

ESTUDIO FOTOMÉTRICO DE MESSIER 13 (I) SECUENCIAS FOTOMÉTRICAS (1905-2010)

FRANCISCO VIOLAT BORDONAU

Asesores Astronómicos Cacereños, fviolat@yahoo.es

Resumen. En este primer artículo dedicado a la fotometría del cúmulo globular Messier 13 (NGC 6205) damos, en primer lugar, un repaso a los estudios fotométricos realizado en el período 1905-1956 para presentar, a continuación, una comparativa entre cuatro trabajos distintos -en bandas B y V - obtenidos en los años 1966 (Kadla), 1979 (Cudworth y Monet), 2000 (Osborn) y 2010 (Sandquist *et al.*): de ellos hemos obtenido una amplia secuencia fotométrica en banda V (cinco magnitudes) que utilizaremos para realizar futuros estudios fotométricos y colorimétricos del cúmulo y sus estrellas variables.

En mayo del año 2000 comenzó nuestro interés por las estrellas variables de los cúmulos globulares al estudiar el lejano y débil NGC 2419, del cual publicamos un artículo exactamente un año después (Violat, 2001a) y tres años más tarde un sencillo trabajo fotométrico (Violat, 2003). A inicios de 2001 nos interesamos por tres de ellos bien situados para su observación desde nuestras latitudes: Messier 13, Messier 92 y Messier 3; los dos primeros se encuentran en la constelación de Hércules y el tercero en Perros de Caza (Canes Venatici), por lo cual pueden ser cómodamente observados desde España en primavera, verano y otoño. Sin embargo la falta de estrellas de comparación para la calibración fotométrica nos impidió dedicarnos a esa tarea, ya que en ninguna publicación asequibles a aficionados en aquel momento aparecían las secuencias que necesitábamos: ni siquiera la AAVSO¹ disponía de cartas para estudiar alguno de estos cúmulos de manera que dejamos nuestros intentos a un lado limitándonos a publicar, en mayo de 2001, un trabajo teórico sobre el tema (Violat, 2001b). Un artículo fotométrico dedicado a las estrellas variables de M 13 (Osborn, 2000), aparecido en el verano del año anterior, nos animó en la primavera de 2001 a retomar el interés en el estudio de las variables del cúmulo ya que mostraba las posiciones, magnitudes B , V e índices de color $B - V$ de 104 estrellas entre las que se encontraban sus variables, sospechosas de variabilidad y astros de comparación: su lectura nos permitió identificar dichas estrellas por sus posiciones (ascensión recta y declinación, equinoccio 2000.0) consiguiendo elaborar y publicar, en mayo de 2001, la primera carta CCD del cúmulo que identificaba todas y cada unas de las variables, presuntas variables y estrellas de comparación (Violat, 2001c), que reproducimos en la Figura 1, en la cual las variables aparecen identificadas con sus números (p. ej. V11) y las presuntas variables con su número en el Catálogo de Ludendorff (Ludendorff, 1905), como por ejemplo L240 o L414.

Con ella en la mano comenzamos, a partir del 15 de junio de 2001, la captura de imágenes filtradas (en bandas B y R) algunas de las cuales publicamos junto con las primeras curvas de luz de sus variables rápidas (Violat, 2001d), así como la magnitud (en luz integral) de hasta veintiséis estrellas distintas² durante el verano del mismo año: en julio ya habíamos obtenido la primera curva de luz de una de sus cefeidas (V2, cuyo período es igual a 5.11 días) y detectado oscilaciones de brillo de una de sus brillantes gigantes rojas (V17); continuando con las observaciones pudimos publicar, en marzo de 2002, un artículo sobre las cefeidas V2 y V6 (Violat, 2002a), un trabajo sobre la presunta variable L222 en marzo del mismo año (Violat, 2002b), otro confirmando la variabilidad

¹ American Association of Variable Star Observers, AAVSO.

² Dieciocho variables o sospechosas y ocho estrellas no variables, para comprobar la dispersión de las mediciones.

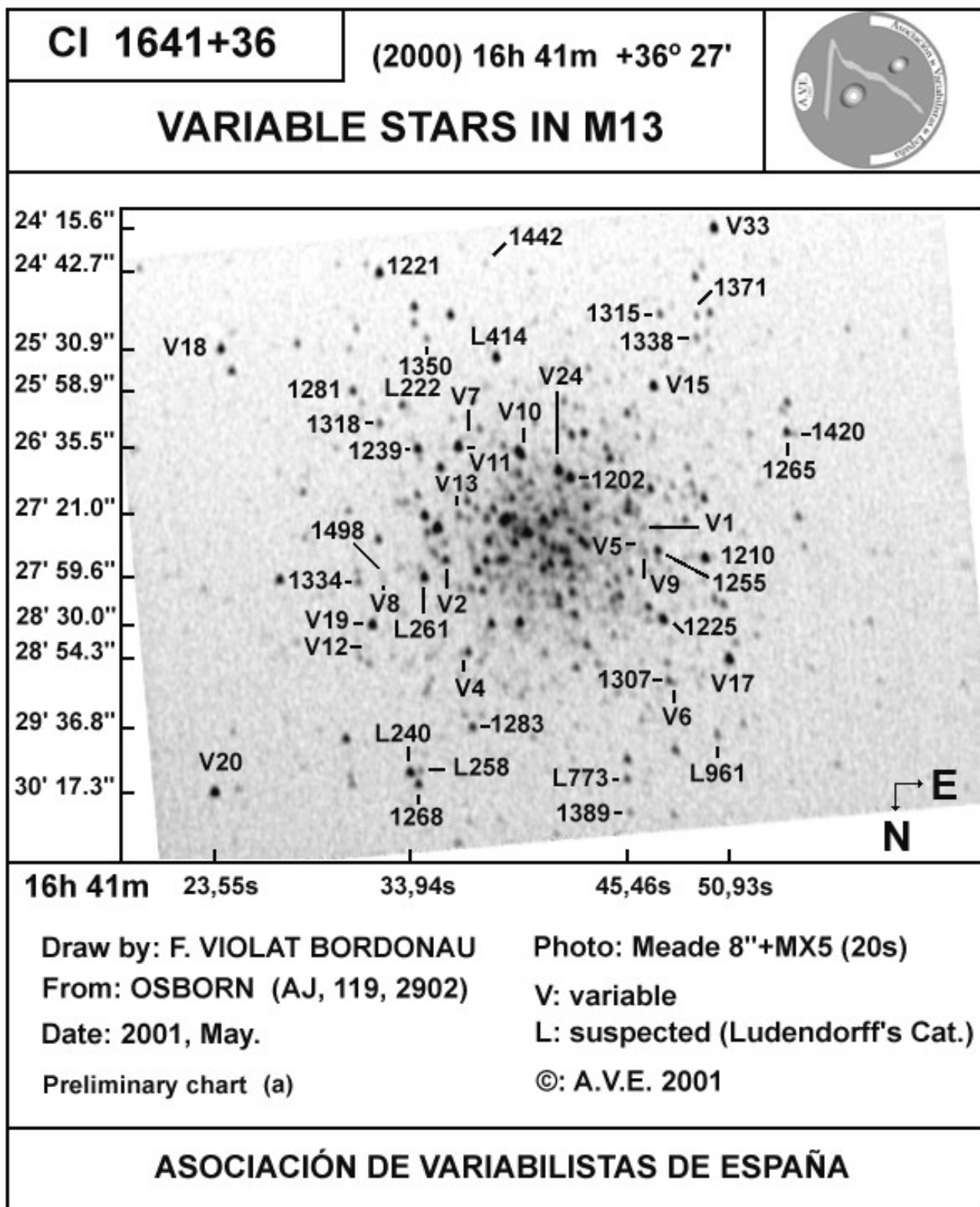


Figura 1. Carta CCD del cúmulo Messier 13, elaborada por el autor en mayo de 2001, que identifica todas las estrellas variables, sospechosas de variabilidad y astros de comparación en banda *V* (Francisco A. Violat Bordonau).

de L414 (Violat, 2002c) seguido de un estudio confirmando dicha variabilidad en base a nuestra fotometría, su composición química y las velocidades radiales disponibles en la bibliografía (Violat, 2002d). En los siguientes cinco años (2003-2007), gracias a la amplia secuencia fotométrica de

Osborn, llegaríamos a publicar una veintena de artículos sobre el cúmulo Messier 13, sus variables y sospechosas de variabilidad, curvas de luz y períodos de las mismas: sin dicho artículo no podríamos haber realizado ningún estudio sobre el cúmulo, ya que sin una adecuada secuencia fotométrica habría sido imposible calibrar el software utilizado para medir el brillo de sus estrellas.

FOTOMETRÍA DEL CÚMULO PRIMEROS ESTUDIOS (1905-1955)

Los primeros estudios fotométricos del cúmulo se iniciaron en el año 1905 (Ludendorff, 1905) con el exhaustivo trabajo de Ludendorff, del Observatorio de Postdam, que se materializaría en el *Catálogo Ludendorff* que todavía se sigue empleando para identificar las estrellas del cúmulo: este investigador, utilizando placas fotográficas obtenidas con un refractor de 33 cm, obtuvo la posición exacta de 1136 estrellas situadas en el cúmulo y alrededores determinando la magnitud fotográfica de la mayor parte de ellas con un decimal (en la Tabla 1 aparecen una veintena de ellas). En 1915 (Shapley, 1915) se publica un trabajo fotométrico del cúmulo presentando magnitudes fotográficas m_{pg} y fotovisuales m_{pv} de algunas docenas de estrellas, las cuales se corresponden aproximadamente a las actuales bandas B y V . En 1925 (Van Maanen, 1925) apareció un trabajo sobre el movimiento propio de las estrellas del cúmulo en el que se presentaba, además, fotometría de medio centenar de estrellas: por desgracia la misma era fotográfica (parecida a la obtenida en banda B) sin indicar el índice de color, con lo cual el trabajo quedaba bastante incompleto.

Todos estos primeros estudios fotométricos utilizaban placas fotográficas sensibles al color azul, de las que se extraían las magnitudes fotográficas, las cuales permitían medir magnitudes visuales al trabajar con filtros amarillos pero, sin embargo, los mismos no estaban normalizados: el actual sistema fotométrico UBV^3 no sería establecido hasta el año 1953 (Johnson y Morgan, 1953) de manera que todas las magnitudes obtenidas con anterioridad son similares, pero no idénticas, a las nuevas bandas B (magnitudes fotográficas) y V (magnitudes fotovisuales) existiendo, pues, la equivalencia $m_{pg} \sim B$ y $m_{pv} \sim V$. El uso del fotómetro fotoeléctrico acoplado al telescopio permitía obtener magnitudes con una precisión de dos decimales, de manera que en los años 50 a 60 del siglo XX se publican multitud de trabajos fotométricos de este tipo: de este modo la identificación de la Secuencia Principal de Messier 13 en el diagrama H-R se logra en el año 1954 (Baum, 1954), midiendo el brillo de treinta y cinco estrellas entre las magnitudes 10.74 y 22.93 V y obteniendo índices de color $B - V$ de las mismas.

Vamos a utilizar una veintena de estrellas del cúmulo (aunque no todas ellas pertenecientes al mismo) para mostrar dos cosas: en primer lugar la magnitud de las mismas obtenidas por diferentes investigadores en épocas distintas, y en segundo la diferencia existente entre estos distintos estudios realizados con diferentes telescopios e instrumentos; más adelante volveremos a utilizar esta veintena de estrellas para efectuar una comparativa de los distintos estudios fotométricos y comprobar si son consistentes entre ellos o aparecen diferencias significativas, decidiendo finalmente cuál de todos ellos puede servir para obtener una secuencia fotométrica que podamos utilizar a la hora de realizar trabajos fotométricos de las estrellas del cúmulo. Para ello en la Tabla 1 presentamos las magnitudes de veintidós estrellas ordenadas por su brillo aparente, desde las más brillantes (magnitud 12.20 V) hasta un poco por debajo de la Rama Horizontal (15.40 V): la primera columna identifica el astro en el catálogo de Ludendorff mientras que los valores tabulados como V_1 , V_2 y V_3 corresponden respectivamente a las magnitudes en banda V (o equivalente) aparecidas en los trabajos fotométricos de Ludendorff (1905), Shapley (1915) y Brown (1955).

3 Sistema UBV o Johnson-Morgan, por los apellidos de sus dos autores.

TABLA 1
MAGNITUDES V DE ESTRELLAS SELECCIONADAS (1905-1955)

Nombre	V_1	V_2	V_3	Nombre	V_1	V_2	V_3
L199	12.4	12.24	12.22	L222	11.7	13.06	13.43
L240	12.5	12.32	12.31	L1043	12.7	13.37	13.58
L316	12.5	12.52	12.56	L920	12.7	13.58	13.84
L158	12.5	12.70	12.69	L1114	12.8	13.90	14.20
L1019	12.2	12.63	12.72	L833	12.8	13.99	14.24
L353	12.5	12.87	12.80	L943	13.0	14.09	14.49
L1073	12.5	12.82	12.83	L22	-----	14.54	14.98
L15	11.7	12.80	12.90	L1018	-----	15.00	15.08
L919	12.5	12.92	13.01	L276	13.0	14.90	15.21
L848	12.5	13.10	13.18	L873	13.0	15.13	15.31
L109	12.7	13.14	13.38	L1079	-----	15.23	15.37

Si comparamos los resultados obtenidos veremos dos llamativos detalles: el primero de ellos es que las magnitudes obtenidas por Ludendorff en 1905, además de mostrar sólo un decimal, en todos los casos son prácticamente distintas a las obtenidas por Shapley apenas una decena de años más tarde (1915) y a las facilitadas por Brown; el otro es que la fotometría obtenida por Brown en 1955 es bastante consistente con la de Shapley en la mayoría de los casos, con diferencias de pocas centésimas de magnitud, aunque para unas pocas estrellas se aprecian discrepancias de entre 0.30 y 0.44 magnitudes (L 1114, L 22 o L943). Podemos comprobar si esta aparente consistencia se refleja en el trabajo fotométrico de Arp (Arp, 1955) que mostramos en la Tabla 2, en donde V_1 , V_2 y V_3 corresponden ahora a los estudios de Shapley, Brown y Arp respectivamente (se ha eliminado el de Ludendorff por ser inconsistente con los demás).

TABLA 2
MAGNITUDES V DE ESTRELLAS SELECCIONADAS (1905-1955)

Nombre	V_1	V_2	V_3	Nombre	V_1	V_2	V_3
L199	12.24	12.22	12.14	L222	13.06	13.43	12.98
L240	12.32	12.31	12.20	L1043	13.37	13.58	-----
L316	12.52	12.56	12.46	L920	13.58	13.84	13.63
L158	12.70	12.69	12.62	L1114	13.90	14.20	-----
L1019	12.63	12.72	12.54	L833	13.99	14.24	14.04
L353	12.87	12.80	12.70	L943	14.09	14.49	-----
L1073	12.82	12.83	-----	L22	14.54	14.98	-----
L15	12.80	12.90	-----	L1018	15.00	15.08	15.10
L919	12.92	13.01	12.88	L276	14.90	15.21	15.12
L848	13.10	13.18	13.04	L873	15.13	15.31	-----
L109	13.14	13.38	13.23	L1079	15.23	15.37	-----

Al comparar las magnitudes obtenidas por Brown y Arp, ambas publicadas en trabajos aparecidos en el mismo año (1955), notamos que entre ellas existen diferencias de hasta 0.21 magnitudes (L920) aunque la mayoría de los valores son muy parecidos con discordancias inferiores o próximas a una décima de magnitud. Podemos comparar estos resultados con la fotometría del cúmulo publicada un año más tarde (Savedoff, 1956⁴), lo que hacemos en la Tabla 3 en donde, como en las anteriores, V_1 , V_2 , V_3 y V_4 corresponden a los estudios de Shapley, Brown, Arp y Savedoff en este orden.

TABLA 3
MAGNITUDES V DE ESTRELLAS SELECCIONADAS (1905-1956)

Nombre	V_1	V_2	V_3	V_4	Nombre	V_1	V_2	V_3	V_4
L199	12.24	12.22	12.14	-----	L222	13.06	13.43	12.98	-----
L240	12.32	12.31	12.20	-----	L1043	13.37	13.58	-----	13.50
L316	12.52	12.56	12.46	-----	L920	13.58	13.84	13.63	-----
L158	12.70	12.69	12.62	-----	L1114	13.90	14.20	-----	14.12
L1019	12.63	12.72	12.54	-----	L833	13.99	14.24	14.04	-----
L353	12.87	12.80	12.70	-----	L943	14.09	14.49	-----	-----
L1073	12.82	12.83	-----	12.80	L22	14.54	14.98	-----	-----
L15	12.80	12.90	-----	12.91	L1018	15.00	15.08	15.10	15.12
L919	12.92	13.01	12.88	-----	L276	14.90	15.21	15.12	-----
L848	13.10	13.18	13.04	-----	L873	15.13	15.31	-----	-----
L109	13.14	13.38	13.23	-----	L1079	15.23	15.37	-----	15.47

El examen de los seis nuevos valores en común con los distintos trabajos fotométricos muestra, una vez más, diferencias máximas de 0.10 magnitudes (L1079) y de 0.08 magnitudes (L1043 y L1114) con respecto a la precisa fotometría de Brown, aunque el resto de los mismos presentan discrepancias mucho menores: de hecho la única medición en común con Brown y Arp (L1018) presenta una diferencia de 0.04 magnitudes con el primero pero sólo 0.02 magnitudes con el segundo.

FOTOMETRÍA DEL CÚMULO ESTUDIOS MODERNOS (1966-2010)

En 1966 (Kadla, 1966) ve la luz un nuevo trabajo fotométrico sobre el cúmulo en el que, además de las magnitudes V e índices de color $B - V$ y $U - B$ de las mismas, se tabulan los movimientos propios de 923 estrellas del cúmulo y alrededores: en este estudio se nombran con la letra K (de Kadla) todos estos astros, además de con la denominación de Ludendorff, de manera que es fácil hacer una identificación cruzada de los mismos; en 1974 (Cathey, 1974) apareció un trabajo fotométrico en el que se tabulaban las magnitudes $UBVR$ de una cincuentena de estrellas y en 1979

⁴ Sus magnitudes m_{pv} han sido convertidas en banda V por medio de la transformación $V = m_{pv} + 0.02$ dada por este mismo autor en su trabajo.

(Cudworth y Monet, 1979) se publica un estudio sobre el movimiento propio de las estrellas del cúmulo y alrededores presentando magnitudes V , índices de color $B - V$ y movimientos propios de hasta 443 de ellas: sorprendentemente diez presentan exactamente las mismas magnitudes que las obtenidas por Cathey lo que nos hace sospechar que estos autores las copiaron directamente del citado trabajo. La mejora de los equipos empleados y el uso de filtros normalizados permitió obtener una precisión elevada iniciándose la era moderna de la fotometría: lo comprobamos comparando los resultados obtenidos por estos tres nuevos trabajos con los previamente expuestos, lo que hacemos en la Tabla 4.

TABLA 4
MAGNITUDES V DE ESTRELLAS SELECCIONADAS (1915-1979)

Nombre	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
L199	12.24	12.22	12.14	-----	12.25	12.20	12.20
L240	12.32	12.31	12.20	-----	12.30	12.34	12.34
L316	12.52	12.56	12.46	-----	12.57	12.58	12.58
L158	12.70	12.69	12.62	-----	12.70	12.70	12.70
L1019	12.63	12.72	12.54	-----	12.64	12.70	12.70
L353	12.87	12.80	12.70	-----	12.77	12.83	12.83
L1073	12.82	12.83	-----	12.80	12.88	-----	12.88
L15	12.80	12.90	-----	12.91	12.94	-----	12.85
L919	12.92	13.01	12.88	-----	12.98	13.03	13.03
L848	13.10	13.18	13.04	-----	13.13	13.15	13.15
L109	13.14	13.38	13.23	-----	13.30	13.32	13.32
L222	13.06	13.43	12.98	-----	13.02	-----	13.14
L1043	13.37	13.58	-----	13.50	13.53	-----	13.49
L920	13.58	13.84	13.63	-----	13.70	-----	13.72
L1114	13.90	14.20	-----	14.12	14.12	-----	14.12
L833	13.99	14.24	14.04	-----	-----	14.08	14.08
L943	14.09	14.49	-----	-----	14.34	-----	-----
L22	14.54	14.98	-----	-----	14.93	-----	14.93
L1018	15.00	15.08	15.10	15.12	15.10	-----	15.10
L276	14.90	15.21	15.12	-----	15.07	-----	15.07
L873	15.13	15.31	-----	-----	15.21	-----	-----
L1079	15.23	15.37	-----	15.47	15.36	-----	15.37

La tabla muestra la siguiente información: denominación de la estrella en el catálogo de Ludendorff y magnitudes en banda V (o fotovisual) publicadas por Shapley (V_1), Brown (V_2), Arp (V_3), Savedoff (V_4), Kadla (V_5), Cathey (V_6) así como Cudworth y Monet (V_7). Un examen atento de la misma muestra que los únicos valores discordantes son los obtenidos por Arp (V_3)⁵, de manera que vamos a eliminar dicha columna y a elaborar una nueva tabla, que denominaremos Tabla 5, que contendrá las mismas columnas aunque excluyendo dichas magnitudes discrepantes.

⁵ Son magnitudes m_{pv} , fotovisuales, sin transformar al sistema UBV .

TABLA 5
MAGNITUDES V DE ESTRELLAS SELECCIONADAS (1915-1979)

Nombre	V_1	V_2	V_4	V_5	V_6	V_7
L199	12.24	12.22	-----	12.25	12.20	12.20
L240	12.32	12.31	-----	12.30	12.34	12.34
L316	12.52	12.56	-----	12.57	12.58	12.58
L158	12.70	12.69	-----	12.70	12.70	12.70
L1019	12.63	12.72	-----	12.64	12.70	12.70
L353	12.87	12.80	-----	12.77	12.83	12.83
L1073	12.82	12.83	12.80	12.88	-----	12.88
L15	12.80	12.90	12.91	12.94	-----	12.85
L919	12.92	13.01	-----	12.98	13.03	13.03
L848	13.10	13.18	-----	13.13	13.15	13.15
L109	13.14	13.38	-----	13.30	13.32	13.32
L222	13.06	13.43	-----	13.02	-----	13.14
L1043	13.37	13.58	13.50	13.53	-----	13.49
L920	13.58	13.84	-----	13.70	-----	13.72
L1114	13.90	14.20	14.12	14.12	-----	14.12
L833	13.99	14.24	-----	-----	14.08	14.08
L943	14.09	14.49	-----	14.34	-----	-----
L22	14.54	14.98	-----	14.93	-----	14.93
L1018	15.00	15.08	15.12	15.10	-----	15.10
L276	14.90	15.21	-----	15.07	-----	15.07
L873	15.13	15.31	-----	15.21	-----	-----
L1079	15.23	15.37	15.47	15.36	-----	15.37

El examen de los datos tabulados muestra varios detalles: el primero de ellos es que los valores obtenidos por Shapley en 1915 son muy similares a los más recientes para las estrellas más brillantes (por debajo de la magnitud 13 V), pero discrepan en todas las débiles⁶; el segundo es que las magnitudes de ciertas estrellas son casi idénticas con diferencias de una a dos centésimas de magnitud (como L158) o diferencias de sólo 0.04, 0.05 y 0.06 magnitudes respectivamente entre el valor más alto y el más bajo (p. ej. L240, L199 o L16), aunque existen algunas en las que la dispersión de los valores es mayor: por ejemplo las 0.31 magnitudes de L276 o las 0.22 magnitudes de L1079 (en el caso de la estrella de tipo *errante azul*, L222, esta diferencia asciende a nada menos que ¡0.41 magnitudes!, discrepancia difícil de explicar); el tercero de ellos es que la fotometría de Brown (1955) es plenamente consistente con la más moderna excepto en un único caso, el de la brillante estrella L222 ya mencionada: este astro es tan azul ($B - V = -0.18$) y brillante (13.15 V)⁷ que encontramos una discrepancia de hasta 0.45 magnitudes entre el valor obtenido por Arp (12.98 V) y el de Brown (13.45 V); en el primer caso aparece demasiado brillante y en el segundo demasiado débil, aunque si examinamos la fotometría ya expuesta para esta estrella (Tablas 1 a 4) comprobaremos que habitualmente se mide más brillante de lo que realmente es excepto en el caso

⁶ Debido al dispar color propio (tipo espectral) de las diferentes estrellas medidas por este autor.

⁷ Datos extraídos de la fotometría de Osborn (2000).

de Cudworth y Monet (1979), quienes la miden con su valor real salvo una minúscula diferencia de sólo una centésima de magnitud. Para poder estudiar fotométricamente las estrellas del cúmulo necesitamos una secuencia estelar que cubra un rango amplio de brillos y colores⁸: por ello hemos elaborado una, de cinco magnitudes completas⁹, que vamos a utilizar para hacer una comparativa entre la fotometría "moderna" al tabular los datos obtenidos por Kadla (1966), Cudworth y Monet (1979) con los de Osborn (2000) lo que hacemos en la Tabla 6.

TABLA 6
FOTOMETRÍA MODERNA (1966-2000)

Nombre	V_1	$B - V_1$	V_2	$B - V_2$	V_3	$B - V_3$
K208	10.58	1.41	10.66	1.39	10.64	1.39
K214	10.76	0.54	10.74	0.58	10.78	0.56
K201	10.87	1.13	10.89	1.12	10.89	1.10
K180	11.14	1.11	11.07	1.21	11.05	1.21
K688	11.34	0.87	11.30	0.93	11.29	0.94
K286	11.99	1.09	11.80	1.28	11.81	1.24
K610	11.88	0.56	11.88	0.56	11.84	0.67
L261	12.23	1.35	12.23	1.35	12.20	1.39
L199	12.25	1.29	12.20	1.39	12.21	1.35
K216	12.40	0.93	12.36	1.04	12.35	1.02
L745	12.52	1.28	12.54	1.28	12.51	1.30
K660	12.63	0.77	12.60	0.85	12.62	0.87
L169	12.78	1.16	12.78	1.16	12.81	1.17
L353	12.77	1.13	12.83	1.09	12.83	1.16
L15	12.94	0.44	12.85	0.50	12.87	0.50
K676	13.09	1.53	13.16	1.38	13.09	1.47
L222	13.02	-0.18	13.14	-0.16	13.15	-0.18
L848	13.13	1.07	13.15	1.10	13.15	1.07
L201	13.19	1.05	13.18	1.06	13.18	1.07
L176	13.31	1.07	13.31	1.07	13.34	1.03
L268	13.53	0.98	13.52	1.01	13.50	1.01
K673	13.98	0.44	13.98	0.44	13.95	0.54
K664	14.11	0.70	14.11	0.70	14.09	0.70
K242	14.24	0.55	14.22	0.58	14.26	0.55
L499	14.57	0.68	14.57	0.68	14.54	0.68
K258	14.88	0.58	14.88	0.58	14.88	0.57
L56	14.99	0.80	15.00	0.74	15.01	0.80
K252	15.21	0.88	15.21	0.88	15.20	0.80
K209	15.59	0.91	15.59	0.84	15.62	0.80

⁸ Las estrellas pertenecientes al cúmulo están comprendidas entre los tipos espectrales B2 (L222) y K2Ib (L70, V20), según los datos espectroscópicos de Popper (1947).

⁹ Desde la cima de la Rama de las Gigantes Rojas hasta un poco por debajo del Brazo Horizontal.

La citada tabla presenta la denominación (K de Kadla, L de Ludendorff) así como las magnitud en banda V e índices de color $B - V$ de Kadla, Cudworth-Monet y Osborn (subíndices 1, 2 y 3 respectivamente). El examen de la misma pone de manifiesto que las magnitudes determinadas por los distintos investigadores son muy similares, con valores casi idénticos en algunos casos y diferencias de pocas centésimas de magnitud; vamos a estudiar estas diferencias en una nueva tabla que llamaremos Tabla 7 y presentamos a continuación.

TABLA 7
FOTOMETRÍA MODERNA (1966-2000)

Nombre	V_1	$B - V_1$	V_2	$B - V_2$	V_3	$B - V_3$	a	b	c	d
K208	10.58	1.41	10.66	1.39	10.64	1.39	0.08	-0.02	-0.02	0.00
K214	10.76	0.54	10.74	0.58	10.78	0.56	0.02	0.02	0.04	-0.02
K201	10.87	1.13	10.89	1.12	10.89	1.10	0.02	-0.03	0.00	-0.02
K180	11.14	1.11	11.07	1.21	11.05	1.21	-0.09	0.10	-0.02	0.00
K688	11.34	0.87	11.30	0.93	11.29	0.94	-0.05	0.07	-0.01	0.01
K286	11.99	1.09	11.80	1.28	11.81	1.24	-0.18	0.15	0.01	-0.04
K610	11.88	0.56	11.88	0.56	11.84	0.67	-0.04	0.11	-0.04	0.09
L261	12.23	1.35	12.23	1.35	12.20	1.39	-0.03	0.04	-0.03	0.04
L199	12.25	1.29	12.20	1.39	12.21	1.35	-0.04	0.06	0.01	-0.04
K216	12.40	0.93	12.36	1.04	12.35	1.02	-0.05	0.09	-0.01	-0.02
L745	12.52	1.28	12.54	1.28	12.51	1.30	-0.01	0.02	-0.03	0.02
K660	12.63	0.77	12.60	0.85	12.62	0.87	-0.01	0.10	0.02	0.02
L169	12.78	1.16	12.78	1.16	12.81	1.17	0.03	0.01	0.03	0.01
L353	12.77	1.13	12.83	1.09	12.83	1.16	0.06	0.03	0.00	0.07
L15	12.94	0.44	12.85	0.50	12.87	0.50	-0.07	0.06	0.02	0.00
K676	13.09	1.53	13.16	1.38	13.09	1.47	0.00	-0.06	-0.07	0.09
L222	13.02	-0.18	13.14	-0.16	13.15	-0.18	0.13	0.00	0.01	-0.02
L848	13.13	1.07	13.15	1.10	13.15	1.07	0.02	0.00	0.00	-0.03
L201	13.19	1.05	13.18	1.06	13.18	1.07	-0.01	0.02	0.00	0.01
L176	13.31	1.07	13.31	1.07	13.34	1.03	0.03	-0.04	0.03	-0.04
L268	13.53	0.98	13.52	1.01	13.50	1.01	-0.03	0.03	-0.02	0.00
K673	13.98	0.44	13.98	0.44	13.95	0.54	-0.03	0.10	-0.03	0.10
K664	14.11	0.70	14.11	0.70	14.09	0.70	-0.02	0.00	-0.02	0.00
K242	14.24	0.55	14.22	0.58	14.26	0.55	0.02	0.00	0.04	-0.03
L499	14.57	0.68	14.57	0.68	14.54	0.68	-0.03	0.00	-0.03	0.00
K258	14.88	0.58	14.88	0.58	14.88	0.57	0.00	-0.01	0.00	-0.01
L56	14.99	0.80	15.00	0.74	15.01	0.80	0.02	0.00	0.01	0.06
K252	15.21	0.88	15.21	0.88	15.20	0.80	-0.01	-0.08	-0.01	-0.08
K209	15.59	0.91	15.59	0.84	15.62	0.80	0.03	-0.11	0.03	-0.04

Las diferentes columnas muestran la denominación de la estrella, la magnitudes V e índices de color $B - V$ de Kadla, Cudworth y Monet y finalmente los de Osborn, la diferencia de magnitud y de índices de color en el sentido *Osborn - Kadla* (columnas a y b) y *Osborn - Cudworth y Monet* (columnas c y d). Cuando examinamos estos resultados comprobamos que la diferencia de magnitud máxima entre Osborn con Kadla es igual a 0.18 magnitudes (K286) siendo el siguiente valor igual a 0.13 magnitudes (L222), mientras que en el caso de Osborn con Cudworth y Monet este valor se reduce a 0.07 magnitudes (K676); si hablamos de índices de color $B - V$ las diferencias son iguales a 0.15 magnitudes (K286) si los comparamos con los de Kadla pero bajan a 0.10 magnitudes (K673) al compararlos con los obtenidos por Cudworth y Monet. El resto de las estrellas presentan diferencias muy pequeñas lo que demuestra la consistencia de los resultados obtenidos por estas "fotometrías modernas".

La aparición de las cámaras CCD a mediados de los años 1970 inauguró una nueva era en la que las magnitudes pasaron de tener dos a tres (como Rey *et al.*, 2001¹⁰), y luego cuatro decimales¹¹ (Sandquist, 2004): de este modo podemos decir que los trabajos fotométricos han llegado a su límite debido a la presencia perturbadora de la atmósfera terrestre. En el año 2010 (Sandquist *et al.*, 2010) apareció la fotometría más actual del cúmulo, que incluimos en la Tabla 8.

TABLA 8
FOTOMETRÍA MODERNA (1966-2010)

Nombre	V_1	V_2	V_3	2010	Nombre	V_1	V_2	V_3	2010
K208	10.58	10.66	10.64	10.607	K676	13.09	13.16	13.09	13.139
K214	10.76	10.74	10.78	10.729	L222	13.02	13.14	13.15	13.116
K201	10.87	10.89	10.89	10.849	L848	13.13	13.15	13.15	13.109
K180	11.14	11.07	11.05	11.070	L201	13.19	13.18	13.18	13.133
K688	11.34	11.30	11.29	11.288	L176	13.31	13.31	13.34	13.343
K286	11.99	11.80	11.81	11.770	L268	13.53	13.52	13.50	13.475
K610	11.88	11.88	11.84	11.806	K673	13.98	13.98	13.95	13.907
L261	12.23	12.23	12.20	12.207	K664	14.11	14.11	14.09	14.063
L199	12.25	12.20	12.21	12.175	K242	14.24	14.22	14.26	14.206
K216	12.40	12.36	12.35	12.317	L499	14.57	14.57	14.54	14.547
L745	12.52	12.54	12.51	12.480	K258	14.88	14.88	14.88	14.851
K660	12.63	12.60	12.62	12.594	L56	14.99	15.00	15.01	15.061
L169	12.78	12.78	12.81	12.798	K252	15.21	15.21	15.20	15.188
L353	12.77	12.83	12.83	12.812	K209	15.59	15.59	15.62	15.580
L15	12.94	12.85	12.87	12.856					

Dado que las mediciones obtenidas por el equipo de Sandquist tienen tres decimales, y las demás dos, no podemos compararlas directamente: para poder hacerlo adecuadamente hemos de redondear todos estos nuevos valores a dos decimales y, ahora sí, los comparamos en la Tabla 9.

¹⁰ *CCD Photometry of the classic Second-Parameter globular clusters M3 and M13.*

¹¹ *A high relative precision colour-magnitude diagram of M67*, que presenta las magnitudes BVI de las estrellas del cúmulo abierto Messier 67 con cuatro decimales.

TABLA 9
FOTOMETRÍA MODERNA (1966-2010)

Nombre	V_1	V_2	V_3	2010	Nombre	V_1	V_2	V_3	2010
K208	10.58	10.66	10.64	10.61	K676	13.09	13.16	13.09	13.14
K214	10.76	10.74	10.78	10.73	L222	13.02	13.14	13.15	13.12
K201	10.87	10.89	10.89	10.85	L848	13.13	13.15	13.15	13.11
K180	11.14	11.07	11.05	11.07	L201	13.19	13.18	13.18	13.13
K688	11.34	11.30	11.29	11.29	L176	13.31	13.31	13.34	13.34
K286	11.99	11.80	11.81	11.77	L268	13.53	13.52	13.50	13.48
K610	11.88	11.88	11.84	11.81	K673	13.98	13.98	13.95	13.91
L261	12.23	12.23	12.20	12.21	K664	14.11	14.11	14.09	14.06
L199	12.25	12.20	12.21	12.18	K242	14.24	14.22	14.26	14.21
K216	12.40	12.36	12.35	12.32	L499	14.57	14.57	14.54	14.55
L745	12.52	12.54	12.51	12.48	K258	14.88	14.88	14.88	14.85
K660	12.63	12.60	12.62	12.59	L56	14.99	15.00	15.01	15.06
L169	12.78	12.78	12.81	12.80	K252	15.21	15.21	15.20	15.19
L353	12.77	12.83	12.83	12.81	K209	15.59	15.59	15.62	15.58
L15	12.94	12.85	12.87	12.86					

La diferencia máxima con los valores de Osborn es igual a 0.05 magnitudes (K214, K676, L201, K242 o L56) siendo el resto de los valores inferiores o incluso nulos; curiosamente la estrella K286 destaca nuevamente porque ahora hay una diferencia de 0.22 magnitudes entre la fotometría de Kadla y la más moderna de Sandquist: es un astro frío, anaranjado, de modo que es posible que sea levemente variable¹². Esto nos demuestra, nuevamente, que los trabajos fotométricos modernos son consistentes entre ellos con diferencias de muy pocas centésimas de magnitud.

La secuencia fotométrica anterior está comprendida entre las magnitudes 10.61 y 15.58 V (según los muy precisos datos de Sandquist) de manera que cubre casi cinco magnitudes y una buena parte de las estrellas variables del cúmulo: desde los astros más brillantes situados en el cima de la Rama de las Gigantes Rojas (como V11, que roza la magnitud 11.9 V), hasta los astros situados aproximadamente 0.8 magnitudes por debajo de las RR Lyrae del Brazo Horizontal (que en el cúmulo aparecen en torno a la magnitud 14.8 V); quedan fuera del rango las cuatro variables de tipo SX Phoenicis que, en este cúmulo, se encuentran entre las magnitudes 16.93 (V50) y 17.23 V (V46) de manera que —utilizando la secuencia anterior— no podríamos estudiarlas tal como vemos en la Figura 2, en la cual una línea marca el límite establecido por dicha secuencia: es preciso elaborar una nueva que descienda, al menos, hasta la magnitud 17.5 V para que todas las variables queden dentro del rango cubierto. Esta tarea, delicada y nada fácil, la dejaremos para un estudio futuro en el que presentaremos distintas posibles secuencias fotométricas multibanda (BVR) así como los resultados derivados del uso de unas y otras, sin olvidar incluir una carta CCD que identifique adecuadamente todas estas estrellas.

¹² Su índice de color $B - V$ es igual a 1.09 (Kadla), 1.28 (Cudworth-Monet), 1.24 (Osborn) y 1.228 (Sandquist).

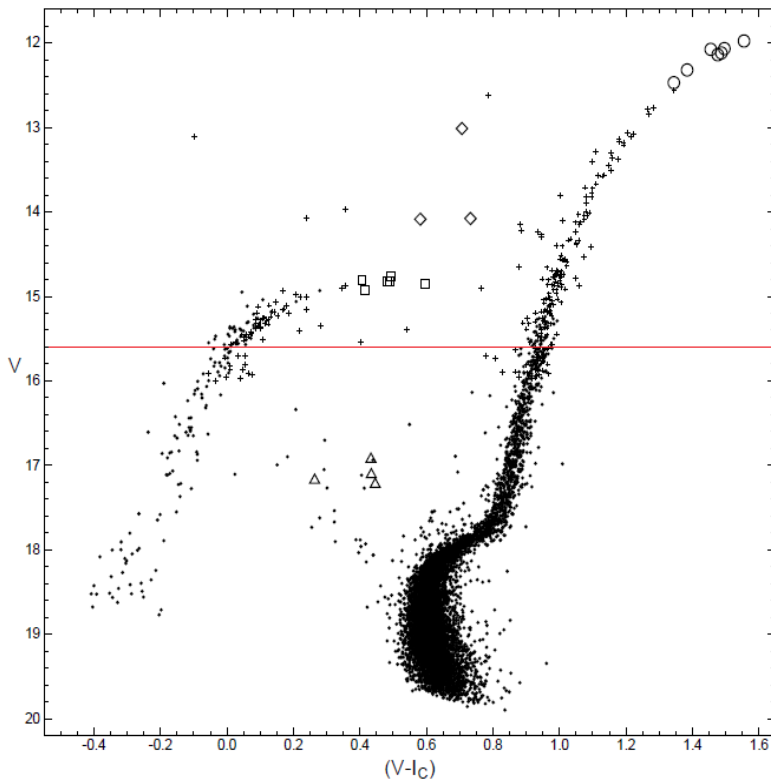


Figura 2. Digrana H-R del cúmulo Messier 13 (Kopacki, 2005). La línea, situada aproximadamente una magnitud por debajo del Brazo Horizontal, marca la magnitud límite recogida en las Tablas 6 a 9: las figuras geométricas representan variables de tipo Gigante Roja (círculos), Cefeidas (rombos), RR Lyrae (cuadrados) y SX Phoenicis (triángulos).

RESUMEN

Hemos presentado distintos estudios fotométricos del cúmulo globular Messier 13 publicados entre los años 1905 y 2010, fotográficos los primeros (hasta 1955), fotoeléctricos casi todos y con tecnología CCD los más recientes (a partir de 1978): al compararlos entre ellos comprobamos que sus magnitudes son bastante similares presentando diferencias máximas de muy pocas décimas de magnitud aunque, en general, estas diferencias se reducen a pocas centésimas. Con la intención de estudiar todas las estrellas variables del cúmulo hemos elaborado una secuencia fotométrica, en banda V , comprendida entre las magnitudes 10.61 y 15.58 V que nos permitiría medir el brillo de sus estrellas desde la cima de la Rama de las Gigantes Rojas ($\sim 11.9 V$) hasta un poco por debajo del Brazo Horizontal ($\sim 15.6 V$): las variables de tipo SX Phe, que brillan con magnitud $\sim 17.1 V$, caen ya fuera de este rango y no podrían ser estudiadas: dejamos para un trabajo futuro la elaboración de una secuencia más completa y precisa así como una comparativa entre las distintas secuencias que pueden elaborarse a partir de los trabajos fotométricos más modernos (1966-2010).

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) del Observatorio Astronómico de Cáceres.

REFERENCIAS

- Aladin Sky Atlas: <http://aladin.u-strasbg.fr/java/nph-aladin.pl>
- Arp, H. C. (1955), *AJ*, 60, 317
- Arp, H. C., Johnson, H. L. (1955), *ApJ*, 122, 171
- AAVSO (*American Association of Variable Star Observers*): <http://www.aavso.org/>
- Baum, W. A. (1954), *AJ*, 59, 422
- Brown, A. (1955), *ApJ*, 122, 146
- Cathey, L. R. (1974), *AJ*, 79, 1370
- Cudworth, K. M., Monet, D. G. (1979), *AJ*, 84, 774
- Johnson, H. L., Morgan, W. W. (1953), *ApJ*, vol. 117, 313
- Kadla, Z. I. (1966), *Izv. Glav. Astron. Obs.*, 181, 93
- Kopacki, G. (2005), *Acta Astronomica*, vol. 55, 85
- Luddendorf, H. (1905), *Publ. Astrophys. Obs. Potsdam*, 15, N° 50
- Osborn, W. (2000), *AJ*, 119, 2902
- Popper, D. M. (1947), *ApJ*, 105, 204
- Rey, S. C., Yoon, S. J., Lee, Y. W., Chaboyer, B., Sarejedini, A. (2001), *AJ*, 122, 3219
- Sandquist, E. L. (2004), *MNRAS*, 347, 101
- Sandquist, E. L., Gordon M., Levine D., Bolte M. (2010), *AJ*, 139, 2374
- Shapley, H. (1915), *Mount Wilson Contrib.*, 6, N° 116
- Shapley, H. (1919), *Mount Wilson Contrib.*, 6, N° 225
- SIMBAD Astronomical Database: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- Van Maanen, A. (1925), *ApJ*, 61, 130
- Violat Bordonau, F. A. (2001, abril) *Alcor*, boletín del club Asesores Astronómicos Cacereños
- Violat Bordonau, F. A. (2001, mayo) web Casanchi: http://casanchi.com/ast/05_Artic1.pdf
- Violat Bordonau, F. A. (2001, julio) web Casanchi: http://casanchi.com/ast/06_Artic2.pdf
- Violat Bordonau, F. A. (2001, agosto) web Casanchi: http://casanchi.com/ast/07_Artic3.pdf
- Violat Bordonau, F. A. (2002a, julio) web Casanchi: http://casanchi.com/ast/08_Artic4.pdf
- Violat Bordonau, F. A. (2002b, julio) web Casanchi: http://casanchi.com/ast/04_L222.pdf
- Violat Bordonau, F. A. (2002c, julio) web Casanchi: http://casanchi.com/ast/09_L414.pdf
- Violat Bordonau, F. A. (2002d, julio) web Casanchi: <http://casanchi.com/ast/l41401.htm>
- Violat Bordonau, F. A. (2003, agosto) web Casanchi: <http://casanchi.com/ast/2419.pdf>
- VizieR Catalogue Service: <http://vizier.u-strasbg.fr/>