

ESTUDIO FOTOMÉTRICO DE MESSIER 13 CAMPAÑAS DE LOS AÑOS 2019 Y 2020 (I)

FRANCISCO VIOLAT BORDONAU

Observatorio Astronómico *Norba Caesarina*, MPC Z71

E-mail: fviolat@yahoo.es

Resumen. En este trabajo fotométrico dedicado al estudio del cúmulo globular Messier 13 (NGC 6205) presentamos los primeros resultados obtenidos durante las campañas de los años 2019 y 2020: entre los mismos cabe mencionar la obtención de magnitudes de estrellas no variables, de chequeo fotométrico, así como curvas de luz, amplitudes, medición de magnitudes medias y períodos de las estrellas variables clásicas y de las candidatas a variables, y nuevas variables, descubiertas por Deras *et al.* en 2019.

1. ANTECEDENTES.

Desde inicios de los años 80 del siglo pasado hemos venido realizando observaciones de diversas estrellas variables, primero visualmente con prismáticos o telescopios de mediana abertura (remitiendo las mediciones obtenidas a la AFOEV¹, *Asociación Francesa de Observadores de Estrellas Variables*: por ejemplo R Leo, R Crb, T CrB, SS Aur, μ Cep, etc.), luego fotográfico (sin filtros, para experimentar con la fotometría de amplio campo) y más tarde, desde mediados de los años 90, con cámaras CCD: primero norteamericanas de la marca SBIG (modelos ST-4, ST-6 y otros) y más tarde de la marca británica *Starlight Xpress*, colaborando con la AAVSO (*Asociación Americana de Observadores de Estrellas variables*) o la BAA (*Asociación Astronómica Británica*) en sus diversas campañas observacionales. En todos los casos hemos tenido cartas de la zona en la que se encontraba la variable, estrellas de comparación y chequeo fotométrico, con lo cual nos hemos movido en un terreno seguro ya transitado por otros observadores. Precisamente en esa época, 1995-1997, comenzamos a observar cúmulos estelares (como Messier 44, Messier 67, Messier 37 y otros) para adquirir práctica en el estudio de estos cuerpos ya que en ellos podíamos observar, simultáneamente, distintos tipos de variables: δ Scu, eclipsantes, irregulares, etc.

En mayo de 1998 realizamos un sencillo estudio fotométrico del cúmulo Messier 13 (NGC 6205) que consistió en la toma de cinco a siete imágenes filtradas² cada noche a lo largo de dieciséis días consecutivos: el objetivo buscado era proporcionar experiencia instrumental (manejando el equipamiento: telescopio y montura, ordenadores de control y adquisición de imágenes, cámaras CCD y filtros) y conocimientos prácticos de fotometría multibanda B , V (procesamiento de las imágenes y análisis de las mismas con posterior extracción de mediciones fotométricas) a varios grupos de alumnos universitarios, de educación secundaria y aficionados a la astronomía; durante este estudio detectamos leves cambios de magnitud en algunas de las componentes más brillantes del cúmulo que, dos años más tarde y con más experiencia, identificamos como las variables V11, V17, V20, V24, V38, V40, V43 y algunas otras. Al carecer de estrellas de calibración y experiencia fotométrica en cúmulos globulares (aunque ya habíamos realizado y dado a conocer algunos trabajos sobre cúmulos abiertos) no publicamos esos resultados en revistas o medios profesionales y dejamos aparcados temporalmente ese tipo de estudios. En 1999 y 2000 volvimos a repetir estas prácticas fotométricas con estudiantes universitarios, obteniendo de nuevo resultados similares,

1 Todavía tenemos en nuestra biblioteca ejemplares de sus boletines trimestrales (BAFOEV), de mediados de los 80, en donde aparecen estas mediciones: nuestro código en aquel entonces era VIT.

2 Con filtros Kodak Wratten de color azul y verde intenso, no con filtros fotométricos profesionales.

dándolos a conocer en varias ponencias, conferencias, campamentos de verano y alguna *star party*: no sería hasta la primavera de 2001, tras elaborar una carta de Messier 13³ que identificaba sus diferentes estrellas variables, sospechosas de variabilidad (como V38 o V40) y estrellas de calibración (partiendo de la robusta fotometría de Osborn [2000]), cuando comenzamos a publicar nuestros primeros resultados en revistas de divulgación científica como *Tribuna de Astronomía* (con la idea de dar a conocer entre los aficionados estos trabajos, por si deseaban repetirlos o mejorarlos) o websites profesionales como la Web Casanchi y otras similares. Desde 2001 hemos estudiado el cúmulo Messier 13 durante veinte años consecutivos con distintos instrumentos (refractores de 75 y 90 mm de abertura para obtener fotometría de amplio campo, catadióptricos de 203 a 355 mm de abertura, reflectores de 40 y 51 cm de abertura y otros mayores): podemos decir, sin miedo a equivocarnos, que en estos momentos poseemos el mayor conjunto de datos fotométricos CCD propios del cúmulo, el cual nos ha permitido observar el comportamiento de sus estrellas variables de una manera no lograda hasta la fecha por ningún otro observador o equipo de observadores. Al disponer de mediciones fotométricas con una excelente cobertura temporal (típicamente de cuatro a seis meses en cada campaña año tras año) hemos podido obtener lo que podemos equiparar a “películas” de las variables, si las comparamos con los resultados más pobres y escasos de otros investigadores los cuales sólo trabajan habitualmente durante unas pocas jornadas en cada campaña (por ejemplo 23 noches entre los meses de febrero y agosto de 2001 en el caso de Kopacki *et al.*, 2003): de hecho el *M13 Team*⁴ (Osborn *et al.*, 2017) en los últimos años ha venido utilizando nuestras publicaciones para comparar sus resultados con los nuestros tanto en el estudio de Gigantes Rojas (2017) como en el de Cefeidas (2019); el propio Osborn (en comunicaciones privadas desde finales de 2020) nos ha apremiado e insistido mucho para que publicásemos rápidamente los resultados obtenidos en las campañas de 2019 y 2020, especialmente de la nueva variable de tipo RR Lyrae V54: dado que los valores obtenidos por uno de los componentes del *team* (Layden, 2020), especialmente su período, no coinciden con los publicados por Deras *et al.* necesitan examinar nuestros resultados con urgencia antes de publicar los suyos a lo largo del año 2021.

En este trabajo, el primero de varios, presentamos los resultados obtenidos en dichas campañas: las imágenes tomadas y filtros utilizados, el período durante el cual hemos trabajado, las mediciones fotométricas extraídas de ellas, la consistencia y coherencia de los datos (de campaña en campaña) así como la precisión de los mismos basados en la observación de estrellas de chequeo situadas en el cúmulo (es decir, de astros no variables).

2. SECUENCIA DE SANDQUIST *ET AL.* (2010).

Como en trabajos anteriores hemos utilizado con provecho los datos fotométricos del cúmulo publicados por Sandquist y colaboradores (2010), quienes tabularon 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: por ello podemos emplear como astros de comparación y chequeo una amplia gama de estrellas, de distintas magnitudes (entre la 12,175 V y la 16,610 V), situadas en diferentes posiciones en el cúmulo pero siempre alejadas del núcleo y su apiñamiento estelar. Para extraer de nuestras imágenes filtradas (B , V e I_c) las magnitudes en cada banda hemos utilizado tres programas distintos (*FotoDif*, *Astroart* y *AIP4WIN*), empleando como estrellas de comparación varios astros del cúmulo –cuya estabilidad lumínica y no variabilidad hemos comprobado en anteriores campañas– de brillo bien determinado, por ejemplo Ludendorff 199 (Ludendorff, 1905), en lo sucesivo L199, de magnitud 13,538 B y 12,175 V (Figura 1); por su

3 Basada en la fotometría B , V publicada por Osborn quien nos asesoró sobre futuros trabajos a realizar.

4 Formado por Osborn, Layden, Kopacki y otros, con el primero de los cuales mantenemos correspondencia sobre el tema (aunque no existe, lamentablemente, ninguna colaboración profesional entre nuestros equipos).

brillo este astro aparece en la parte más elevada del diagrama H-R del cúmulo (la Rama de las Gigantes Rojas), en la zona donde se sitúan el resto de las variables gigantes de largo período: no hemos encontrado en ningún trabajo fotométrico consultado la más mínima prueba de variabilidad. Precisamente para comprobar este punto, antes de meternos de lleno en la obtención de magnitudes de otras estrellas (incluyendo las variables, precisamente la misión principal de nuestros trabajos fotométricos), hemos comprobado la exactitud y precisión de nuestro método de trabajo midiendo el brillo, noche a noche a lo largo de todas las campañas, de siete estrellas no variables (situadas en distintas posiciones del cúmulo lejos del núcleo: Figura 1) comprendidas entre las magnitudes 12,480 V y 15,100 V ; a partir de las imágenes CCD capturadas hemos determinado la magnitud V media y la desviación estándar (σ) de dichas estrellas encontrando las mismas iguales o muy similares a las estándar. También se han tomado, en ambas campañas, algunas imágenes en banda B para determinar los índices de color $B - V$ de cualquier estrella contenida en el campo capturado. Finalmente cabe mencionar la mala calidad de la meteorología local a lo largo de las campañas, lo que ha afectado la precisión de las mediciones obtenidas y producido resultados no esperados: estamos convencidos que se ha debido al irreversible cambio climático.

3. OBSERVACIONES Y REDUCCIÓN DE DATOS.

Debido a la desfavorable meteorología del verano y el otoño de 2019 hemos podido capturar 525 imágenes en banda V (y 7 B) entre los días 2 de julio y 13 de octubre, ambos incluidos, aunque disponemos de fotografías tomadas días antes y después de las que no se han podido extraer mediciones fotométricas debido a su baja calidad. Hemos de hacer notar que, al contrario que años anteriores, en esta campaña hemos tenido abundantes noches con cirros, calima y una turbulencia local más alta de lo habitual (de 2 a 4") con temperaturas nocturnas más elevadas: de continuar esta tendencia en próximos años la calidad de las mediciones será más reducida, por desgracia para nuestros estudios. La campaña de 2020 se extendió entre los días 2 de junio y 13 de octubre, ambos incluidos: también en este caso hemos tenido algunas noches no fotométricas lo que no nos ha impedido tomar 754 imágenes en banda V y 7 en B . Como en años anteriores hemos utilizado un telescopio catadióptrico de 203 mm de abertura y 2000 de focal, con seguimiento automático, dotado de cámara CCD *Starlight Xpress* y rueda portafiltros equipada con filtros fotométricos B , V , R_C e I_C que han sido empleados para tomar imágenes y realizar, a partir de ellas, mediciones de los índices de color $B - V$: la escala en todas las imágenes ha sido igual a 0,90"/píxel.

La extracción de mediciones fotométricas se ha realizado con el programa *FotoDif*, escrito por Julio Castellano, empleado con éxito en campañas anteriores⁵. Dicho software necesita al menos una estrella no variable de magnitud conocida que será empleada como estrella de comparación, pudiendo utilizar tantas estrellas de comparación y chequeo como se desee: en la Figura 1 mostramos una imagen del cúmulo con ocho estrellas de comparación (la más brillante de ellas es Ludendorff 199, abreviada L199, de magnitud 12,175 V), parte de las cuales también pueden ser utilizadas como astros de chequeo para comprobar la estabilidad y precisión del proceso fotométrico a lo largo de la campaña. El programa es capaz de obtener la magnitud de cualquier estrella contenida en las imágenes, siempre y cuando ésta no se encuentre en una zona muy apiñada (por ejemplo lejos del núcleo del cúmulo) o cuando no tenga muy cerca una estrella de igual o superior brillo: esto nos ha impedido obtener mediciones útiles de las variables V7 (próxima a la brillante V11), V5 y V9 (separadas por sólo dos segundos de arco), V25, V34 y V6 —estas dos últimas pegadas a sendas estrellas bastante más brillantes—, necesitando utilizar en este caso un software menos sensible a este efecto: *Astroart* es ideal en estos casos.

⁵ También hemos empleado los programas *AIP4WIN* y *Astroart* no encontrando diferencias significativas entre los resultados obtenidos: este último software ha sido utilizado para medir el brillo de las variables del núcleo.

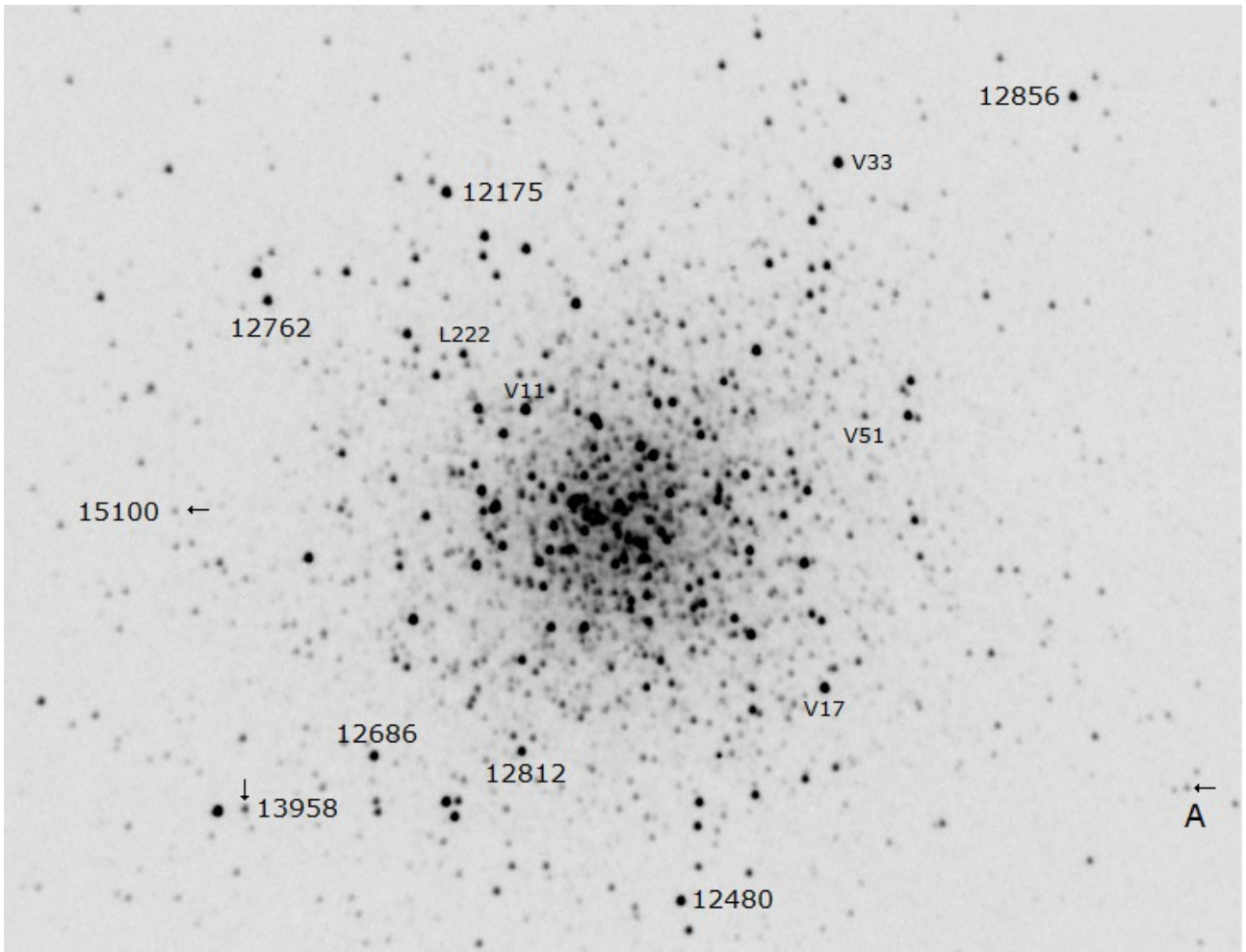


Figura 1. Ocho estrellas de comparación y chequeo fotométrico con sus magnitudes en banda V Johnson: se han identificado también las variables V11, V17 y V33, la candidata a nueva variable L222 (C12 en el trabajo de Deras *et al.*) y la variable (en luz ultravioleta) V51; con la letra A se marca la variable V54. Norte abajo y Este a la derecha.

En un trabajo anterior (Violat, 2013) describimos, entre otros, el estudio fotométrico que Sandquist *et al.* (2010) realizaron del cúmulo así como la secuencia fotométrica (Tabla 8 de nuestro trabajo) que comenzamos a emplear para medir sus variables. En la Figura 1 hemos identificado con sus magnitudes V (sin el punto decimal) estrellas de comparación/chequeo como L199, y otras siete, cuyos números Ludendorff y magnitudes estándar Sandquist presentamos en la Tabla 1:

Tabla 1

<u>L</u>	<u>V</u>	<u>L</u>	<u>V</u>	<u>L</u>	<u>V</u>	<u>L</u>	<u>V</u>
49	15,100	77	12,762	81	13,958	158	12,686
353	12,812	745	12,480	1073	12,856		

el lector podrá comprobar que dicha secuencia (12,175-15,100 V) abarca casi tres magnitudes pudiendo, por tanto, ser empleada perfectamente para nuestros estudios fotométricos.

4. RESULTADOS. MAGNITUDES V PROMEDIO.

Tras abrir, calibrar y medir las imágenes del cúmulo tomadas durante cada campaña hemos procedido a extraer de ellas las magnitudes de las estrellas que hemos estudiado: tres variables Cefeidas (V1, V2 y V6)⁶, ocho RR Lyrae (V7, V8, V25, V31, V34, V35, V36 y V54), una SX Phe (V37), las Gigantes Rojas incluyendo tres situadas en su núcleo (V42, V44 y V45) y cuatro nuevas (V58 a V61). También hemos estudiado catorce de las quince variables descubiertas por Deras *et al.* (2019) llamadas por ellos “Candidatas” y nominadas con la letra C seguida del número de orden: de ellas seis (de C1 a C6) son, según estos observadores, de tipo semirregular mientras que el resto (de C7 a C15) son irregulares; C6 presenta una amplitud superior a 0,44 magnitudes (en banda V), la de C11 es superior a 0,20 magnitudes y la de C14 baja a 0,14 magnitudes quedando las demás por debajo de este valor e incluso reduciéndose a sólo 0,04 magnitudes (es el caso de C1 y C13). En un trabajo futuro presentaremos los datos fotométricos de las mismas determinados con *FotoDif* y *Astroart*: número de mediciones realizadas en cada campaña, magnitudes V promedio, desviación estándar, amplitudes e índices de color $B - V$ obtenidos a partir de nuestras imágenes filtradas.

Mostramos a continuación la precisión y homogeneidad de las mediciones fotométricas extraídas de las imágenes tomadas en cada campaña, lo que determinamos examinando los valores obtenidos de las estrellas de chequeo estudiadas, datos que presentamos en la Tabla 2 (campaña del año 2019) y Tabla 3 (campaña del año 2020) y que son los siguientes: número Ludendorff, total de mediciones obtenidas (o puntos en su curva de luz), magnitudes V estándar Sandquist, magnitudes V promedio y desviaciones estándar, amplitud ficticia y rango medido:

Tabla 2

L	Puntos	V	Mag. V	Amplitud	Rango
745	521	12,480	$12,509 \pm 0,033$	0,152	12,417-12,569
158	521	12,686	$12,680 \pm 0,016$	0,069	12,641-12,710
77	479	12,762	$12,737 \pm 0,015$	0,061	12,707-12,768
353	521	12,812	$12,809 \pm 0,018$	0,088	12,768-12,856
1073	507	12,856	$12,854 \pm 0,021$	0,095	12,800-12,895
81	450	13,958	$13,888 \pm 0,024$	0,105	13,833-13,938
49	495	15,100	$15,104 \pm 0,053$	0,229	14,978-15,207

las magnitudes medias obtenidas son casi idénticas a las estándar en cuatro estrellas (L158, L353, L1073 y L49) pero en tres casos encontramos diferencias: 0,029 magnitudes en L745, 0,025 magnitudes en L77 y 0,070 magnitudes en L81. Podemos ver que las mayores amplitudes ficticias ($>0,080$ magnitudes) las medimos en las cuatro estrellas más débiles, las últimas de la tabla. L745, precisamente la estrella más brillante de las siete, ha mostrado una amplitud ficticia superior a 0,150 magnitudes lo que podría apuntar a cierta variabilidad en su brillo: no encontramos en ningún trabajo fotométrico consultado indicios sobre esta presunta variabilidad, lo que nos hace pensar que la dispar meteorología registrada a lo largo de la campaña es la causante de la dispersión de las mediciones (de hecho en la campaña de 2020 esta amplitud ficticia es mucho menor)

Presentamos en la Tabla 3 los valores determinado de las imágenes capturadas en la campaña de 2020; las distintas columnas muestran los datos ya identificados con anterioridad:

⁶ V6 aparece muy pegada a una estrella más brillante y por ello no es fácil de medir.

Tabla 3

L	Puntos	V	Mag. V	Amplitud	Rango
745	731	12,480	12,508 ± 0,018	0,083	12,459-12,542
158	722	12,686	12,691 ± 0,021	0,145	12,618-12,763
77	734	12,762	12,738 ± 0,018	0,138	12,671-12,809
353	695	12,812	12,830 ± 0,021	0,138	12,755-12,893
1073	665	12,856	12,851 ± 0,021	0,103	12,801-12,904
81	701	13,958	13,898 ± 0,026	0,122	13,835-13,957
49	721	15,100	15,108 ± 0,054	0,255	14,974-15,229

si comparamos las magnitudes medias con las estándar notaremos que son casi idénticas en tres casos (L158, L1073 y L49) con diferencias iguales a 0,028 magnitudes (L745), 0,024 magnitudes (L77), 0,018 magnitudes (L353) y 0,060 magnitudes de nuevo en L81, una estrella poco brillante (su magnitud es próxima a la 14 *V*): no son valores grandes teniendo en cuenta el diámetro de nuestro telescopio. Notamos que las amplitudes ficticias de las restantes estrellas son superiores a las medidas en 2019, con un rango mayor, lo que confirma nuestras sospechas: desde el año 2015 asistimos a un levísimo (aunque constante) empeoramiento de las condiciones meteorológicas durante el verano –debido al cambio climático– con un incremento de las temperaturas nocturnas, aumento del *seeing* y reducción del número de noches fotométricas que afecta a la calidad de las imágenes capturadas y empeora nuestro resultados de un modo muy sutil, pero mensurable, visible en la determinación de las magnitudes medias de las estrellas de chequeo (astros no variables).

5. CURVAS DE LUZ DE LAS ESTRELLAS VARIABLES.

Hemos obtenido, pese a todo, curvas de luz de buena calidad de las variables del cúmulo las cuales han mostrado el comportamiento propio de cada uno de los tipos a los que pertenecen: las Gigantes Rojas pulsando con períodos superior a los 30 días en todos los casos, las Cefeidas con oscilaciones de brillo con períodos cortos (de 1,45 días en el caso de V1 a 5,11 días para V2) y las RR Lyrae cambios de magnitud con períodos inferiores a 0,45 días (excepto V8, cuyo período es próximo a 0,75 días), lo que expondremos y analizaremos más despacio en futuros trabajos. Hemos podido determinar el período, amplitud, magnitud media y obtener la curva de luz de la nueva variable V54 (Ludendorff 1109, rotulada con la letra A en la Figura 1), descubierta por Deras *et al.* en 2019, que hemos seguido con mucha atención en ambas campañas ya que está muy alejada del núcleo⁷: se trata de la décima RR Lyrae del cúmulo (de tipo RRc) con un período levemente superior a los 0,295 días y una amplitud reducida (inferior a 0,16 magnitudes en banda *V*). También se han estudiado catorce de las quince nuevas candidatas a variables propuestas por Deras: en todos los casos nuestra fotometría muestra que sus amplitudes son reducidas. La variable de color azul V51 (Ludendorff 993 o “c”), de magnitud 14,039 *V* según nuestros datos, no muestra oscilaciones de brillo en banda *V*. En la Figura 2 mostramos, a modo de ejemplo, el comportamiento lumínico de la variable V17, un astro de tipo Gigante Roja, durante las campañas del año 2019 (arriba) y 2020 (abajo): son muy visibles sus lentas pulsaciones que provocan notorios cambios en su magnitud de dispar amplitud y con períodos distintos de un ciclo a otro.

⁷ Aunque aparece “escotada” por dos estrellitas de brillo similar, lo que dificulta la medición precisa de sus rápidas oscilaciones de brillo si la turbulencia de la noche es un poco elevada.

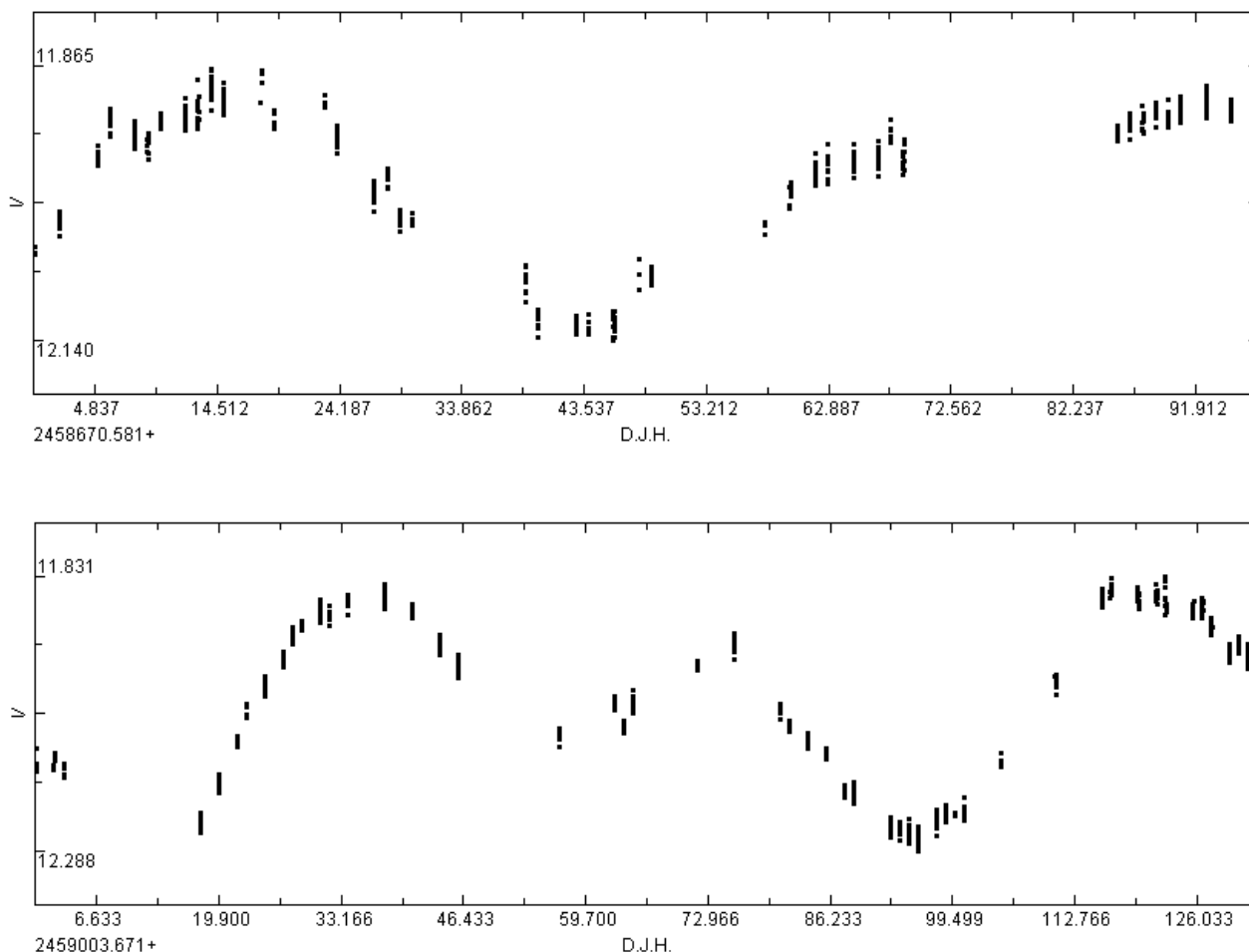


Figura 2. Curvas de luz de la estrella variable V17, de tipo Gigante Roja, obtenidas en las campañas de 2019 (arriba) y 2020 (abajo): se aprecian con claridad sus pulsaciones con dispares amplitudes y períodos con el paso del tiempo.

Hemos obtenido más de 35.400 mediciones fotométricas en la campaña de 2020 entre estrellas variables clásicas, nuevas variables (V54, V58, V59, V60 y V61), astros de chequeo y las candidatas a variables de Deras: es imposible reproducirlas todas en cualquier trabajo escrito ya que se necesitaría un documento de muchísimas páginas; los interesados en ellas pueden solicitarlas vía e-mail. Al final de este trabajo insertamos un Apéndice en el que reproducimos algunas de estas mediciones acompañadas de comentarios sobre su formato y diverso contenido.

6. ÍNDICES DE COLOR $B - V$.

En mayo de 1998, como indicamos al inicio de este trabajo, comenzamos a tomar imágenes con filtros azul y verde Kodak Wratten (nº 80A y 58, respectivamente) y unos pocos meses más tarde con filtros fotométricos profesionales B y V Johnson, con los cuales los alumnos universitarios que han trabajado en este Observatorio han podido realizar prácticas de las asignaturas de Instrumentación (correcto uso del telescopio, seguimiento, ordenadores, software astronómico y adquisición de imágenes astronómicas con CCD), Sistemas Fotométricos, Fotometría Multibanda BVR_{cIc} (obtención de mediciones en dichas bandas a partir de las imágenes filtradas) y Evolución Estelar, estudiando los distintos tipos de estrellas existentes en el cúmulo (todas de Población II, incluyendo las variables) así como la elaboración de diagramas H-R de tipo “color/magnitud” a partir de las mediciones de magnitud obtenidas.

Durante los veranos de 2009 y 2010 tomamos imágenes filtradas del cúmulo con un reflector de 51 cm obteniendo magnitudes B y V e índices de color $B - V$ de las estrellas situadas en su núcleo aunque, muy ocupados con tareas astronómicas, docentes y divulgativas no pudimos dar a conocer estos resultados. Animados por este éxito en la campaña fotométrica de 2013, que se extendió entre los días 30 de junio y 30 de octubre, diseñamos un *survey* de 635 estrellas (520 principales y otras 115 secundarias) repartidas por todo el cúmulo excluyendo el núcleo, ya medido anteriormente: tomamos 25 imágenes en banda B , 27 en V y 8 en I_C a partir de las cuales determinamos las magnitudes B , V e I_C e índices de color $B - V$ de las citadas estrellas publicando los datos de las primeras 114, y un diagrama color-magnitud de las mismas, a lo largo del año 2014 en dos completos artículos (Violat 2014a y b). Confiamos en publicar todos los resultados en un futuro trabajo: incluirá las magnitudes de todas las estrellas del *survey*.

Con la idea de comprobar estos resultados, al menos para una parte de las estrellas (por ejemplo las más brillantes, hasta la magnitud 15,500 V) en las campañas de 2019 y 2020 hemos vuelto a tomar imágenes filtradas: en el primer caso la noche del 29 de julio y en el segundo la del 10 de septiembre; en ambos casos hemos tomado siete imágenes con cada filtro. Presentamos a continuación las magnitudes B , V e índices de color $B - V$ de las estrellas listadas en las Tablas 2 y 3 a las que hemos añadido las variables V11, V17 y V33, la estrella V51 y la presunta variable azul L222; las distintas columnas muestran el nombre del astro (en realidad su magnitud estándar), magnitudes B , V e índices de color $B - V$ del año 2019 y B , V e índices de color $B - V$ del año 2020:

Tabla 4

Astro	B	V	$B - V$	B	V	$B - V$
12,480	13,790	12,492	1,298	13,789	12,511	1,278
12,686	13,877	12,665	1,212	13,854	12,681	1,173
12,762	13,885	12,715	1,170	13,883	12,735	1,148
12,812	13,978	12,818	1,180	13,956	12,828	1,128
12,856	13,896	12,847	1,049	13,889	12,829	1,060
13,958	14,828	13,864	0,964	14,721	13,871	0,850
15,100	15,178	15,102	0,076	15,165	15,079	0,086
V11	13,571	11,957	1,614	13,420	11,842	1,578
V17	13,429	11,904	1,525	13,861	12,230	1,631
V33	13,664	12,079	1,585	13,721	12,147	1,574
V51	14,096	14,038	0,058	14,108	14,025	0,083
L222	12,908	13,001	-0,093	12,926	13,036	-0,110

¿Son precisos los índices de color que hemos obtenido? ¿Son similares a los determinados por otros observadores? Podemos comprobarlo examinando los resultados publicados por Cudworth y Monet en su trabajo del año 1979 para algunas estrellas⁸ como “12,480” (1,28 ellos, 1,30 y 1,28 nosotros), “12,812” (1,09 frente a 1,18 y 1,13), “13,958” (0,93 comparado con 0,96 y 0,85), V51 (0,09 frente a 0,06 y 0,08) o “L222: -0,16 ellos y -0,09 y -0,11 nosotros; las diferencias son pequeñas y totalmente consistentes con la precisión obtenida por nuestro equipo.

⁸ Redondeando nuestros valores a dos decimales para poder compararlos con los de estos investigadores.

Utilizando los valores obtenidos en cualquiera de las dos campañas podemos elaborar un sencillo diagrama color-magnitud que mostrará la posición de las distintas estrellas en el mismo: deberíamos ver la rama de las Gigantes Rojas (ya que son las estrellas más brillantes del cúmulo) y, con suerte, la Rama Horizontal en la cual se sitúan las variables de tipo RR Lyrae; vamos a hacerlo utilizando los datos del año 2020, resultado que mostramos en la Figura 3:

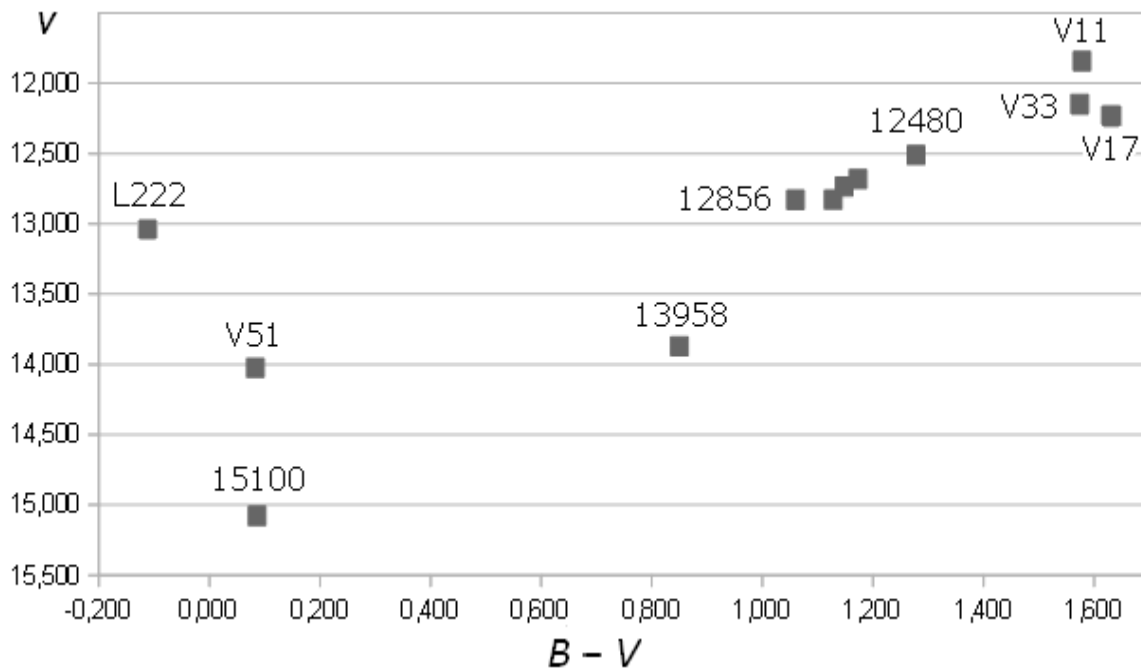


Figura 3. Diagrama color-magnitud dibujado a partir de las mediciones fotométricas V y $B - V$ de las doce estrellas de la Tabla 4 obtenidas en la campaña de 2020: se aprecia perfectamente la Rama de las Gigantes Rojas y una estrella (“15100”) situada en la Rama Horizontal; se han identificado algunas de estas estrellas con sus denominaciones.

En el diagrama aparecen tres estrellas variables en la cima de la Rama de las Gigantes Rojas (V11, V17 y V33), seis estrellas que dibujan perfectamente dicha rama, una estrella situada en la Rama Horizontal (de magnitud 15,100 V) así como una errante azul: L222. V51 es una estrella azul que, pese a su denominación, no muestra cambios de brillo en luz visible.

7. ESPECTROGRAMAS.

Desde el año 2003 venimos tomando regularmente espectrogramas del cúmulo utilizando para ello una red de difracción de 200 líneas/mm, lo que nos proporciona una resolución igual a 1,8 nm/píxel: aunque no muestran las finas y débiles líneas espectrales de las estrellas del cúmulo (ya que son gigantes de Población II pobres en metales) nos permiten determinar sus tipos espectrales por la forma y aspecto de los mismos –es decir, la distribución espectral de la energía– hasta la magnitud $\sim 15 V$. Con la red de difracción los espectros aparecen a un lado de cada estrella (espectro de orden 1) siendo bastante fácil identificarlas una a una. En la campaña de 2019 tomamos siete espectrogramas (con tiempos de integración de dos minutos cada uno) que han ascendido a diez en la del año 2020; en la Figura 4 mostramos uno de ellos:

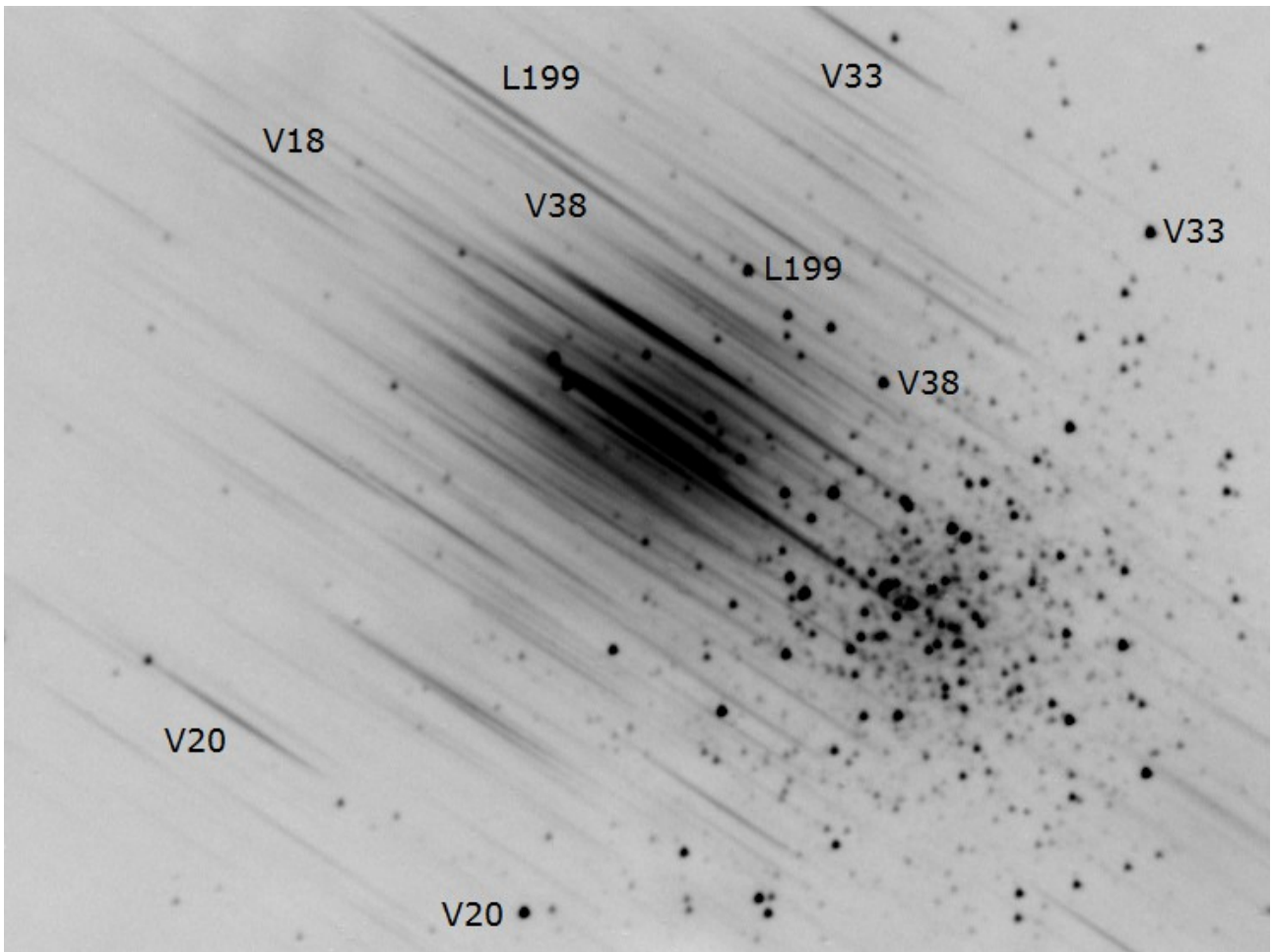


Figura 4. Espectrograma de Messier 13: se aprecian sus estrellas componentes y los espectros de las mismas hasta la magnitud $\sim 14 V$; hemos rotulado algunas variables (y sus espectros) para una mejor comprensión del proceso.

en él son visibles las estrellas del cúmulo (en negativo) y a la izquierda de las mismas, en diagonal, aparecen sus espectros⁹ como una banda alargada: Messier 13 posee varias veintenas de estrellas moderadamente brillantes (magnitudes $\sim 12-14 V$) por lo que en la imagen aparecerán, paralelos entre ellos y con distintas intensidades, varias veintenas de espectros. (La inclinación de los mismos sólo depende de la red de difracción: se la puede rotar para que los espectros aparezcan perfectamente verticales, horizontales o en cualquier otro ángulo.) Hemos manipulado el brillo y el contraste de la imagen para que la zona del núcleo no apareciese negra del todo debido a los espectros de sus estrellas. Se han rotulado con sus nombres algunas variables y sus espectros: por ejemplo V20, en la parte inferior de la imagen, y su espectro a la izquierda en diagonal; del mismo modo podemos ver a V33 en la parte superior derecha de la fotografía y su espectro, L199 y V38 con los suyos paralelos, V18 y la estrella de magnitud 12,762 V cuyos espectros aparecen adyacentes, etc. Estos espectros pueden ser calibrados y analizados adecuadamente con programas especiales tales como *Visual Spec*; también es posible obtener un corte transversal de los mismos (por ejemplo con *Astroart*): al hacerlo así (Figura 5) se obtiene la distribución espectral de la energía –brillo del astro *versus* color– como un gráfico en cuyo eje horizontal aparecen representados los píxeles y en el vertical el número de cuentas (es decir, su brillo aparente).

⁹ La estrella es el espectro de orden 0 y la banda el de orden 1; si alguna estrella fuese más brillante sería posible ver, más lejos de la misma y bastante más extenso (pero también más débil), el espectro de orden 2.

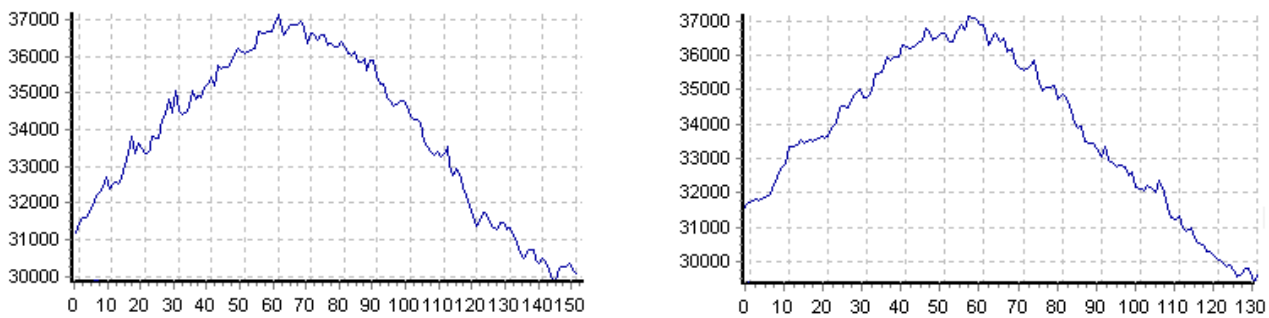


Figura 5. Perfiles de los espectrogramas de las variables V18 (izquierda) y V20 (derecha) obtenidos de una imagen CCD con el programa *Astroart*: la zona violeta/azul aparece en ambos casos a la izquierda (píxeles 0 a 10) y la roja/infrarroja a la derecha (píxeles 100 en adelante). En el eje vertical se ha representado el número de cuentas.

En este caso concreto el lector puede ver una forma “acampanada”: esto indica que el máximo brillo del astro se sitúa en la zona amarillo-anaranjada (píxeles 60-70); si hubiésemos analizado la estrella azul L222 el perfil sería notablemente asimétrico con el máximo a la izquierda (zona azul). Esta técnica, explicada y empleada rutinariamente en la asignatura de Espectroscopía, es muy útil pese a ofrecer espectros de baja resolución ya que no sólo permite –tras apenas una hora analizando espectrogramas de estrellas bien seleccionadas– poder clasificar a simple vista los tipos espectrales de los astros (B, A, F, G, etc.), sino obtener buenos espectros de cuerpos débiles (magnitud ~ 15 V con cinco minutos de exposición) tales como novae y supernovas, variables de diversos tipos, estrellas de carbono, asteroides, planetas y satélites planetarios, nebulosas, quasares, etc.

RESUMEN

Presentamos en este trabajo un compendio de los estudios fotométricos, colorimétricos y espectroscópicos realizados del cúmulo globular Messier 13 durante las campañas de los años 2019 y 2020: los iremos publicando, con mayor extensión y profundidad, a lo largo del año 2021. Entre ellos podemos mencionar la obtención de datos fotométricos (magnitudes medias, períodos, índices de color $B - V$, amplitudes y curvas de luz en banda V Johnson) de gran cantidad de variables del cúmulo, incluyendo casi todas las nuevas propuestas por Deras *et al.* así como las situadas en el núcleo. Confirmamos la variabilidad de V54, una nueva RR Lyrae de tipo RRc, de la que hemos determinado sus parámetros: magnitud media y amplitud en banda V , período (levemente superior a 0,295 días), índice de color $B - V$ y obtenido varias curvas de luz.

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 los diversos telescopios, las cámaras CCD y ruedas de filtros fotométricos (BVR_cI_c) del Observatorio Astronómico *Norba Caesarina* de Cáceres (España).

REFERENCIAS

- Aladin Sky Atlas: <https://aladin.u-strasbg.fr/>
- Astroart: <http://www.msb-astroart.com/>
- Cudworth, K. M., Monet, D. G. (1979), AJ, 84, 774
- Deras D., *et al.* (2019), MNRAS, 486, 2791:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019MNRAS.486.2791D/abstract>
- FotoDif: <http://www.astrosurf.com/orodeno/fotodif/>
- Kopacki, G. *et al.* (2003), A&A, 398, 541
- Layden, A. *et al.* (2020), RNAAS, 4, 2: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2515-5172/ab7242>
- Luddendorf, H. (1905), *Publ. Astrophys. Obs. Potsdam*, 15, N° 50
- NASA/ADS: <https://ui.adsabs.harvard.edu/classic-form>
- Osborn, W. (2000), AJ, 119, 2902: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/301383/pdf>
- Osborn, W. *et al.* (2017), Acta Astronomica, 67, 131-158:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AcA....67..131O/abstract>
- Osborn, W. *et al.* (2019), Acta Astronomica, 69, 101-133:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019AcA....69..101O/abstract>
- Sandquist, E. L. *et al.* (2010), AJ, 139, 2374:
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-6256/139/6/2374/pdf>
- SIMBAD Astronomical Database: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- Violat Bordonau, F. (2001), *Tribuna de Astronomía*, N° 28, Variables en cúmulos globulares (I).
- Violat Bordonau, F. (2001), *Tribuna de Astronomía*, N° 30, Variables en cúmulos globulares (II).
- Violat Bordonau, F. (2002), *Tribuna de Astronomía*, N° 33, Variables en cúmulos globulares (III).
- Violat Bordonau, F. (2002), *Tribuna de Astronomía*, N° 34, Variables en M13.
- Violat Bordonau, F. (2002), *Tribuna de Astronomía*, N° 36, Variables en M13. Las Cefeidas V2 y V6.
- Violat Bordonau, F. (2002, junio), *Bulletin de l'Association Française des Observateurs d'Étoiles Variables*, N° 100, páginas 13-16: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002AFOEV.100...13V/abstract>
- Violat Bordonau, F. (2013, agosto) web Casanchi: <http://casanchi.org/ast/secuencias01.htm>
- Violat Bordonau, F. (2014, febrero) web Casanchi: <http://casanchi.org/ast/secuencias02.htm>
- Violat Bordonau, F. (2014, marzo) web Casanchi: <http://casanchi.org/ast/secuencias03.htm>
- Visual Spec: <http://astrosurf.com/vdesnoux/>
- VizieR Catalogue Service: <https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>

APÉNDICE
MEDICIONES FOTOMÉTRICAS DE
ESTRELLAS DE MESSIER 13

De las fotografías filtradas B y V extraemos, como hemos indicado en el texto, mediciones fotométricas con las cuales realizamos ciertos estudios ya descritos en este trabajo: para ello creamos ficheros de texto (uno por cada astro estudiado) que contienen el Día Juliano Heliocéntrico con cinco decimales, la magnitud en banda B o V (con dos o tres decimales, según los que posean las estrellas de comparación), el error y la relación Señal/Ruido de la que depende el error. Insertamos a continuación doce mediciones, en banda V , de las estrellas V17 (izquierda) y la de chequeo “15,100” (derecha) obtenidas en la noche del 21 de junio de 2020:

D. J. H.	V	\pm	S/R	D. J. H.	V	\pm	S/R
2459021,61641	12,235	0,007	139	2459021,61641	15,035	0,029	35
2459021,61827	12,243	0,007	140	2459021,61827	15,177	0,028	36
2459021,62003	12,259	0,007	145	2459021,62003	15,105	0,026	39
2459021,62180	12,255	0,007	149	2459021,62180	15,144	0,026	39
2459021,62340	12,242	0,007	148	2459021,62340	15,122	0,026	39
2459021,62499	12,233	0,007	149	2459021,62499	15,105	0,025	40
2459021,62657	12,237	0,007	144	2459021,62657	15,131	0,026	38
2459021,62814	12,242	0,007	144	2459021,62814	15,174	0,027	37
2459021,62976	12,226	0,007	143	2459021,62976	15,037	0,026	39
2459021,63137	12,247	0,007	147	2459021,63137	15,101	0,026	39
2459021,63302	12,239	0,007	140	2459021,63302	15,040	0,026	38
2459021,63473	12,249	0,007	145	2459021,63473	15,132	0,026	39

El lector podrá notar que la primera columna es idéntica para las dos estrellas: esto se debe a que ambos conjuntos de datos han sido extraídos de la misma imagen y, por tanto, la fecha (incluyendo horas, minutos y segundos) será la misma para todos los astros estudiados en dicha fotografía. La primera estrella tiene una relación S/R muy alta (superior o igual a 139 en todos los casos) por lo cual el error es siempre inferior a 0,008 magnitudes mientras que la segunda, el astro más débil de todos los que hemos estudiado, presenta una relación S/N baja (entre 35 y 40) con lo cual el error cometido al determinar la magnitud se encuentra en el rango 0,025–0,029 magnitudes.

Teniendo en cuenta que hemos capturado 754 imágenes en la campaña de 2020, y que hemos seguido 43 estrellas distintas (variables, estrellas de chequeo y nuevas candidatas a variables), el número de mediciones obtenidas con el programa *FotoDif* supera las 32.400: a ellas hemos de añadir otras más de 3.000 obtenidas de las variables situadas en el núcleo del cúmulo (o cerca del mismo, como las candidatas a variables de Deras) que han sido medidas con el programa *Astroart*. El lector comprobará que resulta imposible insertar estos valores en un trabajo astronómico –como suelen hacer otros observadores– los cuales, naturalmente, no disponen de conjuntos de datos tan amplios en el tiempo, tan ricos en mediciones ni tan bien muestreados...