

ESTUDIO FOTOMÉTRICO DE MESSIER 13

III. OBTENCIÓN DE MEDICIONES MULTIBANDA BVI_c

FRANCISCO VIOLAT BORDONAU

Asesores Astronómicos Cacereños, fviolat@yahoo.es

Resumen. En este tercer estudio dedicado a la fotometría CCD del cúmulo globular Messier 13 (NGC 6205) describimos el equipo (telescopio, filtros, curvas de transmisión, CCD, etc.) utilizado, en la campaña del año 2013, para adquirir imágenes CCD filtradas a partir de las cuales hemos obtenido mediciones fotométricas multibanda BVI_c de 635 estrellas y de la mayoría de sus variables. Incluimos también, como adelanto, las mediciones multibanda de las primeras 114 estrellas de nuestro *survey* fotométrico (que mostraremos completo en un publicación futura) así como el diagrama H–R del tipo "color-magnitud" obtenido de estos datos.

En un trabajo anterior (Violat, 2014) presentamos dos secuencias fotométricas multibanda publicadas por Osborn (2000) y Sandquist *et al.* (2010): la primera de ella es que hemos venido utilizando desde la primavera de 2001 para efectuar trabajos fotométricos (obtener curvas de luz, confirmar variables, descartar sospechosas, etc.), la segunda es la que hemos comenzado a emplear durante la campaña fotométrica del año 2013 con un doble motivo:

1) por un lado obtener las curvas de luz de sus estrellas variables (Gigantes Rojas, Cefeidas y RR Lyrae) así como sospechosas de variabilidad, y

2) por el otro obtener fotometría BVI_c de un *survey* de 635 estrellas del cúmulo (repartidas en cinco sectores distintos y dos grupos: principales y secundarias), con la idea de conocer no sólo las magnitudes de todas ellas en cada banda, sino los índices de color $B - V$, $B - I_c$ y $V - I_c$ así como elaborar diagramas color-magnitud de los diferentes sectores estudiados.

En este tercer trabajo vamos a presentar el material empleado en esta importante campaña fotométrica, la primera que realizamos de este género, así como las técnicas utilizadas para obtener las numerosas mediciones que publicaremos en un trabajo futuro.

1. SECUENCIA FOTOMÉTRICA DE SANDQUIST *ET AL.* (2010).

En nuestro anterior trabajo ya analizamos el estudio fotométrico del cúmulo realizado por Sandquist y colaboradores en 2010, que tabulaba las magnitudes B , V e I_c (con una precisión de tres decimales) de nada menos que 641 estrellas de la Rama de las Gigantes Rojas, 84 de la Rama Asintótica y 792 de la Rama Horizontal; también comentamos que a partir de ella logramos crear una secuencia de estrellas que cumpliesen tres requisitos imprescindibles.

a) poder ser localizadas sin error sobre nuestras imágenes, para lo cual sólo elegimos estrellas con número Ludendorff (Ludendorff, 1905)

b) situarse lejos del núcleo pero dentro del campo cubierto por el chip, y

c) aparecer aisladas de otras estrellas vecinas.

Tras identificar casi sesenta estrellas elaboramos una lista de treinta y cuatro cuyas magnitudes oscilaban entre la 12.175 V y la 17.996 V , de las cuales elegimos finalmente diecisiete

(hasta la magnitud 17.001 V), que bautizamos con letras mayúsculas –de la A a la Q– para identificarlas y rotularlas sobre una de nuestras imágenes CCD filtradas, como ya mostramos en la Figura 5 de nuestro trabajo anterior.

2. EQUIPO UTILIZADO.

Como hicimos en todas las campañas fotométricas anteriores hemos utilizado un telescopio catadióptrico de 203 mm de diámetro y 2000 mm de focal, sobre montura ecuatorial alemana, dotado de seguimiento automático con un telescopio independiente (refractor acromático de 75 mm de diámetro, 500 mm de focal y CCD); en el foco primario se instaló una CCD de la marca Starlight Xpress modelo SXVF-M7, de 752 x 580 píxeles de 8.5 micras, junto con una rueda portafiltros, de cinco posiciones, ocupadas por los filtros *Astrodon Photometrics* listados en la Tabla 1:

TABLA 1. FILTROS FOTOMÉTRICOS EMPLEADOS

POSICIÓN	FILTRO	SISTEMA
1	B	Johnson
2	V	Johnson
3	R_c	Cousins
4	I_c	Cousins
5	No	

en la tabla comprobamos que el orden de los filtros es el más lógico: comenzando por las longitudes de onda más cortas capturadas por el chip (el cual no trabaja por debajo de los 350 nm), subiendo hacia las medianas, las más largas y finalizando en el infrarrojo cercano, en torno a los 900 nm; la última posición está libre para tomar imágenes sin filtrar en luz integral (que sirvan de comparación) o, si se desea, añadir cualquier otro filtro ($H\alpha$, $H\beta$, OIII, etc.). Debido a la respuesta espectral propia del chip empleado las curvas de transmisión reales han sido distintas a las teóricas de los filtros utilizados, como podemos comprobar en la Figura 1:

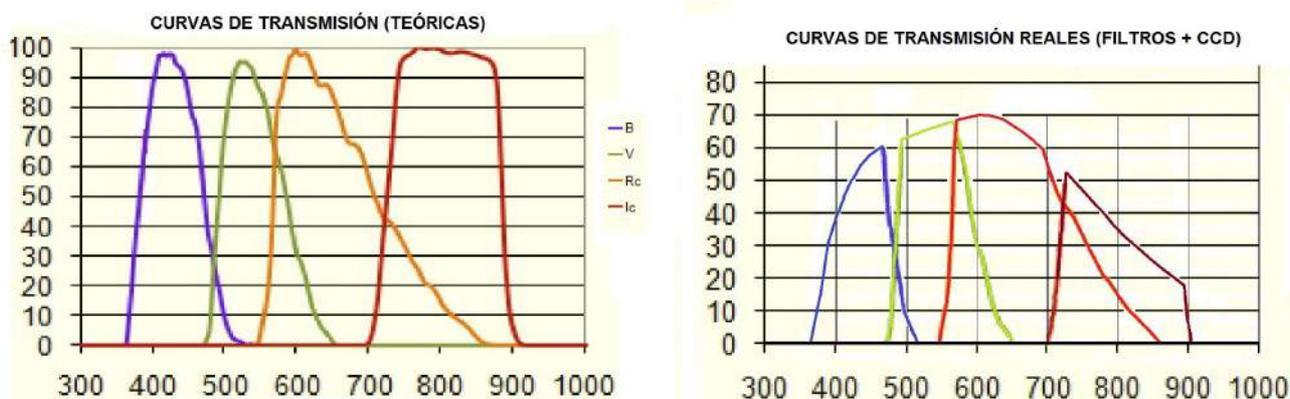


Figura 1. Curvas de transmisión de los filtros empleados (izquierda) y curvas reales de transmisión de los filtros B , V , R_c e I_c utilizados en este trabajo: la máxima sensibilidad ($> 60\%$) está situada en la zona verde y roja.

en ella notamos de inmediato que la máxima transmisión (por encima del 60%) está localizada en la zona verde y roja del espectro, alcanzando un valor inferior tanto en el azul como en el infrarrojo cercano. Al capturar imágenes del cúmulo con un filtro u otro el aspecto del mismo cambia dramáticamente debido a los distintos tipos espectrales y colores de sus estrellas componentes: de este modo en la Figura 2 podemos ver que el cúmulo es rico en débiles estrellas azules y blancas (visibles en las zonas recuadradas, imagen de la izquierda) que resultan invisibles en las imágenes infrarrojas (a la derecha); la estrella más brillante con luz azul resulta ser la *blue straggler* denominada L222 (marcada con su número Ludendorff), de magnitud 12.934 B , apenas visible con magnitud 13.303 I_c en la imagen infrarroja al ser un fuerte emisor de luz ultravioleta, violeta y azul.

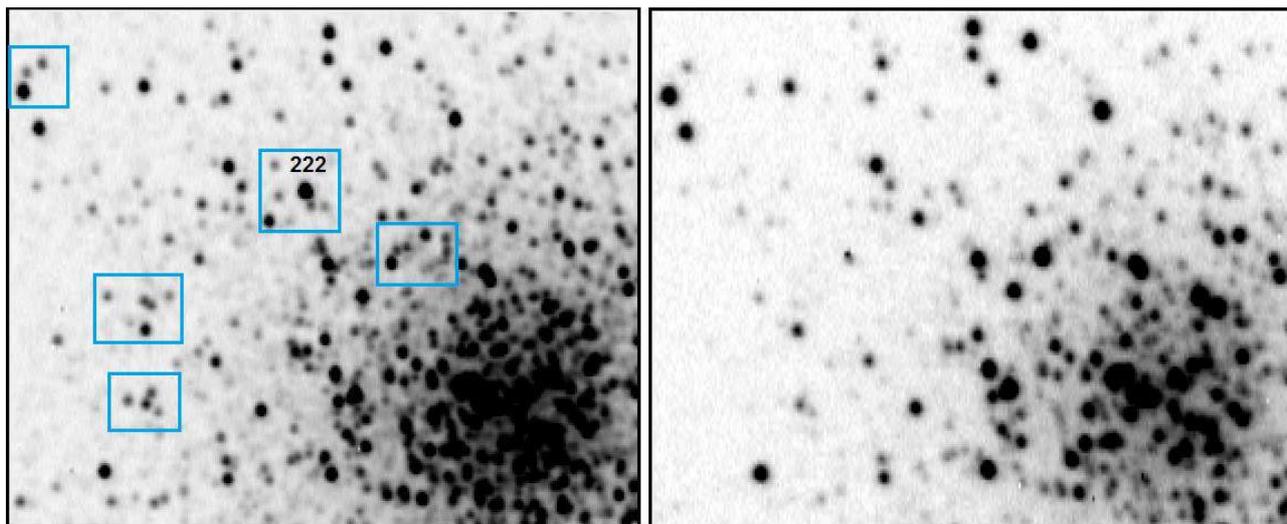


Figura 2. Distintos aspectos de la zona Suroeste del cúmulo capturada a través de los filtros B (izquierda) e I_c (derecha): los cuadrados marcan estrellas azules y blancas no visibles en el infrarrojo; L222 es una estrella de tipo *blue straggler* fuertemente emisora de luz ultravioleta, violeta y azul. Norte abajo y Este a la derecha.

3. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.

Hemos tomado imágenes durante 42 noches distintas entre los días 30 de junio y 30 de octubre de 2013, habiendo capturado fotografías con distintos filtros en diferentes noches y grupos que reflejamos en la Tabla 2:

TABLA 2. IMÁGENES FILTRADAS OBTENIDAS

FECHA	B	V	I_c
26-07	3	7	3
30-07	5	5	
29-08		6	5
01-09	7	9	
10-09	10		
TOTAL	25	27	8

al examinamos la tabla notamos que dedicamos cuatro noches distintas a tomar imágenes, dentro de la misma sesión¹, con dos e incluso tres filtros distintos: sólo una noche (la del 10 de septiembre) la dedicamos por entero a la captura de imágenes en banda B para disponer de fotografías tan profundas y tan nítidas como nos fuese posible, de cara a la obtención de fotometría y astrometría en esa banda (no olvidemos que utilizando las estrellas situadas en la Rama Horizontal, especialmente las variables de tipo RR Lyrae cuya magnitud absoluta M_v es próxima a +0.6, podemos determinar el módulo de distancia $m - M$ del cúmulo). En total obtuvimos 25 imágenes en banda B , 27 en V^2 y sólo 8 en I_c debido a que las que capturamos en dos noches eran lo suficientemente buenas como para no necesitar adquirir ninguna más. (También tomamos hasta 13 espectros distintos durante los días 15 y 16 de agosto, que nos servirían para identificar los tipos espectrales de algunas de sus estrellas componentes y que presentaremos en un trabajo futuro.) Todas las imágenes fueron tratadas, como es habitual en este tipo de trabajos, de *bias*, *darks* maestros y *flats* maestros resultantes de promediar, respectivamente, 16 *darks* y 16 *flats*.

4. OBTENCIÓN DE MEDICIONES FOTOMÉTRICAS.

Las imágenes ya filtradas y procesadas, listas para utilizar, fueron abiertas una a una con el programa *Astroart* (de MSB Software) y calibradas con la secuencia de diecisiete estrellas –A a Q– de Sandquist: el programa, utilizando las magnitudes de las estrellas de calibración, es capaz de localizar todas las estrellas visibles en cada imagen que superen unos ciertos límites (tanto en diámetro aparente –FWHM– como en relación señal/ruido, para descartar rayos cósmicos o píxeles calientes) y calcular la magnitud de cada una con un cierto error, tanto más reducido cuanto mayor sea la relación señal/ruido (S/R) de cada una de ellas; de este modo, por ejemplo, al abrir una de nuestras imágenes filtradas en banda V notamos que una estrella de magnitud 18.639 V tiene una relación S/R igual a 6.2 (Figura 3, parte superior), por lo tanto el error en la magnitud calculada por el programa es igual a ± 0.16 magnitudes. Naturalmente nos interesa trabajar con una relación S/N lo más elevada posible, por ejemplo 25: de este modo el error en el cálculo de la magnitud se reduce a sólo 0.04 magnitudes lo cual es ya aceptable para nuestro estudio; la mayoría de las estrellas brillantes y moderadamente brillantes se han encontrado con un valor S/N > 100 por lo cual el error en todos los casos ha sido igual o inferior a 0.01 magnitudes.

Astroart es capaz de realizar simultáneamente, si se desea, una completa calibración astrométrica y otra fotométrica: para ello sólo se requiere conocer las posiciones y magnitudes exactas (con una precisión de hasta tres decimales en el caso de la fotometría) de las estrellas de calibración; en nuestro caso sólo se efectuó la calibración fotométrica ya que la astrométrica se realizó previamente: sus resultados los presentamos en un anterior trabajo dedicado a la detección de las estrellas de campo situadas en la zona del cúmulo (Violat, 2013).

El programa presenta sus datos en una ventana que podemos situar encima de la imagen, tal y como mostramos en la Figura 3, la cual presenta las magnitudes para tres de las 811 estrellas detectadas; la información contenida en las distintas columnas es la siguiente: número de la estrella, posición en el eje X, posición en el eje Y, valor ADU en unidades analógicas-digitales, magnitud (en este caso en banda V), anchura (FWHM) en el eje X, en el eje Y y relación señal/ruido (S/R). A medida que movamos el puntero sobre cada una de las estrellas detectadas (que aparecen dentro de un cuadrado de color verde) el programa nos muestra en la ventana superior, en una línea resaltada, los datos calculados para esa estrella en concreto: de este modo, moviendo el puntero sobre cada estrella, vamos obteniendo y anotando la magnitud de todas ellas.

- 1 Es decir: prácticamente con la misma altura cenital, transparencia atmosférica, condiciones meteorológicas y fondo de cielo iguales en todas ellas, lo que las convirtieron en grupos de imágenes idénticas dentro de la misma noche.
- 2 Naturalmente disponemos de abundantes imágenes en banda V , ya que trabajamos durante más de cuarenta noches distintas con la intención de obtener curvas de luz de las estrellas variables del cúmulo.

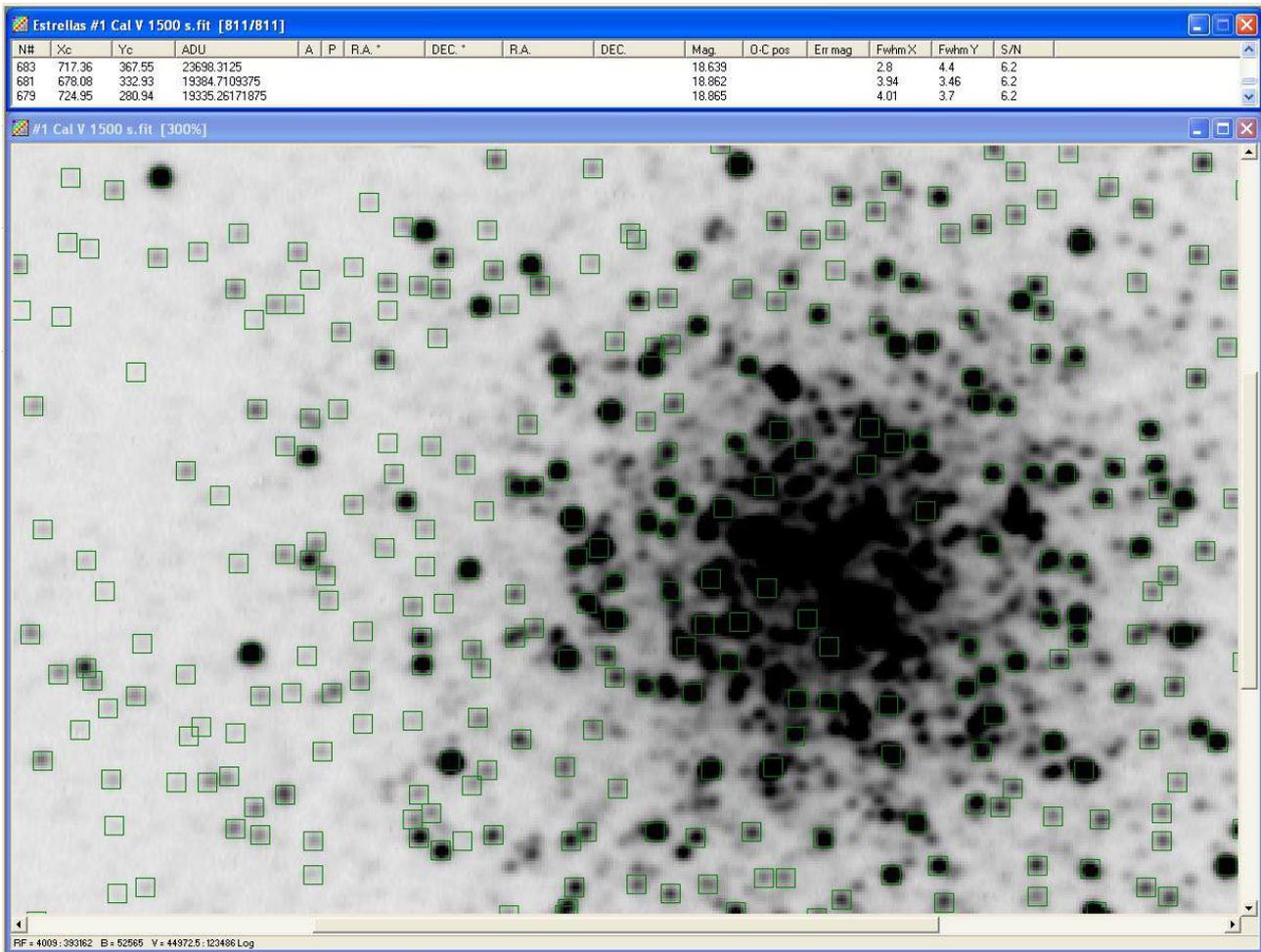


Figura 3. Pantalla mostrada por el programa *Astroart* una vez calibrada una imagen capturada en banda V : en la parte superior aparece la información, magnitudes V y valores fotométricos (FWHM y relación S/R) de cada estrella.

Una de las ventajas de *Astroart* sobre otros programas similares es que podemos determinar las posiciones y magnitudes de las estrellas incluso en campos muy apiñados, como ocurre en el caso de un cúmulo globular: hemos comprobado que, trabajando a foco primario (2000 mm), el sistema óptico logra una resolución de $\sim 0.90''/\text{píxel}$ por lo que es capaz de resolver posiciones y magnitudes de estrellas dobles y múltiples con una separación mínima de $3''$ a $4''$ según la magnitud de las mismas y la turbulencia de la noche.

5. FOTOMETRÍA BVI_c DE 114 ESTRELLAS DEL CÚMULO.

A partir de las imágenes filtradas y calibradas hemos elaborado un *survey* propio y obtenido mediciones fotométricas BVI_c de 635 estrellas de las cuales 520 eran principales y otras 115 secundarias: aunque todas serán presentadas detalladamente en un completo trabajo futuro queremos adelantar ahora los valores que hemos obtenido de 114 de ellas, pertenecientes a los Sectores A y B (zona NW y NW del cúmulo, Figura 8 de nuestro anterior trabajo), lo que realizamos en la Tabla 3; la misma contiene la siguiente información: número de la estrella en este *survey*, magnitud B , magnitud V y magnitud I_c .

TABLA 3. MAGNITUDES BVI_c DE 114 ESTRELLAS

N°	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>I_c</i>	N°	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>I_c</i>	N°	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>I_c</i>
1	15.466	14.616	13.432	2	16.082	15.470	---	3	15.978	15.285	14.280
4	14.569	13.611	12.453	5	15.392	15.569	---	6	16.407	16.772	---
7	15.803	14.964	13.867	8	17.085	16.603	15.497	9	16.554	16.341	---
10	16.012	15.145	13.904	11	15.226	15.184	15.331	12	14.186	13.850	13.123
13	15.609	14.891	13.610	14	15.387	15.454	14.639	15	15.142	15.133	14.990
16	15.334	15.470	---	17	15.364	15.667	15.287	18	15.172	14.094	12.884
19	16.281	14.918	14.022	20	15.338	14.928	14.776	21	16.630	15.996	14.874
22	14.453	13.430	12.302	23	15.945	15.414	---	24	16.162	15.935	15.593
25	15.642	15.539	14.629	26	15.676	14.800	13.572	27	15.838	15.648	---
28	15.744	15.048	14.059	29	16.045	15.825	14.424	30	17.224	16.659	15.034
31	16.856	16.452	---	32	16.397	15.535	14.570	33	16.508	15.996	15.122
34	16.767	16.287	15.526	35	16.147	15.581	14.324	36	16.247	15.446	14.588
37	17.424	16.816	15.186	38	15.947	15.581	15.463	39	15.245	14.414	13.364
40	16.135	15.487	14.255	41	15.535	14.698	---	42	15.744	15.113	---
43	15.456	14.685	13.616	44	14.766	14.083	13.157	45	15.578	14.419	12.923
46	15.522	15.703	14.358	47	16.667	15.527	14.591	48	16.853	15.953	14.783
49	14.550	13.542	12.379	50	14.612	13.886	12.772	51	15.392	15.439	15.448
52	14.178	13.195	12.080	53	15.598	14.778	13.703	54	17.498	16.580	15.184
55	16.369	17.097	---	56	16.282	15.876	---	57	14.010	12.804	11.600
58	15.779	16.175	16.069	59	15.531	14.630	13.615	60	15.486	15.668	15.343
61	15.484	15.535	---	62	15.430	15.447	---	63	14.502	13.476	12.295
64	13.751	12.539	11.237	65	13.812	12.610	11.363	66	16.673	16.046	15.266
67	17.462	17.185	14.919	68	15.610	14.900	13.659	69	15.077	15.119	---
70	16.394	15.764	---	71	16.239	16.545	---	72	15.107	15.086	15.534
73	17.249	16.735	---	74	16.348	15.850	---	75	16.994	16.245	---
76	15.387	15.512	---	77	16.007	15.200	14.297	78	15.491	14.716	13.666
79	16.085	15.347	13.980	80	15.409	14.764	13.584	81	16.151	15.580	---
82	16.346	16.212	15.616	83	15.250	14.514	13.392	84	15.909	16.361	15.772
85	15.176	15.284	15.160	86	16.554	15.569	14.787	87	16.475	15.087	14.337
88	13.540	12.162	10.874	89	15.685	14.978	---	90	15.637	14.654	---
91	15.567	15.499	---	92	15.409	14.606	13.648	93	15.353	15.488	15.499
94	15.382	15.681	15.498	95	15.116	14.411	13.145	96	15.301	14.419	13.342
97	16.667	16.015	14.812	98	15.864	15.003	14.053	99	15.520	14.684	13.478
100	16.082	16.486	15.909	101	17.371	16.538	15.736	102	16.396	16.990	---
103	14.593	13.611	---	104	16.807	15.902	14.847	105	14.791	14.030	13.108
106	16.249	15.387	14.594	107	17.142	16.597	15.405	108	16.458	16.017	15.255
109	16.390	15.935	14.894	110	17.294	16.830	15.230	111	15.704	14.882	13.848
112	16.594	15.862	14.771	113	15.437	14.820	13.703	114	15.403	14.507	13.379

El examen de la Tabla pone de manifiesto varios hechos: en primer lugar que todas las estrellas han sido medidas con los filtros B y V pero no con el filtro I_C : esto ocurre sólo con las estrellas azules que emiten sobre todo en luz violeta y azul y, por tanto, aparecen extremadamente débiles con el filtro I_C ; el segundo lugar notamos que la estrella más brillante (en banda V) es de magnitud 12.162 (la variable V38, astro nº 88) mientras que la más débil es de la magnitud 17.115 (estrella nº 67) y en tercer lugar comprobamos que la mayor parte de las estrellas brillan por debajo de la magnitud 14.0 V . Podemos elaborar un diagrama H-R del tipo "color-magnitud" con estos datos (C.M.D. en la literatura profesional) mostrando el índice de color $B - V$ en el eje horizontal y la magnitud V en el vertical, lo que hacemos en la Figura 4:

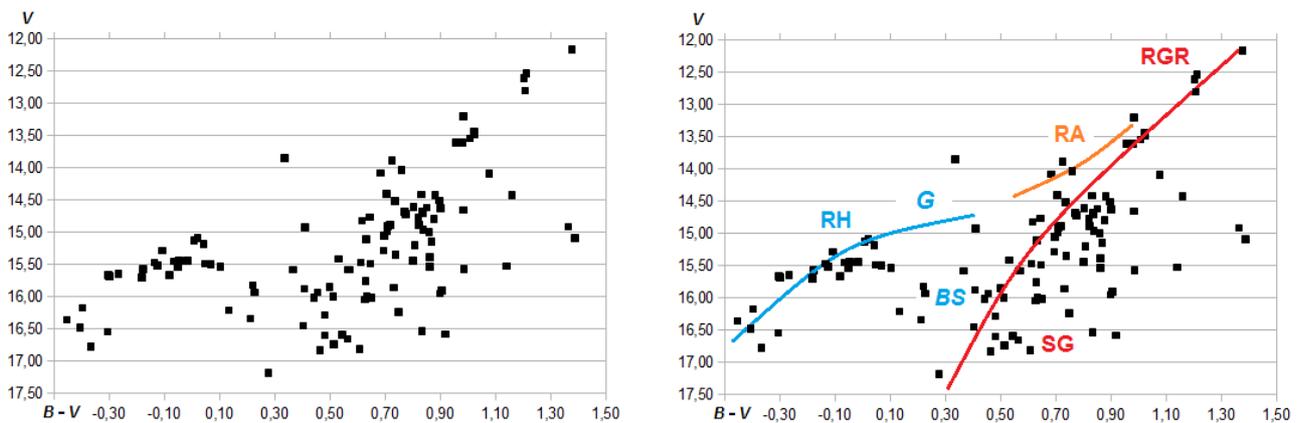


Figura 4. Diagrama color-magnitud obtenido con las mediciones B y V de las 114 estrellas de la Tabla (izquierda) y las distintas zonas del mismo, identificadas con las siglas que se explican en el texto (derecha).

En el panel izquierdo representamos el diagrama color-magnitud original mientras que en el derecho hemos marcado, con letras y líneas, las principales zonas visibles del mismo: en primer lugar destaca la Rama de las Gigantes Rojas (RGR) que contiene unas pocas estrellas brillantes rojizas (en realidad son muy anaranjadas, ambarinas); la Rama Asintótica (RA) corre casi paralela a la anterior y contiene apenas cinco estrellas, de la cual arranca la Rama Horizontal (RH) formada por apenas cuatro estrellas blancas y azules de magnitudes similares ($\sim 15.0 V$)³: dicha rama presenta una *cola* de estrellas más débiles y azules ($B - V < -0.10$) que desciende hasta cerca de la magnitud 16.8 V ; en medio de la Rama Horizontal es muy visible un hueco o *gap* (G) que corresponde a la *Banda de Inestabilidad* en la cual se localizan las estrellas variables de tipo Cefeida, RR Lyrae y SX Phoenicis, ninguna de las cuales aparece entre las medidas; descendiendo por la Rama de las Gigantes Rojas encontramos estrellas cada vez más débiles que pertenecen al tipo Subgigante (SG) de color amarillo, amarillo intenso y anaranjado. Finalmente, entre las magnitudes 15.50 V y 16.50 V , encontramos unas pocas estrellas (seis o siete) situadas a la izquierda de las Subgigantes: son astros del tipo *Blue Straggler* (BS) localizados fuera (a la izquierda) de dicha Secuencia.

A partir de la magnitud promedio de las cuatro estrellas que encontramos en la Rama Horizontal ($\sim 15.0 V$), y sabiendo que las estrellas variables de tipo RR Lyrae tienen una magnitud absoluta cercana a $M_v \sim 0.60$, podemos determinar el módulo de distancia $m - M$ del cúmulo el cual

³ En la Rama Horizontal del cúmulo notamos la abundancia de estrellas *calientes* ($B - V < 0.10$, situadas a la izquierda del *gap*) y la ausencia de estrellas *frías* ($B - V > 0.25$, a la derecha del *gap*), al revés de lo que ocurre en Messier 3 en el cual hay estrellas de los dos tipos.

resulta ser próximo a 14.40: en buena concordancia con el valor profesional $M_v = 14.33$ que consta en la base de datos *A galactic Globular Cluster Database*⁴, disponible a través de Internet y actualizada con frecuencia; esta es la misma información que consta en la última actualización del *Catalog of Parameters for Milky Way Globular Clusters. Database*, información gestionada y mantenida por Harris, de la McMaster University (Harris, 2010).

Cuando tabulemos las mediciones multibanda de las 635 estrellas estudiadas en el *survey* podremos presentar diagramas H-R color-magnitud más completos y detallados, tanto de las zonas externas del cúmulo (Sectores A a D) como del núcleo (Sector E), que analizaremos y compararemos con los profesionales para estudiar las semejanzas y diferencias, llegando a determinar la edad aproximada y distancia de Messier 13: dejaremos esta tarea para un trabajo futuro.

RESUMEN

Utilizando la secuencia fotométrica multibanda de Sanquist *et al.* (2010), presentada en nuestro trabajo anterior, hemos obtenido magnitudes BVI_c de 635 estrellas del cúmulo: en estas páginas hemos mostrado el instrumental empleado (telescopio, rueda portafiltros, cámara CCD, filtros, software, etc.) así como las técnicas utilizadas para extraer de las imágenes filtradas estas magnitudes; se presentan, a modo de breve adelanto, las magnitudes BVI_c de las primeras 114 estrellas de nuestro *survey* fotométrico. A partir de las magnitudes V y de los índices de color $B - V$ que hemos calculado se ha elaborado un diagrama H-R del tipo "color-magnitud": en él se identifican con letras y líneas las principales zonas del mismo como son la Rama de las Gigantes Rojas, la Rama Asintótica, la Rama Horizontal, las estrellas Subgigantes y, finalmente, las estrellas blanco-azuladas de tipo *Blue Straggler*. En la Rama Horizontal, formada por estrellas de magnitud $\sim 15.0 V$, se aprecia con toda claridad el *gap* que marca la "Banda de Inestabilidad" en la cual se localizan las variables pulsantes de tipo Cefeida, RR Lyrae y SX Phoenicis; aparece también una *cola* de estrellas débiles muy azules (magnitud $> 16.0 V$ y $B - V < -0.10$); apreciamos una destacable abundancia de estrellas "calientes" situadas a la izquierda del *gap* ($B - V < 0.10$) pero no "frías" ($B - V > 0.25$) situadas a la derecha del mismo, a diferencia de lo que ocurre en el cúmulo globular Messier 3. Finalmente, a partir de la magnitud promedio de las estrellas situadas en la Rama Horizontal ($\sim 15.0 V$), calculamos el módulo de distancia $m - M$ del cúmulo el cual encontramos próximo a 14.40: en buena concordancia con el valor profesional ($M_v = 14.33$).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación ha sido realizado utilizando los catálogos y bancos de datos de VizieR y SIMBAD (Centro de Datos Estelares CDS, Strasbourg, France), Aladin Sky Atlas, NASA's Astrophysics Data System así como el telescopio catadióptrico de 203 mm de abertura, la cámara CCD y su rueda de filtros fotométricos (BVR_cI_c) del Observatorio Astronómico de Cáceres.

4 Localizada en la dirección: http://gclusters.altervista.org/cluster_4.php?ggc=M+13

REFERENCIAS

- Aladin Sky Atlas: <http://aladin.u-strasbg.fr/java/nph-aladin.pl>
- Astroart (MSB Software): <http://www.msb-astroart.com/>
- Filtros *Astrodon Photometrics*: http://www.astrodon.com/products/filters/astrodon_photometrics_-_uvbric/
- Harris, W. E. (2010). *Catalog of Parameters for Milky Way Globular Clusters. Database*:
<http://physwww.physics.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>
- Luddendorf, H. (1905), *Publ. Astrophys. Obs. Potsdam*, 15, N° 50
- Osborn, W. (2000), *AJ*, 119, 2902
- Sandquist, E. L., Gordon M., Levine D., Bolte M. (2010), *AJ*, 139, 2374
- SIMBAD Astronomical Database: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- Violat Bordonau, F. A. (2013, diciembre) web Casanchi: <http://casanchi.com/ast/astrometria01.htm>
- Violat Bordonau, F. A. (2014, febrero) web Casanchi: <http://casanchi.com/ast/secuencias02.pdf>
- VizieR Catalogue Service: <http://vizier.u-strasbg.fr/>