagen final obtenida se examina con la tarea “*imexamine*” en varios lugares de la misma y en sectores cuadrados de 4 píxeles de lado, el promedio tiene el mismo valor en todo el *chip*, este valor debe ser muy parecido al encontrado en las imágenes individuales. En lo que respecta a los valores mínimos y máximos, éstos no tienen que ser diferentes de los valores mencionados anteriormente. Esto nos permitirá conocer que no existen grandes dispersiones, por lo que esta imagen obtenida puede considerarse prácticamente uniforme. Luego se construye un histograma de la imagen obtenida correspondiente al *bias*, en el cual es posible observar que la distribución de los valores tiene una forma *gaussiana*. Esto demuestra la calidad del *bias*. En la Figura 2.1 podemos observar el histograma de un *bias*. Si efectuamos un corte en la dirección de las líneas del CCD (dirección espacial) y se superponen varias de ellas promediándolas de a 100 líneas, tampoco se encuentran variaciones significativas.

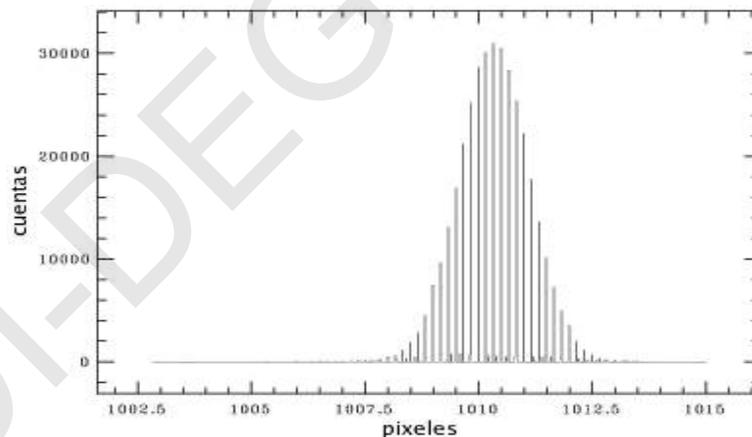


Fig. 2.1 Histograma típico de una imagen “zero”. Las ordenadas representan cuentas en tanto que las abscisas representan píxeles. Histograma obtenido con las imágenes *bias* tomadas en CASLEO, para el procesamiento de los datos de este trabajo.

- ***Flat-Field***

Las imágenes *flat* permiten determinar la sensibilidad del CCD en cada píxel (próximo a la unidad), homogeneizando el comportamiento de cada píxel del CCD. En estas imágenes, la presencia de polvo en la trayectoria de la luz es un factor importante, por lo que es necesario tomar las imágenes *flats* para cada noche de observación. Esto se debe a que el polvo puede aparecer o desaparecer de un día para otro, o bien puede variar la iluminación del sistema óptico del telescopio.

Las imágenes *flats* deben poseer una elevada razón señal ruido (S/N). Dependiendo de la forma como sean adquiridas, estas imágenes suelen llamarse *flat* de cúpula o *flat* de cielo. Los *flat* de cúpula o *dome-flat* se obtienen cuando se expone el CCD a la luz recibida de una pantalla blanca iluminada uniformemente o bien cuando se expone el CCD a la luz reflejada sobre alguna parte interior de la cúpula iluminada con luz difusa. Por su parte, los *flats* de cielo o *sky-flats* se obtienen cuando el CCD es expuesto a una región del cielo en el crepúsculo, después de que se ha puesto el Sol sobre el horizonte o bien antes del amanecer. El tiempo de exposición a las que son sometidas las imágenes *flats* suele ser de unos pocos segundos, ya que las fuentes a las que se expone el CCD son muy luminosas.

En cada turno de observación es importante obtener *flats* tanto de cúpula como de cielo, y analizarlos al igual que los *bias* con la tarea “*imstatistic*”. Los *flats* obtenidos durante cada noche se combinan por separado (*flat* de cúpula y *flat* de cielo) haciendo uso de la tarea “*flatcombine*”, utilizando el algoritmo *ccdclip* para eliminar los píxeles no deseados.

Este algoritmo utiliza características conocidas del CCD, tales como el ruido de lectura (read out noise) y la ganancia del mismo. Antes de realizar la combinación de los *flats* de cúpula es necesario determinar una región del CCD libre de defectos y bien expuesta, para escalar las imágenes individuales a un mismo nivel medio de cuentas en dicha región.

Para los *flats* de cielo se realiza el procedimiento similar. Como los tiempos de exposición durante los cuales se adquirieron estas imágenes son diferentes y muy cortos, hay que tomar la precaución de desplazar el telescopio entre una y otra exposición, para evitar posibles estrellas en el campo al efectuar la combinación.

2.3.2 Procesamiento de las imágenes de calibración

- ***Overscan***

Las columnas ficticias adicionales que aparecen en el extremo derecho de las imágenes CCD, más allá de las dimensiones del chip, constituyen lo que se conoce como *overscan*. Una vez que el CCD es expuesto, las cuentas que se obtienen indican el ruido de lectura de la electrónica del detector. Cuando el ruido introducido por la electrónica no es significativo, entonces el nivel de cuentas del *overscan* será semejante al del *bias*, por lo que los ajustes realizados en la sección del *overscan* poseen valores cercanos al *bias*.

- ***Recorte***

El recorte o *trimming* de las imágenes se realiza a los costados del área expuesta a la luz proveniente de la ranura del espectrógrafo, ya que las secciones externas a la misma no se exponen a ninguna fuente.

- **Correcciones**

Todas las imágenes deben ser desafectadas por el *overscan* (a cada una se le ajusta su *overscan* en forma interactiva) y recortadas, conservando todas el mismo tamaño, de manera de poder operar luego conjuntamente con las mismas. Las imágenes de calibración también fueron desafectadas por diferentes efectos: *bias*, *dark* y *flat-field*. La imagen *bias* no fue procesada por ninguna imagen de calibración, ya que solo representan el punto cero de lectura del CCD. A la imagen *dark* se le resta el *bias*, a los *flats* se les debe restar el *dark* procesado y el *bias*, en tanto que a las imágenes de programa se les debe restar el *bias* y el *dark* procesado, dividiendo luego la imagen resultante por el *flat final*. En algunos casos, no se realiza la corrección por *dark* a ninguna imagen, debido a que el *dark* es igual al *bias*, y al hacer la corrección esto introduciría ruido adicional en las imágenes finales. Lo expresado anteriormente, puede escribirse como:

$$\text{dark procesado} = \text{dark} - \text{bias}$$

$$\text{flat-final} = \text{flat} - \text{bias} - \text{dark procesado}$$

$$\text{Imágenes finales} = (\text{imágenes obtenidas} - \text{bias} - \text{dark procesado}) / \text{flat-final}$$

- **Preparación del *flat-field***

La corrección por *flat-field* es una de las calibraciones más importantes que se realizan sobre los datos obtenidos con un detector CCD, esta corrección permite calibrar la respuesta relativa de cada píxel que forma parte del CCD. Al hacer un corte en la imagen correspondiente al *flat* de cúpula final en la dirección de la dispersión (a lo largo de las columnas), puede observarse la presencia de una notable pendiente (Figura 2.2), la cual debe su origen a que el CCD responde de diferente manera a distintas longitudes de onda. Si se tomara esta imagen para efectuar las correcciones por *flat-field* sólo introduciría distorsiones.

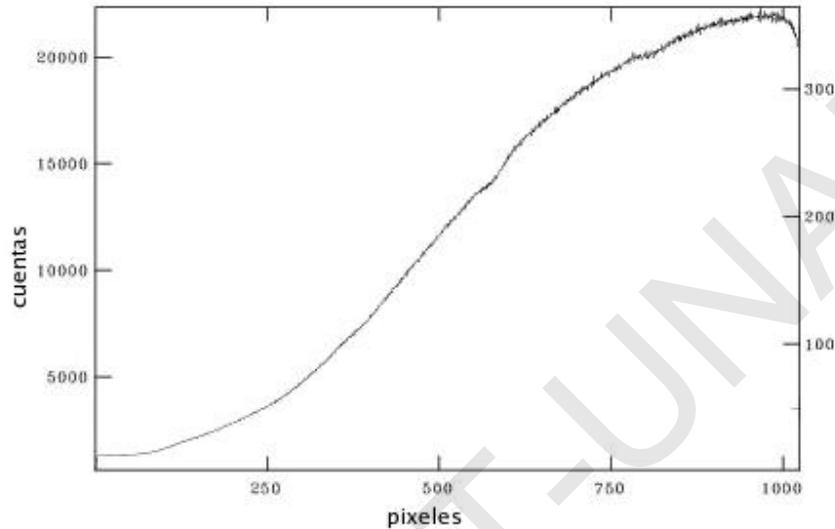


Fig. 2.2 Corte en la dirección de la dispersión (columnas) del flat de cúpula final. Las ordenadas representan cuentas en tanto que las abscisas representan pixeles. Imagen realizada con datos de este trabajo.

Para remover las características espectrales es necesario promediar todas las columnas - esto es, en la dirección de la dispersión - para crear un espectro representativo. Una vez que se realiza este promedio, se ajusta una curva que suavice el ruido del espectro. El *flat* de cúpula original se divide por la curva obtenida para eliminar la forma del espectro, sin modificar la información en la dirección espacial. Puede ocurrir también que haya problemas en el patrón de iluminación, debido a que la ranura no suele estar iluminada en forma uniforme.

La tarea *response* de IRAF es la encargada de calibrar la respuesta del CCD en la dirección de la dispersión. Esta tarea permite crear una imagen que modela al *flat* al dividirlo por la imagen creada. Ese espectro normalizador llamado *response*, se obtiene promediando el *flat* de cúpula a lo largo del eje de la dispersión, para formar un espectro

unidimensional y suavizarlo ajustándole una función.

Al realizar cortes en la dirección espacial para promedios de diferentes líneas sobre la imagen que resultó de la división del *flat* de cielo con la imagen de calibración (*response*), si se observa que la variación de las pendientes es inferior al 10%, se usa el *flat* así normalizado, porque la superficie de intensidad es constante en la dirección de la dispersión. Sin embargo, como mencionamos anteriormente el *flat* normalizado puede mostrar un patrón de iluminación particular en la dirección espacial, o sea, puede tener variaciones en las pendientes superiores al 20%, lo que indicaría que la iluminación de la ranura por la pantalla blanca no ha sido uniforme.

Para ajustar las variaciones que se presentan en el *flat* de cielo se hace uso de la tarea *illumination*. Con esta tarea se crea la imagen a partir de los *flats* de cielo. Para determinarla, se hace un ajuste con diferentes funciones a través de la ranura en diferentes puntos a lo largo del eje de dispersión. La función se interpola entre los diferentes puntos de dispersión. El ajuste de los datos se realiza dividiendo el eje de dispersión en un conjunto de segmentos y promediando luego el perfil de la ranura dentro de cada segmento. Luego de obtenida la imagen, se ajusta la iluminación de la ranura. Posteriormente se procede a multiplicar la imagen obtenida (con la tarea *illumination*) con la imagen *response*, o sea, el *flat* de cúpula modificado en la dirección de la dispersión, con la imagen del *flat* de cielo corregido en la dirección espacial. De esta manera resulta el *flat-final*. Después de que las imágenes de calibración son obtenidas, se procesan las imágenes de programa usando la tarea *ccdproc*.

La razón señal ruido (S/N) de una imagen corregida y sin corregir por *flat* muestra cambios no apreciables. Esto se debe a que las imágenes tienen señales muy débiles, la cuales están dominadas por el ruido fotónico.

2.3.3 Extracción del espectro unidimensional

Hasta aquí todas las tareas descritas permitirán corregir las imágenes de los objetos observados. Ahora para cada uno de los cúmulos observados hay que convertir las imágenes espectrales de estos a espectros unidimensionales, eso significa, que debemos sumar la luz del objeto distribuido en la ranura para cada longitud de onda y así obtener una imagen unidimensional. Para realizar este proceso se requiere de tres etapas:

a) Definición de las aperturas

Cuando se trabaja en espectroscopía en el modo de Dispersión Simple (DS), la apertura trazada debe incluir por completo el perfil del objeto con el menor fondo del cielo posible. Para ajustar el espectro del fondo de cielo (background) de la imagen se definen regiones fuera del objeto. El background debe sustraerse a cada uno de los espectros observados, tanto para las líneas de emisión, como para el continuo del espectro del cielo. Esta tarea debe realizarse con mucho cuidado, debido a que la medición de los anchos equivalentes en los espectros dependerá en gran medida de cuán bien se haya efectuado esta tarea.

Para definir correctamente las aperturas se usa un criterio que depende, por un lado, del tamaño del objeto, del *seeing* de la imagen y del foco del telescopio y, por otro, de la intensidad de la señal recibida y del ruido que haya en ésta. Lo ideal es conseguir integrar la mayor parte posible de la señal introduciendo el menor ruido posible. Si se traza una apertura demasiado estrecha, se dejará fuera la contribución de la luz debida a la alas del perfil espacial del objeto y una apertura demasiado grande que vaya más allá del límite del objeto, disminuirá la calidad del espectro al incluir ruido de píxeles que no han sido expuestos.

b) Trazado de las aperturas

Después de haber definido el tamaño de la apertura, hay que sumar la luz dentro de ella para cada una de las columnas. Como la ranura no siempre está perfectamente alineada con las filas de píxeles del CCD, el centro del perfil del objeto no suele caer siempre en la misma columna. Debido a esto, tiene que ajustarse una función a ese desplazamiento, la que por lo general se realiza usando una estrella brillante (por ejemplo, una estrella estándar).

c) Extracción del espectro.

Para extraer el espectro se suman las cuentas de los píxeles que están dentro de la apertura centrada y luego se les resta el nivel del fondo del cielo.

Estas tres etapas deben aplicarse a las imágenes obtenidas para las lámparas de comparación, excepto la sustracción del fondo de cielo.

La tarea *apall* de IRAF permite realizar las operaciones antes mencionadas. Primero se definen las aperturas, con la tarea *apall*. Esta muestra un corte de la imagen espectral en la dirección espacial, en la cual pueden definirse y centrarse las aperturas como se ilustra en la Figura 2.3., además podemos apreciar que es posible definir la región del fondo del cielo (*background*). Las aperturas son registradas en un archivo de texto. El paso siguiente consiste en ajustar la función desplazamiento de la ranura, la cual es modificada en forma interactiva y, por último, se extrae el espectro. En la Figura 2.4 se muestra el espectro obtenido, después de realizar la integración en el sentido espacial para una estrella estándar.

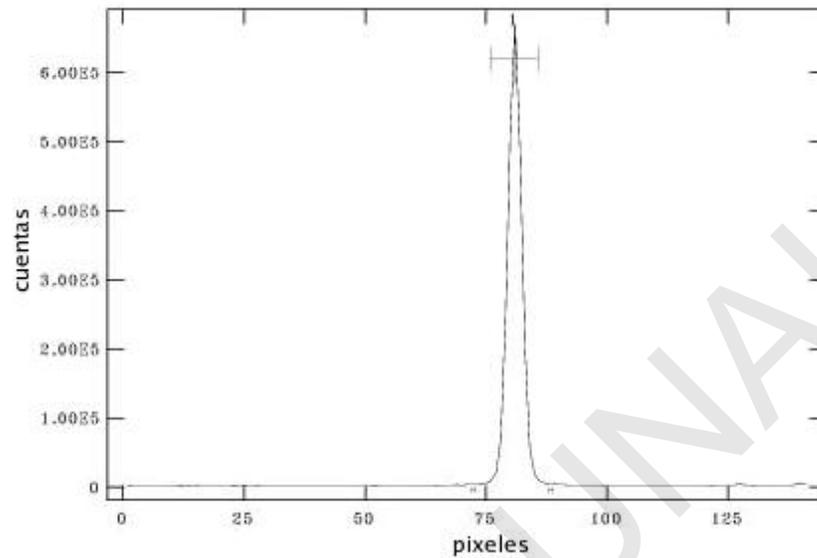


Fig. 2.3 Trazado de la apertura a la imagen de una estrella estándar. Las ordenadas representan cuentas en tanto que las abscisas representan píxeles. Imagen obtenida con los datos observacionales de este trabajo.

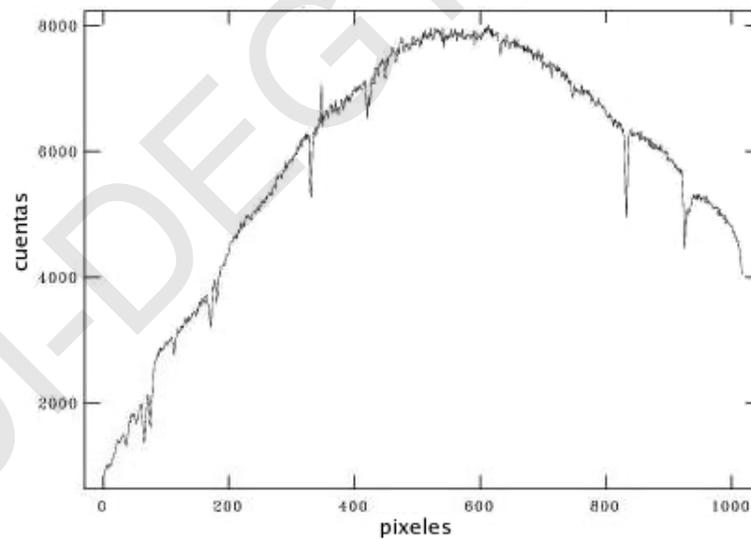


Fig. 2.4 Espectro unidimensional obtenido de la estrella estándar, después de haber integrado en la dirección espacial. Las ordenadas representan cuentas en tanto que las abscisas representan píxeles. Imagen obtenida con los datos observacionales de este trabajo.

2.3.4 Calibración de los espectros en longitud de onda

Después que los espectros han sido extraídos, primero hay que calibrarlos en longitud de onda y luego en unidades de flujo. Para lograr la calibración en longitud de onda, debe medirse en los espectros de las lámparas de comparación la posición de cierto número de líneas con longitud de onda conocida. Con estos puntos se ajusta una función longitud de onda versus pixeles, valiéndose para ello de un atlas que contiene espectros patrones de los elementos que componen las lámparas de comparación. Es recomendable que los espectros de las lámparas de comparación se obtengan inmediatamente después de cada objeto. De esta manera, cuando se calibren los espectros, podrá asignarse a cada objeto su respectiva lámpara de comparación. Luego se aplica la función ajustada, obteniéndose de esta manera los espectros calibrados en unidades de longitudes de onda.

La tarea *identify* permite realizar la calibración antes descrita. Los coeficientes de la función ajustada son almacenados en un archivo. Luego se emplea la tarea *dispcor* que aplica la solución encontrada a los espectros extraídos, obteniéndose así los espectros calibrados en longitud de onda. En la Figura 2.5 se muestra el espectro de una estrella estándar calibrado en función de la longitud de onda.

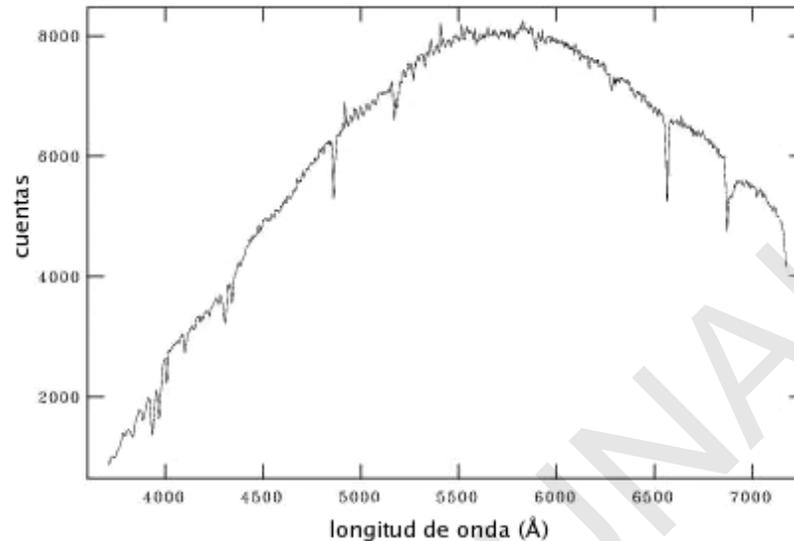


Fig. 2.5 Espectro de la estrella estándar calibrado en longitud de onda. Las ordenadas representan cuentas en tanto que las abscisas representan angströms. Imagen obtenida con los datos observacionales de este trabajo.

2.3.5 Construcción de la función sensibilidad

La función sensibilidad representa la respuesta del aparato de medición a la radiación de distintas frecuencias. Es una constante de proporcionalidad en función de la longitud de onda. Por esta razón, es necesario transformar la intensidad del espectro que se encuentra en cuentas a unidades de flujo. La función de transformación se encuentra cuando comparamos el número de cuentas obtenidas del espectro de una estrella patrón con su flujo conocido, suponiendo que existe linealidad entre el número de cuentas y el flujo. La cantidad de cargas acumuladas dependerá, además de la intensidad de la fuente, del tiempo de exposición, de la característica del instrumento y de la extinción atmosférica.

2.3.6 Calibración de los espectros en unidades de flujo

Para realizar la calibración de un espectro en unidades de flujo usando el paquete IRAF, hay que desarrollar las siguientes etapas:

1. Definición de bandas pasantes para usar el ajuste de la función sensibilidad.
2. Ajuste de una función suave con los puntos definidos anteriormente.
3. Aplicación de dicha función a los espectros de los objetos ya calibrados en longitud de onda.

Para definir las bandas pasantes se utiliza la tarea *standard*, la cual permite seleccionar las estrellas estándares calibradas en unidades de flujo, que se encuentran en la biblioteca de IRAF. Esta tarea integra las cuentas del espectro observado que están dentro de cada banda pasante. Como resultado de la aplicación de esta tarea, se obtiene un archivo con los puntos que se utilizarán en el ajuste de la función sensibilidad.

Posteriormente se aplica la tarea *sensfunction*, la cual requiere el ingreso del archivo generado con la tarea anterior (*standard*). Como resultado de esto tendremos la función sensibilidad en función de la longitud de onda. En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de la función sensibilidad. Una vez obtenida la curva de sensibilidad, se corre la tarea *calibrate*, la cual permite realizar las correcciones por extinción atmosférica y la calibración en flujo. Para las correcciones de extinción atmosférica se utilizan los coeficientes de extinción determinados para el sitio de observación y las masas de aire efectivas calculadas a partir de las coordenadas ecuatoriales absolutas, instante de comienzo de las observaciones y tiempo de integración de los distintos objetos de programa.

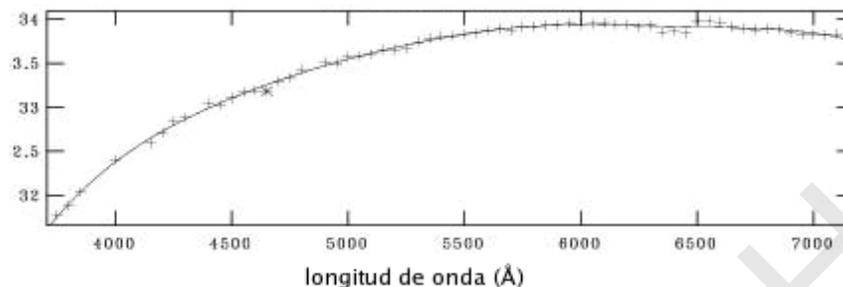


Fig. 2.6 Función sensibilidad (línea continua) obtenida a partir de las cuentas registradas para la estrella estándar en función de la longitud de onda. Las abcisas representan angströms. Imagen obtenida con los datos observacionales de este trabajo.

La manera de comprobar si la función sensibilidad está bien construida es aplicarla al espectro de la estrella estándar observada y compararla gráficamente con el espectro que se encuentra en la biblioteca de IRAF. En la Figura 2.7 se muestran ambos espectros, los cuales se comparan muy bien. Esta calibración puede aplicarse a todos los objetos observados.

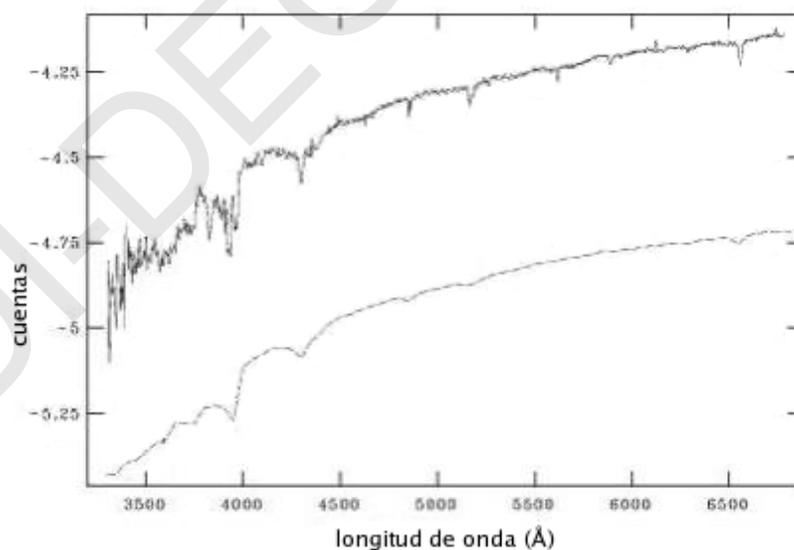


Fig. 2.7 Comparación entre el espectro de la estrella estándar observada (parte superior) y en la parte inferior el espectro obtenido a partir de la biblioteca de IRAF. Las abcisas representan angströms. Imagen obtenida con los datos observacionales de este trabajo.

2.3.7 Eliminación de rayos cósmicos y combinación de espectros individuales

Los rayos cósmicos generan ruido en la señal recibida. La forma de eliminarlos de las imágenes de calibración, es combinando las imágenes obtenidas. A diferencia de lo que ocurre en imagen directa donde los rayos cósmicos son eliminados mediante la combinación de las imágenes crudas, en las imágenes espectrales esto no puede realizarse, debido a que una misma longitud de onda puede corresponder a diferentes píxeles en las imágenes. Por lo tanto, la eliminación de los rayos cósmicos en una imagen espectral debe realizarse una vez que el espectro ya ha sido calibrado en longitud de onda. Para eso se comparan los diferentes espectros de un mismo objeto, pues al ser los rayos cósmicos aleatorios pueden eliminarse mediante tareas existentes en IRAF.

Con el objeto de obtener una mejor razón S/N, los espectros individuales de cada objeto se combinan, ya sea a través de la suma, del promedio o de la mediana. Esto se logra haciendo uso de la tarea scombine.

Una vez que se tienen los espectros de cada cúmulo estelar observado, procesados correctamente, se debe realizar el análisis (trazar el continuo, medir anchos equivalentes de las líneas, realizar las comparaciones con los espectros de las bases de espectros patrones) de estos, para ello se utilizan algunos programas. Uno de estos programas es el SPEED.

2.4 Programa SPEED

Este programa se utilizó para realizar el análisis de los espectros ya calibrados en longitud de onda y flujo. El programa SPEED fue desarrollado por Alex Schmidt (1988) del Departamento de Matemática de la Universidad Federal de Santa María (Brasil), haciendo uso de una versión de Turbo Pascal. Es presentado como un conjunto de funciones específicas aplicables a uno o más espectros de acuerdo a tres menús de opciones.

- a) De acceso al sistema operacional: leer, grabar y suprimir archivos, cambiar de directorio etc.
- b) De tratamiento de datos: suma, inversión y multiplicación entre espectros, suma y multiplicación por una constante, cambio de escala, corrección por enrojecimiento, corrección por *redshift*, normalización, ajuste de *gaussianas*, etc.
- c) Rutinas gráficas: gráfico de uno o más espectros.
- d) De acceso a la biblioteca de espectros.
- e) Rutinas específicas como: listado de datos, estado de archivos, etc.

Para poder trabajar los datos en el programa SPEED, éstos deben encontrarse en formato ASCII, ordenados de la siguiente manera: Número de puntos, longitud de onda inicial e intervalo entre los puntos. El intervalo entre los puntos se tomó igual a 2 Å, igual al que poseen los espectros patrones.

En este trabajo las funciones utilizadas están distribuidas en dos de los tres menús y fueron las siguientes:

- a) Menú principal: selecciona y grafica espectros; lista, graba borra y lee archivos; finaliza el programa.

- b) Menú secundario: cambia unidades de flujo y de energía; suma, resta, multiplica y divide los espectros por una constante seleccionada o bien por otro espectro; corrige por enrojecimiento interestelar, corrimiento hacia al azul y hacia el rojo; normaliza; permite generar continuos y determinar anchos equivalentes.

2.5 Medida de los anchos equivalentes

Para realizar la medida de los anchos equivalentes de las líneas de *Balmer* primero se definió el continuo sobre la región donde se encontraban estas líneas. Debido a la baja dispersión utilizada, existen en el espectro muchos puntos de flujo máximo que permiten llevar a cabo una buena estimación del continuo espectral. Estos puntos fueron cuidadosamente seleccionados por Bica & Alloin (1986a) y Bica & Alloin (1987) y permiten representar satisfactoriamente el continuo espectral, aun en el caso de que los puntos se conecten simplemente por líneas rectas.

En este trabajo el continuo de cada espectro se trazó en la región intermedia del mismo. A partir de estos continuos se determinaron los anchos equivalentes de las líneas de Balmer y las tres líneas metálicas (K CaII, banda G (CH) y MgI) haciendo uso de las ventanas espectrales definidas por Bica & Alloin (1986a) y el programa SPEED descrito en la sección anterior. En las tablas 2.5 y 2.6 se muestran para los cúmulos estelares de las dos Nubes de Magallanes, los anchos equivalentes promedios y las sumas de estos obtenidos para las ventanas que contienen las principales líneas de la serie de Balmer y las tres líneas metálicas (K CaII, banda G(CH) y MgI).

Tabla 2.5: Anchos equivalentes promedios medidos en los espectros de los cúmulos estelares de la Nube Menor de Magallanes, para determinadas ventanas espectrales.

N°	Cúmulo	KcaII (3908-3952) Å	H δ (4082-4124) Å	G(CH) (4284-4318)Å	H γ (4318-4364) Å	H β (4846-4884) Å	Mg I (5156-5196)Å	Sh	Sm
1	NGC 242	2.10	5.15 \pm 1.8	0.84	5.24 \pm 0.06	5.26 \pm 0.3	0.97	15.65	4.11
2	NGC 256	1.15	5.95 \pm 1.0	-0.40	5.06 \pm 0.2	6.44 \pm 0.4	1.15	17.45	4.87
3	NGC 265	4.37	4.05 \pm 0.3	0.50	7.27 \pm 0.6	8.97 \pm 1.0	0.68	20.29	5.55
4	Bruck 50	0.54	1.02 \pm 1.8	-0.06	1.21 \pm 0.3	-	-	2.23	0.48
5	K 34	5.24	4.56 \pm 0.2	2.91	8.26 \pm 0.11	7.14 \pm 0.7	0.54	19.96	8.69
6	IC 1611	2.16	6.72 \pm 0.2	1.64	-	6.40 \pm 0.4	-0.08	13.12	3.72
7	IC 1626	3.12	8.63 \pm 1.6	1.31	7.54 \pm 0.9	8.34 \pm 0.4	0.61	24.51	5.04
8	IC 1641	4.10	9.00 \pm 0.3	3.13	8.33 \pm 0.2	6.47 \pm 0.4	2.11	24.33	9.34
9	L 95	1.91	9.19 \pm 0.1	1.27	8.30 \pm 0.1	7.74 \pm 0.04	0.08	25.23	3.26
10	Bruck 164	1.23	4.09 \pm 0.3	0.16	4.05 \pm 0.1	1.18 \pm 0.9	-0.65	9.32	0.74
11	HW 85	4.87	2.56 \pm 1.8	1.96	5.31 \pm 0.01	4.39 \pm 0.9	1.65	12.26	8.48
12	WG 1	1.16	3.91 \pm 1.8	1.24	2.61 \pm 0.9	3.77 \pm 0.07	0.68	10.29	3.08
13	NGC 796	-0.08	7.11 \pm 0.11	0.37	7.29 \pm 0.2	5.21 \pm 0.4	-0.61	19.61	-0.32

Tabla 2.6: Anchos equivalentes promedios medidos en los espectros de los cúmulos estelares de la Nube Mayor de Magallanes, para determinadas ventanas espectrales.

N°	Cúmulo	KcaII (3908-3952)Å	H _δ (4082-4124)Å	G(CH) (4284-4318)Å	H _γ (4318-4364)Å	H _β (4846-4884)Å	Mg I (5156-5196)Å	Sh	Sm
1	SL 14	6.04	1.70 ± 1.80	4.28	2.25 ± 0.30	4.75 ± 0.35	2.23	12.55	13.77
2	NGC 1695	3.95	9.02 ± 0.28	2.15	6.16 ± 0.54	4.90 ± 0.65	1.89	5.02	7.99
3	SL 56	2.18	5.02 ± 0.18	0.08	5.48 ± 0.18	5.08 ± 0.47	1.02	15.58	3.28
4	SL 58	4.37	8.13 ± 0.77	1.45	6.44 ± 0.26	5.26 ± 0.29	0.67	19.83	6.49
5	SL 79	3.60	14.21 ± 1.10	2.70	10.62 ± 0.72	8.45 ± 0.55	1.19	33.28	7.49
6	SL 76	0.61	9.80 ± 0.30	0.78	8.93 ± 0.32	7.15 ± 0.30	0.62	25.88	2.01
7	NGC 1732	1.90	5.74 ± 1.20	0.92	6.65 ± 0.05	6.35 ± 0.50	0.19	18.74	3.01
8	SL 116	0.95	8.12 ± 0.78	0.49	8.38 ± 0.23	7.29 ± 0.44	-0.20	23.79	1.24
9	SL 168	1.97	10.5 ± 0.70	1.46	11.07 ± 1.17	9.11 ± 1.20	-0.34	30.68	3.09
10	NGC 1822	0.91	9.46 ± 0.16	0.48	11.00 ± 1.10	7.71 ± 0.86	0.08	28.17	1.47
11	HS 109	4.34	8.36 ± 0.54	0.07	9.38 ± 0.13	8.42 ± 0.52	0.53	26.16	4.94
12	SL 234	0.99	5.90 ± 0.90	0.07	7.29 ± 0.64	5.56 ± 0.01	-0.49	18.75	0.57
13	SL 255	2.35	6.36 ± 0.59	0.62	8.36 ± 0.21	4.33 ± 0.07	0.48	19.05	3.45
14	NGC 1887	0.63	6.85 ± 0.10	0.54	5.76 ± 0.46	5.42 ± 0.13	1.67	18.03	2.84
15	SL 364	1.63	9.17 ± 0.13	-0.37	4.51 ± 0.31	7.19 ± 0.71	0.16	20.87	1.42
16	SL 360	0.31	2.24 ± 1.8	0.03	3.09 ± 0.41	1.67 ± 0.90	-0.23	7.00	0.11
17	SL 386	0.02	5.28 ± 0.28	0.14	6.21 ± 0.44	6.28 ± 0.57	1.21	17.77	1.37
18	NGC 1944	2.53	8.27 ± 1.30	0.47	10.05 ± 0.15	8.90 ± 1.00	-0.06	27.22	2.94
19	SL 463	4.61	5.23 ± 1.23	0.60	6.18 ± 0.47	3.40 ± 0.10	-1.19	14.81	4.02
20	SL 477	2.28	4.30 ± 0.15	-0.80	6.06 ± 0.59	4.07 ± 0.33	1.04	14.43	2.52
21	NGC 1972	0.81	6.89 ± 0.06	1.02	6.66 ± 0.01	5.96 ± 0.41	0.80	19.51	2.63
22	NGC 2000	0.22	9.54 ± 0.24	-0.19	7.34 ± 0.69	7.98 ± 0.08	1.40	24.86	1.43
23	NGC 1986	1.55	6.50 ± 0.45	0.16	4.39 ± 0.19	4.49 ± 0.09	2.52	15.38	4.23
24	SL 551	8.13	3.61 ± 0.84	2.53	5.62 ± 0.32	4.56 ± 0.12	0.34	13.79	11.00
25	SL 566	1.77	5.88 ± 1.10	1.08	8.02 ± 0.13	5.45 ± 0.1	0.36	19.35	3.21
26	NGC 2053	2.35	7.00 ± 0.05	0.43	6.03 ± 0.62	6.57 ± 0.28	0.19	19.60	2.97
27	SL 763	-1.42	10.25 ± 0.95	0.18	8.11 ± 0.04	6.60 ± 0.25	1.49	24.96	0.25
28	NGC 2137	4.36	2.65 ± 1.8	4.50	4.06 ± 0.14	3.87 ± 0.17	2.14	10.58	11.00
29	NGC 2140	4.90	9.65 ± 0.35	0.55	8.11 ± 0.04	6.51 ± 0.34	0.23	24.27	5.68

2.6 Determinación de la edad y enrojecimiento

Para determinar las edades y enrojecimientos de los cúmulos observados a partir de sus espectros integrados realizamos una primera estimación de la edad del cúmulo con los anchos equivalentes medidos de las líneas de la serie de Balmer en absorción y de las tres líneas metálicas ya mencionadas anteriormente. La medida de los anchos equivalentes se llevó a cabo con el programa llamado “SPEED”. Esta primera edad determinada es independiente del enrojecimiento interestelar que afecta al cúmulo. Los valores medidos de los anchos equivalentes de las líneas de Balmer se interpolaron entre los valores correspondientes a la calibración de Bica & Alloin (1986b), como se indica en la Tabla 2.7, la primera columna están las edades correspondientes para las principales líneas de Balmer, las columnas siguientes nos muestran los intervalos de edades para cada una de las 4 principales líneas de Balmer (H_α , H_β , H_γ y H_δ). En la tabla podemos ver que estos valores no son de utilidad para determinar edades en cúmulos más jóvenes que 10 millones de años.

Tabla 2.7: Variación de los anchos equivalentes de las líneas de Balmer en función de la edad.

Edad (años)	H_α (4082-4124) Å	H_β (4318-4364) Å	H_γ (4846-4884) Å	H_δ (6540-6586) Å
16.5×10^9	3.0 ± 0.5	3.5 ± 0.9	4.9 ± 1.8	4.4 ± 1.8
5.0×10^9	3.6 ± 0.5	4.9 ± 0.7	5.7 ± 1.8	5.0 ± 1.8
10^9	4.4 ± 0.5	7.5 ± 0.7	7.7 ± 1.0	9.7 ± 1.8
5×10^8	5.6 ± 0.5	7.9 ± 0.5	8.6 ± 0.8	11.9 ± 1.1
10^8	4.6 ± 0.8	7.9 ± 0.5	9.9 ± 0.3	10.5 ± 1.1
5×10^7	3.3 ± 1.6	6.2 ± 0.5	7.6 ± 0.3	8.9 ± 1.1
10^7	0.8 ± 1.6	3.9 ± 0.5	3.5 ± 0.3	4.5 ± 1.1

Posteriormente adoptamos en primera aproximación la edad inferida en el paso anterior, elegimos entre las bases de espectros patrones disponibles al momento de desarrollar este trabajo, el *template* con características espectrales más parecidas a las del espectro integrado del cúmulo en estudio. Seguidamente modificamos el enrojecimiento interestelar del espectro observado usando diferentes *templates*, hasta conseguir el mejor ajuste entre el continuo y las líneas de absorción de los espectros. Las correcciones por enrojecimiento fueron realizadas tomando en cuenta la ley de enrojecimiento interestelar de Seaton (1979): $A_\lambda = 0.65 A_v \left[1 - \left(\frac{1}{\lambda} \right) - 0.35 \right]$ y el valor de 3.0 para la razón R entre la absorción total y selectiva: $A_v = 3.0E(B - V)$. Además de este método determinamos enrojecimientos haciendo uso de los mapas de enrojecimiento de Burstein & Heiles (1982).

También determinamos la edad de los cúmulos estelares utilizando los anchos equivalentes de ciertas características espectrales en combinación con los diagramas diagnósticos que involucran la suma de los AEs de las líneas espectrales seleccionadas, junto con las respectivas calibraciones de edad y metalicidad obtenidas por Santos & Piatti (2004). Es decir, realizamos una suma de los AEs de las primeras 3 líneas de Balmer H_β , H_γ y H_δ y de las líneas metálicas K Ca II, banda G y Mg I en $\sim 5170 \text{ \AA}$, llamadas Sm y Sh, respectivamente. Debido a que el AE de cada línea de Balmer es una función bivaluada de la edad, se utiliza la suma Sm para obtener una primera estimación de la edad a partir de la expresión: $\log(t) = a_0 + a_1 s_m + a_2 (s_m)^2$. Los valores de los coeficientes son: $a_0 = -2.18 \pm 0.38$, $a_1 = 0.188 \pm 0.080$ y $a_2 = -0.0030 \pm 0.0032$, determinados previamente por Santos & Piatti (2004). La edad t que se obtiene, esta expresada en miles de millones de años.

Después de obtener este valor, se utiliza la suma de los AEs de las líneas de Balmer (Sh) para obtener una segunda estimación de la edad, en este caso se obtienen dos soluciones posibles: $\log(t) = -b \pm \left[(b^2 - 4a(c - s_h)) \right]^{1/2} / 2a$. Los valores de los coeficientes son: $a = -63.5 \pm 0.18$, $b = -8.56 \pm 0.35$, $c = 23.32 \pm 0.20$, determinados por Santos & Piatti (2004), t es la edad correspondiente al cúmulo y esta expresada en miles de millones de años. En el anexo 5 se muestra un ejemplo de un diagrama diagnóstico, donde los cúmulos son discriminados por edades. Ver Tablas 2.8 y 2.9.

Tabla 2.8: Edades inferidas a partir de los AEs y excesos de color E(B-V) a partir de los mapas de BH para los cúmulos estelares pertenecientes a la Nube Menor de Magallanes.

N°	Objeto	E(B-V) B&H	E(B-V) Template	Edad de Balmer (x10 ⁶ años)	Edad S _h , S _m (x10 ⁶ años)
1	NG C 242	0.03	0.08 ± 0.03	50	27
2	NGC 256	0.03	0.03 ± 0.02	50	36
3	NGC 265	0.03	0.03 ± 0.02	50-100	41
4	Bruck 50	0.03	0.00 ± 0.02	< 10	05
5	Kron 34	0.03	0.00 ± 0.02	50	95
6	IC 1611	0.06	0.10 ± 0.02	50-100	19
7	IC 1626	0.03	0.11 ± 0.02	300	57
8	IC 1641	0.03	0.04 ± 0.01	500	350
9	Lindsay 95	0.03	0.12 ± 0.02	50-100	57
10	Bruck 164	0.03	0.00 ± 0.02	~ 10	07
11	HW 85	0.03	0.01 ± 0.01	10-50	82
12	WG 1	0.03	0.12 ± 0.02	< 10	14
13	NGC 796	0.03	0.06 ± 0.02	10-50	22

Tabla 2.9: Edades inferidas a partir de los AEs y excesos de color E (B-V) a partir de los mapas de BH para los cúmulos estelares pertenecientes a la Nube Mayor de Magallanes.

N°	Objeto	E(B-V) B&H	E(B-V) Template	Edad Balmer (x10 ⁶ años)	Edad S _n , S _m (x10 ⁶ años)
1	SL 14	0.08	0.18 ± 0.02	10-50	8
2	NGC 1695	0.06	0.16 ± 0.02	50-100	69
3	SL 56	0.10	0.05 ± 0.02	10-50	18
4	SL 58	0.10	0.13 ± 0.03	~50	51
5	SL 79	0.09	0.06 ± 0.02	~100	115
6	SL 76	0.03	0.06 ± 0.02 0.08 ± 0.02	50-100	28
7	NGC 1732	0.03	0.00	50	20
8	SL 116	0.06	0.00	50-100	34
9	SL 168	0.03	0.01 ± 0.01	100	23
10	NGC 1822	0.04	0.05 ± 0.02	50-100	12
11	HS 109	0.06	0.08 ± 0.02	50-100	110
12	SL 234	0.06	0.00	50-100	24
13	SL 255	0.10	0.10 ± 0.02	50-100	22
14	NGC 1887	0.04	0.05 ± 0.02	50	18
15	SL 364	0.09	0.02 ± 0.01	50	19
16	SL 360	0.07	0.10 ± 0.02	~10	05
17	SL 386	0.03	0.17 ± 0.02	50	16
18	NGC 1944	0.07	0.07 ± 0.02	50-100	22
19	SL 463	0.06	0.1 ± 0.02	50	22
20	SL 477	0.07	0.03 ± 0.01	10-50	14
21	NGC 1972	0.07	0.00	50	20
22	NGC 2000	0.07	0.02 ± 0.01	10-50	42
23	NGC 1986	0.07	0.10 ± 0.02	10-50	23
24	SL 551	0.07	0.14 ± 0.02	>10	171
25	SL 566	0.09	0.15 ± 0.02	10-50	22
26	NGC 2053	0.06	0.08 ± 0.02	~50	21
27	SL 763	0.08	0.00	50-100	41
28	NGC 2137	0.07	0.05 ± 0.02	1000	286
29	NGC 2140	0.06	0.00	50-100	60

Para poder realizar una determinación de la edad y el enrojecimiento de los cúmulos estelares estudiados en este trabajo, elegimos de un grupo de espectros patrones con un amplio rango de edades el *template* o espectro patrón con características espectrales muy semejantes a las del espectro observado. Las bases de datos de espectros templates utilizadas fueron las de Bica (1988); Bica, Alloin & Santos (1990); Santos et al. (1995) y Piatti et al. (2002). Ver anexos A1, A2 y A3.

CAPÍTULO III

CÚMULOS ESTELARES DE LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

3.1 Introducción

En este Capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar la técnica de la espectroscopía integrada a 13 cúmulos estelares compactos de la Nube Menor de Magallanes, junto con el análisis y la discusión de los resultados obtenidos para cada uno de estos cúmulos.

La primera estimación de las edades de los objetos seleccionados se llevó a cabo mediante la comparación de los anchos equivalentes, para ello se utilizaron las ventanas espectrales seleccionadas con las calibraciones establecidas por Bica & Alloin (1986) y más recientemente por Santos & Piatti (2004). Una segunda estimación, ciertamente más precisa, se realizó mediante el ajuste de los espectros obtenidos con espectros patrones seleccionados de las bases de Bica (1988), Santos et al. (1995, de ahora en adelante SBCPGD), Dutra et al. (1999), Piatti et al. (2002, de ahora en adelante PBCSA) y Ahumada, Clariá & Bica (2007). Los excesos de color $E(B-V)$ se determinaron, por un lado, a partir de los mapas de extinción interestelar obtenidos por Burstein & Heiles (1982, BH) (Tabla 2.8) y, por otro lado, variando el enrojecimiento hasta lograr el mejor ajuste entre los espectros obtenidos con los espectros patrones o templates.

En la Tabla 3.1 se presentan las coordenadas ecuatoriales de los cúmulos seleccionados para este estudio, incluyendo la denominación principal de los mismos. Además se incluyen los colores integrados (U-B) y (B-V), obtenidos recientemente por Rafelski & Zaritsky (2005, de ahora en adelante RZ) para algunos cúmulos de la presente muestra.

Usando los filtros UBVI, estos autores realizaron un “survey” o relevamiento de cúmulos estelares pertenecientes a las dos Nubes de Magallanes.

Tabla 3.1: Coordenadas e índices de color de los cúmulos de la Nube Menor de Magallanes.

N°	Cúmulo	α_{2000} (h:m:s)	δ_{2000} (°:':")	(U-B)	(B-V)
1	NGC 242	00:43:38	-73 :26:38	-	-
2	NGC 256	00:45:54	-73:30:24	-0.08	0.25
3	NGC 265	00:47:12	-73:28:38	-0.02	0.35
4	Bruck 50	00:49:03	-73:22:00	-	-
5	K 34	00:55:33	-72:49:58	0.09	0.36
6	IC 1611	00:59:48	-72:20:02	-0.12	0.30
7	IC 1626	01:06:14	-73:17 :51	0.15	0.19
8	IC 1641	01:09:40	-71:46:03	0.31	0.13
9	L 95	01:15:00	-71:20:00	-	-
10	Bruck 164	01:29:30	-73:32:00	-	-
11	HW 85	01:42:00	-71:17:00	-	-
12	WG 1	01:42:53	-73: 20:00	-	-
13	NGC 796	01:54:45	-74:13:00	--	-

En la Fig. 3.1 se muestra la ubicación de los 13 cúmulos observados con respecto a la barra de la Nube Menor de Magallanes (línea sólida), cuyo centro óptico está indicado con una cruz, y sus coordenadas ecuatoriales son: $(\alpha; \delta)_{J2000} = 00^h49^m27^s; -73^\circ09'30''$. Puede apreciarse que aproximadamente la mitad de los objetos estudiados se encuentran distribuidos prácticamente sobre la misma barra, en tanto que los restantes se hallan alejados unos cuantos grados de la misma.

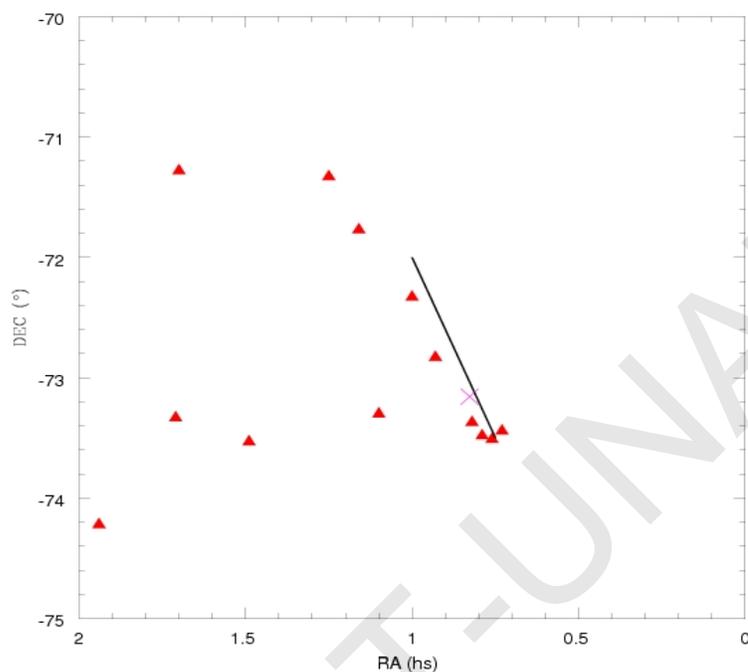


Fig. 3.1: Ubicación de los 13 cúmulos observados (triángulos) con relación a la barra (línea sólida) y al centro óptico (cruz) de la Nube Menor de Magallanes.

Los espectros integrados de los cúmulos observados obtenidos finalmente se presentan en la Figura 3.2. Todos estos espectros han sido calibrados en unidades de flujo, normalizados a la unidad en $\lambda \approx 5800 \text{ \AA}$ y desplazados por constantes arbitrarias para facilitar su visualización.

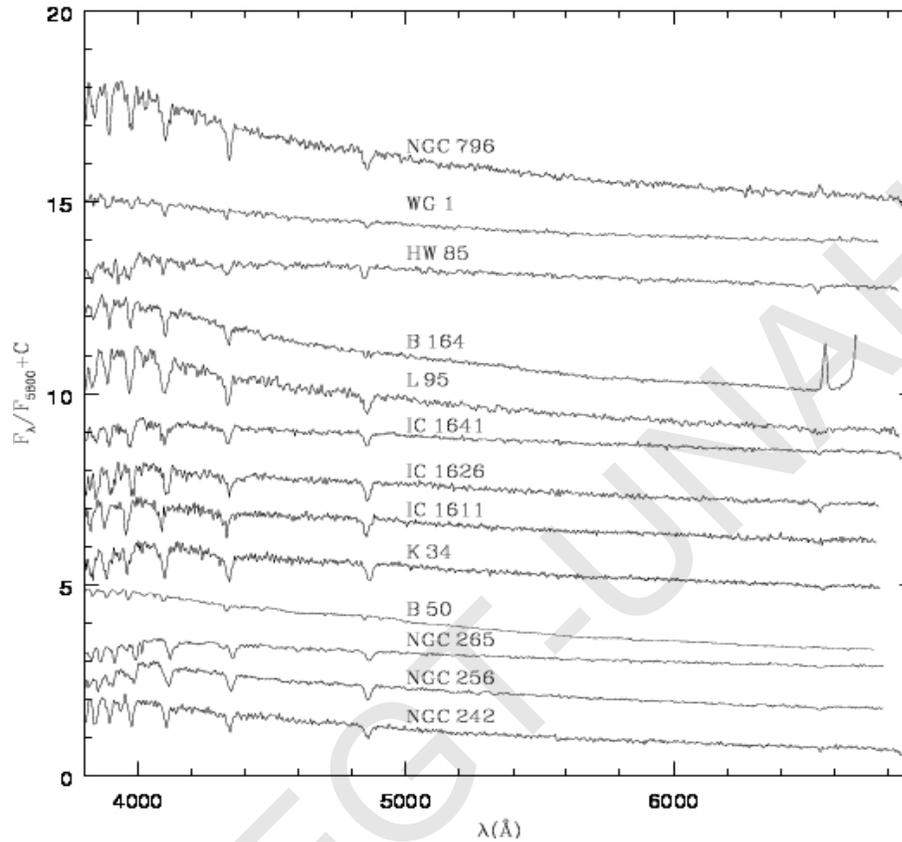


Fig. 3.2: Espectros integrados observados de los 13 cúmulos estelares de la Nube Menor de Magallanes. Los espectros están calibrados en unidades relativas de flujo, han sido normalizados a la unidad en $\lambda \approx 5800 \text{ \AA}$ y desplazados por constantes arbitrarias.

3.2 Análisis y discusión de los resultados obtenidos

Para cada uno de los cúmulos presentamos sus correspondientes cartas de identificación, estas tienen un tamaño de $(10' \times 10')$ y corresponden a la imagen obtenida con el filtro azul extraídas de la base del “*Digitized Sky Survey*” (*DSS*), realizado por el “Space Telescope Science Institute” (STSI), además se muestran los gráficos obtenidos para cada uno de los cúmulos, el espectro patrón seleccionado y la corrección por

enrojecimiento correspondiente. Un resumen de los presentes resultados ya han sido publicados en el Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía (Talavera, M.L et al. 2006, 2007).

3.2.1 NGC 242

De acuerdo al trabajo de Oliveira et al. (2000), NGC 242 podría encontrarse interactuando dinámicamente con el cúmulo NGC 241, el cual puede observarse al este (izquierda y arriba) de NGC 242 (Fig. 3.3). En la Fig. 3.4 se presenta el espectro observado de NGC 242 (abajo), el espectro corregido por un exceso de color: $E(B-V) = 0.06$ (medio) y el *template* YDE.LMC de la base de SBCPGD que mejor ajusta la distribución espectral observada en el mencionado cúmulo estelar. Este *template* es representativo de poblaciones estelares pertenecientes a la Nube Menor de Magallanes con edades comprendidas entre $(35-65) \times 10^6$ años. Una comparación alternativa se realizó con el *template* YC.SMC $(10-20) \times 10^6$ años de la misma base, luego de corregir el espectro observado por $E(B-V) = 0.10$ (Fig. 3.5). Dado que ambas comparaciones resultan aceptables, se adoptó finalmente para NGC 242 un valor intermedio tanto en edad como en enrojecimiento, esto es: 40×10^6 años y $E(B-V) = 0.08$ magnitudes. Nótese que este exceso de color representa el doble del valor obtenido a partir de los mapas de BH (1982) (Tabla 2.8).

Utilizando diagramas color–magnitud (DCM) y mediante el ajuste isócronas, Pietrzyński & Udalski (1999) obtuvieron para NGC 242 una edad de 79×10^6 años y un exceso de color: $E(B-V) = 0.10$. Por otra parte, Ahumada et al. (2002) estimaron la edad de este cúmulo en 20×10^6 años en base a espectroscopía integrada, si bien aparentemente el espectro denominado “NGC 242” en ese trabajo correspondería al espectro integrado de NGC 241 y viceversa. Recientemente, Chiosi et al. (2006) determinaron mediante el ajuste de isócronas una edad de 63×10^6 años y un exceso de color $E(V-I) = 0.08$. Si se

adopta la relación $E(V-I) = 1.242 E(B-V)$ (Dean et al. 1978), el exceso de color $E(V-I)$ implica un valor de 0.065 para $E(B-V)$. Es decir que los valores que nosotros encontramos para este cúmulo son comparables a los encontrados anteriormente por otros autores, utilizando diversas técnicas.

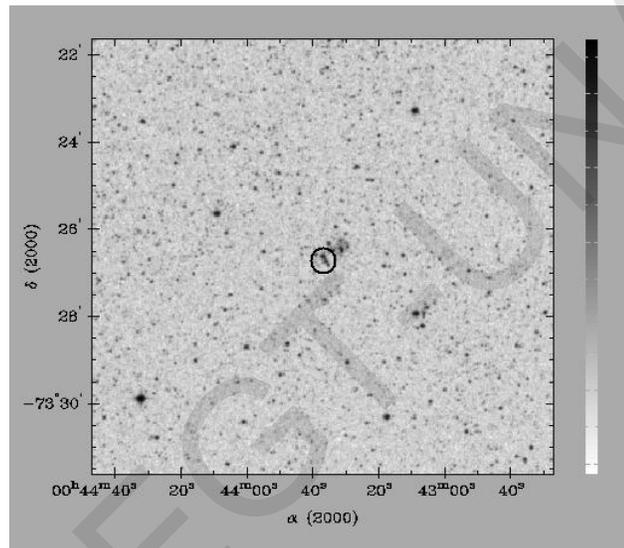


Fig. 3.3: Imagen de NGC 242.

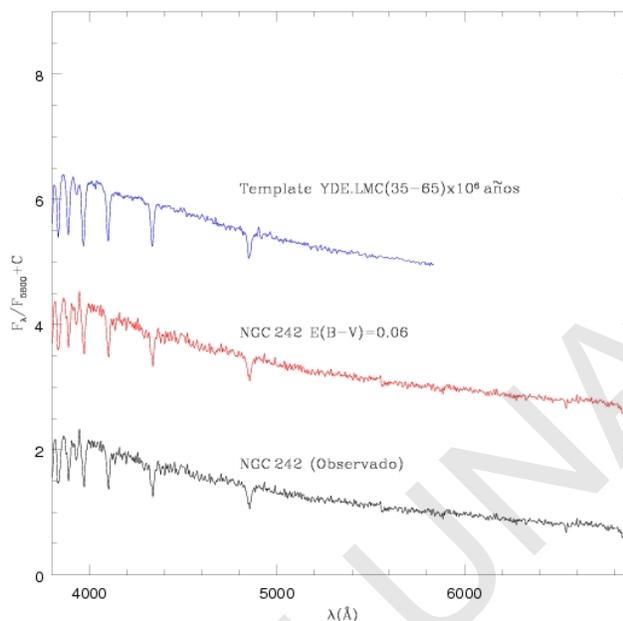


Fig. 3.4: Espectro observado de NGC 242 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.06$ (medio) y espectro template YDE.LMC que mejor ajusta el espectro observado (arriba).

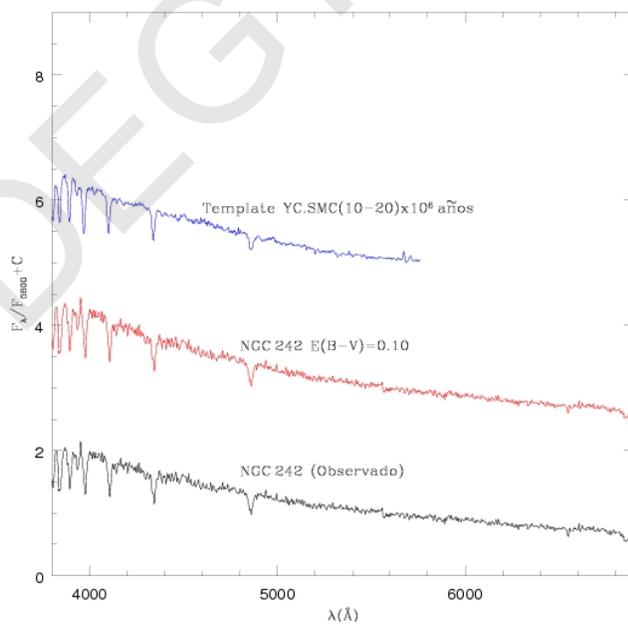


Fig. 3.5: Espectro observado de NGC 242 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.10$ (medio) y espectro template YC.SMC que mejor ajusta el espectro observado (arriba).

3.2.2 NGC 256

NGC 256 (Fig. 3.6) es un cúmulo compacto y rico en estrellas, que recientemente ha sido catalogado con el número 44 en el “*Survey*” de RZ (2005). La mejor comparación del espectro observado se logró con el espectro que resultó de promediar los *templates* Yg (200-350) $\times 10^6$ años e Yf (100-150) $\times 10^6$ años, ambos de la base de PBCSA, luego de corregir el espectro observado por un exceso de color: $E(B-V) = 0.03$ (Fig. 3.7). Nótese que este último valor es semejante al derivado a partir de los mapas de BH. El promedio de los *templates* Yg e Yf representaría una población estelar con edades cercanas a los 200×10^6 años. Teniendo en cuenta la edad inferida a partir de los anchos equivalentes de algunas líneas espectrales (Tabla 2.8), se decidió finalmente adoptar para este objeto una edad de 150×10^6 años. Este valor es compatible con los obtenidos por Pietrzyński et al. (1999) y Chiosi et al. (2006), esto es $\sim 100 \times 10^6$ años, aunque los excesos de color $E(B-V)$ determinados por estos autores están comprendidos entre 0.10 y 0.16 magnitudes. Sin embargo, de acuerdo a RZ (2005), este cúmulo tendría una edad comprendida entre 100 y 200 millones de años. Finalmente, Ahumada et al. (2002) derivaron en base a espectroscopía integrada una edad menor (50×10^6 años) y un exceso de color: $E(B-V) = 0.15$ magnitudes.

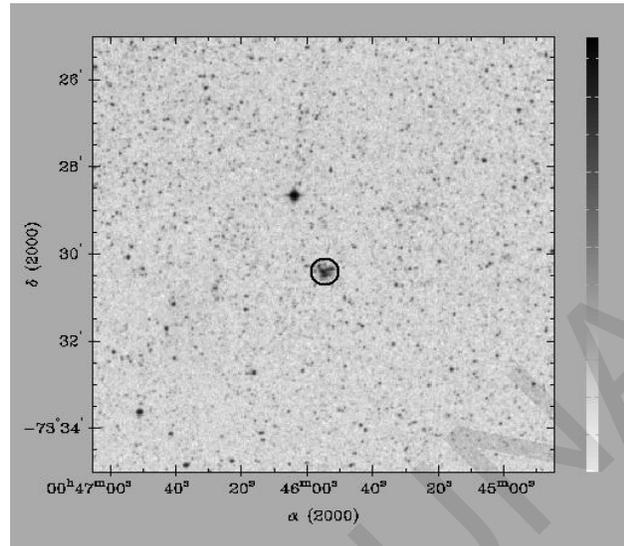


Fig. 3.6: Imagen de NGC 256.

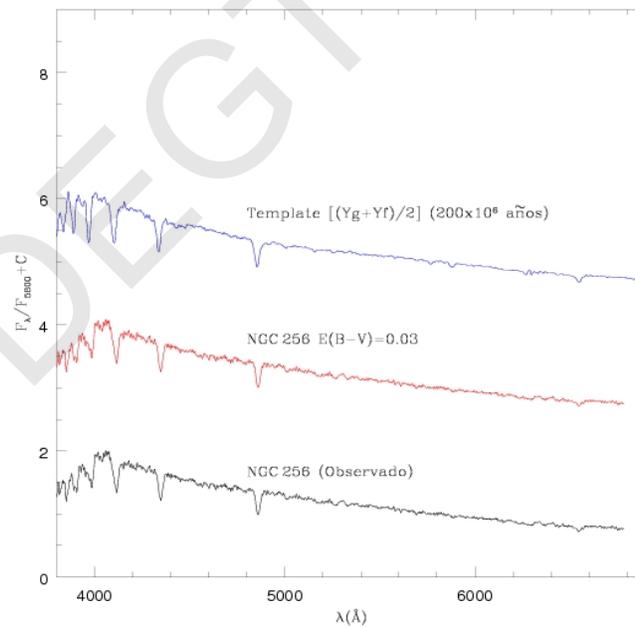


Fig. 3.7: Espectro observado de NGC 256 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.03$ (medio) y el espectro promedio de los templates de Yg e Yf de PBCSA (arriba).

3.2.3 NGC 265

Este cúmulo, cuya imagen se muestra en la Fig. 3.8, también fue catalogado por RZ (2005) con el número 50. El espectro integrado de este objeto, corregido por $E(B-V) = 0.03$, se compara razonablemente bien con el *template* YEF.LMC (50-110) $\times 10^6$ años de la base de SBCPGD (Fig. 3.9). La edad de este *template* es compatible con la que indican los anchos equivalentes de algunas líneas medidas en el espectro integrado de NGC 265 (Tabla 2.8). Los valores acá determinados (Tabla 3.2) concuerdan con los valores obtenidos por Pietrzyński et al. (1999) y Ahumada et al. (2002). Recientemente RZ (2005), Chiosi et al. (2006) y Chiosi & Vallenari (2007) resolvieron que NGC 265 es algo más viejo de lo que acá se presenta, con una edad comprendida entre los 200×10^6 y los 400×10^6 años.

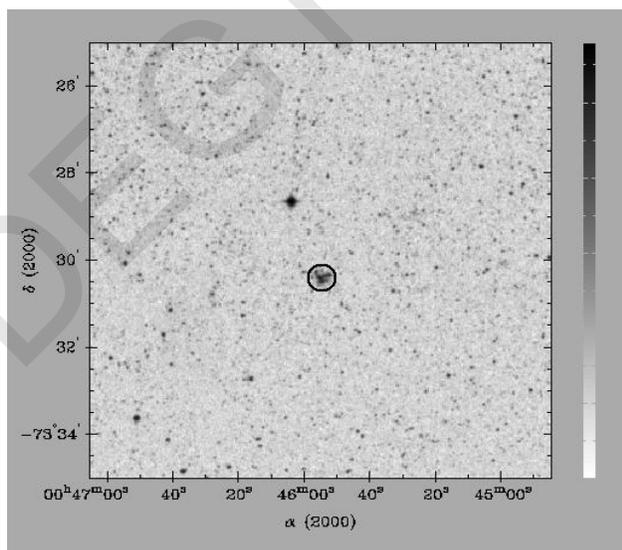


Fig. 3.8: Imagen de NGC 265.

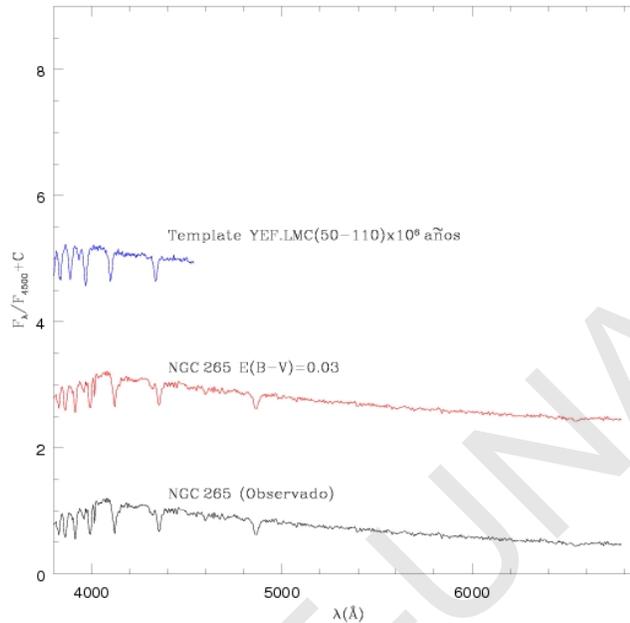


Fig. 3.9: Espectro observado de NGC 265 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.03$ (medio) y el espectro template YEF.LMC que mejor ajusta el espectro observado (arriba).

3.2.4 Bruck 50

La imagen en el azul de Bruck 50 se muestra en la Fig. 3.10. Este objeto de la Nube Menor de Magallanes se denomina de esta manera en virtud de que fue precisamente Bruck (1976) quien catalogó por vez primera este objeto como un cúmulo estelar de la mencionada galaxia vecina. De acuerdo a de Oliveira et al. (2000), Bruck 50 parecería formar parte de un sistema triple junto con BS 41 y L 39. Una estrella masiva, catalogada como SMC 12412, se encuentra aparentemente dentro de la región del cúmulo (Massey 2002). En la zona del cúmulo en cuestión también se encuentra la estrella catalogada como HD 4812 (tipo espectral B), la cual también está contribuyendo al espectro del cúmulo. El espectro integrado obtenido parecería reflejar este hecho, ya que el mismo presenta las características típicas de una estrella de tipo espectral OB. La edad

obtenida a partir del ajuste del espectro observado con el *template* YA_SG.LMC de la base de SBCPGD es de unos 4×10^6 años, valor similar al obtenido mediante el método de los anchos equivalentes (Tabla 2.8). Chiosi et al. (2006) determinaron una edad ligeramente mayor (10×10^6 años) y un exceso de color $E(V-I) = 0.08$, equivalente a $E(B-V) = 0.06$, en tanto que de Oliveira et al. (2000) obtuvieron una edad inferior a los 30×10^6 años y un exceso de color $E(B-V) = 0.10$, en buen acuerdo con los datos del presente trabajo.

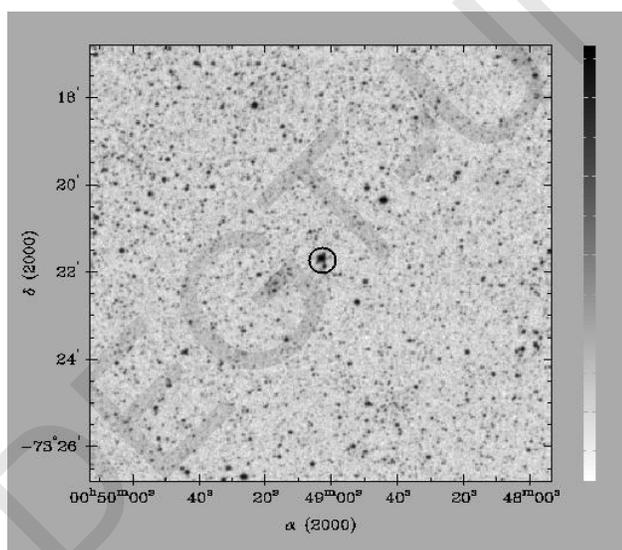


Fig. 3.10: Imagen de Bruck 50.

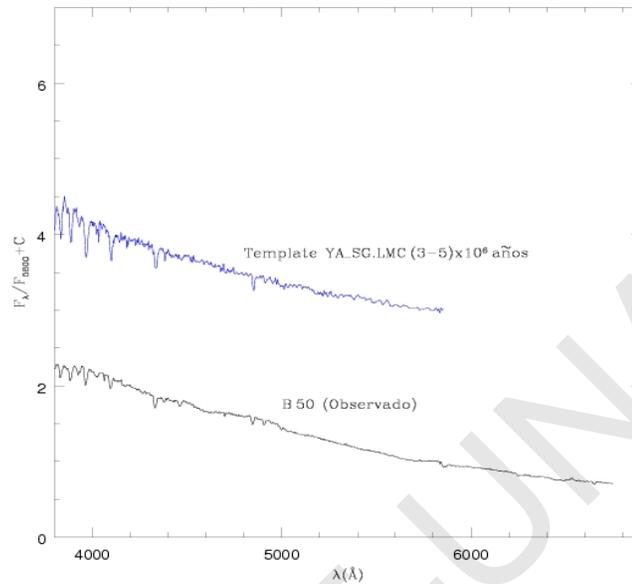


Fig. 3.11: Espectro observado de Bruck 50 (abajo) y el espectro template YA_SG.LMC que mejor ajusta la distribución espectral observada (arriba).

3.2.5 Kron 34

Este objeto débil se encuentra catalogado con el número 96 en el *Survey* de RZ (2005) y se presenta en la Fig. 3.12. Varios autores tales como Pietrzyński et al. (1999), RZ (2005) y Chiosi et al. (2006), encontraron para este cúmulo una edad típica del orden de los 400×10^6 años y un exceso de color E (B-V) del orden de 0.13 magnitudes.

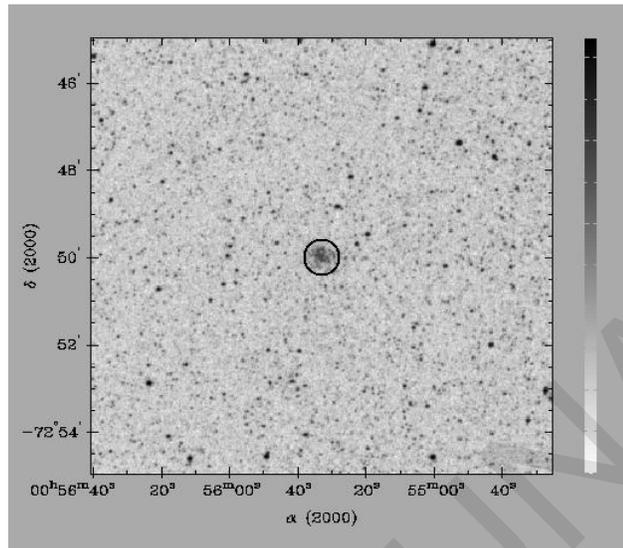


Fig. 3.12: Imagen de Kron 34.

Tal como puede apreciarse en la Fig. 3.13, una buena comparación del espectro observado se logra con el *template* Yf de PBCSA, si se corrige al primero por un exceso de color E (B-V) de 0.08 magnitudes. Dado que las líneas espectrales son algo más profundas en Kron 34 que en el *template*, se decidió adoptar para este objeto una edad algo mayor que la edad del *template* (200×10^6 años).

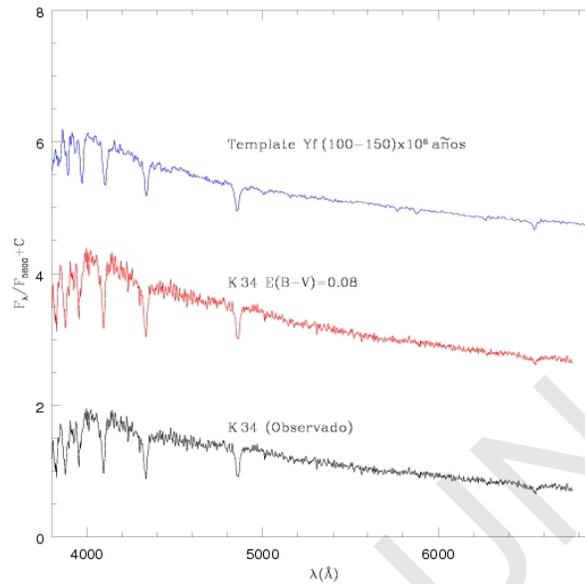


Fig. 3.13: Espectro observado de Kron 34 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.08$ (medio) y el espectro template Yf que mejor ajusta el espectro observado (arriba).

3.2.6 IC 1611

El cúmulo estelar IC 1611 (Fig. 3.14) ha sido catalogado con el número 115 en el *Survey* de RZ (2005). De acuerdo a de Oliveira et al. (2000), IC 1611 parece formar un sistema de cuatro componentes juntamente con H 86, IC 1612 y Kron 42.

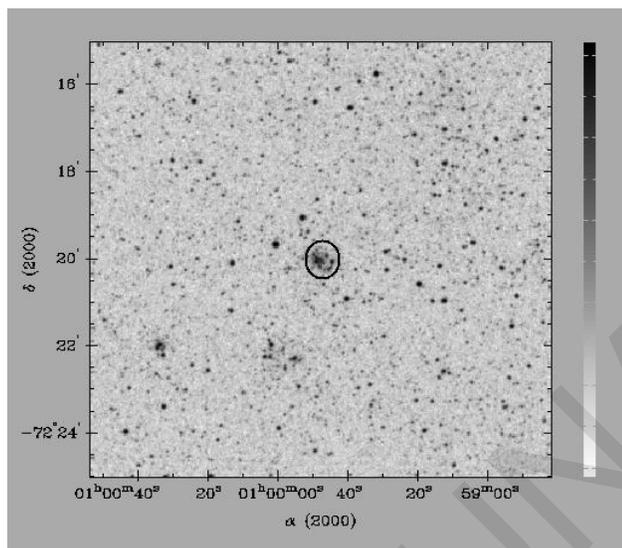


Fig. 3.14: Imagen de IC 1611.

En este trabajo el mejor ajuste para el espectro de este objeto se obtuvo con el *template* Yf de $(100-150) \times 10^6$ años de la base de PSCBA, previa corrección por un exceso de color $E(B-V) = 0.10$ (Fig. 3.15), ambos valores semejantes a los encontrados por Pietrzyński et al. (1999). Los AEs de las líneas de Balmer indican una edad que oscila entre los $(50-100) \times 10^6$ años (Tabla 2.8.), pero debido a que el presente espectro tiene las líneas ligeramente más profundas que las del *template* elegido, se adoptó entonces una edad de 130×10^6 años. Esta edad muestra buen acuerdo con los valores comprendidos entre $(100-158) \times 10^6$ años obtenidos por otros autores tales como, RZ (2005), Chiosi et al. (2006) y de Oliveira et al. (2000).

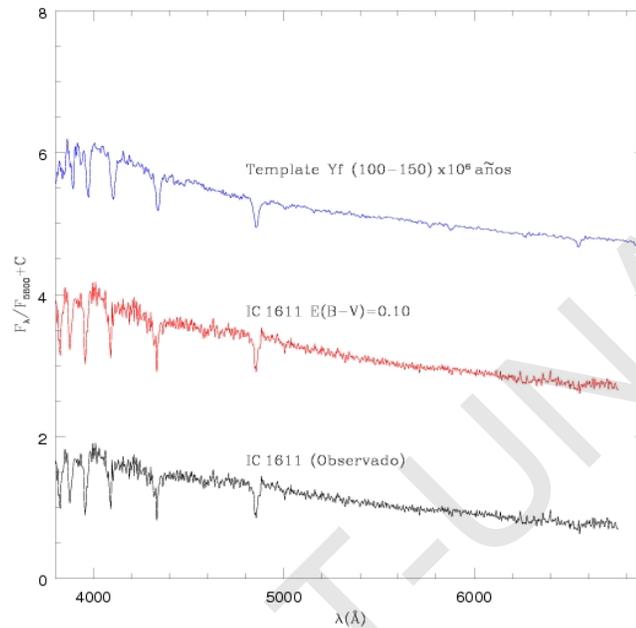


Fig. 3.15: Espectro observado de IC 1611 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.10$ (medio) y el espectro template Yf que mejor ajusta el espectro observado (arriba).

3.2.7 IC1626

Este débil cúmulo estelar (Fig. 3.16) figura bajo el número 156 en el *survey* de RZ (2005). De acuerdo al modelo y al valor de metalicidad fijada para este cúmulo, estos autores obtuvieron una edad comprendida entre los $(25-400) \times 10^6$ años.

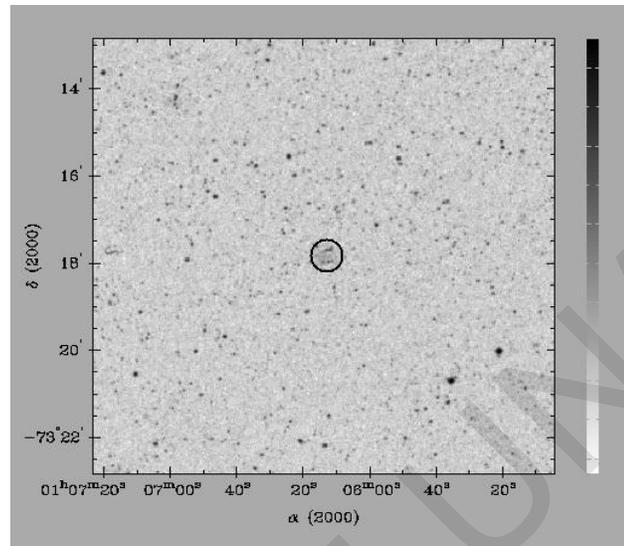


Fig. 3.16: Imagen de IC 1626.

Luego de numerosas comparaciones realizadas entre el espectro de este cúmulo y una variedad de *templates*, se encontró finalmente que el *template* Yg de la base de PBCSA es el que mejor ajusta el espectro observado, previa corrección por un exceso de color $E(B-V) = 0.11$ magnitudes (Fig. 5.17). Los AEs de las líneas de Balmer (Tabla 2.8) indican una edad del orden de los 300×10^6 años, por lo que la edad que finalmente se adoptó para este cúmulo es cercana a los 250×10^6 años (Tabla 3.2).

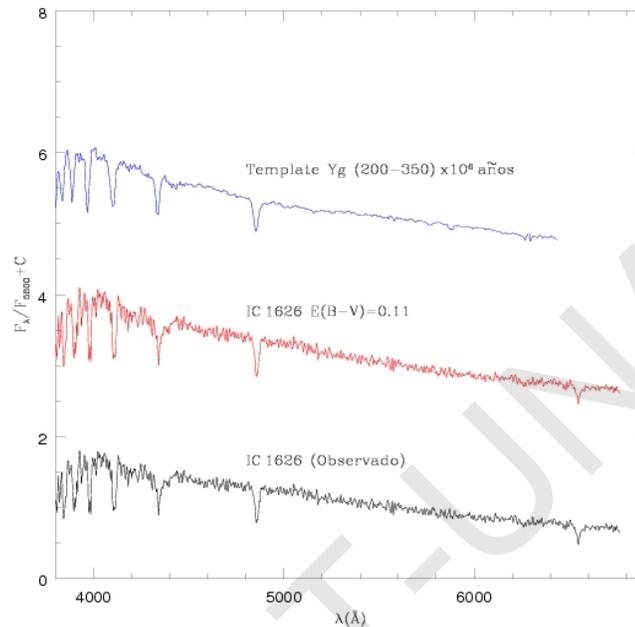


Fig. 3.17: Espectro observado de IC 1626 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.11$ (medio) y el espectro template Yg que mejor ajusta el espectro observado (arriba).

3.2.8 IC 1641

En la Fig. 3.18 se presenta una imagen donde el cúmulo IC 1641 es apenas visible. Este objeto tiene el número 179 en el trabajo de RZ (2005), quienes le asignaron una edad comprendida entre los $(5-300) \times 10^6$ años. En base a espectroscopía integrada, Piatti et al. (2005) determinaron una edad de 300×10^6 años, luego de corregir su espectro integrado por un exceso de color: $E(B-V) = 0.03$, obtenido a partir del trabajo de BH (1982).

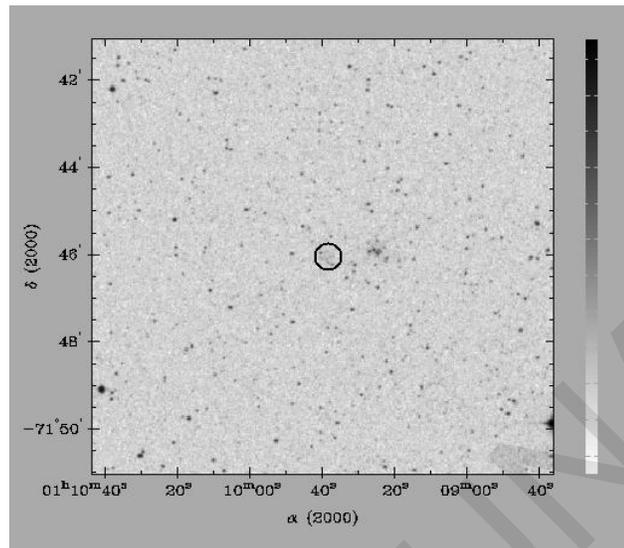


Fig. 3.18: Imagen de IC 1641.

No obstante la regular calidad del espectro del cúmulo, el mismo, luego de ser corregido por $E(B-V) = 0.04$, se comparó con un espectro que surgió de promediar los *templates* Yg ($200-350 \times 10^6$ años) e Yf (500×10^6 años) de la base de PBCSA. Por otro lado, los AEs de las ventanas seleccionadas indican una edad promedio de 400×10^6 años. En la Fig. 3.19 se muestra el espectro del cúmulo observado, el corregido por enrojecimiento y el espectro promedio construido, que mejor ajusta este espectro. Cabe acotar que IC 1641 parece formar un par juntamente con NGC 422 (de Oliveira et al. 2000).

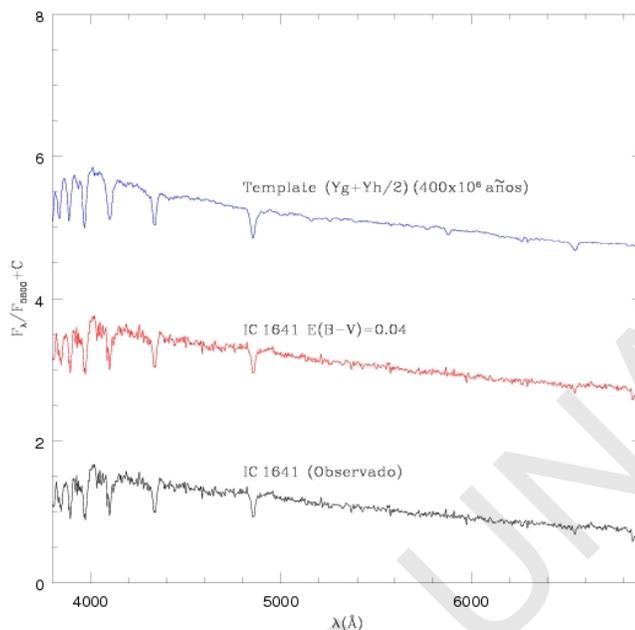


Fig. 3.19: Espectro observado de IC 1641 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.04$ (medio) y el espectro template promediado que mejor ajusta el espectro observado (arriba).

3.2.9 Lindsay 95

Este débil cúmulo de la Nube Menor de Magallanes (Fig. 3.20) no presenta estudios previos publicados, su nombre es debido a que fue primeramente catalogado por Lindsay (1958). Para este cúmulo los AEs de las líneas de Balmer nos indican una edad comprendida entre los 50×10^6 y los 100×10^6 años, en tanto que luego de corregir el espectro observado por $E(B-V) = 0.12$, el mismo se compara razonablemente con el *template* Yd de 40×10^6 años de PBCSA (Fig. 3.21). Teniendo en cuenta la edad inferida por ambos métodos, se decidió adoptar finalmente para este objeto una edad de 50×10^6 años (Tabla 3.2).

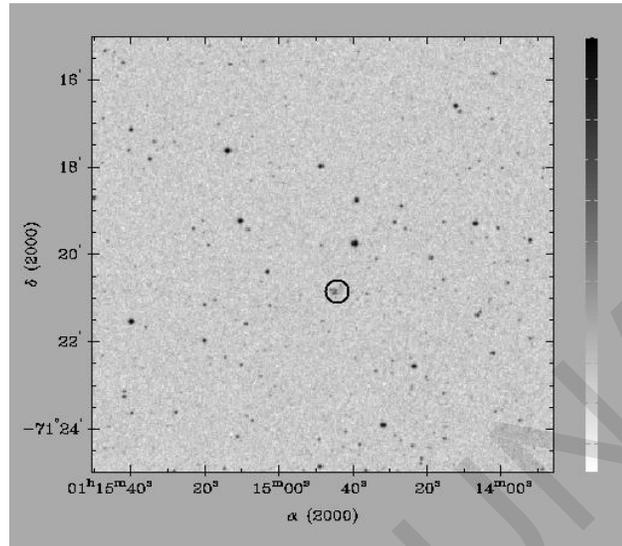


Fig. 3.20: Imagen de Lindsay 95.

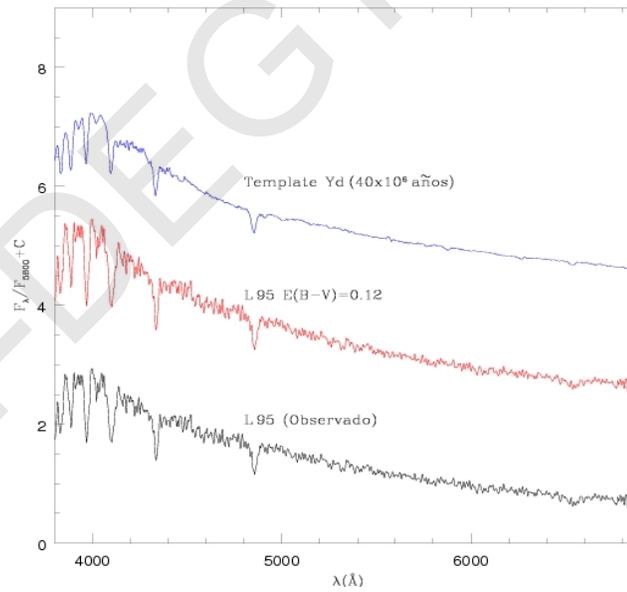


Fig. 3.21: Espectro observado de Lindsay 95 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.12$ (medio) y el espectro template Yd (arriba).

3.2.10 Bruck 164

Este objeto, cuya imagen azul puede verse en la Fig. 3.22, fue originalmente catalogado por Bruck (1976), de allí su denominación. El mismo, que se encuentra al norte de NGC 602, hasta el momento de finalizar este estudio no se encontró registro de estudios previos, de manera que los parámetros acá derivados constituyen los primeros en su especie. El espectro integrado de Bruck 164 muestra la línea H_α en emisión, en tanto que la línea H_β se hace apenas visible en el espectro que acá se presenta (Fig. 3.23). Los AEs correspondientes a las líneas H_δ y H_γ indican una edad próxima a los 10×10^6 años (Tabla 3.2), en tanto que las dos primeras líneas de la serie de Balmer sugieren una edad aún menor. La mejor comparación del espectro observado se logró con el *template* denominado YACIR.LMC, sin corregir al espectro observado por enrojecimiento. Dicho *template* se construyó en base al espectro YA.LMC (4.5×10^6 años) de la base de SBCPGD y al espectro YC.LMC ($(12-35) \times 10^6$ años) de la base espectral que realizaron en el infrarrojo cercano Bica, Santos & Alloin (1990). Es decir que Bruck 164 sería un cúmulo estelar joven, de aproximadamente 10×10^6 años, y no estaría afectado por enrojecimiento. La mencionada comparación puede observarse en la Fig. 3.23.

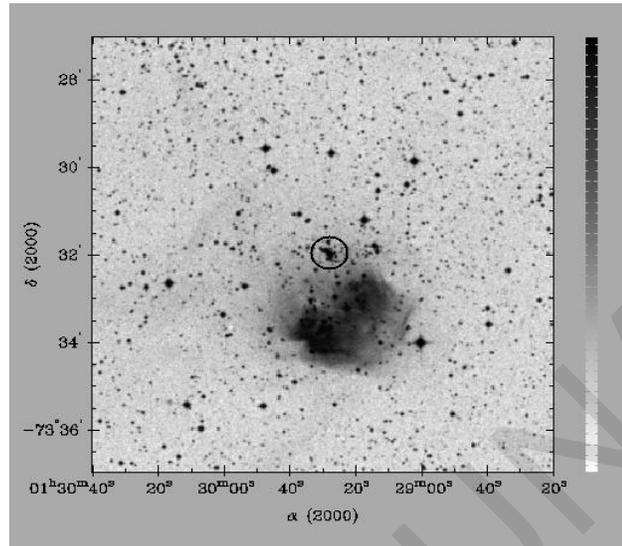


Fig. 3.22: Imagen de Bruck 164.

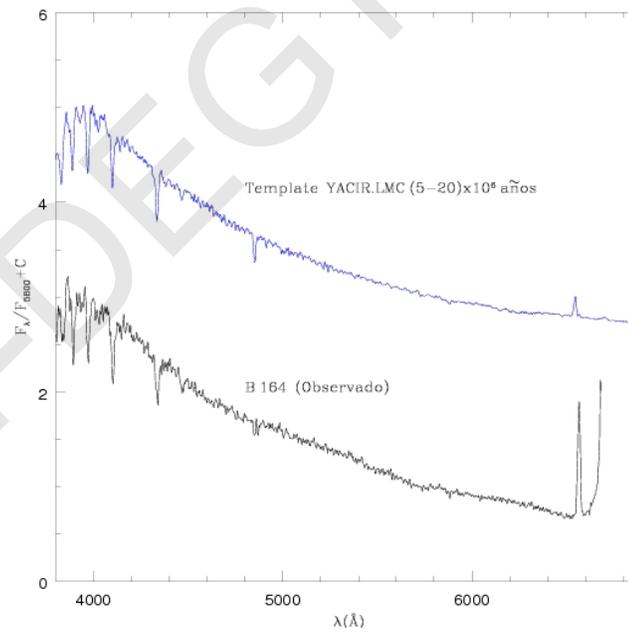


Fig. 3.23: Espectro observado de Bruck 164 (abajo) y el espectro template YACIR.LMC que mejor ajusta al espectro observado (arriba).

3.2.11 HW 85

HW 85 fue catalogado por Hodge & Wright (1974) y, al igual que Bruck 164, no presenta estudios previos publicados. Pese a la baja calidad con que se obtuvo este espectro, el mismo se compara satisfactoriamente con el *template* YC_SG.LMC, de $(10-20) \times 10^6$ años de la base de SBCPGD, si se lo corrige previamente por un exceso de color cercano a cero ($E(B-V) = 0.01$). Los AEs de las tres primeras líneas Balmer indican una edad comprendida entre los $(10-50) \times 10^6$ años, por lo que la edad adoptada para este cúmulo es de 20×10^6 años. La Fig. 3.25 muestra el espectro observado del cúmulo, el espectro corregido por enrojecimiento y el mencionado *template* que mejor ajusta la distribución espectral observada.

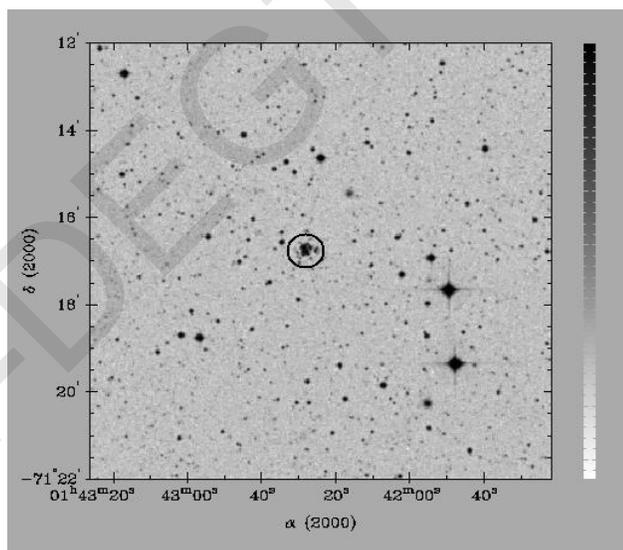


Fig. 3.24: Imagen de HW 85.

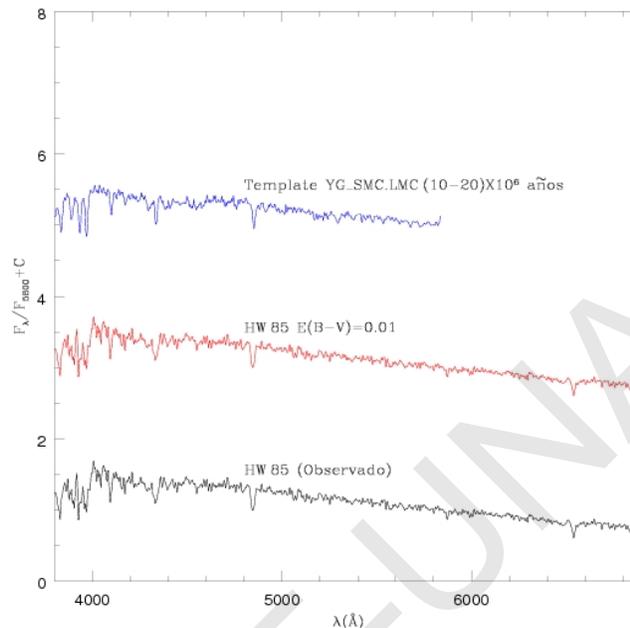


Fig. 3.25: Espectro observado de HW 85 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.01$ (medio) y el espectro template YG_SG.LMC que mejor ajusta al espectro observado (arriba).

3.2.12 WG 1

WG 1 (Figura 3.26) debe su nombre a que fue originalmente catalogado por Westerlund & Glaspey (1971). Si bien la calidad que presenta el espectro no es la óptima, los parámetros que se presentan en este trabajo corresponden a los primeros valores de edad y de enrojecimiento publicados de este débil agregado. En la Figura 3.27 se muestra el espectro observado (abajo), el espectro corregido por un exceso de color $E(B-V) = 0.12$ (medio) y el *template* YA_SG.LMC de la base de SBCPGD. Este *template*, cuya cobertura espectral es menor que con la que se obtuvo el espectro de WG 1, es representativo de poblaciones estelares muy jóvenes con edades comprendidas entre los $(3-5) \times 10^6$ años y es el resultado de la combinación del espectro de una estrella supergigante O8 enrojecida por $E(B-V) = 0.50$ con el *template* YA.LMC de la

mencionada base. Nótese que la comparación entre el espectro del cúmulo y el del template es bastante razonable. El espectro integrado de WG 1 sugiere entonces que se trata de un objeto con una edad por debajo de los 10×10^6 años (Tabla 3.2) y que se encuentra afectado por un enrojecimiento: $E(B-V) = 0.12$ magnitudes, tal como puede apreciarse en la Figura 3.27.

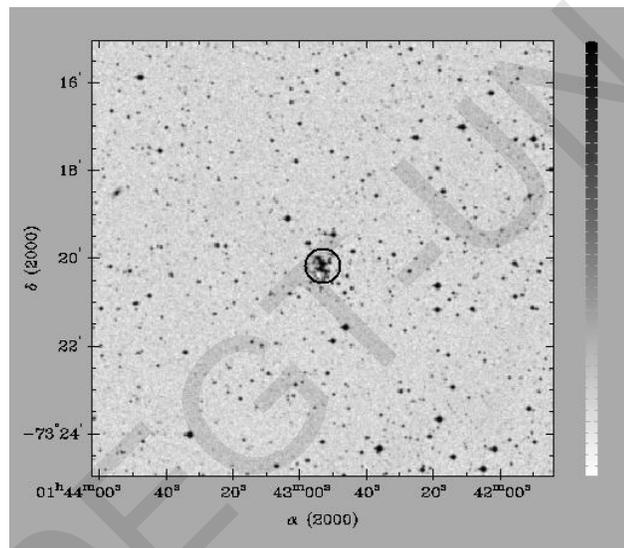


Fig. 3.26: Imagen de WG 1.

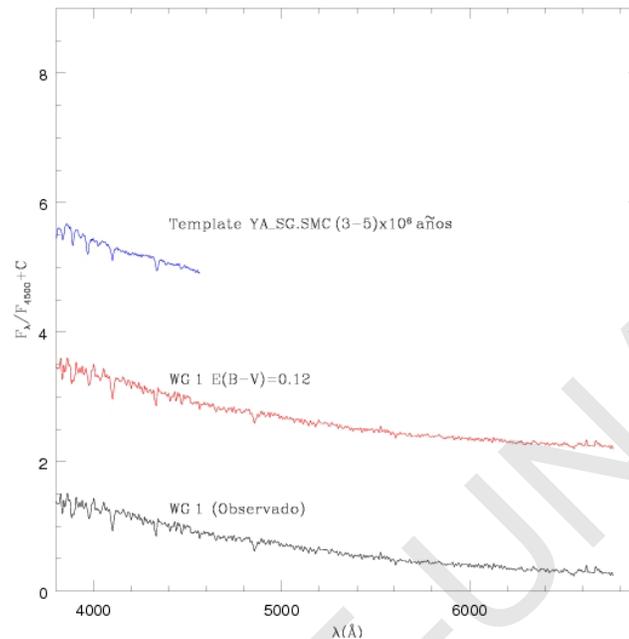


Fig. 3.27: Espectro observado de WG 1 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.12$ (medio) y el espectro template YA_SG.LMC que mejor ajusta (arriba).

3.2.13 NGC 796

No obstante el brillo de NGC 796 (Fig. 3.28), el espectro integrado resultó de regular calidad. En la Fig. 3.29 se presenta la comparación del espectro de este cúmulo con el *template* Yc de PBCSA, luego de corregirlo por un exceso de color $E(B-V) = 0.06$. La edad de este *template* es de 20×10^6 años, valor semejante al encontrado para este objeto por Ahumada et al. (2002) y Santos et al. (1995).

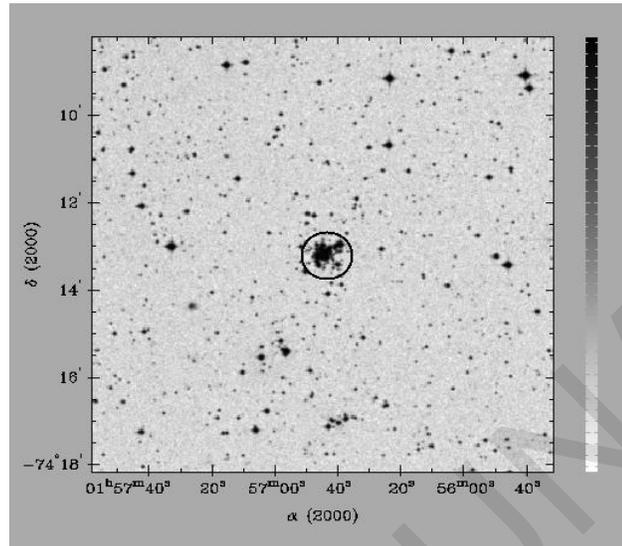


Fig. 3.28: Imagen de NGC 796.

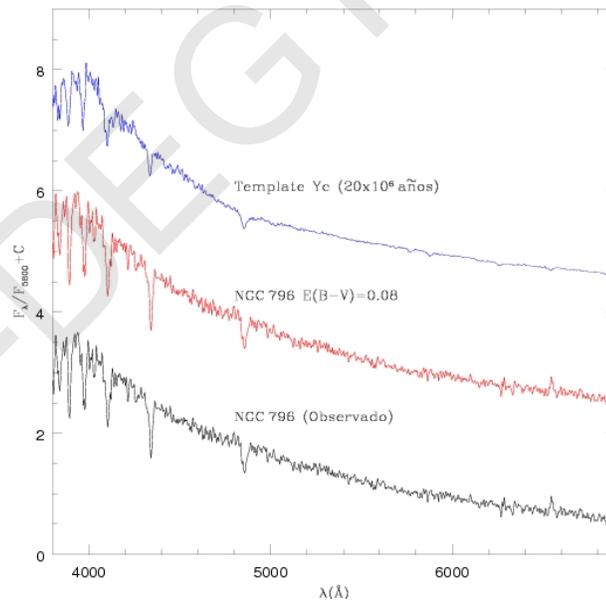


Fig. 3.29: Espectro observado de NGC 796 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.06$ (medio) y el espectro template Yc que mejor ajusta (arriba).

3.3 Parámetros obtenidos

Para los 13 cúmulos estudiados de la Nube Menor de Magallanes se determinaron edades y enrojecimientos, los cuales se muestran en la Tabla 3.2. Dichos valores han sido graficados en la Fig. 3.30, en la que se puede apreciar que no hay ninguna relación notable entre estas dos variables, ya que se encuentra que los valores obtenidos se distribuyen homogéneamente por el plano “edad vs. E(B-V)”. Cabe mencionar que a pesar que los valores de excesos de color E(B-V) determinados para estos cúmulos a partir del ajuste de los *templates* (0.01-0.12), son mayores que los valores encontrados a través de los mapas de enrojecimiento de BH (1982) (Tabla 2.6, 0.03-0.06), los mismos son comparables entre sí.

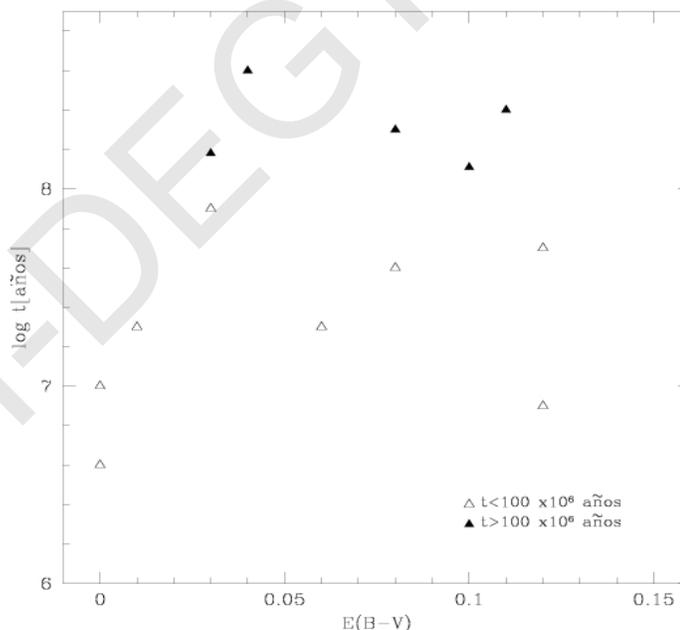


Fig. 3.30: Edad y enrojecimiento para los 13 cúmulos de la Nube Menor de Magallanes.

En la Fig. 3.31 se muestra la distribución de edades de los 13 cúmulos presentados en este trabajo, junto a los presentados previamente, utilizando la misma técnica, por Piatti et al. (2005) y Ahumada et al. (2002), en función de los índices colores (U-B) y (B-V). En esta figura se advierte que los cúmulos más viejos, tienden a ser mas rojos que lo cúmulos jóvenes. Además se puede observar que la generación de cúmulos ha sido prácticamente ininterrumpida en la Nube Menor, a diferencia de lo que sucedió en la Nube Mayor de Magallanes.

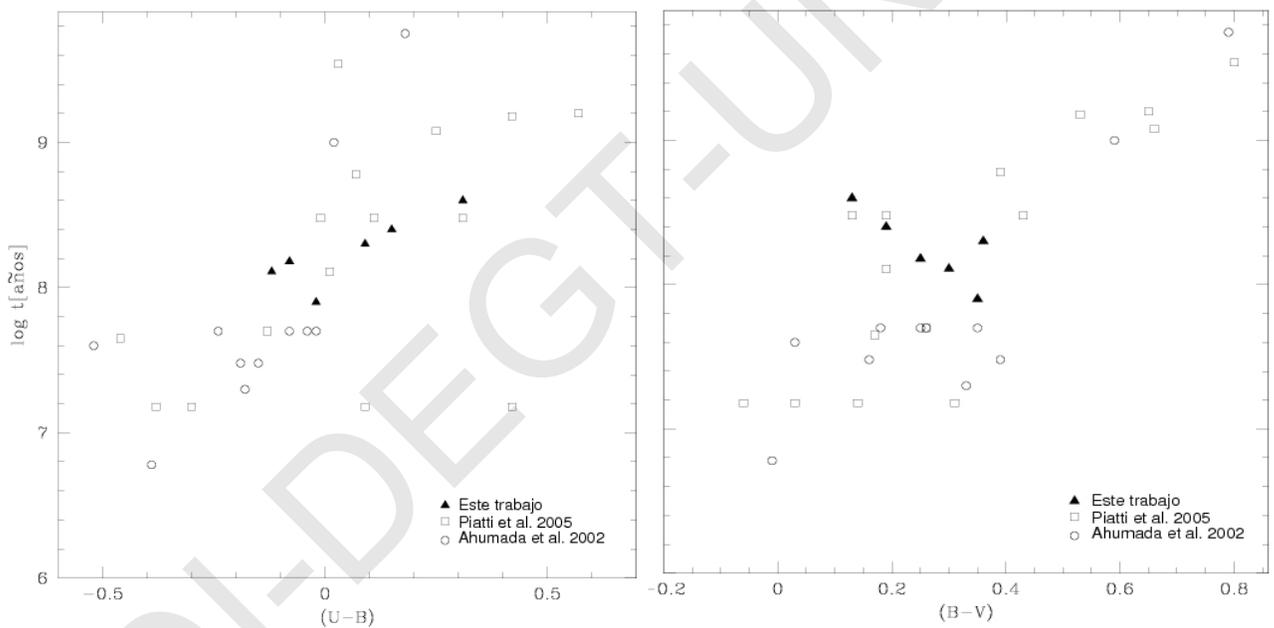


Fig. 3.31. Distribución de la edad de los cúmulos con sus colores integrados.

Se presenta también la distribución espacial proyectada de los cúmulos estelares pertenecientes a la Nube Menor de Magallanes estudiados en el presente trabajo, como sí también los cúmulos previamente estudiados por Piatti et al. (2005) y Ahumada et al. (2002) (Fig. 3.32). Las coordenadas ecuatoriales: ascensión recta y declinación, son relativas al centro óptico de la Nube Menor de Magallanes: $00^{\text{h}}49^{\text{m}}27^{\text{s}}$, $-73^{\circ}09'30''$ (J_{2000}). Finalmente en la Fig. 3.33 se presentan los mismos cúmulos estelares, pero ahora discriminándolos por edades. Se puede apreciar que la distribución de cúmulos de diferentes edades en la Nube Menor de Magallanes es aparentemente homogénea.

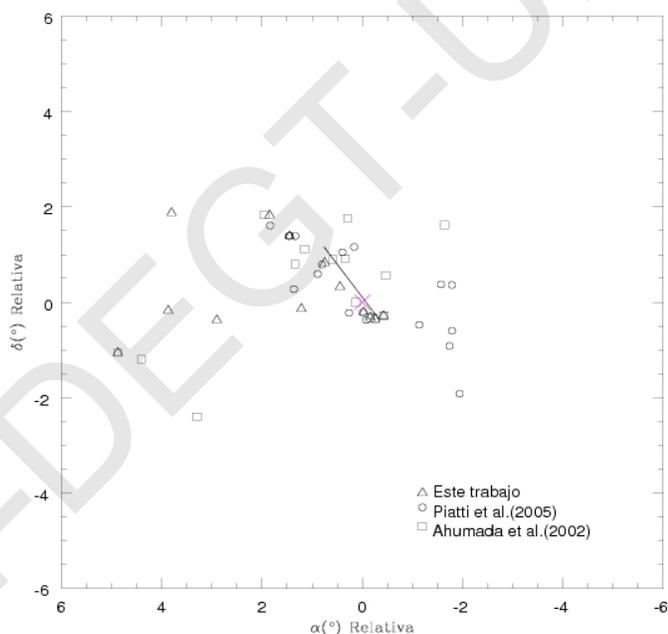


Fig. 3.32: Distribución espacial de los cúmulos analizados en este trabajo, los de Piatti et al. (2005) y Ahumada et al. (2002).

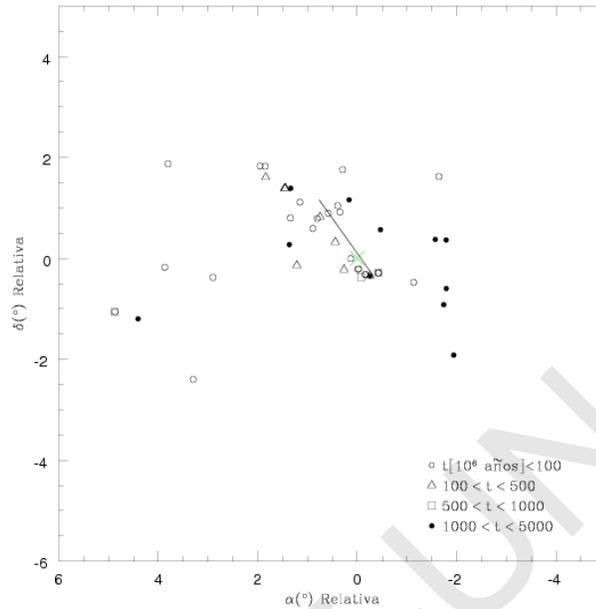


Fig. 3.33: Los cúmulos graficados anteriormente, discriminándolos por edades.

Tabla 3.2: Parámetros determinados de los cúmulos estelares de la presente muestra.

Objeto	E(B-V) Template	Edad Balmer (x10 ⁶ años)	Edad S _h , S _m (x10 ⁶ años)	Edad template (x10 ⁶ años)	Edad adoptada (x10 ⁶ años)
NGC 242	0.08 ± 0.03	50	27	10-20 35-65	40 ± 20
NGC 256	0.03 ± 0.02	50	36	200	150 ± 50
NGC 265	0.03 ± 0.02	50-100	41	50-110	80 ± 40
Bruck 50	0.00 ± 0.02	< 10	5	3-5	4 ± 2
Kron 34	0.08 ± 0.02	50	95	100-150	200 ± 100
IC 1611	0.10 ± 0.02	50-100	19	100-150	130 ± 30
IC 1626	0.11 ± 0.02	300	57	200-350	250 ± 50
IC 1641	0.04 ± 0.01	500	350	400	400 ± 100
Lindsay 95	0.12 ± 0.02	50-100	57	40	50 ± 20
Bruck 164	0.00 ± 0.02	~10	07	3-6 12-35	10 ± 5
HW 85	0.01 ± 0.01	10-50	82	10-20	20 ± 10
WG 1	0.12 ± 0.02	< 10	14	3-5	< 10
NGC 796	0.06 ± 0.02	10-50	22	20	20 ± 10

3.4 Síntesis

En este capítulo hemos presentado un estudio detallado de 13 cúmulos estelares pertenecientes a la Nube Menor de Magallanes. Mediante espectros integrados se determinaron edades y enrojecimientos para la muestra, en un amplio rango de valores, con edades que oscilan entre los 4×10^6 años (Bruck 50 & WG 1) y los 350×10^6 años (IC 1641). Cuatro de los 13 cúmulos estudiados (Lindsay 95, Bruck 164, HW 85 & WG 1) no presentan estudios previos, por lo que los parámetros acá presentados son los primeros en su especie. Con todos los espectros obtenidos, para los 13 cúmulos estelares de la Nube Menor, se conformará e incrementará, sin lugar a dudas, una base de espectros patrones que represente la metalicidad típica de la Nube Menor de Magallanes.

CAPÍTULO IV

CÚMULOS ESTELARES DE LA NUBE MAYOR DE MAGALLANES

4.1 Introducción

En este Capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar la técnica de la espectroscopía integrada a 29 cúmulos estelares compactos de la Nube Mayor de Magallanes, junto con el análisis y la discusión de los resultados obtenidos para cada uno de estos cúmulos.

La primera estimación de las edades de los objetos seleccionados se llevó a cabo mediante la comparación de los anchos equivalentes, para ello se utilizaron las ventanas espectrales seleccionadas con las calibraciones establecidas por Bica & Alloin (1986) y más recientemente por Santos & Piatti (2004). Una segunda estimación, ciertamente más precisa, se realizó mediante el ajuste de los espectros obtenidos con espectros patrones seleccionados de las bases de Bica (1988), Santos et al. (1995, de ahora en adelante SBCPGD), Dutra et al. (1999), Piatti et al. (2002, de ahora en adelante PBCSA) y Ahumada, Clariá & Bica (2007). Los excesos de color $E(B-V)$ se determinaron, por un lado, a partir de los mapas de extinción interestelar obtenidos por Burstein & Heiles (1982, BH) (Tabla 2.9) y, por otro lado, variando el enrojecimiento hasta lograr el mejor ajuste entre los espectros obtenidos con los espectros patrones o templates.

En la Tabla 4.1 se presentan las coordenadas ecuatoriales de los cúmulos seleccionados para este estudio, incluyendo la denominación principal de los mismos. Además se incluyen los colores integrados (U-B) y (B-V), obtenidos recientemente por Bica et al. (1996) y el tipo SWB determinado por Searle et al. (1980).

Tabla 4.1: Coordenadas, índices de color y tipos “SWB” de los 29 cúmulos seleccionados de la Nube Mayor de Magallanes.

N°	Cúmulo	α_{2000} (h:m:s)	δ_{2000} (°:':")	(U-B)	(B-V)	SWB
1	SL 14	04:40:28	-69:39:00	-0.25	0.20	II
2	NGC 1695	04:47:44	-69:22:00	-0.12	0.34	III
3	SL 56	04:50:32	-70:04:00	-0.29	0.19	II
4	SL 58	04:50:59	-69:38:00	-0.04	0.27	III
5	SL 79	04:52:53	-71:39:00	0.03	0.29	III
6	SL 76	04:53:09	-68:12:00	0.05	0.17	III
7	NGC 1732	04:53:11	-68:39:00	-0.20	0.14	II
8	SL 116	04:56:24	-68:48:00	-0.18	0.20	II
9	SL 168	05:00:44	-65:27:00	0.03	0.24	III
10	NGC 1822	05:05:08	-66:12:00	-0.23	0.09	II
11	HS 109	05:05:37	-68:43:06	-0.26	0.11	II
12	SL 234	05:06:54	-68:43:08	-0.36	-0.03	II
13	SL 255	05:07:55	-70:03:00	-0.22	0.20	II
14	NGC 1887	05:16:05	-66:19:00	-0.17	0.19	II
15	SL 364	05:17:41	-71:03:00	-0.19	0.20	II
16	SL 360	05:18:11	-69:13:06	-0.91	-0.15	0
17	SL 386	05:19:50	-65:23:00	-0.19	0.23	II
18	NGC 1944	05:21:57	-72:29:00	0.01	0.27	III
19	SL 463	05:26:15	-66:03:00	-0.28	0.19	II
20	SL 477	05:26:23	-71:41:00	-0.35	0.07	II
21	NGC 1972	05:26:48	-69:50:17	-0.20	0.33	II
22	NGC 2000	05:27:30	-71:52:00	-0.20	0.18	II
23	NGC 1986	05:27:38	-69:58:14	-0.20	0.24	II
24	SL 551	05:32:13	-68:00:00	-0.30	0.05	II
25	SL 566	05:32:50	-70:47:00	-0.02	0.24	III
26	NGC 2053	05:37:40	-67:24:00	0.17	0.20	II
27	SL 763	05:52:53	-69:47:00	-0.25	0.10	II
28	NGC 2137	05:53:12	-69:29:00	-0.23	0.22	II
29	NGC 2140	05:54:17	-68:36:00	-0.19	0.21	II

En la Fig. 4.1 se muestra la posición de los 29 cúmulos observados con respecto a la barra de la Nube Mayor de Magallanes; el centro de la barra se encuentra en: $(\alpha; \delta)_{J2000} = (05^{\text{h}}20^{\text{m}}57^{\text{s}}; -69^{\circ}2'41'')$, según el trabajo de Piatti et al. (2003). Se puede notar que la mayoría de los cúmulos seleccionados se encuentran en los alrededores de la barra, sólo una pequeña cantidad de ellos se localizan en el cuerpo de ésta.

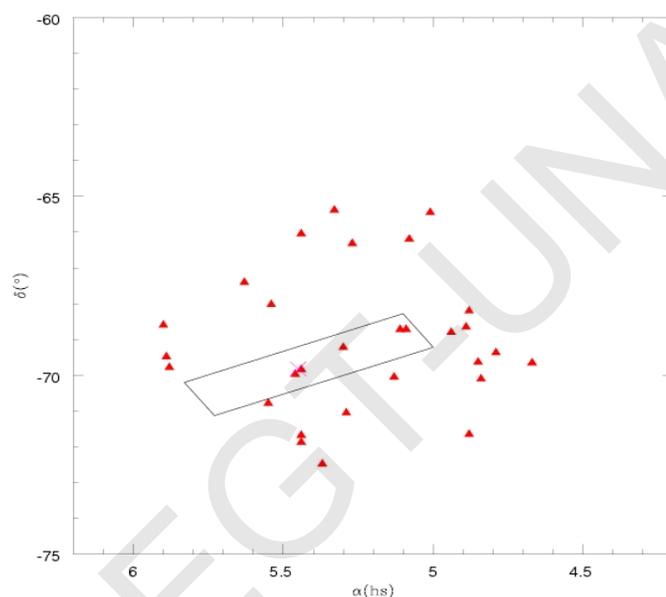


Fig. 4.1: Ubicación de los 29 cúmulos estelares de la muestra (triángulos) con respecto a la barra (paralelogramo) de la Nube Mayor de Magallanes y al centro óptico de la misma, representado con una cruz.

Por otra parte, se presentan en la Fig. 4.2 los espectros integrados de los cúmulos estelares observados. Dichos espectros fueron calibrados en unidades de flujo, normalizados a la unidad, en su mayoría a $\lambda \approx 5800 \text{ \AA}$ y desplazados por constantes arbitrarias para una mejor visualización y comparación.

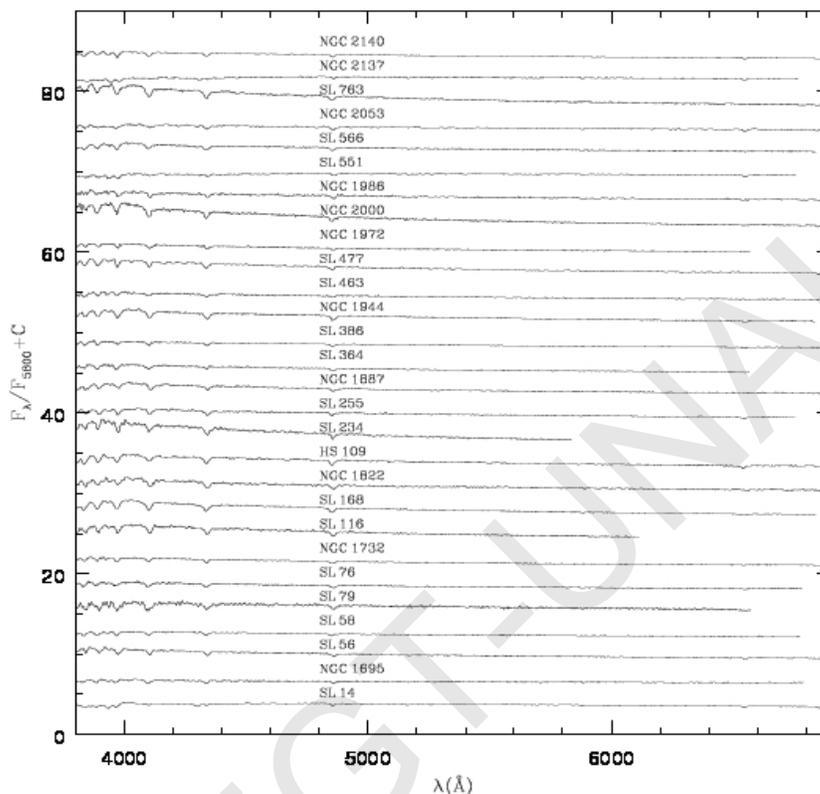


Fig. 4.2: Espectros integrados observados de los 29 cúmulos estelares de la Nube Mayor de Magallanes. Los espectros están calibrados en unidades relativas de flujo, han sido normalizados a la unidad en $\lambda \approx 5800 \text{ \AA}$ y desplazados por constantes arbitrarias.

4.2 Análisis y discusión de los resultados individuales

En esta Sección se analizan y discuten los resultados individuales obtenidos para los 29 cúmulos estelares de la Nube Mayor de Magallanes. Las cartas de identificación de cada cúmulo ($10' \times 10'$), corresponden a la imagen obtenida con el filtro azul extraídas de la base del “*Digitized Sky Survey*” (*DSS*), realizado por el “*Space Telescope Science Institute*” (*STSI*).

Un resumen de los presentes resultados ya han sido publicados en el Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía y en la Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica – Serie de Conferencias (Talavera, M.L et al. 2006, 2007).

4.2.1 SL 14

En la Fig. 4.3, se muestra la imagen del cúmulo SL 14 del cual hasta el momento, no registra ningún estudio en el que se determinen sus parámetros astrofísicos. El espectro integrado de este agregado (Fig. 4.4) muestra claramente que se trata de un cúmulo joven de la Nube Mayor de Magallanes, avalado también por la edad inferida a partir de los anchos equivalentes de las líneas de Balmer (Tabla 2.9). La mejor comparación se logró con el *template* YC_SG.LMC, representativo de poblaciones estelares con edades entre los (10-20) $\times 10^6$ años de la base de Santos et al. (1995, de ahora en más SBCPGD). Dicha comparación se logró luego de corregir el espectro observado por un enrojecimiento: $E(B-V) = 0.18$, valor éste que duplica al encontrado a partir de los mapas de BH (1982) (Tabla 2.9). Nótese que el *template* cubre un rango espectral algo menor que el del espectro observado. Se decidió adoptar una edad de 10 $\times 10^6$ años para SL 14 debido a que las líneas de Balmer del espectro observado son ligeramente menos profundas que las del *template*.

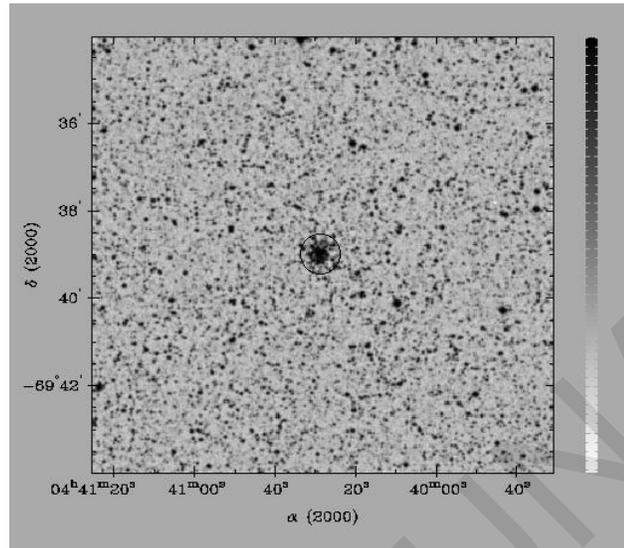


Fig. 4.3: Imagen de SL 14.

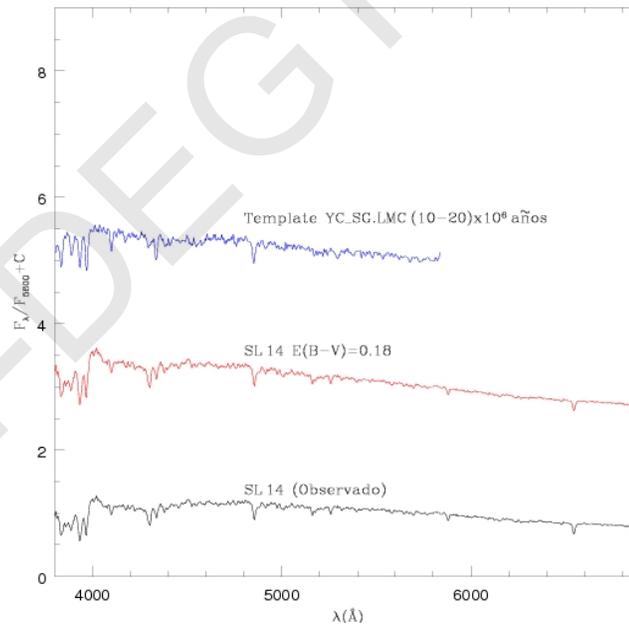


Fig. 4.4: Espectro observado de SL 14 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.18$ (medio) y el espectro template YC_SG.LMC (arriba).

4.2.2 NGC 1695

Al igual que SL 14, NGC 1695 (Fig. 4.5) no registra estudios previos y ha sido catalogado. Su espectro se compara satisfactoriamente con *el template* YEF.LMC con una edad de $(50-110) \times 10^6$ años de la base SBCPGD, luego de corregir el espectro obtenido por un enrojecimiento: $E(B-V) = 0.16$ (Fig. 2.8). Dicho valor también duplica al encontrado en los mapas de BH (1982, BH) (Tabla 2.9). La edad del *template* escogido es compatible con la que indican los anchos equivalentes de las líneas de Balmer ($\sim 50 \times 10^6$ años) y de las líneas metálicas (70×10^6 años). Dado que algunas líneas del espectro observado son un poco menos profundas que las del *template*, se decidió adoptar para NGC 1695 una edad de 70×10^6 años.

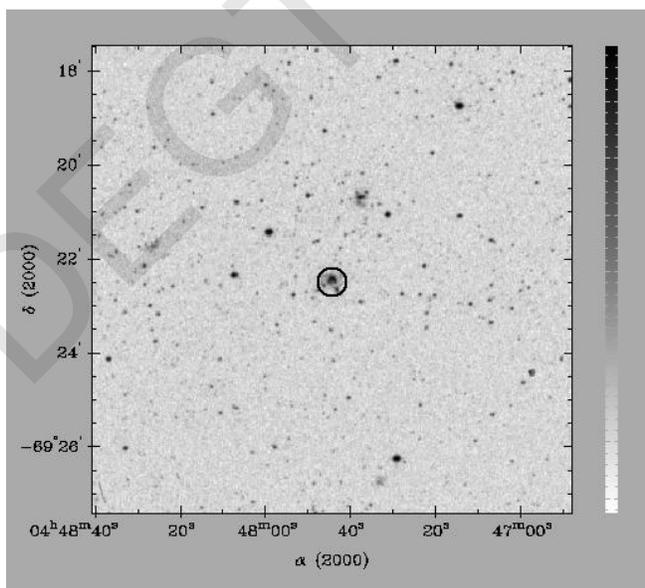


Fig. 4.5: Imagen de NGC 1695.

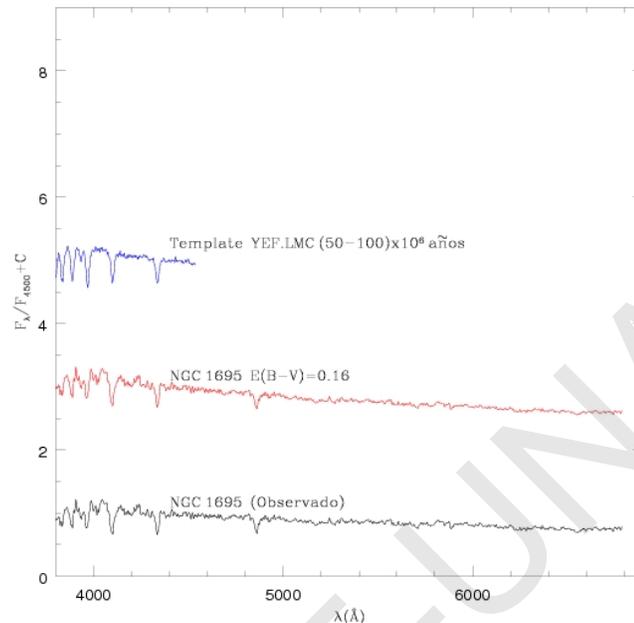


Fig. 4.6: Espectro observado de NGC 1695 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.16$ (medio) y el espectro template YEF.LMC que mejor ajusta al espectro observado (arriba).

4.2.3 SL 56

Las características que presenta el espectro integrado de SL 56, cuya imagen se muestra en la Fig. 4.7, como así también los AEs de las líneas de Balmer, indican que se trata de un cúmulo moderadamente joven de la Nube Mayor de Magallanes. El espectro de SL 56 se compara notablemente bien con el *template* YC.LMC (12-40) $\times 10^6$ años de la base de SBCPGD, luego de corregirlo por un exceso de color: $E(B-V) = 0.05$ magnitudes (Fig.4.8). Se adoptó para este cúmulo una edad de 40×10^6 años, debido a que las líneas de Balmer del espectro observado son ligeramente más profundas que en el *template*. Los resultados acá presentados son los primeros en su especie ya que este cúmulo no presenta estudios previos.

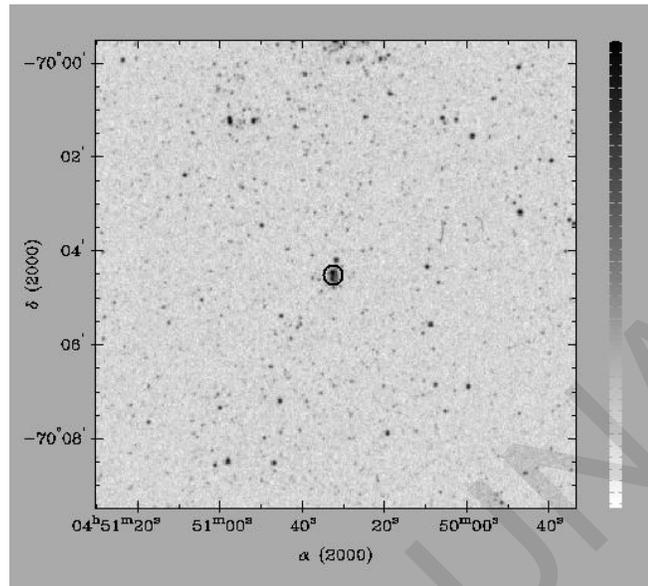


Fig. 4.7: Imagen de SL 56.

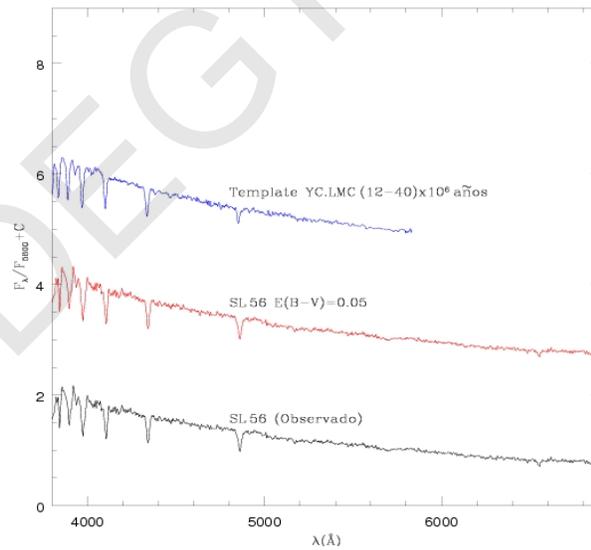


Fig. 4.8: Espectro observado de SL 56 (abajo), el espectro corregido por $E(B-V) = 0.05$ (medio) y el espectro template con el que mejor se ajusta el espectro de SL 56 (arriba).

4.2.4 SL 58

En la Fig. 4.9, se muestra la imagen del cúmulo SL 58. Hasta donde se sabe, este cúmulo no registra estudios previos, por lo que acá se presentan son los primeros en su especie. El espectro de este cúmulo se comparó con dos *templates* representativos de poblaciones estelares moderadamente jóvenes: YDE.LMC ((35-65) $\times 10^6$ años) e YEF.LMC ((50-110) $\times 10^6$ años), ambos de la base SBCPGD (Fig. 4.10). El espectro observado fue corregido por $E(B-V) = 0.18$ para realizar la primera comparación, en tanto que para la segunda comparación, se corrigió el espectro observado por $E(B-V) = 0.05$. Al notar que ambas comparaciones resultaban satisfactorias, se decidió construir un espectro promedio de los mencionados *templates*; de esta manera SL 58 tendría una edad de 65×10^6 años y estaría afectado por un enrojecimiento: $E(B-V) = 0.13$ (Tabla 4.2), semejante al encontrado por BH (1982) (Tabla 2.9).

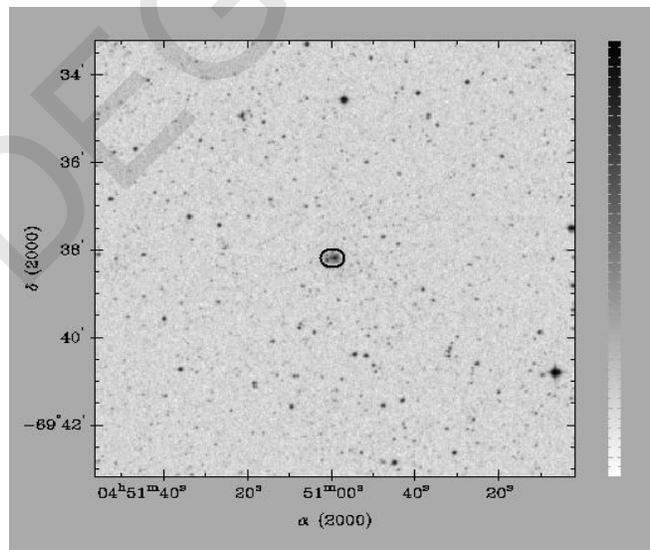


Fig. 4.9: Imagen de SL 58.

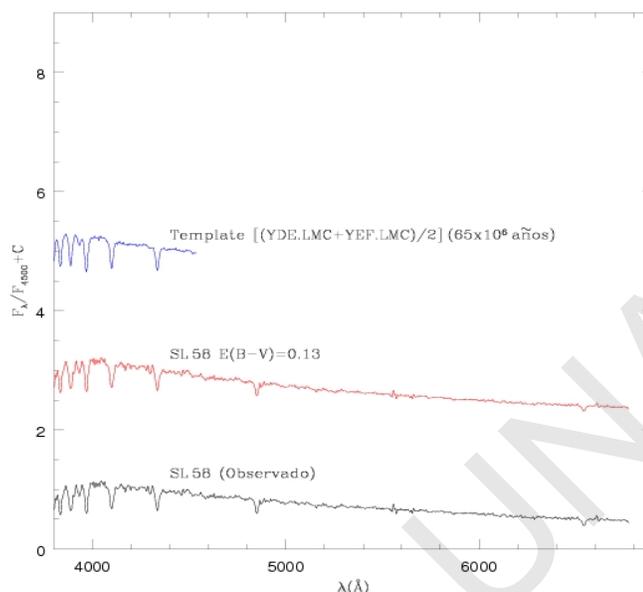


Fig. 4.10: Espectro observado de SL 58 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.13$ (medio) y el espectro template promediado que mejor se ajusta el espectro observado (arriba).

4.2.5 SL 79

SL 79 (Fig. 4.11), al igual que los objetos previamente presentados, no presenta; ni edad ni enrojecimiento publicados al momento de realizar este trabajo. La medida de los AEs de las diferentes líneas, indican una edad cercana a los 100×10^6 años (Tabla 2.9). No obstante la baja calidad con la que se obtuvo este espectro, se compara de manera aceptable si se corrige por un exceso de color: $E(B-V) = 0.06$, con el *template* Y3B.UI (100×10^6 años) de la base construida por Bica (1988) (Fig. 4.12). El enrojecimiento en este caso es muy similar al encontrado a partir del trabajo de BH (1982), tal como se puede apreciar en la Tabla 2.9.

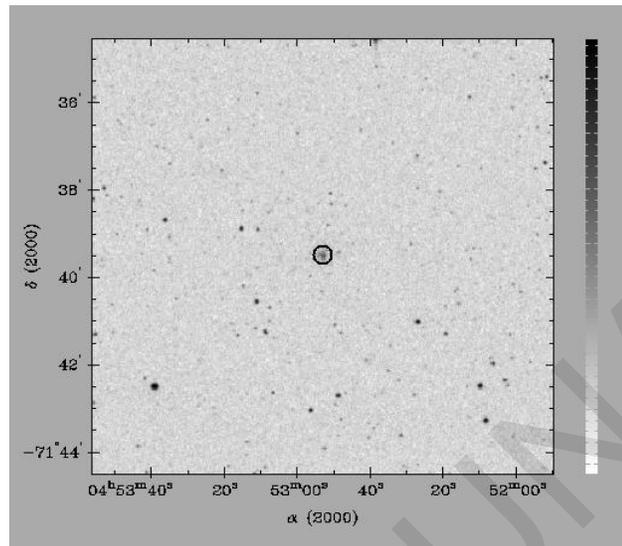


Fig. 4.11: Imagen de SL 79.

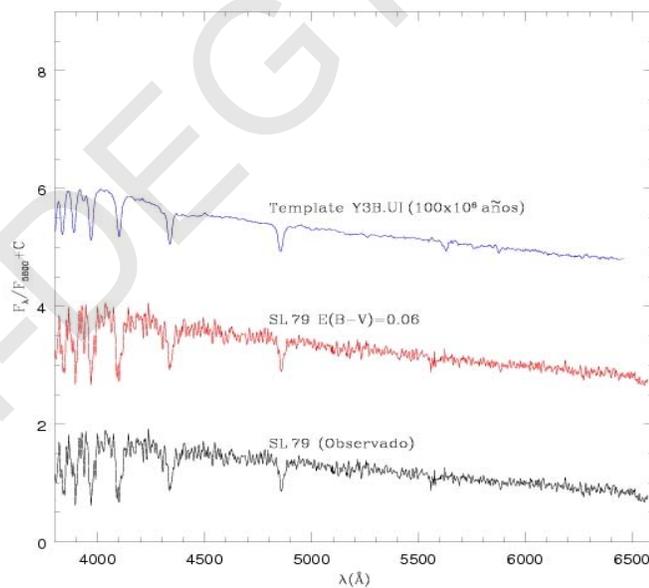


Fig. 4.12: Espectro observado de SL 79 (arriba), espectro corregido por $E(B-V) = 0.06$ (medio) y el espectro del template que mejor se ajustó al espectro observado.

4.2.6 SL 76

Para SL 76 (Fig. 4.13) se encontraron dos *templates* que permitieron realizar un par de comparaciones aceptables. La primera comparación se realizó con el *template* YC.LMC (12-40) $\times 10^6$ años (SBCPDG), luego que el espectro observado fuera corregido por $E(B-V) = 0.06$ (Fig. 4.14). Debido a que el espectro del cúmulo posee líneas más profundas que las del *template* se decidió realizar otra comparación, construyendo para tal fin un nuevo espectro a partir de los *templates*: YDE.LMC ((35-65) $\times 10^6$ años) e YEF.LMC ((50-110) $\times 10^6$ años) de la misma biblioteca de espectros patrones. El nuevo ajuste, comparando ahora el espectro corregido por un exceso de color: $E(B-V) = 0.08$, con el nuevo espectro de 60 $\times 10^6$ años, se muestra en la Fig. 4.15. Teniendo en cuenta los AEs de algunas líneas (Tabla 2.9), se adopta para SL 76 una edad de 50 $\times 10^6$ años y un exceso de color: $E(B-V) = 0.10$ (Tabla 4.2).

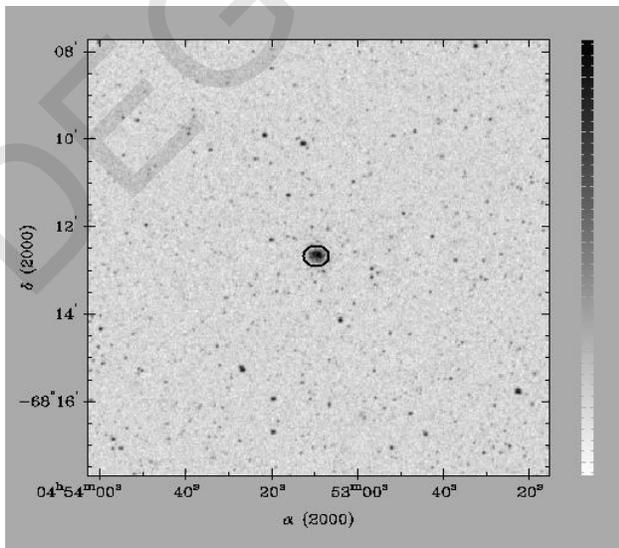


Fig. 4.13: Imagen de SL 76.

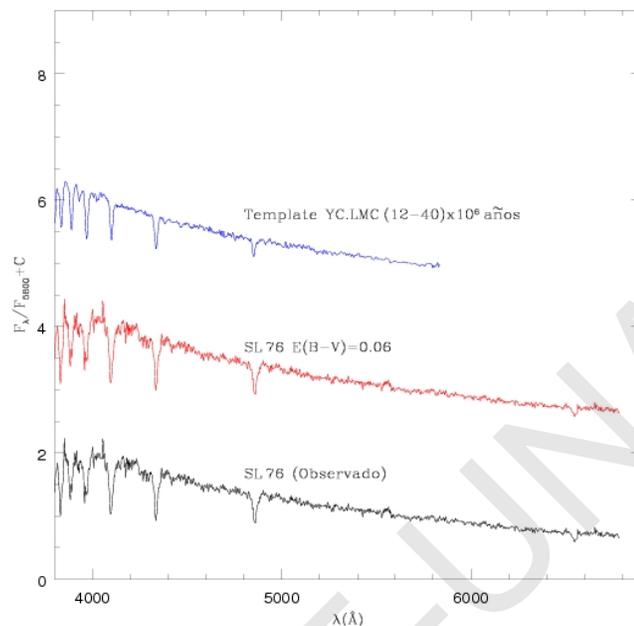


Fig. 4.14: Espectro observado de SL 76 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.06$ (medio) y el espectro template YC.LMC (arriba).

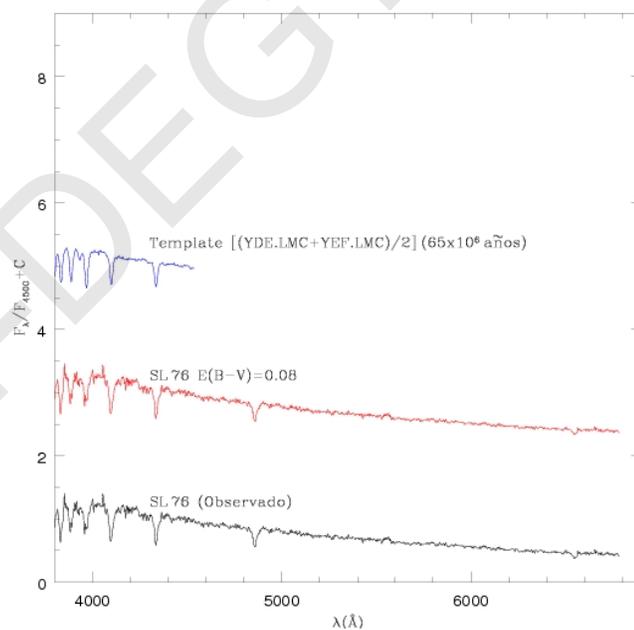


Fig. 4.15: Espectro observado de SL 76 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.08$ (medio) y el espectro template $[(YEF.LMC + YDE.LMC)/2]$ (arriba).

4.2.7 NGC 1732

Aparentemente, según Dieball et al. (2002), NGC 1732 (Fig. 4.16) formaría un par con el cúmulo BSDL 158 (Bica et al. 1999). En la Fig. 4.17 se muestra la comparación del espectro observado con el espectro resultante de promediar los *templates* YDE.LMC ((35-65) $\times 10^6$ años) e YEF.LMC ((50-110) $\times 10^6$ años), ambos de la base de SBCPDG. La edad adoptada para este cúmulo es un promedio de las edades correspondientes a los mencionados *templates* (Tabla 4.2). La edad obtenida se encuentra dentro de los valores determinados por Bica et al. (1996); (30-70) $\times 10^6$ años, y por los calculados a partir del método de Elson & Fall (1995); 70×10^6 años.

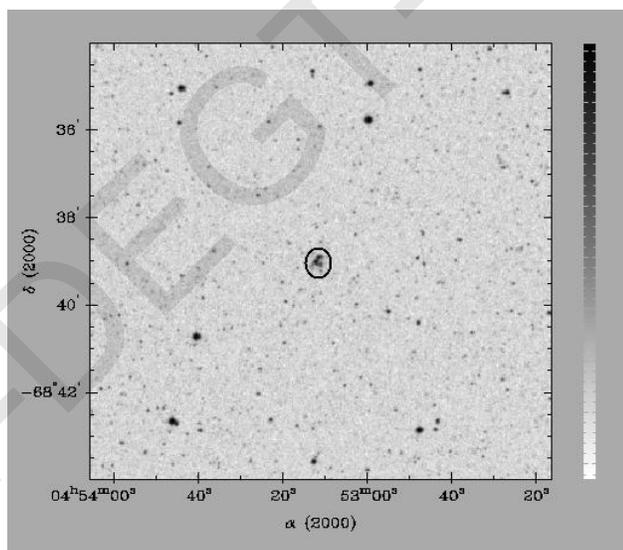


Fig. 4.16: Imagen de NGC 1732.

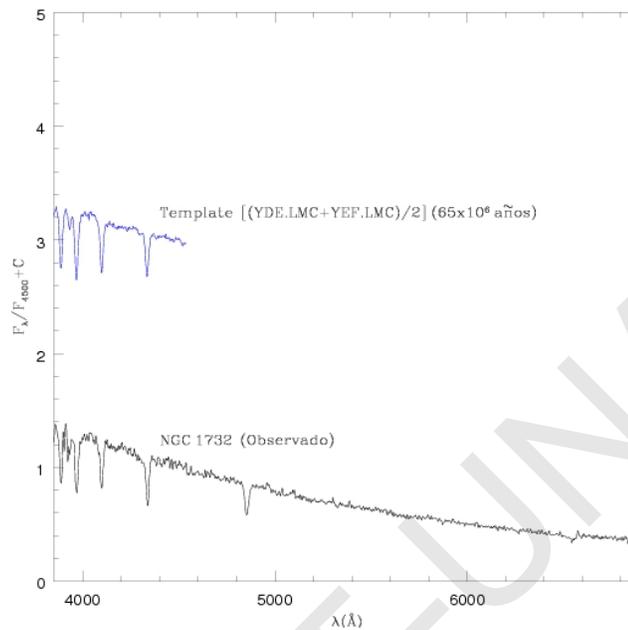


Fig. 4.17: Espectro observado de NGC1732 (abajo) y un espectro promedio de dos templates (arriba).

4.2.8 SL 116

En la Fig. 4.18, se presenta la imagen de SL 116, del cual hasta donde se pudo saber, no registra ningún estudio previo, por lo que la edad y el enrojecimiento acá determinados constituyen las primeras determinaciones en su especie.

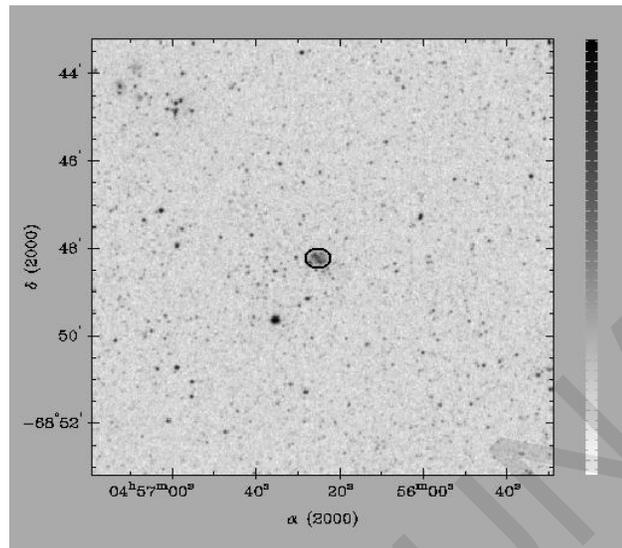


Fig. 4.18: Imagen de SL 116.

Se aprecia en la Fig. 4.19 que el espectro observado se compara muy bien con el *template* YDE.LMC (35-65) $\times 10^6$ años (SBCPDG), tanto en lo que se refiere a la distribución del continuo como a la presencia y profundidad de las líneas espectrales. La edad del *template* YDE.LMC es compatible con la indicada por las líneas de Balmer (50-70) $\times 10^6$ años. De esta manera SL 116 es un cúmulo de 60×10^6 años y no está afectado por enrojecimiento.

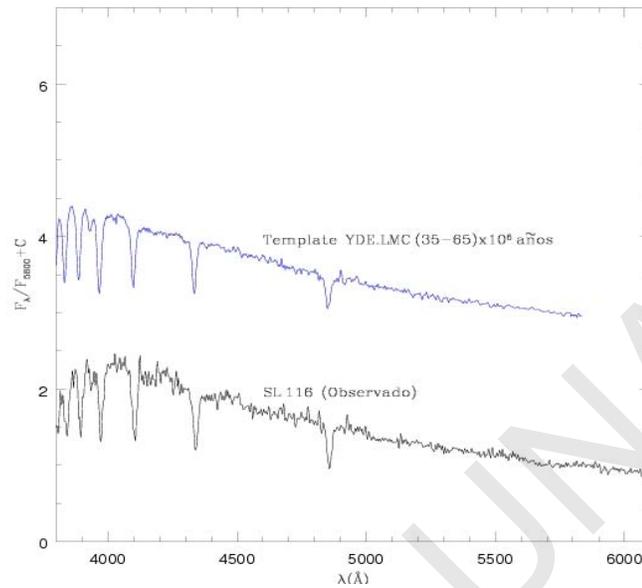


Fig. 4.19: Espectro observado de SL 116 (abajo) y el template seleccionado (arriba).

4.2.9 SL 168

SL 168 (Fig. 4.20) es un cúmulo muy compacto, sobre el cual no se han encontrado estudios publicados previamente.

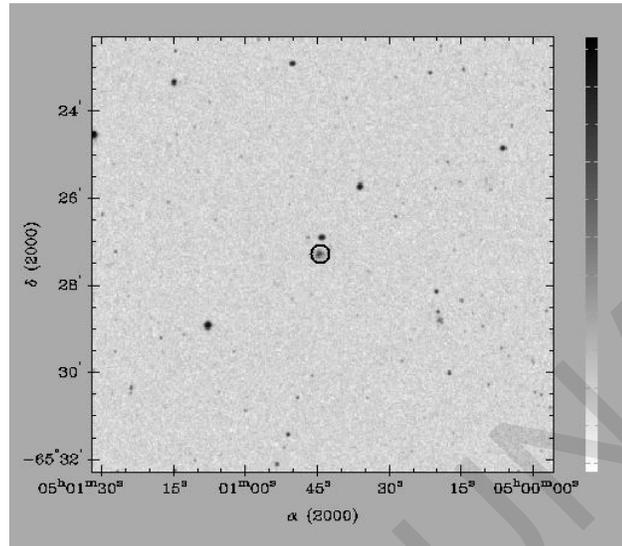


Fig. 4.20: Imagen de SL 168.

El espectro de este cúmulo corregido por $E(B-V) = 0.01$, el cual es semejante al encontrado a partir de los mapas de BH (1982) (Tabla 2.9), se compara muy bien con el *template* YDE.LMC $(35-65) \times 10^6$ años de SCPDG. Ya que las líneas del espectro observado son un poco más profundas que las del *template* y debido a que la edad determinada a partir de los AEs de 100×10^6 años, se decidió adoptar una edad de 60×10^6 años. En la Fig. 4.21 se puede apreciar el espectro observado de SL 168, el corregido por enrojecimiento y el *template* con el que se logró el mejor ajuste.

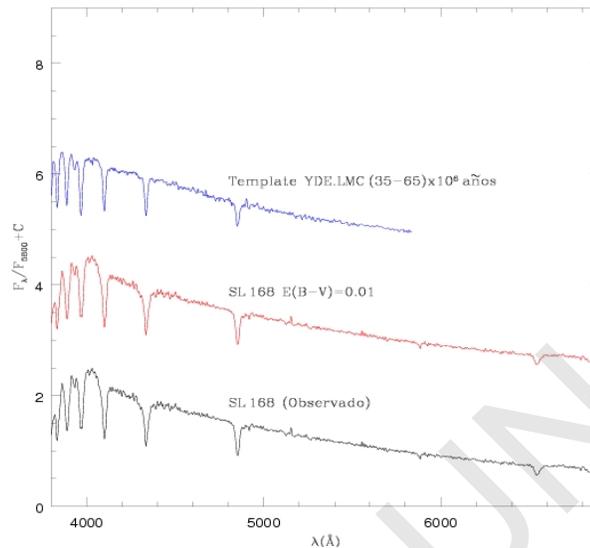


Fig. 4.21: Espectro observado de SL 168 (abajo), el espectro corregido por enrojecimiento (medio) y el template que mejor se ajusta (arriba).

4.2.10 NGC 1822

En la Fig. 4.22 se presenta la imagen en el azul de NGC 1822. El mejor ajuste para el espectro de este objeto (Fig. 4.23) se obtuvo con el *template* Yf (Piatti et al. 2002, de ahora en más PBCSA) que presenta una edad comprendida entre los 100 y 150 $\times 10^6$ de años, después de corregir el espectro observado por $E(B-V) = 0.05$, valor muy similar con el encontrado a partir del trabajo de BH (1982) (Tabla 2.9). Los AEs de las líneas de Balmer indican una edad entre los (50-100) $\times 10^6$ años, pero debido a que el espectro observado presenta las líneas un poco más profundas, se decidió adoptar una edad de 125×10^6 años para este cúmulo.

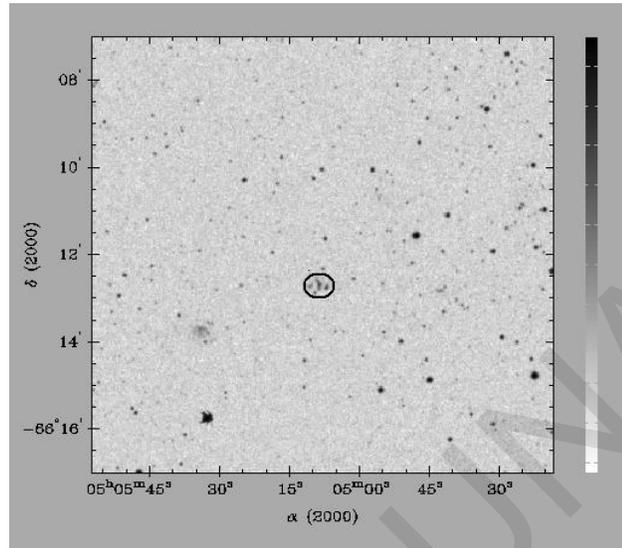


Fig. 4.22: Imagen de NGC 1822.

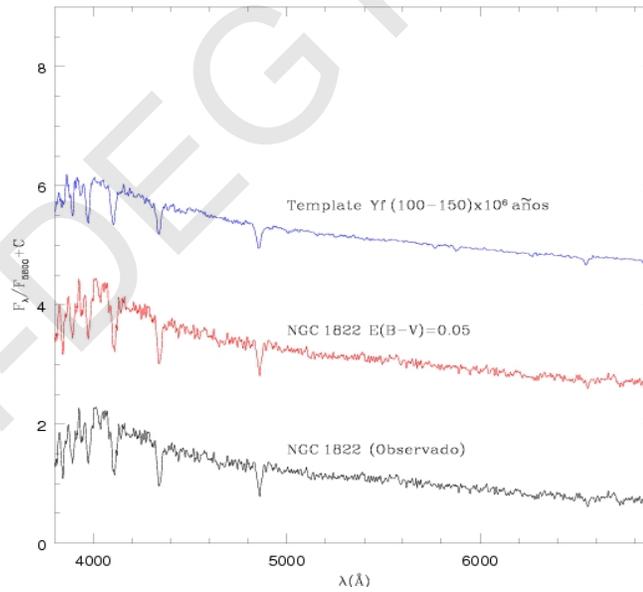


Fig. 4.23: Espectro observado de NGC 1822 (abajo), espectro corregido por $E(B-V)=0.05$ (medio) y el template que mejor se ajusta (arriba).

4.2.11 HS 109

Hodge & Sexton (1966) catalogaron por vez primera a este objeto, el que se muestra en la Fig. 4.24. El espectro correspondiente a este cúmulo se compara muy bien con el *template* YDE.LMC (35-65) $\times 10^6$ años (SBCPDG), después de corregirlo por $E(B-V) = 0.08$, muy similar al valor encontrado en el trabajo de BH (1982); $E(B-V) = 0.06$ (Fig. 4.25). Los AEs de las líneas de Balmer indican una edad entre los (50-100) $\times 10^6$ años. La edad que se adoptó para este cúmulo es de 70×10^6 años, valor que coincide con el determinado por Pietrzyński et al. 2000 (63×10^6 años).

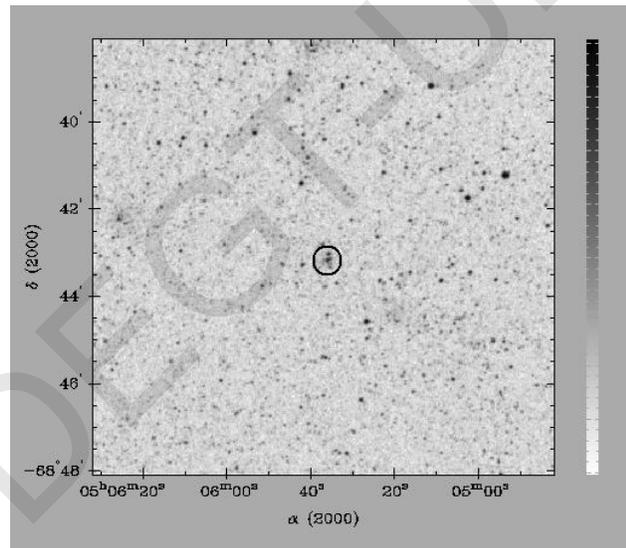


Fig. 4.24: Imagen de HS 109.

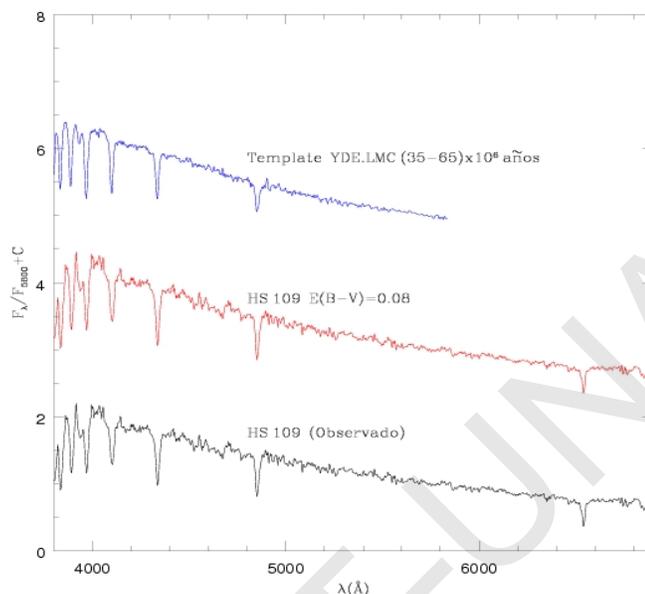


Fig. 4.25: Espectro observado de HS 109 (abajo), espectro corregido por enrojecimiento (medio) y el template YDE.LMC (arriba).

4.2.12 SL 234

Alcaino & Liller (1987) realizaron mediciones fotográficas de sólo 16 estrellas de SL 234 (Fig. 4.26) en las bandas BVRI y en base al ajuste de isócronas teóricas derivaron tentativamente un exceso de color de $E(B-V) = 0.15$ y una edad de $48 \pm 20 \times 10^6$ años. Esta edad resulta en principio compatible con el tipo SWBII (Searle et al. 1980) asignado por Bica et al. (1996) en base a fotometría fotoeléctrica UBV integrada de éste y otros cúmulos de la Nube Mayor de Magallanes. Pietrzyński & Udalski (2000), a través del ajuste de isócronas determinaron una edad de 79×10^6 años, por otro lado Tsvetkov et al. (1989) obtuvieron una edad de 47×10^6 años, a través de estrellas pulsantes de población I, encontradas en los cúmulos estelares.

El espectro observado de este cúmulo se compara con el que resulta de promediar los *templates* YDE.LMC e YEF.LMC, ambos de la base de SBCPDG, con una edad de 65×10^6 años (Fig. 4.27). Dado que los AEs de algunas líneas indican una edad de 50×10^6 años, se decidió adoptar una edad de 60×10^6 años, valor similar al encontrado por Tsvetkov et al. (1989), y que se aproxima a la edad que determinaron Pietrzyński et al. (2000) y Vallenari et al. (1998); en este último trabajo determinaron para SL 234 un exceso de color $E(B-V) = 0.17$ y una edad de 80×10^6 años.

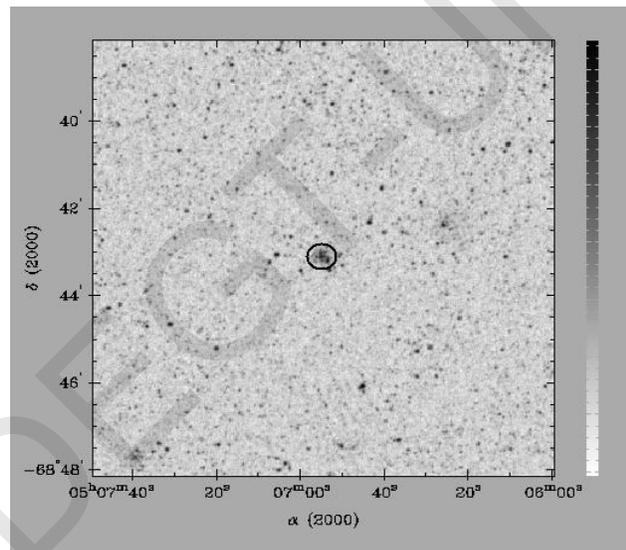


Fig. 4.26: Imagen de SL 234.

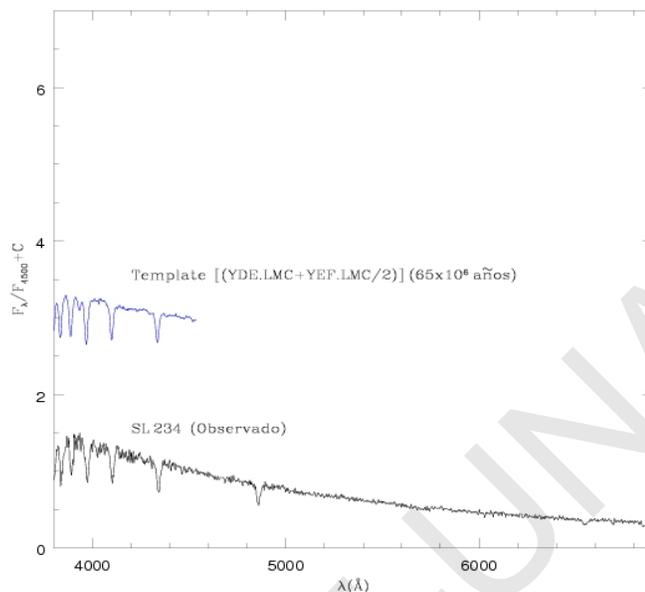


Fig. 4.27: Espectro observado de SL 234 (abajo) y el template promedio (arriba).

4.2.13 SL 255

El espectro de este débil cúmulo (Fig. 4.28) se ajusta razonablemente bien con el *template* Ye (45-75) $\times 10^6$ años de la base de PBCSA, si se lo corrige previamente por $E(B-V) = 0.10$ (Fig. 4.29), similar al determinado a partir de los mapas de BH (1982), si bien las líneas del espectro de SL 255 son ligeramente menos profundas respecto a las del *template*. Los AEs de las líneas de Balmer indican una edad comprendida entre los (10-100) $\times 10^6$ años (Tabla 2.9). La edad finalmente adoptada para este cúmulo es de 60×10^6 años.

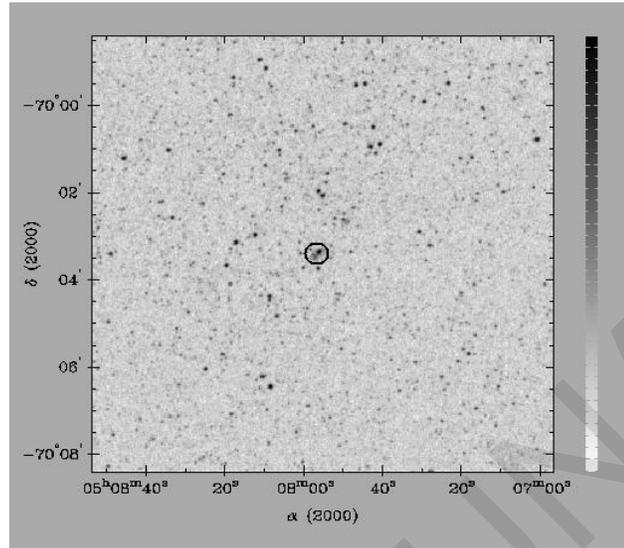


Fig.4.28: Imagen de SL 255.

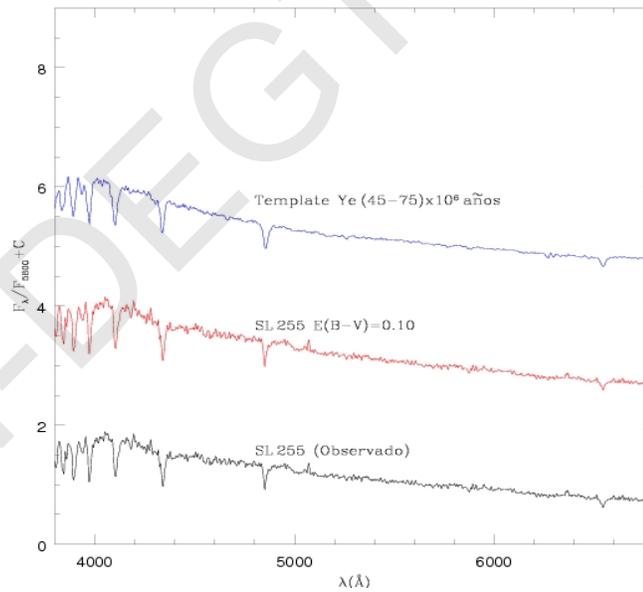


Fig. 4.29: Espectro observado de SL 255 (abajo), el espectro corregido por $E(B-V) = 0.10$ (medio) y el template Ye (arriba).

4.2.14 NGC 1887

La buena razón S/N con que se obtuvo el espectro NGC 1887 (Fig. 4.30), permite una excelente comparación con el *template* $Ye (45-75) \times 10^6$ años de la base de PBCSA, si se corrige antes por $E(B-V) = 0.05$ (Fig. 4.31). La edad del *template* escogido es compatible con la que indican los AEs de las líneas de Balmer. Ya que algunas líneas del espectro observado son algo más profundas que las del *template*, se ha adoptado para NGC 1887 una edad de 60×10^6 años. Mediante un estudio que Tsvetkov (1989) realizó con estrellas pulsantes determinó edades de cúmulos estelares y asociaciones, a partir del cual indica para NGC 1887 una edad similar a la de este estudio $(50-80) \times 10^6$ años.

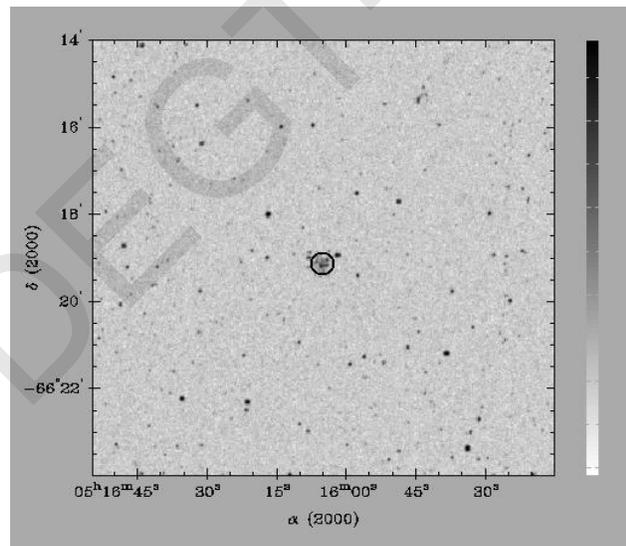


Fig. 4.30: Imagen de NGC 1887.

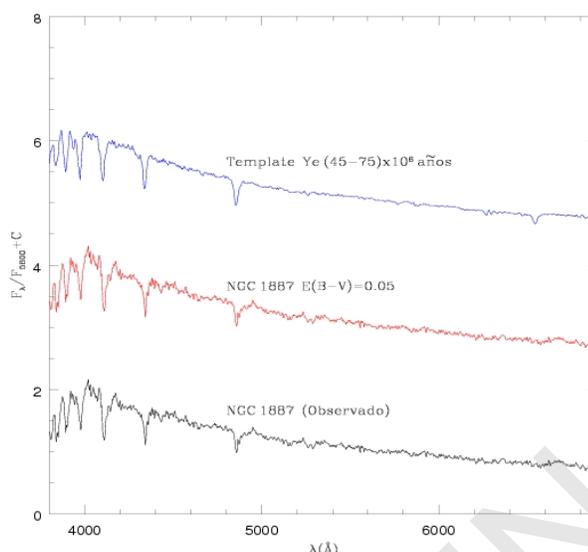


Fig. 4.31: Espectro observado de NGC 1887 (abajo), espectro corregido por enrojecimiento (medio) y el template que mejor se ajusta (arriba).

4.2.15 SL 364

En la Fig. 4.32 se presenta la imagen del débil y pequeño cúmulo SL 364, para el cual no se detectaron estudios previos al que acá se presenta. El mejor ajuste para su espectro integrado, se obtuvo con el espectro que resultó de promediar dos *templates*: YEF.LMC ((50-110) $\times 10^6$ años) de la base de SBCPDG e Ye ((45-75) $\times 10^6$ años) de la base de PBCSA, que representa poblaciones con una edad de 40×10^6 años. Para lograr este ajuste, el espectro observado fue corregido por $E(B-V) = 0.02$, valor que discrepa con el encontrado a partir del trabajo de BH (1982) (Tabla 2.9). Los AEs de las líneas de Balmer indican una edad de 50×10^6 años, por lo que la edad adoptada para SL 364 es de 40×10^6 años. En la Fig. 4.33 se presentan el espectro observado, el corregido por enrojecimiento y el espectro de comparación creado para este fin.

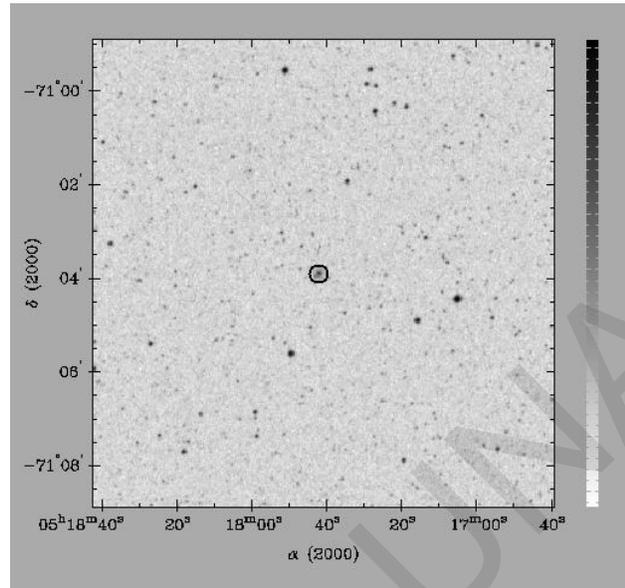


Fig. 4.32: Imagen de SL 364.

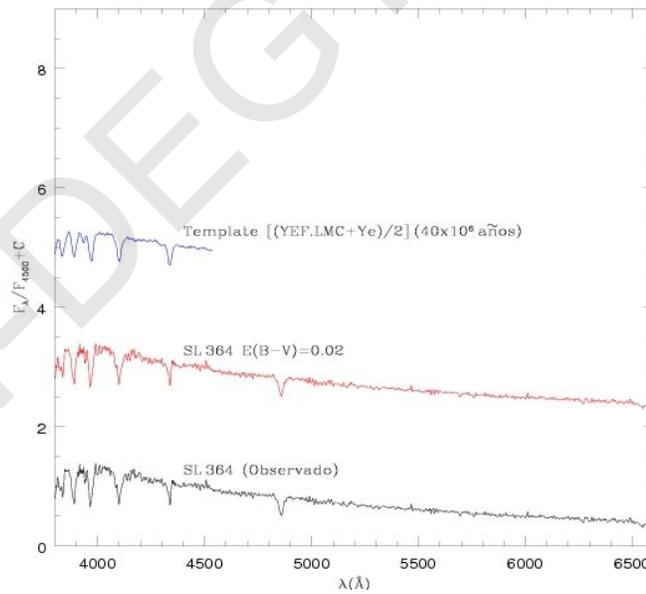


Fig. 4.33: El espectro observado de SL 364 (abajo), el espectro corregido por $E(B-V) = 0.02$ (medio) y el template de comparación $[(YEF.LMC+Ye)/2]$ (arriba).

4.2.16 SL 360

SL 360 es un cúmulo brillante y compacto de la Nube Mayor de Magallanes (Fig. 4.34). El mejor ajuste para el espectro de este cúmulo fue con el *template* YA_SGWC.LMC con una edad entre los $(3-6) \times 10^6$ años de la base de SBCPGD, luego de corregirlo por $E(B-V) = 0.10$ (Fig. 4.35), valor similar al encontrado en el trabajo BH (1982). La edad indicada por los AEs de las líneas de Balmer es de $\sim 10 \times 10^6$ años (Tabla 2.9). Para este cúmulo se adoptó una edad de 5×10^6 años, valor que coincide con el determinado por Pietrzyński et al. (2000) mediante el ajuste de isócronas (4×10^6 años), y con la determinada por Elson & Fall (1985) (10×10^6 años). Por otra parte Cassatella et al. (1996) determinaron para este agregado estelar una edad de $(5-15) \times 10^6$ años, en tanto que González et al. (2004) determinaron una edad de 2×10^6 años.

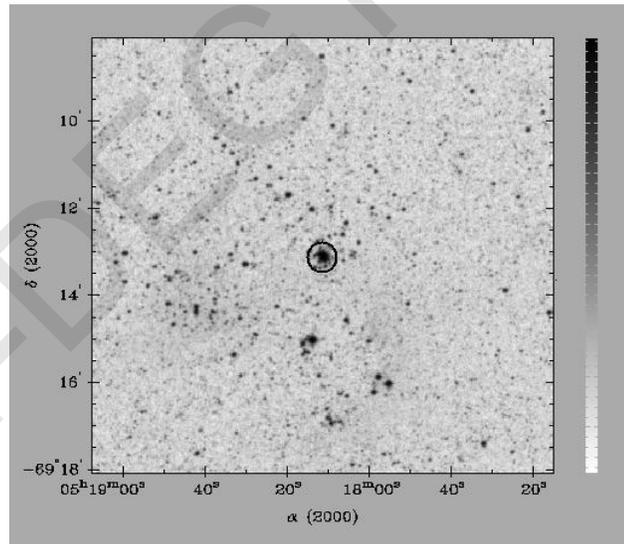


Fig.4.34: Imagen de SL 360.

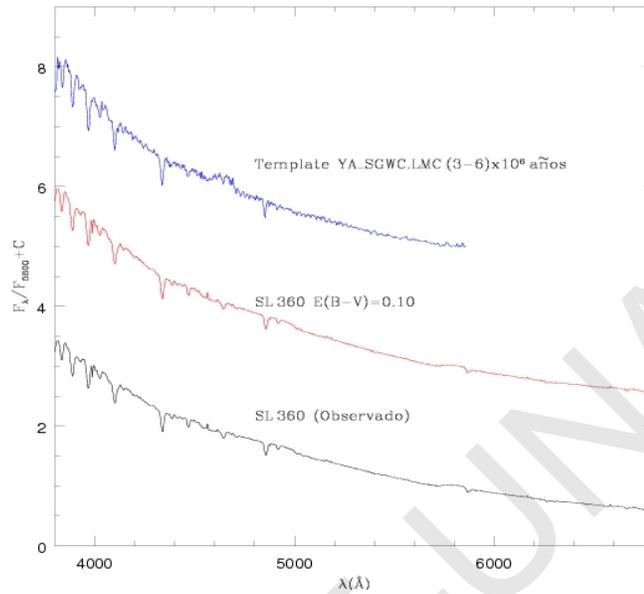


Fig. 4.35: El espectro observado (abajo), el espectro corregido por enrojecimiento (medio) y el template que mejor ajusta (abajo).

4.2.17 SL 386

Tal como se puede ver en la Fig. 4.36, SL 386 es un objeto débil de la Nube Mayor, y al igual que la mayoría de los cúmulos de esta muestra, no presenta estudios previos.

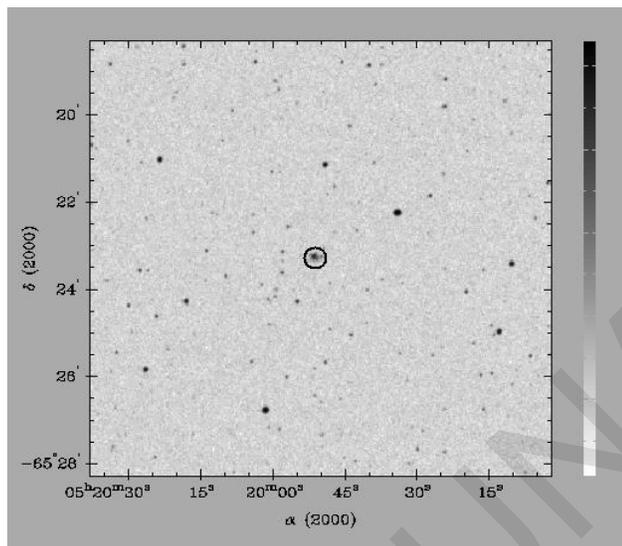


Fig. 4.36: Imagen de SL 386.

Luego de corregir el espectro observado de SL 386 por enrojecimiento: $E(B-V) = 0.17$, se logró ajustar el mismo con el espectro de 60×10^6 años, que resultado del promedio de YDE.LMC (35-65) $\times 10^6$ años con YEF.LMC (50-110) $\times 10^6$ años, ambos de la base de SBCPDG (Fig. 4.37). A pesar que los AEs de las líneas de Balmer indican una edad promedio de 40×10^6 años, se adoptó para SL 386 una edad de 70×10^6 años, debido a que su espectro presenta las líneas ligeramente más profundas que las del espectro utilizado para su comparación.

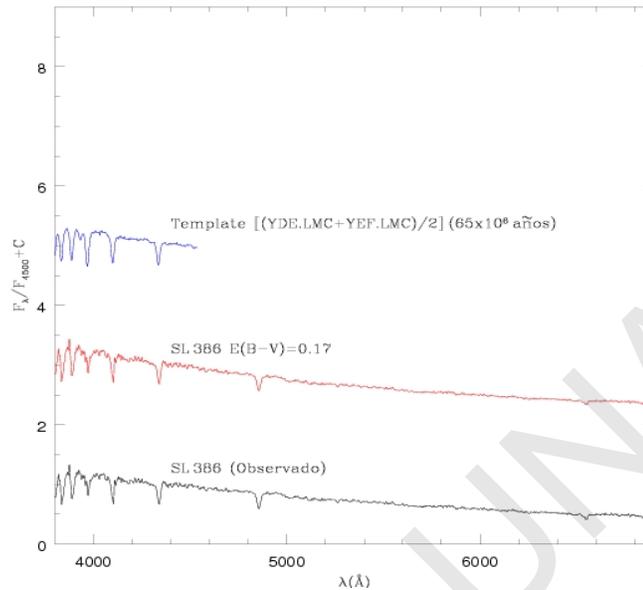


Fig. 4.37: Espectro observado de SL 386 (abajo), el espectro corregido por enrojecimiento (medio) y el template de comparación elegido (arriba).

4.2.18 NGC 1944

Como se puede apreciar en la Fig. 4.38, NGC 1944 es un cúmulo muy abundante en estrellas. La mejor comparación para el espectro integrado de este cúmulo (Fig. 4.39) se logró con el *template* Ye de $(45-75) \times 10^6$ años (PBCSA), luego de haber corregido por $E(B-V) = 0.07$ el espectro observado. Este valor de enrojecimiento resulta similar a los encontrados en los trabajos de BH (1982) y de Persson et al. (1983). La edad indicada por los AEs de las líneas de Balmer está comprendida entre los $(50-100) \times 10^6$ años, por lo que la edad finalmente adoptada para este cúmulo es de 60×10^6 años. La abundancia determinada para NGC 1944 es de -0.76, de acuerdo al trabajo de Olszewski et al. (1991).

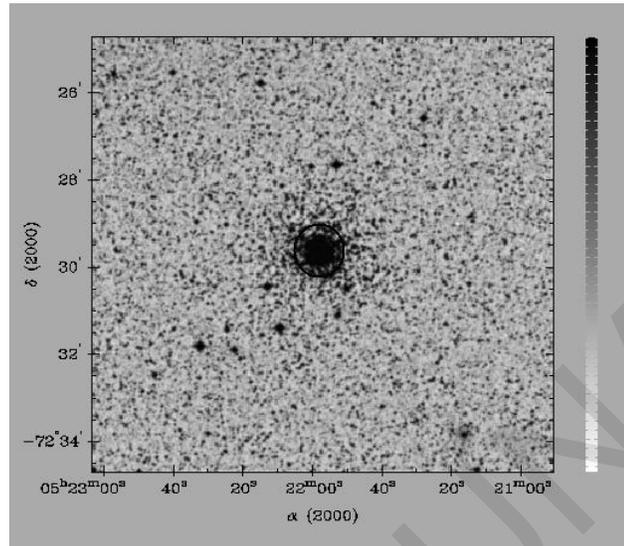


Fig. 4.38: Imagen de NGC1944.

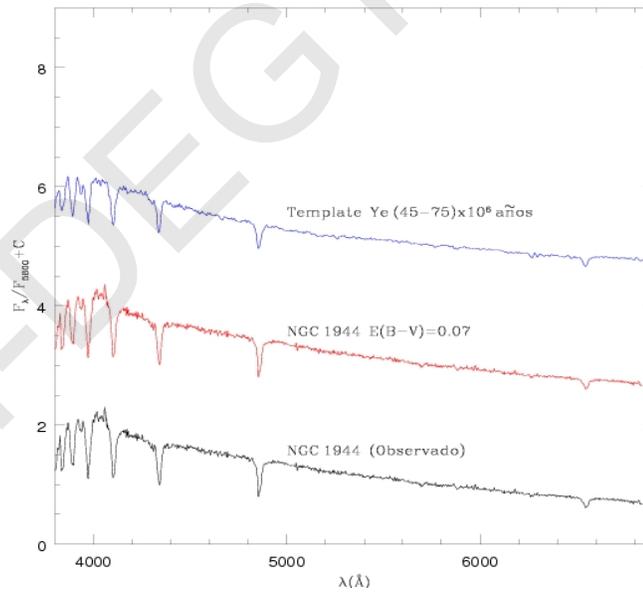


Fig. 4.39: Espectro observado de NGC 1944 (abajo), el espectro corregido por enrojecimiento (medio) y el template Ye (arriba).

4.2.19 SL 463

En la Fig. 4.40 se muestra la imagen de SL 463, el cual no presenta estudios previos. El espectro de este cúmulo corregido por un $E(B-V) = 0.10$, fue comparado con el *template* YDE.LMC representativo de poblaciones estelares con edades comprendidas entre los 35×10^6 años y 65×10^6 años, pertenece a la base de SBCPDG, similar a la edad determinada mediante los AEs de algunas líneas espectrales (Tabla 2.9)

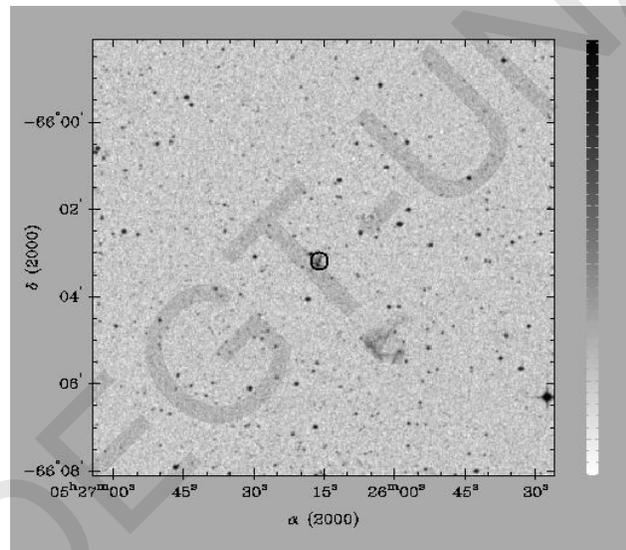


Fig. 4.40: Imagen de SL 463.

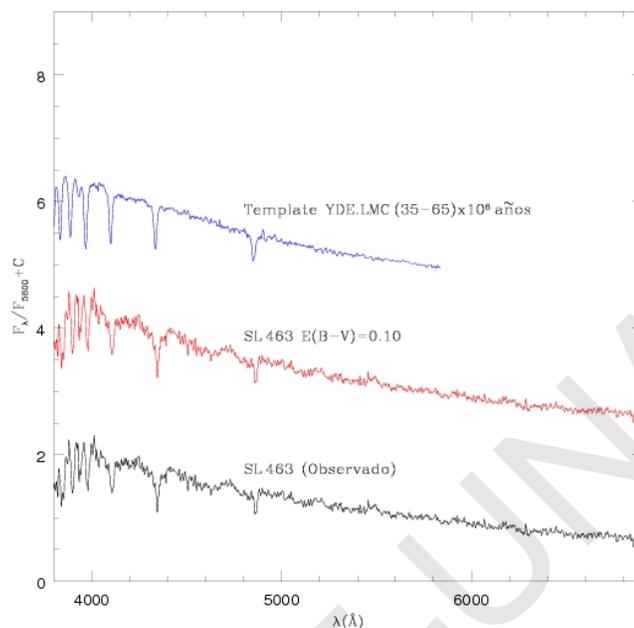


Fig. 4.41: Espectro observado de SL 463 (abajo), el espectro corregido por $E(B-V)=0.10$ (medio) y el template YDE.LMC (arriba).

4.2.20 SL 477

El espectro integrado de SL 477 (Fig. 4.42) se compara muy bien, después de haberlo corregido por $E(B-V) = 0.03$, con el template YDE.LMC de $(35-65) \times 10^6$ años (SBCPDG). Debido a que las líneas del espectro son algo más profundas que las del template (Fig. 4.43) y a que la edad indicada por los AEs de las líneas de Balmer ronda los $(10-50) \times 10^6$ años, se adopta para SL 477 una edad de 40×10^6 años. Esta edad es algo mayor que la determinada por González et al. (2004), quienes le asignan a este objeto una edad de 10×10^6 años.

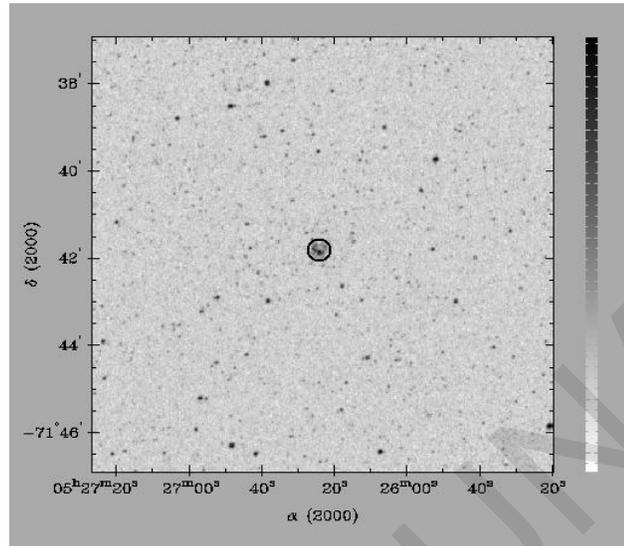


Fig. 4.42: Imagen de SL 477.

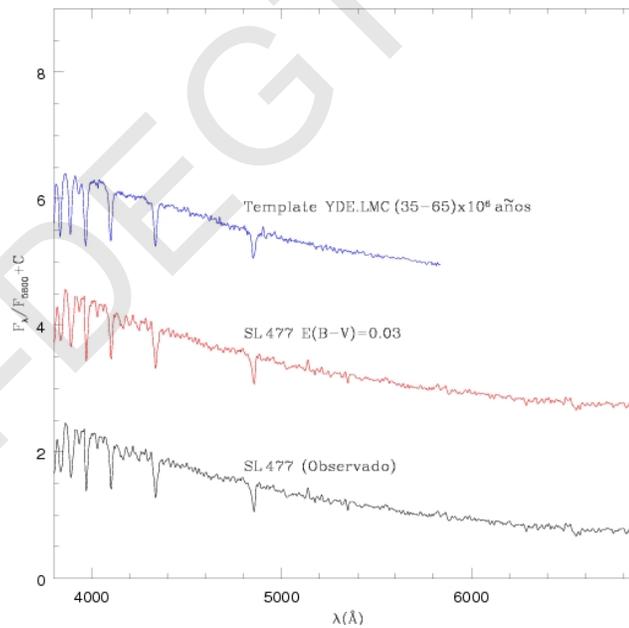


Fig. 4.43: Espectro integrado de SL 477 (abajo), espectro corregido por $E(B-V)=0.03$ (medio) y el template con el que mejor se ajusto (arriba).

4.2.21 NGC 1972

Pietrzyński et al. (2000) determinaron para NGC 1972 (Fig. 4.44) una edad de 63×10^6 años, compatible con la que se determina en este estudio. En efecto, la mejor comparación para el espectro integrado de este cúmulo se logró con un espectro de 70×10^6 años, resultante de promediar los templates Ye (45-75) $\times 10^6$ años (PBCSA) e YEF.LMC (50-110) $\times 10^6$ años (SBCPDG), tal como se puede apreciar en la Fig. 4.45. Por lo tanto NGC 1972 es un cúmulo moderadamente joven y no estaría afectado por enrojecimiento.

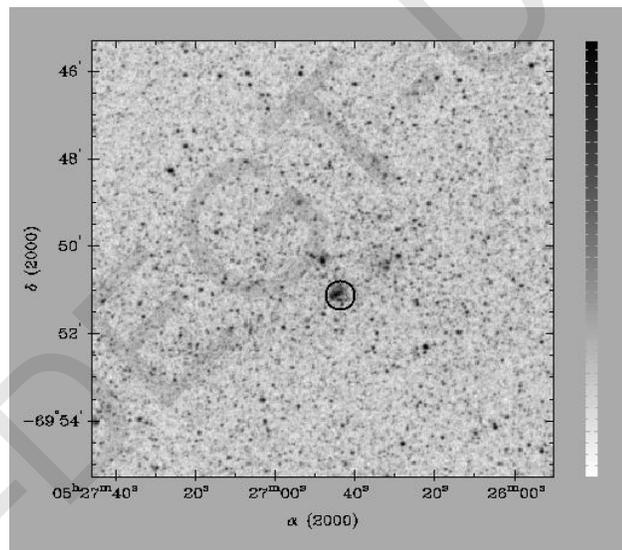


Fig. 4.44: Imagen de NGC 1972.

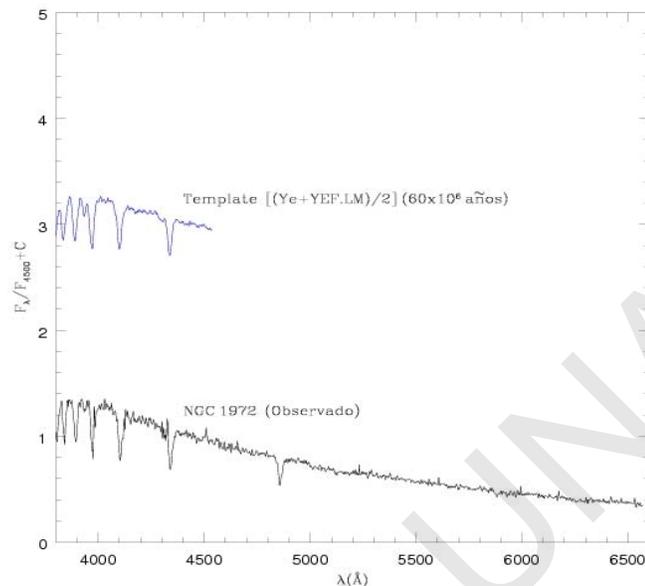


Fig. 4.45: Espectro de NGC 1972 (abajo) y el template promedio [(Ye+YEF.LMC)/2] (arriba).

4.2.22 NGC 2000

NGC 2000 (Fig. 4.46) es un cúmulo disperso de bajo brillo superficial. Tal como se puede apreciar en la Fig. 4.47, una buena comparación se logra al corregir el espectro integrado por un exceso de color $E(B-V) = 0.02$, con el *template* Yd (40×10^6 años) de la base de PBCSA. Ya que los AEs de las líneas de Balmer indican una edad entre los $(10-50) \times 10^6$ años, la edad adoptada para este cúmulo fue de 50×10^6 años. Esta edad discrepa notablemente con la encontrada por González et al. (2004), quienes clasificaron a este objeto como SWB III, en vez de SWB II, por lo que al determinar su edad mediante fluctuaciones de brillo superficial, le asignaron una edad de 500×10^6 años.

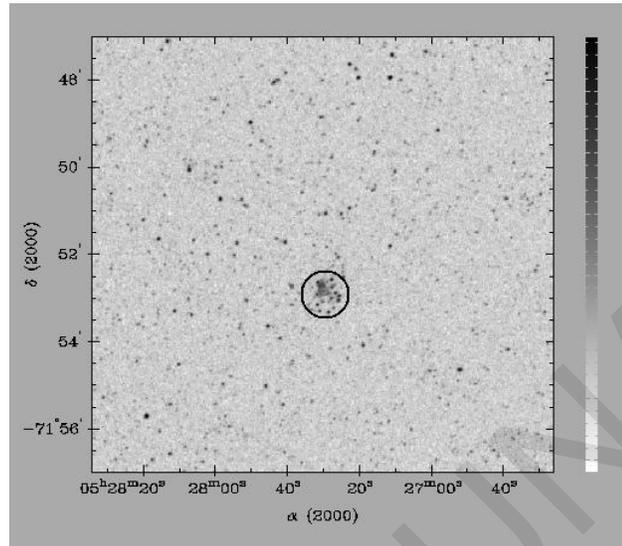


Fig. 4.46: Imagen de NGC 2000.

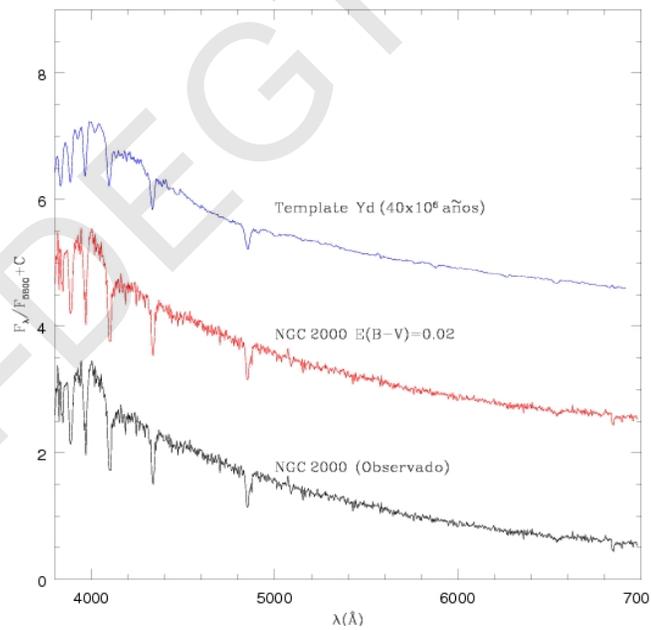


Fig. 4.47: Espectro observado de NGC 2000 (abajo), espectro corregido por $E(B-V) = 0.02$ (medio) y el template de comparación Yd.

4.2.23 NGC 1986

La mejor comparación para NGC 1986, cuya imagen se muestra en la Fig. 4.48, se logró con el *template* Y_e (45-75) $\times 10^6$ años (PBCSA), corrigiendo previamente el espectro integrado por $E(B-V) = 0.10$, valor que poco difiere del encontrado a través de BH (1982): $E(B-V) = 0.07$. Los AEs de las líneas de Balmer indican una edad que oscila entre los (10-50) $\times 10^6$ años, y debido a que las líneas del espectro son poco menos profundas con respecto a las líneas del *template* (Fig. 4.49), se decidió adoptar una edad de 50×10^6 años para NGC 1986. Este valor discrepa con los 100×10^6 años determinado por Pietrzyński et al. (2000), sin embargo coincide con el determinado por González et al. (2004): 50×10^6 años, Persson et al. (1983), determinaron para NGC 1986 un exceso de color $E(B-V)=0.18$.

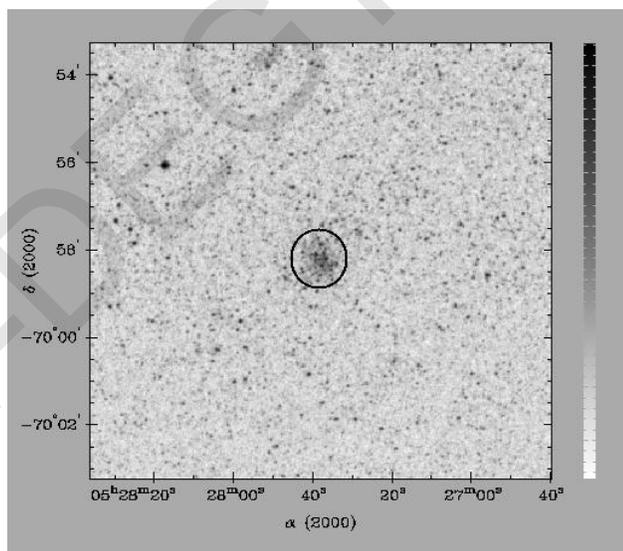


Fig. 4.48: Imagen de NGC 1986.

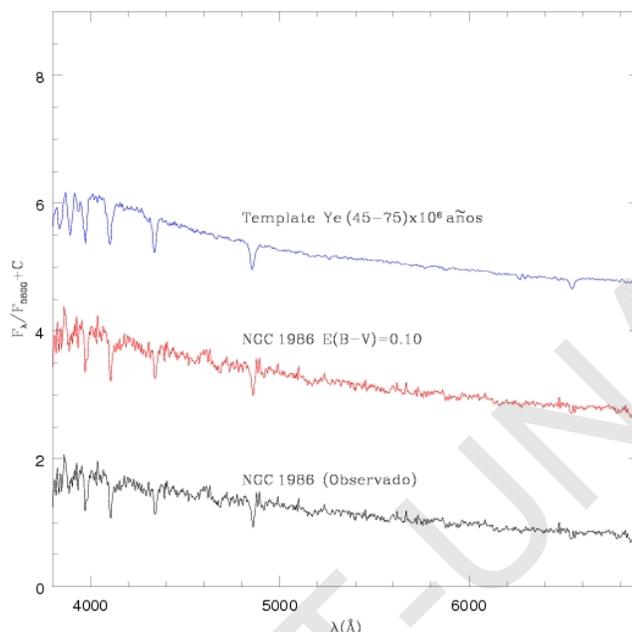


Fig. 4.49: Espectro observado de NGC 1986 (abajo), espectro corregido por enrojecimiento (medio) y el template que mejor se ajusta.

4.2.24 SL 551

Para este débil cúmulo de la Nube Mayor de Magallanes (Fig. 4.50), tampoco se encontraron trabajos previos. Los AEs de las líneas de Balmer de este cúmulo indican una edad entre 10×10^6 y 30×10^6 años. El espectro integrado correspondiente a SL 551 fue corregido por $E(B-V) = 0.27$, y se comparó satisfactoriamente con el *template* YC_SG.LMC, representativo de las poblaciones estelares con edades comprendidas entre los $(10-20) \times 10^6$ años (SBCPDG), como puede apreciarse en la Fig. 4.51. Ya que las líneas del espectro de SL 551 son ligeramente menos profundas que las *template*, la edad finalmente adoptada para este cúmulo es de 20×10^6 años.

Al examinar en detalle el campo de SL551, se ve que hay una estrella brillante que domina la luz del cúmulo, por lo que los parámetros que se derivan en este trabajo mediante la espectroscopía integrada de todo el conjunto, no serían representativos del cúmulo, del cual llama la atención el elevado enrojecimiento con el que se debió corregir el espectro para lograr el ajuste. El espectro obtenido presenta características típicas de una estrella de tipo espectral F-G. Se recomienda por lo tanto analizar de manera individual el espectro de esa estrella.

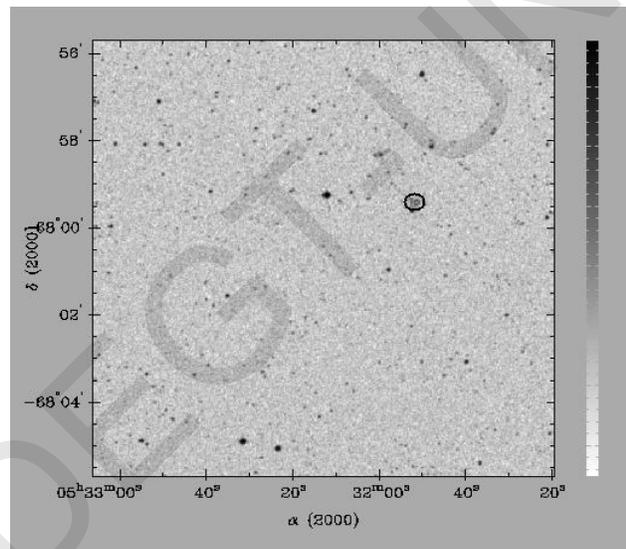


Fig. 4.50: Imagen de SL 551.

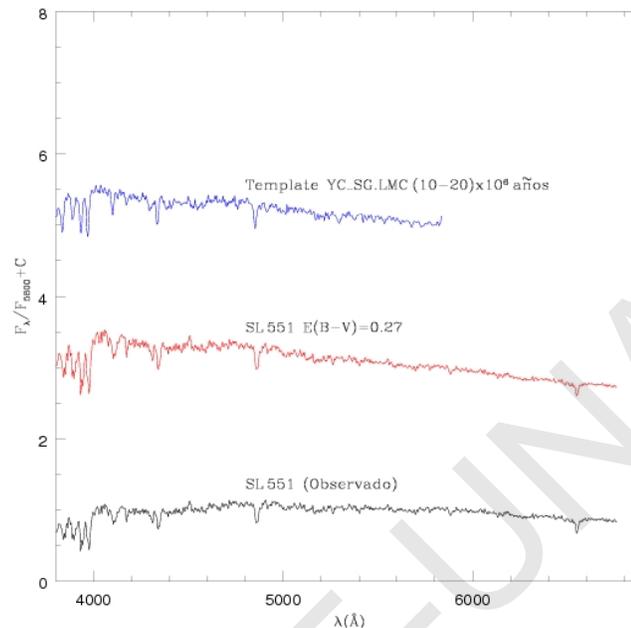


Fig. 4.51: Espectro integrado de SL 551 (abajo), el espectro integrado corregido por $E(B-V)=0.27$ (medio) y el template que mejor ajusta (arriba).

4.2.25 SL 566

El espectro observado de SL 566 (Fig. 4.52), luego de corregirlo por $E(B-V) = 0.18$, se compara de manera aceptable con el *template* Ye (45-75) $\times 10^6$ años de la base de PBCSA (Fig. 4.53). Ya que las líneas del espectro integrado de SL 566 son algo menos profundas que las de Ye y debido a que la edad indicada por los AEs de las líneas de Balmer oscila entre los (20-50) $\times 10^6$ años (Tabla 2.9), la edad adoptada para este cúmulo es de 50×10^6 años. Estos son los primeros parámetros en su especie derivados para SL 566.

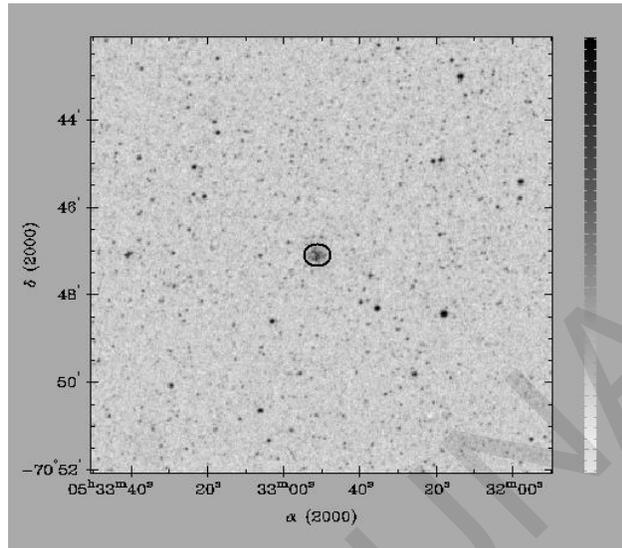


Fig. 4.52: Imagen de SL 566.

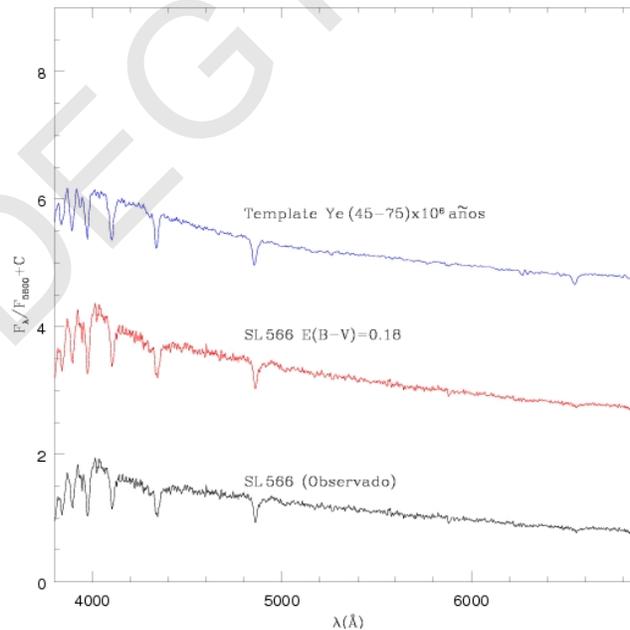


Fig. 4.53: Espectro observado de SL 566 (abajo), espectro corregido por enrojecimiento (medio) y el template que mejor ajusta (arriba).

4.2.26 NGC 2053

La imagen de NGC 2053 se presenta en la Fig. 4.54, y hasta donde se sabe este cúmulo no presenta estudios previos donde se determine la edad del mismo. El espectro integrado de este objeto corregido por $E(B-V) = 0.08$, se compara razonablemente bien con el *template* YEF.LMC (50-110) $\times 10^6$ años (SBCPDG) tal como se puede apreciar en la Fig. 4.55. Los AEs de las líneas de Balmer indican una edad de 50×10^6 años, pero debido a que la profundidad de las líneas en el espectro integrado de NGC 2053 es algo menor que en el *template*, se decidió adoptar para este cúmulo una edad de 70×10^6 años.

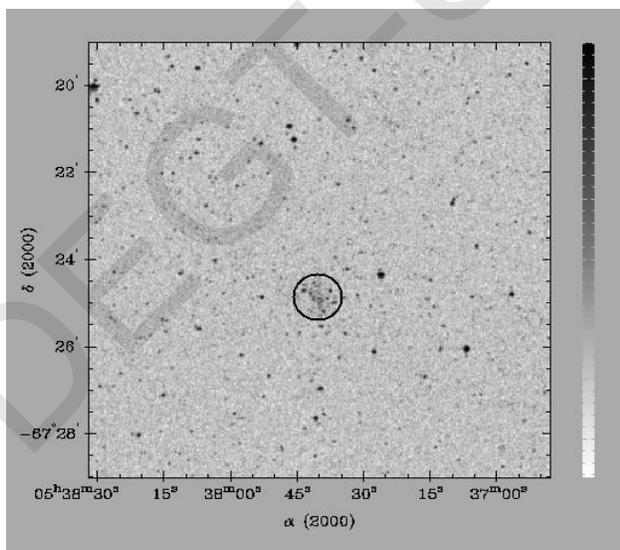


Fig.4.54: Imagen de NGC 2053.

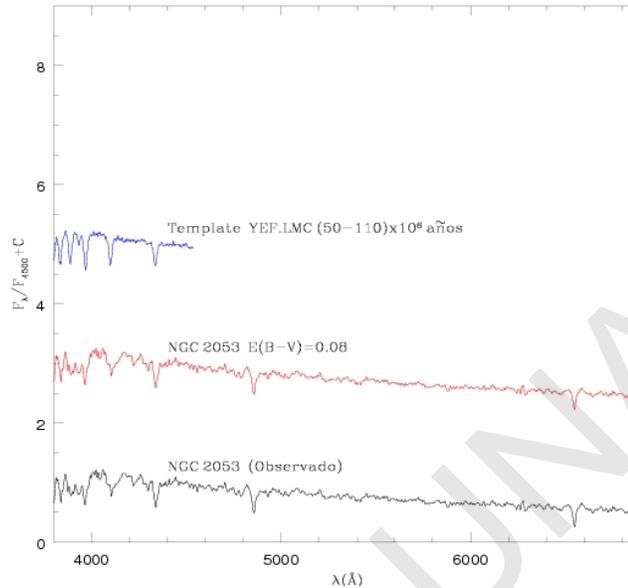


Fig. 4.55: Espectro observado de NGC 2053 (abajo), corregido por enrojecimiento (medio) y el template de comparación (arriba).

4.2.27 SL 763

En la Fig. 4.56 se presenta la imagen del cúmulo SL 763, del cual no se han encontrado estudios previos. El mejor ajuste que se logró para el espectro integrado de este cúmulo (Fig. 4.57), después de corregirlo por $E(B-V) = 0.04$, se obtuvo con el *template* Yd con una edad de 40×10^6 de años (PBCSA). Debido a que las líneas del espectro de SL 763 resultaron más profundas que las del *template* seleccionado y a que los AEs de las líneas de Balmer indican una edad comprendida entre los $(50-100) \times 10^6$ años, se adopta para este cúmulo una edad de 70×10^6 años.

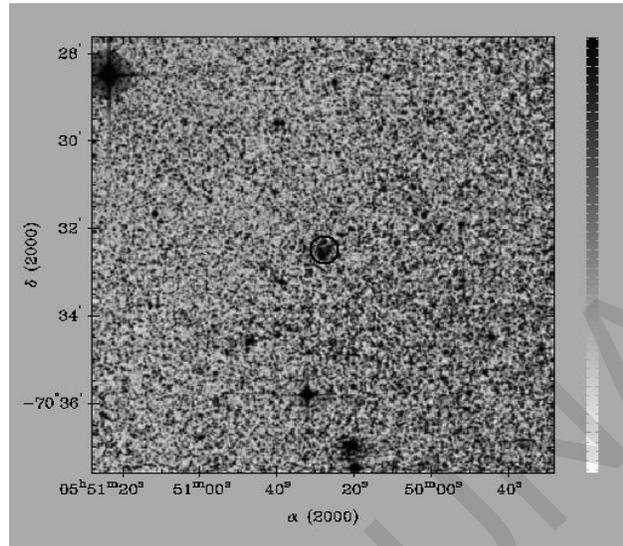


Fig. 4.56: Imagen de SL 763.

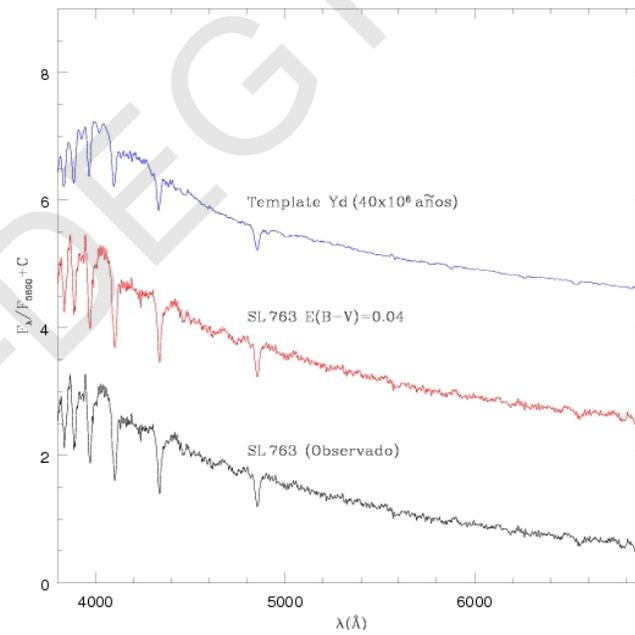


Fig. 4.57: Espectro integrado de SL 763 (abajo), espectro corregido por $E(B-V)=0.04$ (medio) y el template Yd (arriba).

4.2.28 NGC 2137

La imagen de este cúmulo, que formaría un sistema doble (y quizás triple) con NGC 2136, se presenta en la Fig. 4.58. El espectro de NGC 2137 presenta características típicas de un objeto relativamente viejo, incluso los AEs de las líneas de Balmer indican una edad de 500×10^6 años. En la Fig. 4.59 se muestra la comparación de NGC 2137, luego de corregirlo por $E(B-V) = 0.02$, con el *template* Ia de edad intermedia (1000×10^6 años) de la base de PBCSA. Debido a que las líneas de este espectro son algo un poco más profundas que las del *template*, y teniendo en cuenta la edad inferida a partir de los AEs (Tabla 2.9), se adoptó tentativamente para este cúmulo una edad de aproximadamente 800×10^6 años. Vale la pena aclarar que se recomienda enfáticamente realizar un estudio espectroscópico posterior de este agregado y de su par NGC 2136, ya que autores como Bhatia (1992), Hilker, Richtler & Stein (1995), Dirsch et al. (2000) y Pietrzyński et al. (2000), sugieren una edad de 100×10^6 años.

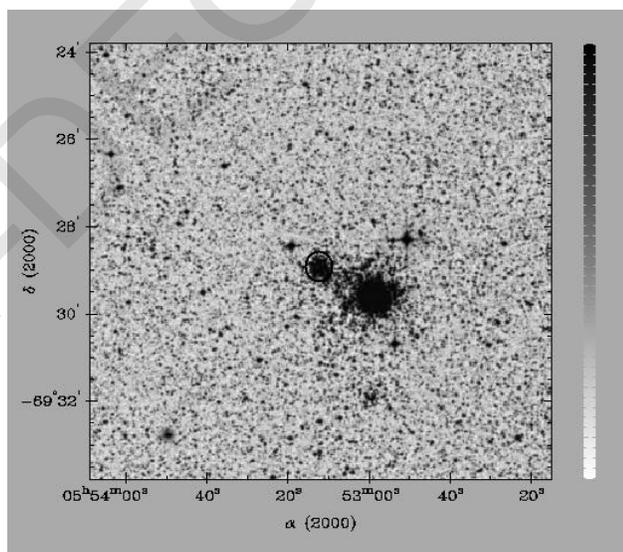


Fig. 4.58: Imagen de NGC 2137.

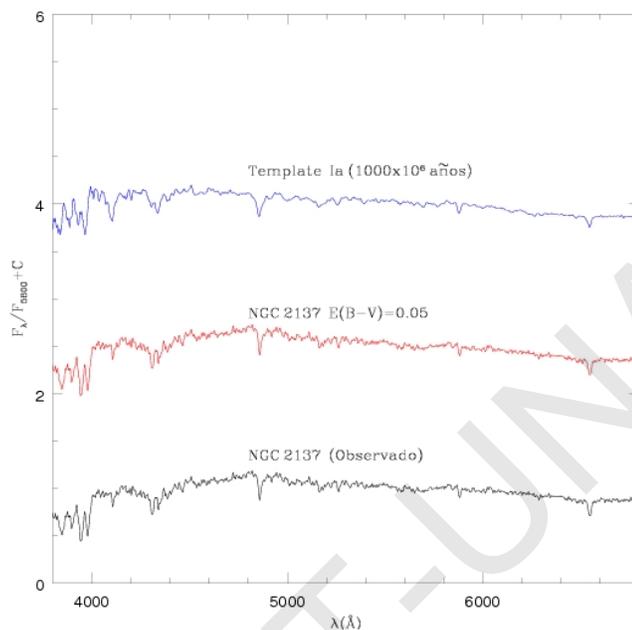


Fig. 4.59: Espectro integrado de NGC2137 (abajo), el espectro corregido por enrojecimiento (medio) y el template que mejor ajusta (arriba).

4.2.29 NGC 2140

NGC 2140 es un cúmulo de alto brillo superficial, como puede apreciarse en la Fig. 4.60. El mejor ajuste que se consiguió para el espectro integrado de este cúmulo, tal como puede observarse en la Fig. 4.61, fue con el *template* YEF.LMC con una edad promedio de 80×10^6 años (SBCPDG). Como la edad indicada por los AEs de las líneas de Balmer está comprendida entre los 50 y 100 millones de años, y debido a que las líneas del espectro de NGC 2140 son ligeramente menos profundas que las del *template*, se adoptó una edad de 60×10^6 años para este cúmulo. Este valor es semejante al determinado por de Oliveira, Dottori & Bica (1998), quienes calculan para este agregado una edad de 50×10^6 años.

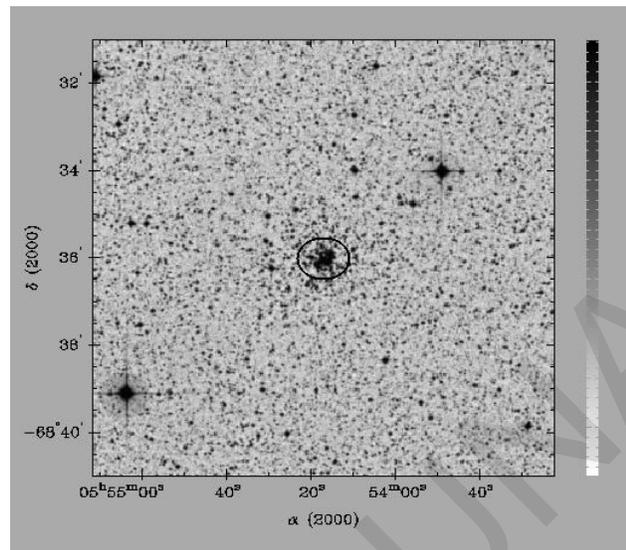


Fig. 4.60: Imagen de NGC 2140.

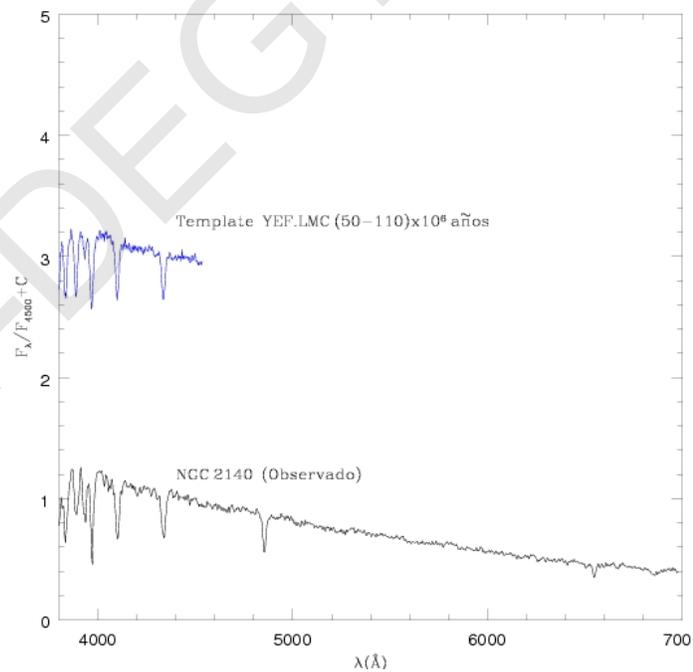


Fig. 4.61: Espectro observado de NGC 2140 (abajo) y el template que mejor ajusta a este (arriba).

4.3 Discusión de los parámetros obtenidos

Los parámetros encontrados para los 49 cúmulos estelares de las Nubes de Magallanes por medio de los mapas de BH (1982), y por ajuste de templates. Se encuentra que el intervalo de valores de $E(B-V)$ abarca entre las 0.03 y 0.10 magnitudes al utilizar los mapas de extinción interestelar de BH (1982), en tanto que al utilizar el segundo método, el rango de valores es mayor: $E(B-V) = 0.00-0.18$ magnitudes. Las edades que se determinadas oscilan entre los 5 y los 800×10^6 años. Los valores obtenidos de edades y excesos de colores se muestran en la Tabla 4.2, en tanto que en la Fig. 4.63 se han graficado los valores obtenidos, y se encuentra que no existe ninguna relación entre la edad y el exceso de color de los cúmulos.

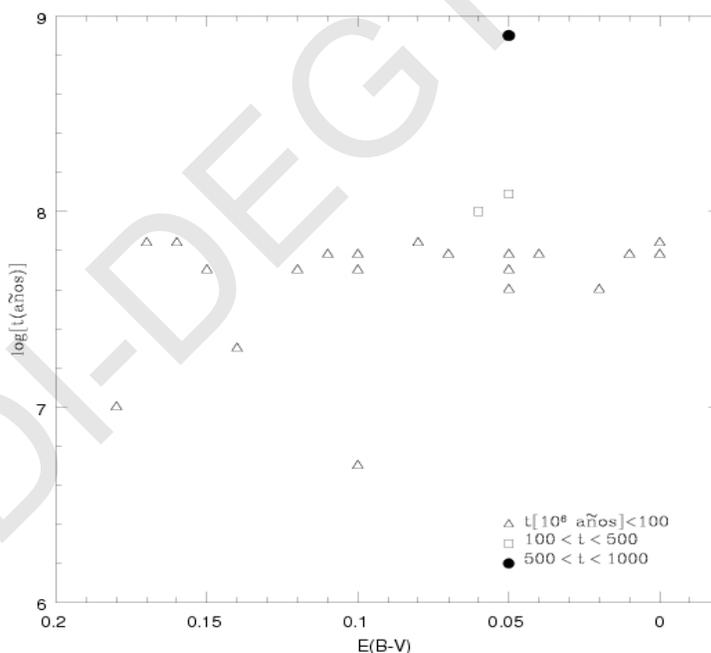


Fig. 4.63: Enrojecimiento interestelar para los 29 cúmulos estelares en función de la edad.

Recientemente Santos et al. (2006) determinaron recientemente edades y enrojecimientos para 17 cúmulos jóvenes de la Nube Mayor de Magallanes, haciendo uso del mismo telescopio y la misma técnica que en este trabajo. Si a la mencionada muestra se le agrega la acá presentada se dispone entonces de 46 cúmulos, en su mayoría jóvenes, con edades derivadas homogéneamente. Por otra parte, Piatti et al. (2003) mediante fotometría de Washington y el método de ajuste de isócronas, determinaron edades y metalicidades de 37 cúmulos de la Nube Mayor en un amplio rango de edades. En la Fig. 4.64 se muestra la distribución espacial deproyectada de la muestra total de 83 cúmulos, donde las coordenadas ecuatoriales absolutas (α y δ) son relativas al centro de la Nube Mayor de Magallanes.

En el panel de la izquierda se representan las posiciones de acuerdo a la procedencia de la muestra, en tanto que en el panel de la derecha se grafica la muestra discriminándola por edades. Resulta claro que existe una tendencia general de los cúmulos más viejos a ubicarse en las regiones del disco exterior, mientras que los más jóvenes tienden a aglutinarse en las proximidades de la barra.

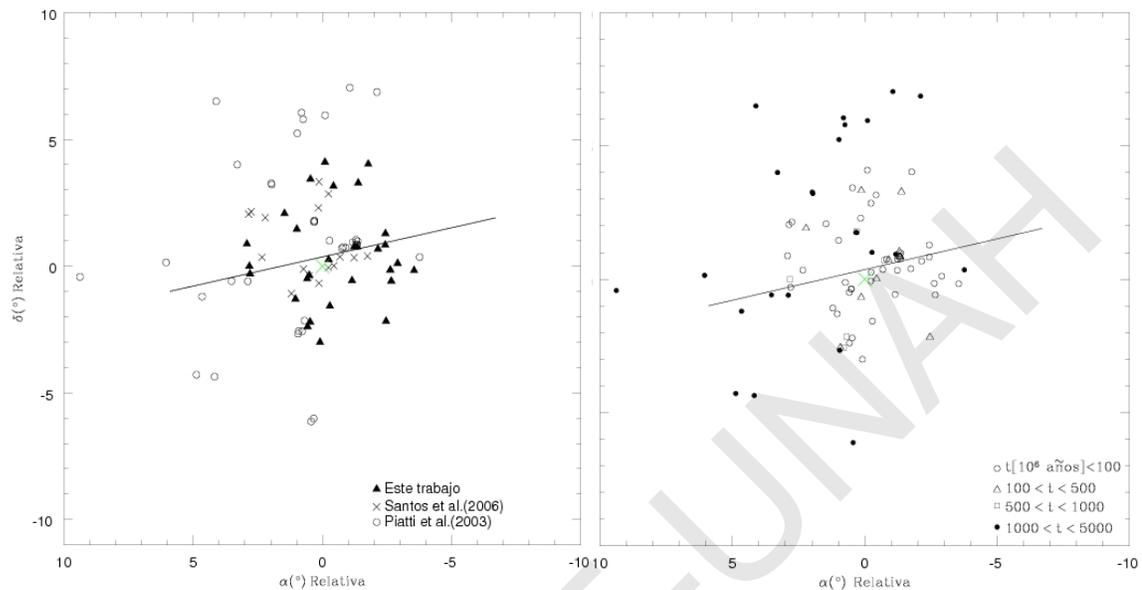


Fig. 4.64: Distribución espacial de 83 cúmulos estelares de la Nube Mayor de Magallanes. Las coordenadas ecuatoriales son relativas al centro de la Nube Mayor de Magallanes que se indica con una cruz, en tanto que la barra también se indica señalada.

Este efecto es aún más claramente visible en la Fig. 4.65 en la cual se ha graficado las distancias deproyectadas en función de la edad. Las distancias deproyectadas se calcularon utilizando una inclinación de 45° entre el plano del cielo y el disco exterior de la Nube Mayor y un ángulo de posición de la línea de los nodos de 7° (Lynga & Westerlund, 1963). Esta tendencia mencionada en la distribución espacial de los cúmulos es enteramente compatible con los resultados encontrados por Smecker-Hane et al. (2002) al examinar la historia de formación estelar en la Nube Mayor en base a observaciones realizadas con el Telescopio Espacial. La tasa de formación estelar parece haber aumentado hace aproximadamente 2000 millones de años tanto en el disco como en la barra, manteniéndose constante en la barra y habiendo disminuido más recientemente en el disco.

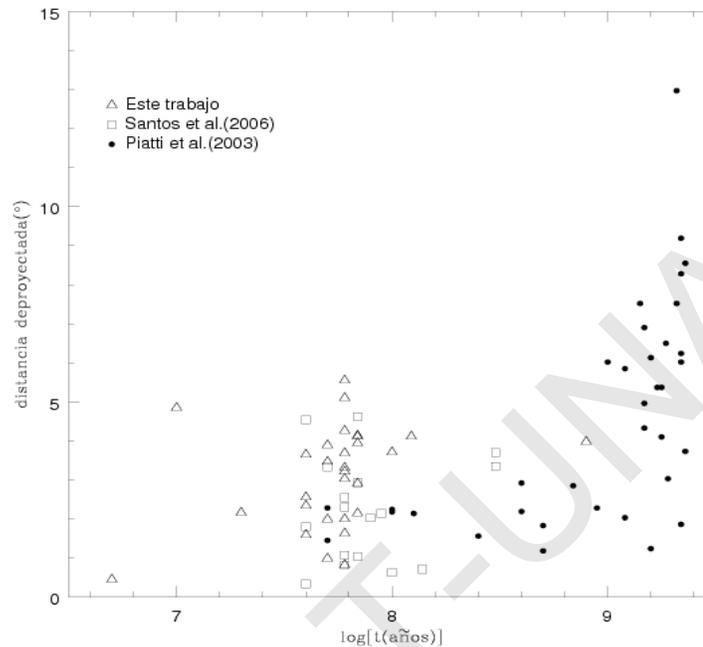


Fig. 4.65: *Distancia deproyectada al centro de la Nube Mayor de Magallanes en función de la edad para la muestra mencionada en la Figura 4.64.*

Bica et al. (1996), usando el mismo telescopio de 2.15 m del CASLEO y mediante fotometría fotoeléctrica, determinaron colores integrados (U-B) y (B-V) de 624 cúmulos y asociaciones estelares de la Nube Mayor. En la Figura. 4.66 se muestra el comportamiento de estos colores en función de la edad para el total de la muestra mencionada anteriormente, donde se advierte que los cúmulos más viejos, tienden a ser más rojos que los cúmulos jóvenes. Se puede notar además que existe una discontinuidad en la distribución de los colores integrados, debida probablemente a la evolución natural de los cúmulos, en el sentido de que los mismos tienden a ser más ricos en metales cuanto más reciente ha sido su formación, y como consecuencia de las épocas en que se redujo la formación de cúmulos estelares (Santos et al. 2006).

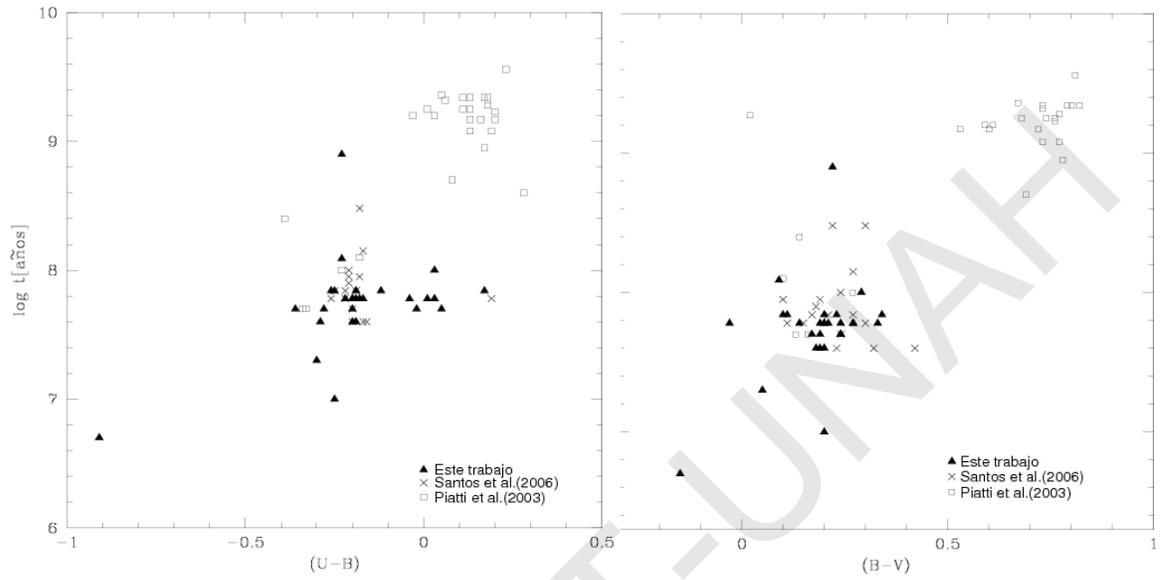


Fig. 4.66: Distribución de la edad con respecto a los colores integrados para los 83 cúmulos antes mencionados.

Tabla 4.2: Edad y enrojecimiento determinados para los 29 cúmulos estelares en Nube Mayor de Magallanes.

N°	Cúmulo	E(B-V) Template	Edad Balmer (x10 ⁶ años)	Edad template (x10 ⁶ años)	Edad adoptada (x10 ⁶ años)
1	SL14	0.18 ± 0.02	10-50	10-20	10 ± 5
2	NGC 1695	0.16 ± 0.02	50-100	50-110	70 ± 10
3	SL 56	0.05 ± 0.02	10-50	12-40	40 ± 20
4	SL 58	0.13 ± 0.03	~50	65	60 ± 10
5	SL79	0.06 ± 0.02	~100	100	100 ± 10
6	SL76	0.06 ± 0.02	50 - 70	12-40	50 ± 30
		0.08 ± 0.02		100	
7	NGC 1732	0.00	50	65	60 ± 10
8	SL 116	0.00	50-70	35-65	60 ± 20
9	SL 168	0.01 ± 0.01	100	35-65	60± 20
10	NGC 1822	0.05 ± 0.02	50-100	100-150	125± 25
11	HS 109	0.08 ± 0.02	50-100	35-65	70± 20
12	SL 234	0.00	50	50	60± 20
13	SL 255	0.10 ± 0.02	10-100	45-75	60± 10
14	NGC 1887	0.05 ± 0.02	30-50	45-75	60± 20
15	SL 364	0.02 ± 0.01	~50	40	40± 10
16	SL 360	0.10± 0.02	< 10	3-6	5± 2
17	SL 386	0.17 ± 0.02	30-50	60	70± 20
18	NGC 1944	0.07 ± 0.02	50-100	45-75	60± 10
19	SL 463	0.1 ± 0.02	10-50	35-65	50± 10
20	SL 477	0.03 ± 0.01	10-50	35-65	40± 20
21	NGC 1972	0.00	30-50	70	60± 10
22	NGC 2000	0.02 ± 0.01	50-100	40	50± 10
23	NGC 1986	0.10 ± 0.02	10-50	45-75	50± 20
24	SL 551	0.27 ± 0.02	10-30	10-20	20± 10
25	SL 566	0.15 ± 0.02	10-50	45-75	50± 10
26	NGC 2053	0.08 ± 0.02	~50	50-110	70± 30
27	SL 763	0.04	50-100	45-75	70± 20
28	NGC 2137	0.05 ± 0.02	10000	1000	800± 200
29	NGC 2140	0.00	50-100	50-110	60± 20

4.4 Síntesis

En este capítulo hemos presentado un estudio detallado de 29 cúmulos estelares pertenecientes a la Nube Mayor de Magallanes. Mediante espectros integrados se determinaron edades y enrojecimientos para la muestra, en un amplio rango de valores, con edades que oscilan entre los 5×10^6 años (SL 360) y los 800×10^6 años (NGC 2137). El 65% de la muestra los 350×10^6 años (IC 1641). De los 29 cúmulos estudiados, 17 de ellos no presentan estudios previos, por lo que los parámetros acá presentados son los primeros en su especie. Con todos los espectros obtenidos, para los 29 cúmulos estelares de la Nube Mayor, se conformará e incrementará, sin lugar a dudas, una base de espectros patrones que represente la metalicidad típica de la Nube Mayor de Magallanes.

CONCLUSIONES

En la presente investigación realizamos un estudio para determinar la edad y el enrojecimiento de 42 cúmulos estelares en las Nubes de Magallanes, 13 en la Nube Menor y 29 en la Nube Mayor, aplicando el método de ajuste de *template* y el método de los anchos equivalentes, a cada uno de los cúmulos estelares de la muestra. Resumiendo los resultados encontrados de la siguiente manera:

- Para todos los cúmulos estudiados en este trabajo, se determinaron edades y enrojecimiento interestelar usando los anchos equivalentes (líneas de la serie de *Balmer* y tres líneas metálicas) y comparando los espectros observados con espectros templates con edades bien conocidas.
- Para la Nube Menor de los 13 cúmulos estudiados 8 resultaron ser jóvenes con edades comprendidas entre 4×10^6 y 80×10^6 años, 2 cúmulos (NGC 256 e IC1611) tienen edad de aproximadamente 100 millones de años y 3 de ellos (Kron 34, IC1626 e IC1641) pueden considerarse de edad intermedia.
- Los excesos de color E(B-V) derivados espectrocópicamente para los cúmulos observados en la Nube Menor varían desde 0.0 en Bruck 50 y Bruck 164 hasta 0.12 en Wg1 y L 95 para la Nube Menor, estos cúmulos se encuentran distribuidos aleatoriamente con respecto a la barra de la Nube, por lo que parece ser que no existe una relación entre el enrojecimiento derivado para estos cúmulos con la edad encontrada.
- De los 29 cúmulos observados para la Nube Mayor, 26 resultaron ser jóvenes con edades comprendidas entre 5 y 70 millones de años, 2 objetos (SL 79 y NGC 1822) son moderadamente jóvenes con una edad de ~ 100 millones de años y sólo uno (NGC 2137) podría considerarse de edad intermedia.

- Los excesos de color $E(B-V)$ derivados espectroscópicamente oscilan entre ~ 0.0 (NGC 1732) y ~ 0.18 magnitudes (SL 14). SL 551 presenta un exceso de color $E(B-V)$ atípicamente elevado, el cual supera la media en 0.10 magnitudes. Al igual que para los cúmulos de la Nube Menor, no encontramos relación alguna entre el enrojecimiento de estos y la edad determinada.
- Existe una clara tendencia general de los cúmulos más viejos de la Nube Mayor a ubicarse en las regiones del disco exterior, mientras que los más jóvenes se aglutinan en las proximidades de la barra. Este efecto es aún más visible cuando se grafican las distancias deproyectadas en función de la edad.
- En la Nube Mayor la tasa de formación estelar parece haber aumentado hace aproximadamente 2000 millones de años tanto en el disco como en la barra, manteniéndose constante en la barra y habiendo disminuido más recientemente en el disco.
- Para los cúmulos estelares de la Nube Mayor de Magallanes se advierte una notable discontinuidad en la distribución de los colores integrados, debida probablemente a la evolución natural de los cúmulos, en el sentido de que los mismos tienden a ser más ricos en metales cuanto más reciente ha sido su formación.
- Parte de los resultados presentados y analizados en este trabajo han sido presentados oralmente y como poster en el XI Curso Centroamericano de Astronomía y Astrofísica (CURCAA), Managua-Nicaragua 2007, y en la XII Reunión Latinoamericana de Astronomía (Isla Margarita, Venezuela). Además se han publicado en la edición de 2006 del Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía, y también serán publicados en la edición de 2007 de dicho boletín (en prensa) y en la Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica.

Los resultados obtenidos en este trabajo representan otro paso más hacia adelante en la interpretación de estos espectros integrados. En la actualidad disponemos de muy pocas bases de espectros templates, las cuales no tienen un amplio rango de edades. Estos espectros obtenidos, al igual que los espectros integrados obtenidos tanto para la Nube Mayor como para la Nube Menor de Magallanes, serán parte una base de espectros patrones representativo de la metalicidad típica de estas dos galaxias, esto permitirá incrementar las bases de espectros templates. Dichas librerías serán particularmente útiles para el estudio de cúmulos estelares en galaxias enanas más distantes. En futuro no muy lejano aumentaremos la muestra de cúmulos estelares de estas dos Nubes, para ser observados con otros telescopios, y así contribuir cada vez más a ampliar las bases de espectros patrones ya existentes o conformar una nueva.

ANEXOS

Anexo A1

Templates para síntesis de población

Considerando la evolución con la edad de las líneas de absorción y emisión en el azul de los cúmulos estelares Bica et al (1990) los agruparon en 8 clases, con el fin de generar templates para la síntesis de población.

(1) Group	(2) Members NGC	(3) Age (Myr)	(4) P 17 8467	(5) Ca II-8498 + P 16-8502	(6) Ca II-8542 + P 15-8545	(7) P 14 8598	(8) Ca II-8662 + P 13-8665	(9) P 12 8751
Y _A , LMC	1767 2003 2006 SL 538 2011	5-7	1.1	1.9	4.1	1.7	2.9	1.5
Y _B , LMC	1805 1994 2002 2004 2098 2100	7-12	0.9	2.2	5.0	1.2	4.0	1.2
Y _C , LMC	1711 1735 1818 1847 1850 1854	12-35	0.9	1.8	3.6	1.3	3.5	2.2
Y _D , LMC	1774 1782 1903 1951 2157 2164 2214	35-50	1.0	1.7	4.4	1.8	4.5	1.3
Y _E , LMC	1755 2025 2041 2058 2065 2136	50-85	1.0	2.1	4.5	1.5	3.1	1.8
Y _F , LMC	1866 2031 2134	85-130	1.0	2.6	4.2	2.2	3.8	1.2
Y _G , LMC	1831 1856	130-250	1.4	1.9	4.3	2.0	4.8	2.0
Y _H , LMC	1868	250-750	0.7	1.8	3.3	1.4	3.7	1.2
Y _B , SMC	299	12	0.9	2.1	5.6	1.1	3.2	1.2
Y _C , SMC	330 376	13-20	1.1	1.8	4.6	1.8	3.1	2.3

Anexo A2

Rango de edades de los templates creados por Santos et al (1995)

Distintos grupos de *templates* definidos por Santos et al. (1995), en la cual podemos observar que el rango de edades de estos templates abarca edades que oscilan entre 2×10^6 y 1.7×10^8 años.

Group	Members NGC	Age Range (Myr)
H II _y .LMC	IC 2105 1714 IC 2111 1738 IC 2138 1936 1949 2032 2035	2-3
H II _o .LMC	1743 HT 4 1921w 1935 5BCPGD1	3-5
H II _y WN.LMC	2070 (30 Dor)	2-3
H II+CL+SMB.LMC	N 63A	3-5
YA.LMC	Rob 1 1987 HS 314 1984 SL 538 KMHK 1074 SL 588 2102	3-6
YA_SG.LMC	1731 SL 82 1970 SL 492 SL 601 2011	3-5
YA_WC.LMC	HD 32228	3-6
YA_SG/WC.LMC	SL 360	3-6
YA_EBV.LMC	H89-267	4-5
YA_WN.LMC	HDE 269828	3-4
YAB_SG/WN.LMC	ET-a	5-8
YB.LMC	KMHK 212 1767 1805 2002 2006 HS 385 2008 BRHT 116 M-OB4 2091 2098 2100	6-9
YBA_Ba.LMC	1993 1994	4-8
YC.LMC	1711 1736 1772 1792 1919 1847 1951	12-40
YC_SG.LMC	BRHT 16b 2096	10-20
YDE.LMC	1755 1774 SL 153 1850 1963 2025 2136 2159 2164 2214	35-66
YET.LMC	2041 2058 2134 2156	60-110
YG.LMC	1872	110-170
E1.LMC	HDE 268728	4.5-6.5
E2.LMC	2021 HCDSP 8	3-5
E3.LMC	IT-ζ IT-γ IT-δ	4-8
E4.LMC	SL 639 2092	6-12
E5.LMC	2147	6-20
E6.LMC	1921e 1854	20-40
H II _y .SMC	IC 1644	2.5-3
H II _o .SMC	248a 248e 456 N83A	3-3.5
YA.SMC	K 50	5-8
YA_SG.SMC	5k 137 5k 158	3-5
YB.SMC	299	8-12
YD+.SMC	K 34	6-10
YC.SMC	L 36 330 376 706	10-20

Anexo A3

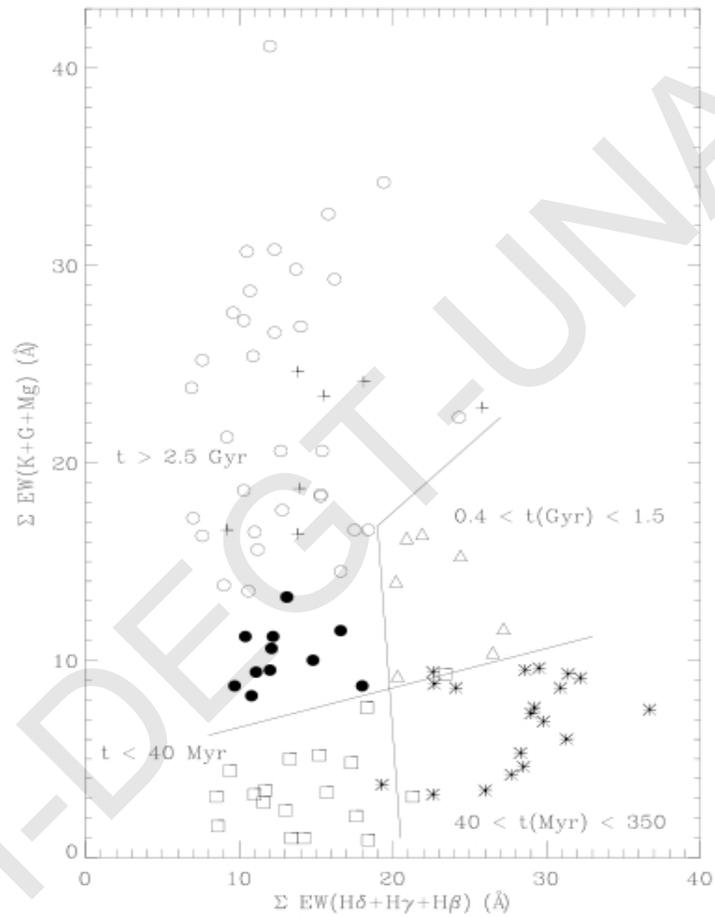
Espectros templates para diferentes grupos de edad

Se presentan 20 templates resultantes, correspondientes a edades de cúmulos abiertos que oscilan entre los $2-4 \times 10^6$ años, esta base fue determinada por Piatti et al. 2002.

Name	Age range (Myr)	Group members
Ya1	2-4	NGC 3293, Pismis 17, NGC 6611
Ya2		" "
Ya3		" "
Ya1.WR		Westerlund 2, NGC 3293, Pismis 17, NGC 3603, NGC 6611
Ya2.WR		" "
Ya3.WR		" "
Yb1	5-10	vdB RN 80, Hogg 11, NGC 5606
Yb2		" "
Yb3		" "
Yb1.WR.SC		vdB-RN 80, Hogg 11, NGC 4755, NGC 5606, Westerlund 1, NGC 6231
Yb2.WR.SC		" "
Yb3.WR.SC		" "
Yc	20	Hogg 15, Ruprecht 119, B11 217, NGC 6318, B11 245
Yd	40	Pismis 22, NGC 6178, NGC 6216
Ye	45-75	NGC 2368, Ruprecht 83, Hogg 3, Bochum 12, Ruprecht 130
Yf	100-150	Haffner 7, ESO 429-SC 13, BH 87, BH 132, Ruprecht 120, Ruprecht 144
Yg	200-350	Melotte 105, NGC 5999, NGC 6031, NGC 6520, NGC 6603, NGC 6705, NGC 6756
Yh	500	Ruprecht 115, Lyngå 11
Ia	1×10^3	NGC 2635, NGC 2660, LKS 2, Pismis 18
Ib	$3-4 \times 10^3$	NGC 2158, Berkeley 75, ESO 93-SC 8, NGC 6253

Anexo A4

Diagrama diagnóstico para determinar edades de cúmulos estelares Galácticos y extragalácticos. Santos & Piatti (2004).



BIBLIOGRAFÍA

- Ahumada, A.V., Clariá, J.J., Bica, E., Dutra, C.M. 2002, *A&A* **393**, 855.
- Ahumada, A.V., Clariá, J.J., Bica, E. 2007, *IAUS* **235**, 67
- Alcaino, Gonzalo; Liller, William. 1987, *ApJ* **319**, 304.
- Bhatia, R. K. 1992 *MmSAI* **63**, 141.
- Bica, E.; Alloin, D. 1986a, *A&A* **162**, 21.
- Bica, E., Alloin, D. 1986b, *A&AS* **66**, 171.
- Bica, E.; Alloin, D. 1987, *A&A* **186**, 49.
- Bica, E., 1988, *A&A* **195**, 76.
- Bica, E.; Santos, J.F.C., Jr.; Alloin, D. 1990, *A&A* **235**, 103.
- Bica, E.; Claria, J. J.; Dottori, H. 1992, *AJ* **103**, 1859.
- Bica, E., Schmit, H.R., Dutra, C.M., Oliveira, H.L. 1999, *AJ* **117**, 238.
- Bica, Eduardo L. D.; Schmitt, Henrique R. 1995, *ApJS* **101**, 41.
- Bica, E., Clariá, J.J., Dottori, H., Santos, J.F.C., Jr., Piatti, A. E. 1996, *ApJS* **102**, 57.
- Bica, E.; Dutra, C. M. 2000, *AJ* **119**, 1214.
- Bruck, M. T. 1975, *MNRAS* **173**, 327.
- Bruck, M.T. 1976, *Star clusters in the Small Magellanic Cloud, Occasional reports of the Royal Obs., Edinburg*, No.1.
- Burstein, D; Heiles, C. 1982, *AJ* **87**, 1165.
- Dean, J. F.; Warren, P. R.; Cousins, A. W. J. 1978, *MNRAS* **183**, 569.
- Cassatella, A.; Barbero, J.; Brocato, E.; Castellani, V.; Geyer, E. H. 1996, *A&A* **306**, 125.
- Chiosi, E., Vallenari, A., Held, E.V., Rizzi, L., Moretti, A. 2006, *A&A* **452**, 179.
- Chiosi, E., Vallenari, A. 2007, *A&A* **466**, 165.
- Da Costa, G. S. 1991, *The Magellanic Clouds, IAU Symp.* No. 148 (eds. R. Haynes, D. Milne; Kluwer, Dordrecht), p. 183.
- de Oliveira, M. R.; Dottori, H.; Bica, E. 1998, *MNRAS* **295**, 921.

- de Oliveira, M.R., Dutra, C.M., Bica, E., Dottori, H. 2000, A&AS **146**, 57.
- Dieball, A., Mueller, H., Grebel, E.K. 2002, A&A **391**, 547.
- Dirsch, B.; Richtler, T.; Gieren, W. P.; Hilker, M. 2000, A&A **360**, 133.
- Dutra, C.M., Bica, E., Clariá, J.J., Piatti, A.E. 1999, MNRAS **305**, 373.
- Elson, R.A.W.; Fall, S.M. 1985 ApJ **299**, 211.
- González R.A., Liu, M.C., Bruzual, A.G. 2004, ApJ **611**, 270
- Hilker, M.; Richtler, T.; Stein, D. 1995, A&A **299**, 37.
- Hodge, Paul. 1988c, PASP **100**, 1051.
- Hodge, P. W.; Sexton, J. A. 1966, AJ **71**, 363.
- Hodge, P. W.; Wright, F. W. 1974, AJ **79**, 858.
- Irwin, M. J. 1991, IAU Symp. No. 148 (eds. R.F Haynes, D. Milne; Kluwer, Dordrecht), p.453.
- Kontizas, M.; Morgan, D. H.; Hatzidimitriou, D.; Kontizas, E. 1990, A&AS **84**, 527.
- Kron, Gerald E. 1956, PASP **68**, 125.
- Lauberts, A. 1982ESO...C.....0L.
- Lindsay, E. M. 1958, MNRAS **118**, 172.
- Lynga, G. , Westerlund, B.E. 1963, MNRAS **127**, 311.
- Massey, P. 2002, ApJS **141**, 81.
- Olszewski, Edward W.; Schommer, Robert A.; Suntzeff, Nicholas B.; Harris, Hugh C. 1991, AJ **101**, 515.
- Persson, S. E.; Aaronson, M.; Cohen, J. G.; Frogel, J. A.; Matthews, K. 1983, ApJ **266**, 105
- Piatti, Andrés E.; Bica, Eduardo; Clariá, Juan J.; Santos, João F. C.; Ahumada, Andrea V. 2002 MNRAS **335**, 233.
- Piatti, A.E., Clariá, J.J., 2002, *Principios básicos, funcionamiento y propiedades del detector CCD*, Nueva edición, Secretaria de Extensión Universitaria, Univ. Nac. de Cordoba.
- Piatti, Andrés E.; Bica, Eduardo; Geisler, Doug; Clariá, Juan J. 2003, MNRAS **344**, 965.
- Piatti, A.E.; Santos, Jr., J. F.C.; Clariá, J.J.; Bica, E.; Ahumada, A.V.; Parisi, M.C. 2005,

- A&A **440**, 111.
- Pietrzynski, G., Udalski, A. 1999, *AcA* **49**, 157.
- Pietrzynski, G., Udalski, A. 2000 *acta Astron.*, 50, **337-354**.
- Pietrzynski, G., Udalski, A. 2000 *acta Astron.*, 50, **355-357**.
- Pietrzynski, G., Udalski, A., Kubiak, M., Szymanski, M., Wozniak P. and Zebrun, K. 1999 *acta Astron.*, 49, **521-542**.
- Rafelski, M., Zaritsky, D. 2005, *AJ* **129**, 2701.
- Santos, Jr., J.F.C., Bica, E., Clariá, J.J., Piatti, A.E., Girardi, L.A., Dottori, H. 1995, *MNRAS* **276**, 1155.
- Santos, Jr., J.F. C., Piatti, A. E. 2004, *A&A* **428**, 79.
- Santos, J. F. C., Jr.; Clariá, J. J.; Ahumada, A. V.; Bica, E.; Piatti, A. E.; Parisi, M. C. 2006, *A&A* **448**, 1023.
- Searle, L.; Wilkinson, A.; Bagnuolo, W. G. 1980, *ApJ* **239**, 803.
- Seaton, M. J. 1979, *MNRAS* **187**, 73.
- Shapley, H.; Lindsay, E. M. 1963, *IrAJ* **6**, 74.
- Smecker-Hane, Tammy A.; Cole, Andrew A.; Gallagher, John S., III; Stetson, Peter B. 2002, *ApJ* **566**, 239.
- Stone, R., Baldwin, J. 1983, *MNRAS* **204**, 347.
- Talavera, M. L.; Ahumada, A. V.; Clariá, J. J.; Parisi, M. C.; Santos, J. F. C., Jr.; Bica, E. 2006, *BAAA* **49**, 311 .
- Talavera, M.L.; Ahumada, A.V.; Claria, J.J.; Parisi, M.C.; Santos, J.F.C, Jr.; Bica, E. 2007 *BAAA* 50. (en prensa).
- Tsvetkov, T.G. 1989, *Astrophys. Space Sci.*, 151, **47-71**.
- Vallenari, A., Betttoni, D. and Chiosi, C. 1998, *A&A* **331**, 506.
- van den Bergh, S. 1981, *A&A* **46**, 79.
- Westerlund, B. E. 1997, "The Magellanic Clouds", *Cambridge Astrophysics Series 29*, Cambridge Univ. Press **117**, 317.
- Westerlund, B.E., Glaspey, J. 1971, *A&A* **10**, 1.