

VARIABLES EN M13: NUEVOS RESULTADOS (2001-2004)

Francisco A. Violat Bordonau - violat@olanet.net

Toni Bennasar Andreu

En trabajos anteriores (disponibles en Internet en la web Casanchi) hemos comentado que en el cúmulo globular M13 había algunas estrellas catalogadas como sospechosas de variabilidad: astros en los cuales se han registrado oscilaciones de brillo (aparentes o reales) pero para los cuales no existe certeza de variabilidad, al no disponerse de un conjunto de datos amplio y bien muestreado que confirme o desmienta esta cuestión.

En el estudio fotométrico de Osborn (verano de 2000) se citaban como sospechosas de variabilidad las estrellas L940*, L414, L258, etc... y en comunicación privada el propio Osborn nos avisó de la variabilidad de alguna más (como L629): esto nos hizo suponer que tenía pruebas de este hecho pero (quizá por la debilidad de las mismas) no podía comprometerse afirmándolo.

La disponibilidad de abundante tiempo, de un buen conjunto de astros de calibración fotométrica y de instrumentos propios nos llevó a diseñar un ambicioso proyecto: el estudio de M13 durante un período de 3-4 años, aunque este tiempo podría alargarse según los resultados obtenidos. Dicho proyecto tenía como objetivos principales:

- obtención de curvas de luz de las variables rápidas (RR Lyraes y cefeidas) bien estudiadas, con la determinación de sus amplitudes, períodos actuales y curvas de luz

- obtención de curvas de luz, períodos y amplitudes de las variables rojas bien conocidas

- vigilancia constante de las estrellas sospechosas de variabilidad con la idea de confirmar o descartar este estado.

En este último caso nuestra idea era obtener curvas de luz de estos astros a lo largo de 4-5 años, lo cual nos podría permitir asegurar -con abundante mediciones en la mano- si eran o no variables y, caso de serlo, presentar curvas de luz, amplitudes y períodos bien determinados.

Tras la elaboración de la carta CCD del cúmulo, la calibración fotométrica de la misma -por medio de las datos de Osborn- y una vez tuvimos unas pocas semanas de experiencia pusimos en marcha el proyecto: estábamos a inicios de junio de 2001. Además de medir las sospechosas de variabilidad (propuestas por los profesionales) elegimos un conjunto de 6 (ampliadas a 7 en 2003 y luego a 9 en 2004) estrellas brillantes o bastante brillantes con la idea de buscar en ellas indicios

*Las estrellas de M13 se nominan según el catálogo de Ludendorff (1905), anteponiendo la letra "L" a su número.

de variabilidad: caso de no serlo nos servirían de astros de chequeo fotométrico con los cuales comprobar la bondad de las mediciones y el error cometido en el proceso. Las denominamos astros S (abreviatura de Suspected, sospechosa), marcándolos S1, S2 ... S9 en nuestros mapas.

En julio de 2001, apenas 30 días después del inicio del estudio, comprobamos que la presunta variable L222 (la errante azul) no variaba en absoluto fuera de las típicas oscilaciones de baja amplitud debidas a errores aleatorios en el enfoque, seguimiento o transparencia del aire, manteniéndose en torno a la magnitud 13.15^a V (es decir, V Johnson). Al ir pasando a un diagrama Día Juliano-Magnitud las mediciones fotométricas comprobamos con sorpresa que L414, otra sospechosa de variabilidad, era realmente variable: lo mismo podíamos decir de las brillantes estrella L629, S4 (L96), L940, etc...

No podíamos creer los resultados: era imposible que dos aficionados sin experiencia fotométrica previa, con una carta de M13 elaborada por ellos mismos, con instrumentos de 20 y 30 cm de apertura y cámaras CCDs comerciales pudiesen emular a los profesionales o incluso rebasarles levemente, obteniendo curvas de luz en las cuales podían apreciarse oscilaciones lumínicas que eran claros signos de variabilidad...

Contactamos a Josep M^a Gómez, del Grupo de Estudios Astronómicos, quien nos aconsejó disponer de al menos 3 ó 4 años de fotometría de calidad antes de publicar nada precipitadamente, con el consiguiente riesgo de equivocarnos. Lamentablemente le hicimos caso y esto nos privó de habernos adjudicado la confirmación de variabilidad de estos astros, ya que mientras nosotros dudábamos sobre si esperar un año más o publicar un equipo de astrónomos polacos, dirigidos por el Dr. Kopacki, trabajaba en las mismas fechas sobre los mismos astros...

Nosotros continuamos obteniendo imágenes a lo largo del verano y parte del otoño de 2001, finalizando las observaciones cuando la meteorología local nos impidió continuar: era el momento de terminar de medir las imágenes y analizar en profundidad los resultados obtenidos.

La falta de experiencia y de filtros fotométricos V Johnson nos impidió obtener mediciones de calidad aunque comprobamos que, debido a la respuesta espectral de los chips Starlight Xpress usados, habíamos trabajado muy próximos al sistema V (es decir, con una sensibilidad máxima en el color verde). Posteriormente, con la adquisición de sendos filtros V en 2002, comprobamos que tanto las mediciones de M13 como las del cúmulo M29 -realizadas ex profeso para calibrar nuestras cámaras- eran completamente válidas: podíamos transformar nuestras mediciones al sistema estándar (o profesional) con una simple constante de brillo en todas nuestras imágenes.

Las fotografías obtenidas en 2001 y 2002 fueron medidas y analizadas empleando el programa IRIS, de Christian Buil, el cual utiliza una única estrella para la calibración fotométrica del software: se basa en el empleo de 'anillos' fotométricos que suman la luz de la estrella a estudiar (buscando su fotocentro) y restan la del fondo estelar, ofreciendo la magnitud con bastante precisión.

Lamentablemente el uso de una única estrella (que hemos de suponer de brillo fijo, no variable) es su debilidad: basta con tocar un poco lejos del fotocentro estelar, usar una imagen levemente movida o desenfocada para que toda la calibración esté afectada por errores de hasta 0.1 magnitudes; de hecho en la campaña de 2002 comprobamos que estrellas que antes no habían variado en absoluto (como S5) ahora presentaban una acusada caída de brillo, más acentuada a medida que avanzaba la campaña... algún tipo de error desconocido se nos había colado en el proceso de medición. Esta aparente debilidad de IRIS, unida al sistema de medición y búsqueda a mano de los fotocentros estelares (proceso lento, costoso y fatigoso para una treintena de estrellas en 5, 6 ó 7 imágenes por noche) nos movió a emplear el programa Astroart, de la compañía italiana MSB Software, en la campaña de 2003, aunque para homogeneizar las mediciones de ciertas variables tuvimos que remedir nuevamente todas las imágenes tomadas a lo largo del año 2002...

Astroart puede hacer astrometría y fotometría de calidad: basta con calibrar la imagen utilizando astros (hasta 12) de posición o brillo conocido para, automáticamente, no sólo localizar todas las estrellas de la imagen (por lo general 200-300 en nuestras tomas) sino conocer su posición o brillo con mucha precisión. Tras las primeras pruebas comprobamos que este programa reducía notablemente tanto el trabajo de medir (ahora automático: basta pasar el puntero sobre el astro a estudiar para obtener su magnitud) sino que aumentaba la precisión obtenida y reducía el error aleatorio. La toma de 3-4 imágenes por noche nos permitía eliminar aquellas mediciones erróneas.

Durante el invierno de 2001 empezamos a publicar en Internet los primeros resultados, en un primer trabajo sobre la estrella L414 y luego, despacio, sobre las demás variables confirmadas por nosotros. Cualquiera que lea ahora, años después, aquel primer artículo sobre L414 (V38

en la actualidad), podrá comprobar que a nuestras mediciones fotométricas acompañamos todo tipo de pruebas indirectas (medidas de velocidad radial, composición química, índices de color B-V...) que daban credibilidad a nuestros resultados: nosotros mismos no podíamos aceptarlos del todo.

Antes de llegar a publicar nuestros resultados fruto de dos campañas fotométricas (2001-2002) nos enteramos, a inicios de 2003, que había aparecido un artículo profesional que tiraba por el suelo todo nuestro trabajo: se trataba de Variable star in M13, de Kopacki, Kolaczowski y Pigulski. Nos pusimos en contacto con el Dr. Kopacki quien amablemente nos remitió una copia de su artículo: en él aparecían, para nuestra desesperación, curvas de luz y amplitudes de gran parte de las estrellas sospechosas que habíamos seguido; de este modo se confirmaban y bautizaban definitivamente astros como L414 (ahora V38), L629 (V39), L940 (V40), L96 -nuestra S4- (V43), etc...

Tras la primera impresión (desesperación, frustración y desánimo) comprobamos asombrados que este equipo no proporcionaba períodos prácticamente para ninguna de ellas (salvo V41), lo cual no daba por perdido todo nuestro trabajo: leyendo más despacio su artículo supimos que habían trabajado sólo durante 23 noches a lo largo de los meses de febrero a agosto de 2001; este pequeño número de noches les impedía disponer de datos bien repartidos en el tiempo, algo imprescindible para cubrir sus ciclos de oscilación y determinar el período. Por otro lado el empleo de un reflector de 60 cm de abertura (3 veces mayor que el de Cáceres y 2 veces mayor que el de Mallorca: una superficie 9 y 4 veces mayor, respectivamente) había originado una saturación parcial en los astros más brillantes, precisamente las gigantes rojas que más nos interesaban...

El artículo nos permitió comprobar que las curvas de brillo de ambos equipos, salvando la dispar calidad debida a la diferencia en la abertura de los telescopios, eran idénticas durante el tiempo en que ambos habíamos medido a la vez. Ya que no podíamos contar con la paternidad del descubrimiento nos propusimos determinar mejor la amplitud y el período de estas variables, presentando completas curvas de luz de las mismas.

En la figura 1 podemos ver la nueva carta CCD de M13 (elaborada en la primavera de 2004) con toda esta información adicional: incluye ya todas las variables y nuevas variables rotuladas con sus respectivos números (17 corresponde a V17, 33 a V33, 2 a V2, etc...) así como los astros de calibración fotométrica rotulados con cuatro cifras (centésimas de magnitud, según el trabajo de Osborn); en este caso la coma decimal ha sido omitida para mayor claridad.

estrellitas apiñadas a su alrededor (crowding) dificulta las estimaciones de brillo con un mínimo de calidad.

Su situación tan poco favorable nos hubiese desanimado a seguirla de no ser porque, al leer la bibliografía profesional buscando otro tipo de información sobre el cúmulo, supimos que un estudio sobre su velocidad radial apuntaba a que podría tratarse de un sistema binario o ser una nueva variable: ello nos movió a finales de 2001 a incluirla en la campaña de 2002.

Por otro lado el Dr. Jason Rowe (Universidad de Ontario, Canadá), en comunicación privada, nos remitió una imagen del cúmulo en la que nos había marcado algunas de las presuntas "nuevas variables" que había confirmado en sus trabajos sobre M13, rotuladas con números posteriores al 33 (el último oficial en 2001): V41 aparece en su carta (figura 2) con el nombre de V35 y la hemos marcado con una flecha para una cómoda identificación; como podemos apreciar en la imagen aparece demasiado pegada al núcleo.

Llama la atención el que sea la única variable de tipo gigante roja para la cual Kopacki y equipo han logrado determinar el período con certeza (42.5 días), algo que nos parece un tanto raro con la curva de luz a la vista (figura 3): ésta aparecía demasiado regular en su forma a todo lo largo del tiempo. Este hecho tan llamativo, su bajo brillo (de 1 a 1.5 magnitudes menos que el resto de las variables gigantes rojas) y las sospechas profesionales de que era una posible binaria nos movieron a estudiarla con todo el detalle posible.

Al analizar nuestras imágenes de la campaña de 2002 comprobamos que el programa IRIS producía mediciones con una dispersión bastante grande, fruto del crowding de la zona en la que se encuentra; la remediación de todas las imágenes con el programa Astroart proporcionó un material con una dispersión un poco menor, pero todavía excesivamente alto para nuestros propósitos.

De nuestros datos extraemos una conclusión muy clara: presenta una curva de luz similar a la de una binaria eclipsante y no a la de una pulsante gigante roja, cuyas curvas son más bien redondeadas (el período, sin embargo, es similar al de las demás variables rojas del cúmulo). Un análisis más detallado de la bibliografía profesional publicada sobre esta estrella (magnitud V, velocidad radial, índice de color B-V, movimiento propio y otros) nos hicieron sospechar de nuevo que estábamos en verdad ante una binaria eclipsante: la curva de luz de Kopacki, aunque de poca validez debido a su mala distribución temporal, parecía confirmarlo plenamente. La figura 3, elaborada por nosotros empleando las mediciones originales del equipo polaco tomadas de Internet, muestra la curva de brillo en una escala arbitraria (algo poco usual entre los profesionales): en ella se aprecia con claridad que durante su mínimo brillo la estrella alcanza magnitudes levemente distintas... creemos que esto es algo más propio de una binaria eclipsante que de una estrella gigante roja pulsante. La curva de luz, al contrario que la que estos autores muestran en uno de los esquemas de su artículo, ofrece mínimos claramente de distinta profundidad incluso contando con el típico error aleatorio inherente al proceso de medir.

La figura 4, por su parte, presenta nuestras mediciones de brillo de los años 2002 (arriba) y 2003 (abajo) analizadas con Astroart: en ambos casos al haber prolongado el trabajo durante bastantes meses hemos logrado capturar un mínimo de 3 ciclos cada año midiendo hasta 7 máximos de luz distintos; cuando analizamos las mediciones foto-métricas con el programa A.V.E. de modo separado, y con dos algoritmos distintos, obtenemos también períodos algo diferentes como ahora veremos en la siguiente tabla de datos:

PERIODOS

año	Bloomfield	Scargle
2002	41.62	41.54
2003	40.58	41.51
ambos	42.59	42.46

notamos que los resultados obtenidos analizando campañas fotométricas individuales oscilan entre

40.58 y 42.59 días. Sin embargo el análisis de los datos de modo conjunto (2002+2003) sí arroja valores más parecidos al que ellos proponen. Una manera de comprobar qué valor es el acertado consiste en representar la curva de luz de los datos conjuntos con cada uno de los períodos obtenidos; el resultado será o no coherente y mostrará o no una buena curva de luz, lo que indicamos con S o N:

Período coherencia

40.58	N
41.51	N
41.54	N
41.62	N
42.46	S
42.59	S

esto nos demuestra que las mediciones conjuntas 2002+2003 sólo son consistentes con períodos muy similares a los de Kopacki.

La figura 5 ha sido elaborada utilizando un período doble (85.04 días) para apreciar mejor su comportamiento: la inevitable dispersión en las mediciones nos impide dilucidar si sus mínimos son o no de idéntica profundidad y, por tanto, si estamos ante una binaria o una pulsante. Por su parte la figura 6b superior muestra la curva de luz obtenida empleando un período de 42.52 días, la media de los dos valores hallados por nosotros que difiere en 0.02 días (28.8 minutos) del valor del equipo polaco.

Podemos notar que la curva de luz es consistente con este período aunque muestra una dispersión de 0.06-0.09 magnitudes en todo momento originada, como comentamos, no tanto por su debilidad (magnitud 13.15 V) sino por la cercanía al núcleo y el apiñamiento que ello produce a la hora de medir correctamente... Si comparamos esta curva de luz con la de Kopacki (figura 6a superior) veremos que la nuestra parece, paradójicamente, de mayor calidad por su consistencia aunque presente (como es lógico debido a la menor abertura de los instrumentos empleados) una mayor dispersión en las mediciones.

Hemos utilizado también el programa PerSea y buscado con él los posibles períodos a efectos de comparación: en este caso se ha trabajado en el intervalo 30-90 días empleando 5 armónicos; el resultado es igual a 42.520 ± 0.415 días por un lado y 84.403 ± 1.574 días por otro, muy similar al facilitado por A.V.E. Al representar las curvas de luz con ambos períodos se obtienen en los dos casos resultados consistentes (figura 6a y 6b) sin que nos sea posible decantarnos por una u otra como representación del período más probable; la dispersión de 0.05 magnitudes durante el mínimo nos impide comprobar si esta profundidad es levemente distinta (posible binaria eclipsante) o si es idéntica (pulsante gigante roja). En la figura 7 mostramos el diagrama colormagnitud de los astros de M13 hasta la magnitud 14.10, marcando las estrellas variables con cuadrados negros: podemos ver que V41 está muy lejos de la cima de las gigantes rojas donde aparecen, precisamente, todas las pulsantes rojas.

A la vista de los resultados nuestra impresión es que estamos ante un sistema binario formado por dos estrellas gigantes rojas de bajo brillo (la magnitud que apreciamos, 13.15^a, es la suma

de la luz de ambas estrellas) que giran en torno a su baricentro en un período de 83-84 días. Necesitamos más mediciones (y de calidad) para determinar los mínimos, refinar las curvas de luz y medir mejor el período, algo que esperamos conseguir en los próximas campañas fotométricas.

Figura 2

. Imagen digital de M13 facilitada por Dr. Rowe: las nuevas variables identificadas por él aparecen señaladas con su nombre provisional; V41 es aquí V35 (flecha).

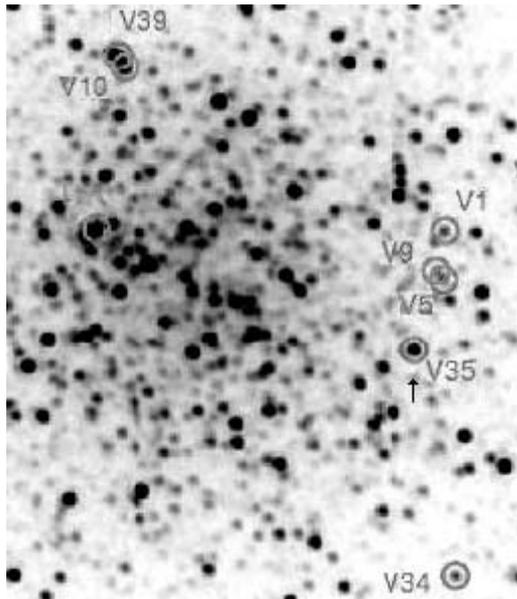


Figura 3

. Curva de luz de V41, en banda V, obtenida por Kopacki *et al.*: pese a la dispersión de las mediciones podemos ver la distinta profundidad de los mínimos.

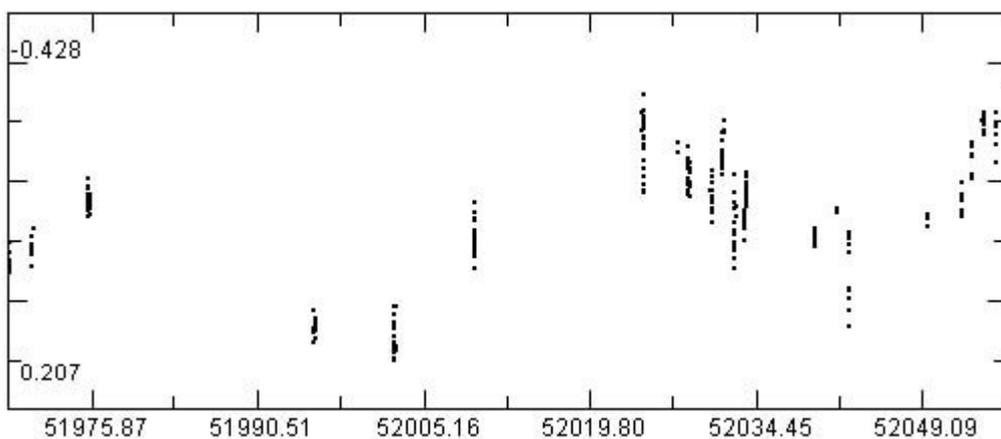


Figura 4

. Curvas de luz, en banda V, obtenidas por nosotros durante las campañas fotométricas de 2002 (arriba) y 2003 (abajo). La cobertura temporal nos ha permitido capturar de 3 a 4 ciclos completos por campaña, pero no hemos podido medir bien más que dos mínimos.

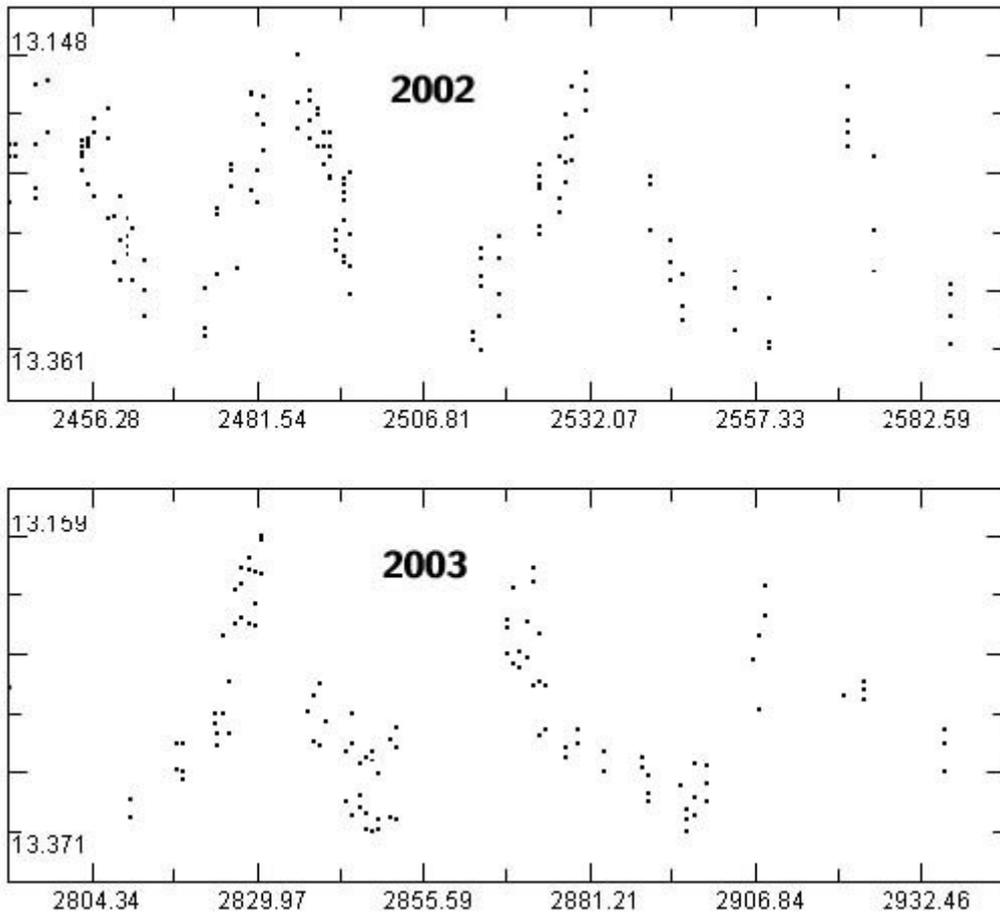
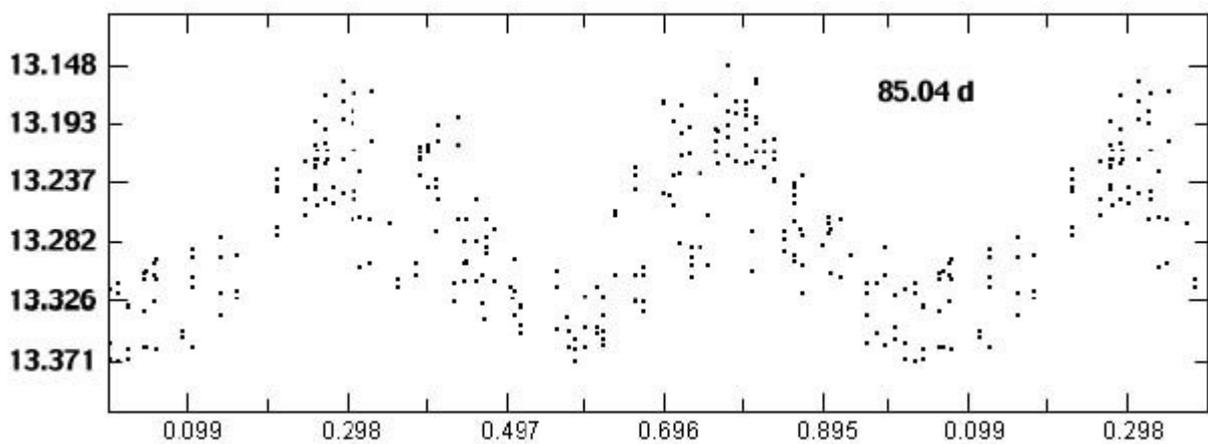


Figura 5

. Curva de luz de V41 obtenida empleando un período de 85.04 días, justo el doble del obtenido por Kopacki y equipo: la forma de la misma es sospechosamente similar a la de una binaria eclipsante, con mínimos de distinta profundidad aquí mal dibujados debido a la dispersión de nuestras mediciones (en torno a 0.05-0.07 magnitudes).



Figuras 6a (izda.) y 6b (dcha.)

. Curvas de luz obtenidas empleando un período de 42.52 días (arriba) y 85.40 días (abajo), elaboradas por medio del programa *PerSea*: las figuras de la izquierda corresponden a los datos de Kopacki, los de la derecha a nuestras propias mediciones; puede notarse la similitud

de ambas curvas de brillo, aunque las nuestras (pese a tener menos puntos) aparecen más completas y con una mejor cobertura temporal de su fase.

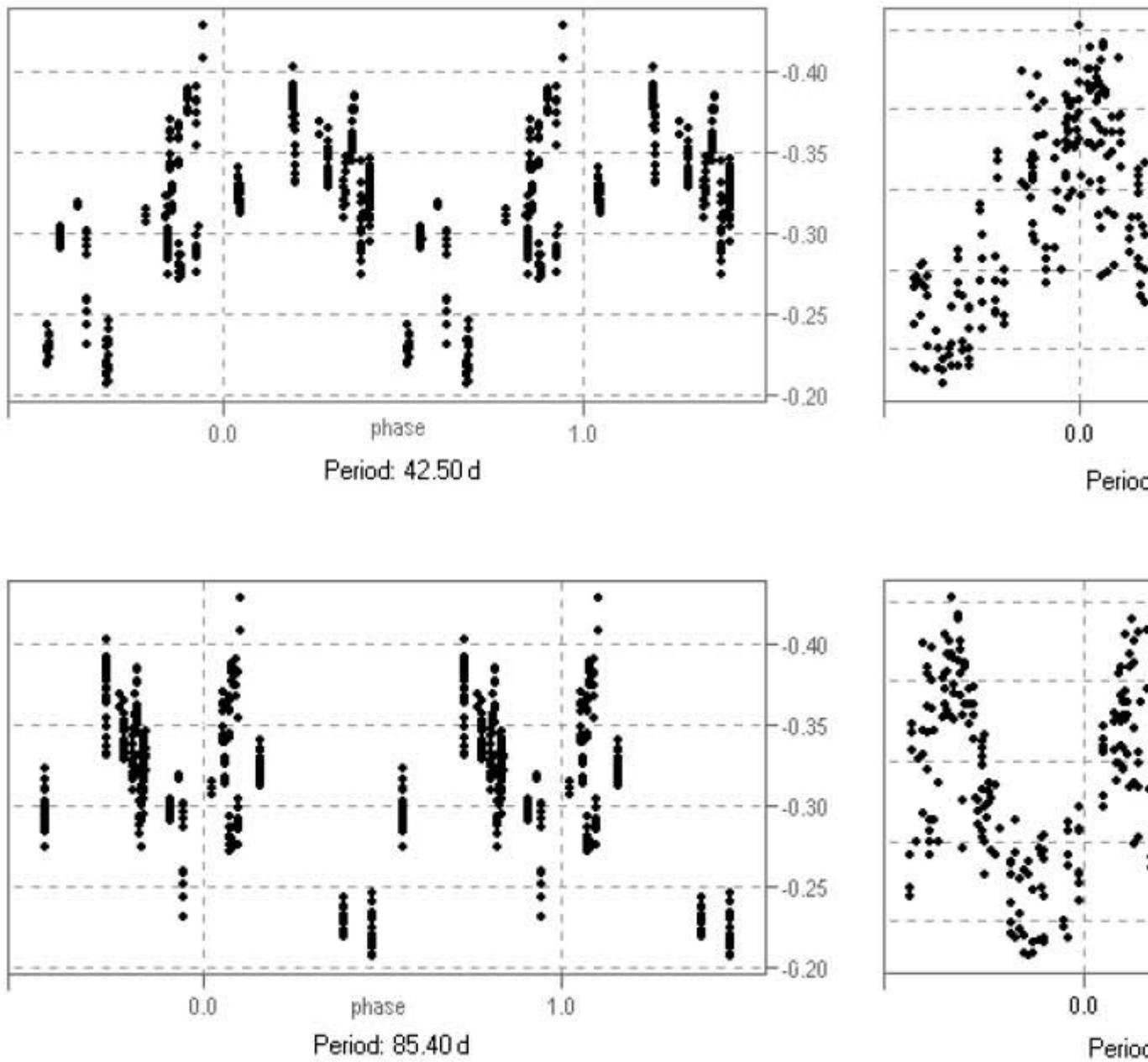
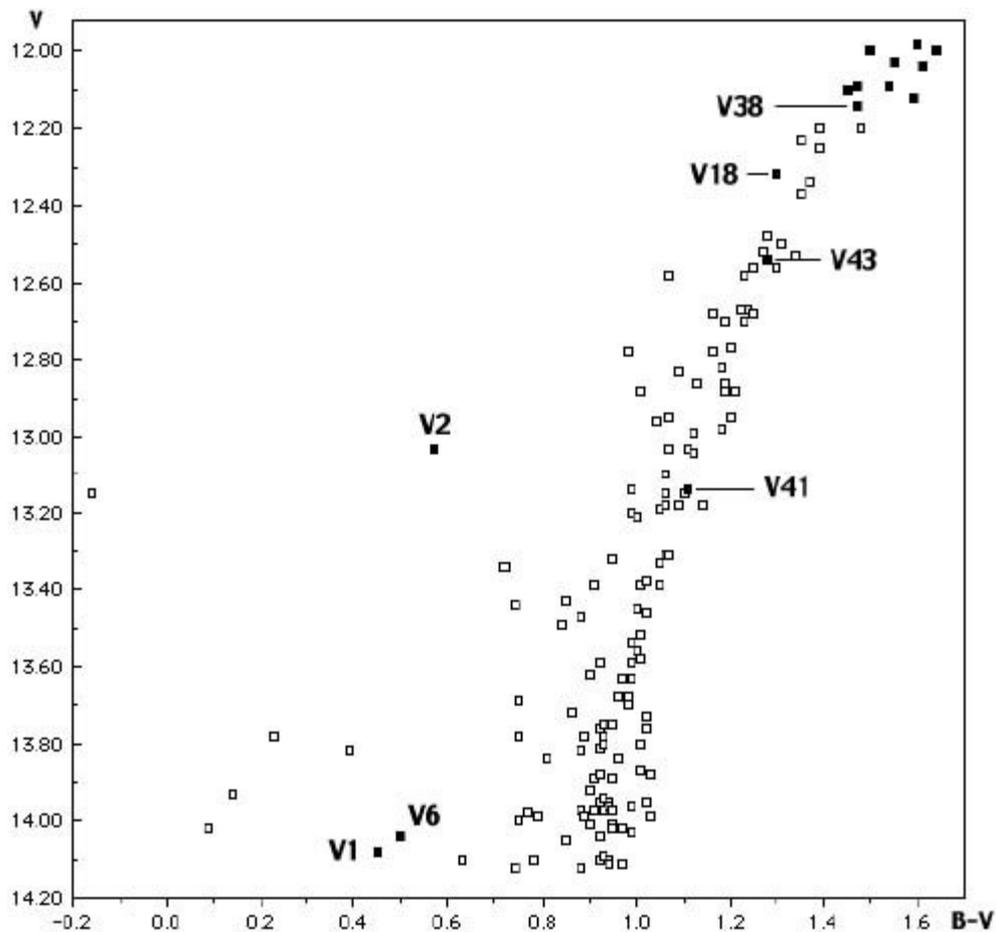


Figura 7

. Diagrama color-magnitud de M13 hasta la magnitud 14.10^a: las variables aparecen representadas con cuadrados negros; destaca la anómala posición de V41, lejos de la cima de las gigantes rojas y del resto de las variables rojas.



V11 (L324) es una variable del tipo gigante roja perteneciente al cúmulo en base a su movimiento propio (Cudworth y Monet, 1979); su variabilidad fue descubierta por H. Sawyer-Hogg (1940) quien la clasifica dentro del tipo *variable irregular* (1942); Demers (1971) presenta una curva de luz, la confirma como variable de largo período y cifra éste en 92.5 días, aunque posteriormente Russev (1973) determina un nuevo período igual a 91.77 días. En el trabajo fotométrico de Osborn y Fuenmayor (1977) se presenta nueva fotometría, estiman su período en 90.42 días y miden una amplitud de 0.5 magnitudes en banda B (luz azul) aunque con 'bumps' e irregularidades en su forma y amplitud. Russev y Russeva (1979) estudian su comportamiento durante un período de 16 años (DJ 2.437.790 al 2.443.669) trabajando con el reflector de 60 cm de la Belogradchik Astronomical Station (Bulgaria), notando que el máximo tiene una duración próxima a 91.77 días (el período fundamental) así como el cambio que éste ha sufrido con el tiempo: según ellos cada 2.070 días (23 ciclos de 90 días) el máximo primario se convierte en máximo secundario (máximo de menor brillo), y a los 1.035 días (11.5 ciclos de 90 días) el máximo secundario se convierte de nuevo en máximo principal; en este trabajo llegaron a detectar seis de tales cambios.

El estudio más reciente sobre variables en M13 realizado por Kopacki et al. (2003) muestra una curva de luz parcial a lo largo de 23 noches discontinuadas, con una amplitud de sólo 0.13 magnitudes en banda V e irregularidades en su forma y amplitud. Su período oficial más reciente es de 91.77 días (Clement et al., 2001).

Nosotros la hemos estudiado durante los años 2001 a 2004 obteniendo curvas de luz a lo largo de 5-6 meses en cada campaña: en la figura 8 mostramos las mediciones de los años 2001 a 2003, separadas por el tiempo durante el cual el cúmulo es invisible desde nuestros observatorios. Podemos ver que las amplitudes de los máximos no sólo es distinta, sino que el

intervalo de tiempo entre los mínimos es diferente: esto se pone de manifiesto claramente en la anchura de pulsación, el intervalo de tiempo que transcurre entre cada mínimo de la curva de luz.

La alternancia de brillo en sus máximos y la distinta duración de sus pulsaciones nos orientan hacia un fenómeno físico interno que lo provoca (reacciones nucleares): es como si la estrella tuviera que recuperarse del gran esfuerzo que le ha supuesto dilatar su radio (unos 41 millones de km en su máximo, según un cálculo aproximado de Violat) para alcanzar el máximo primario (en el cual, según nuestros datos, brilla un 40.6% más que en el mínimo), contrayéndose de nuevo y acumulando energía para subir a un máximo secundario de menor altura, recuperándose de nuevo (haciendo acopio de energía) para subir a un nuevo máximo primario y repetir todo el ciclo.

Si utilizando la potencia del programa A.V.E. dibujamos su curva de luz tomando el período oficial (91.77 días) y empleando las observaciones de ambas campañas, obtenemos un resultado absurdo visible en la figura 9: notamos de inmediato que no es una curva coherente lo que obtenemos, sino dos curvas distintas inconsistentes entre sí, como si la variable pulsase con dos períodos desiguales, de amplitud dispar con pendientes y duraciones distintas... Por medio del software citado hemos buscado su período en el intervalo 10-200 días determinando los siguientes valores para cada campaña: 113 d (2001), 108 d (2002) y 96 d (2003); con estos tres valores distintos no es posible dibujar curvas de luz coherentes ni siquiera utilizando su período oficial...

Esto nos parece una prueba solidísima que demuestra que es en realidad una estrella semirregular (tipo SRD) con, al menos, dos períodos distintos de pulsación que van modulando su curva de luz con el tiempo: sus períodos de oscilación, sus máximos de brillo e incluso la forma de la curva de luz cambian de un ciclo a otro, de modo que (al contrario que otras variables) no podemos analizar las observaciones conjuntas de varias campañas sino que es preciso estudiar cada año (o ciclo de pulsación) separado de los demás.

La búsqueda de un período superior a los 92 días pone de manifiesto posibles candidatos, ninguno de los cuales produce una buena curva de luz al analizar el conjunto completo: la mejor representación visual de su comportamiento -curva de luz bastante consistente con las mediciones de las campañas 2001 a 2003- se obtiene empleando un período de 522 días (figura 10). En ella podemos ver la desigual altura de los máximos (no así de los mínimos, los cuales coinciden con su radio menor: el instante de máxima contracción y mínima energía), la cambiante forma de la curva de luz y la modulación que los distintos períodos de oscilación producen.

Necesitamos al menos otras dos o tres campañas fotométricas más (incluyendo la de 2004 aún sin finalizar) para poder determinar, con un gran número de mediciones, cuál es el valor de los dos o tres ciclos que modulan su curva de luz.

Este período de 522 días podría corresponder a 6 ciclos de 87 días de duración media cada uno, o también a 3 de 92 días (período oficial) y otros 3 de 82 días: en la figura 9 comprobamos que tienen una duración claramente diferente.

Confiamos en que nuevas mediciones en próximas campañas nos permitan mejorar los datos y extraer conclusiones más precisas.

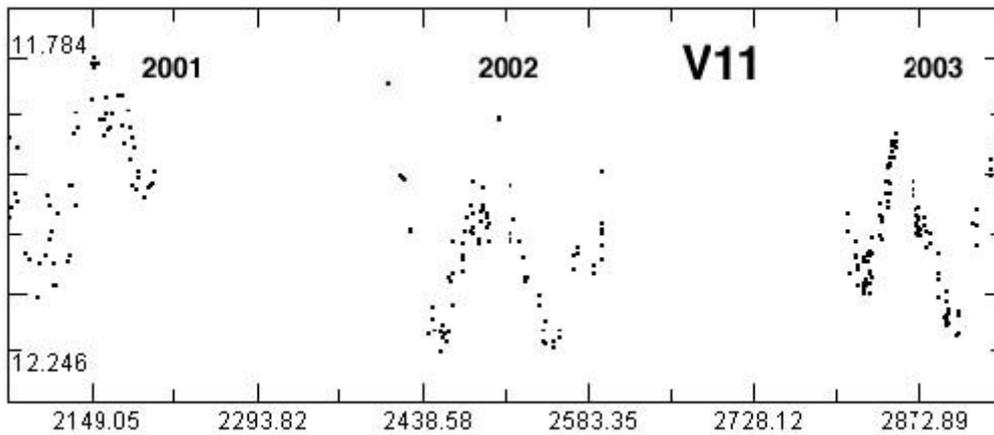


Figura 8

. Curva de luz de V11 en las campañas de 2001, 2002 y 2003: puede notarse la diferencia de brillo de un máximo a otro, así como la desigual longitud de su período de año en año.

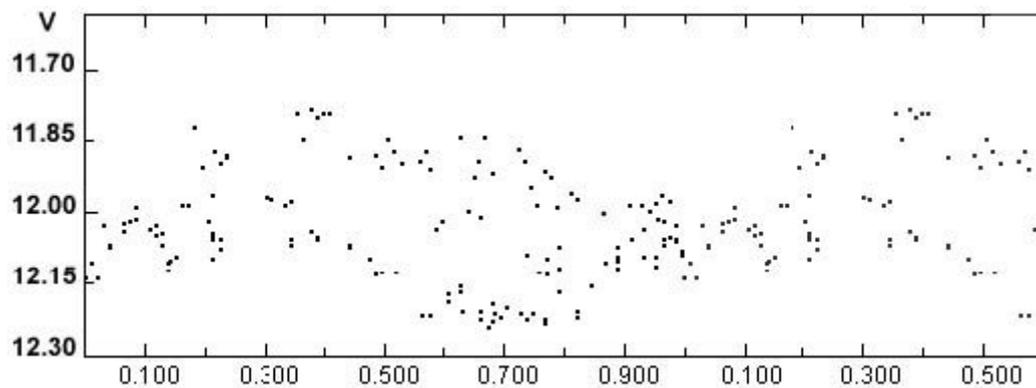


Figura 9

. Utilizando las mediciones de 2001-2002 y el período oficial de la variables (92 días) se obtiene un resultado absurdo, como si tuviese dos ciclos distintos: podemos ver dos curvas desiguales (fase: 0.3 a 0.8) que se cruzan (fase: 0.0); este resultado es plenamente consistente con el doble ciclo de pulsación y la modulación de su fase.

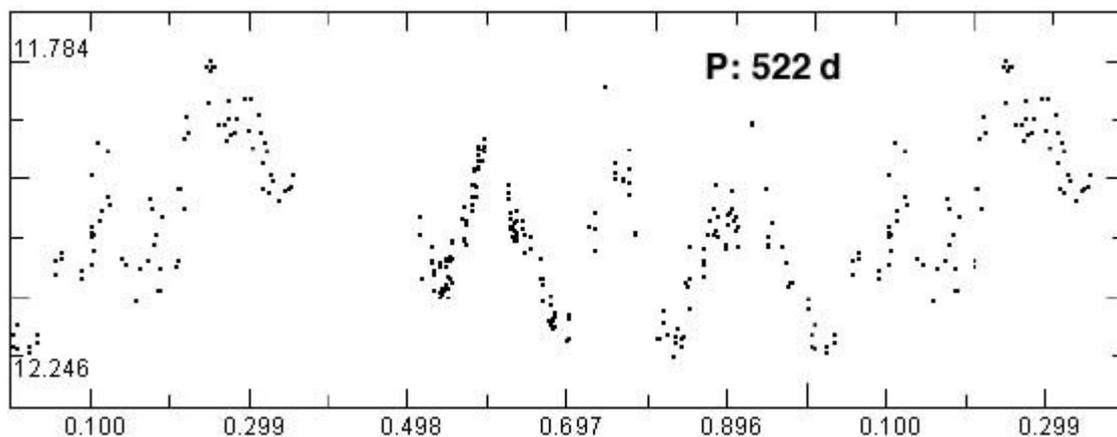


Figura 10

. Curva de luz de V11 empleando un período de 522 días en las mediciones de los años 2001 a 2003: destacan los cambios en la forma de la misma, la desigual duración de los ciclos y la modulación en amplitud y período ya comentada.

V2

(L306) es una estrella variable cefeida de Población II (tipo W Virginis) perteneciente al cúmulo según su movimiento propio (Cudworth y Monet, 1979): es del subtipo BL Herculis por tener un período de pulsación inferior a 8 días.

Hemos estudiado el cúmulo durante tres campañas fotométricas entre mayo de 2001 y noviembre de 2003 (una cuarta campaña, en 2004, no aparece en este resumen al no haberse analizado el conjunto de datos); nos propusimos dos metas:

- a) obtener una completa la curva de luz
- b) determinar el período actual.

La bibliografía ofrece distintos valores de su período según la época del trabajo: así encontramos un valor de **5.110939 días** (Osborn, 1969) y otro más reciente de **5.110818 días** en el *Catálogo de Estrellas Variables en Cúmulos Globulares* (CVSGC, 2001) determinado por Russev y Russeva (1983); habiendo transcurrido ya 20 años, y sabiendo que esta estrella alarga su período cerca de 20 días (Osborn, 1969) y 18 ± 2 días (Wehlau y Bohlender, 1982) por millón de años, pensamos que su período actual debía ser levemente distinto y que podíamos detectar este mínimo cambio con nuestras mediciones fotométricas.

En nuestro reciente trabajo *Photometric Study of the V2 Cepheid in M13*, remitido al "1st Virtual Meeting on Amateur Astronomy" (Italia, marzo de 2004), elaborado en colaboración con el Dr. Sánchez Bajo (Universidad de Extremadura y Agrupación Astronómica de Cáceres), presentamos los resultados obtenidos analizando 211 mediciones fotométricas propias: de este modo el período encontrado es de **5.11168 \pm 0.00021 días**, la magnitud V media igual a **13.089 \pm 0.005** y el rango instrumental medido **12.683-13.545** (figura 11) con una amplitud de **0.862 magnitudes**; dichos resultados son similares a los de Kopacki (2003).

Las mediciones disponibles y los máximos de luz, incluyendo las nuestros, se ajustan perfectamente a un período constante de **5.11086 \pm 0.00002 días** y muestran con claridad un alargamiento del período inferior al esperado, conforme a los resultados de Osborn y Wehlau-Bohlender; el valor del período para el año 2001 obtenido de las mediciones de Kopacki, utilizando el programa *ISDA*, es igual a **5.11056 d \pm 0.00034 días**: dicho valor es idéntico al anterior dentro del margen de error de los cálculos y mediciones.

Por tanto el período actual de V2 (2003) es muy levemente superior al oficial (1983) pero en todo caso inferior al esperado según los trabajos de Osborn, primero, y Wehlau y Bohlender después: necesitamos mediciones actuales, abundantes y precisas, para corroborar este resultado y determinar mucho mejor su período.

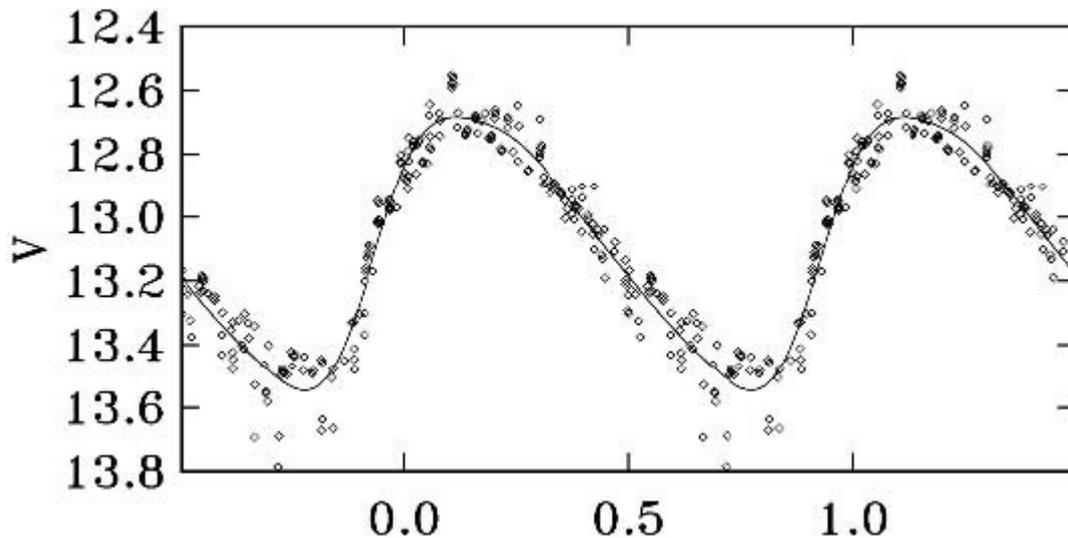


Figura 11

. Curva de luz de V2 basada en nuestras observaciones empleando un período de 5.11168 días: podemos apreciar que la cobertura es muy completa incluso en la rama ascendente, la dispersión de las mediciones es reducida (excepto en el mínimo, debido a la debilidad de la estrella con filtro V) mientras que los puntos dibujan muy bien su forma real.

Para nuestro trabajo ya citado las mediciones fotométricas fueron analizadas por medio de los programas AVE (de Rafael Barberá, perteneciente al Grupo de Estudios Astronómicos, G.E.A.) e ISDA (de Jaan Pelt*). El análisis de los datos proporcionó un resultado igual a 5.11168 +/- 0.00021 días, valor muy similar a la bibliografía profesional: la figura 11 presenta la curva de luz utilizando el período citado; una línea sólida representa el modelo obtenido con ISDA usando 4 armónicos.

Con el mejor ajuste se obtiene una magnitud media igual a 13.089 +/- 0.005, en buena concordancia con la literatura y los datos más recientes de Kopacki et al. (2003), 13.054 o Pike y Meston (1977), 13.10; el rango medido está entre las magnitudes 12.683-13.545 con una amplitud de 0.862 magnitudes: el resultado es muy similar al valor obtenido por Kopacki. De la sencilla relación período-color (Harris, 1985):

$$(B-V)_o = 0.275 + 0.206 \log P$$

obtenemos un índice de color $(B-V)_o = 0.42$, en concordancia con el valor 0.53 facilitado por Wallerstein y Cox (1984). Dicho índice de color corresponde a una temperatura efectiva de unos 6630 K, de acuerdo con la relación empírica de Flower (1996). La relación período-luminosidad-metalicidad para las cefeidas globulares con pulsación en el primer sobretono (Nemec et al., 1994), como se ha sugerido para V2, arroja una magnitud absoluta media V igual a -1.51. Tomando para el enrojecimiento un valor igual a 0.03 y la magnitud media V 13.089^a ya indicada, calculamos la distancia del cúmulo en torno a 8.0 kpc, en buena concordancia con el valor de 7.7 kpc de Harris (1996) para la distancia de M13. De la corrección bolométrica igual a 0.015 para el índice de color de 0.42 (Flower, 1996), deducimos que la magnitud bolométrica absoluta media de V2 es -1.49. De este valor obtenemos una luminosidad media igual a 316 veces la solar (asumiendo que la magnitud bolométrica del Sol es igual a 4.76). Este resultado, de acuerdo con la relación luminosidad-radius-temperatura derivada de la ley de Stefan-Boltzmann, proporciona un radio medio de aproximadamente 13 radios solares. Estos resultados, naturalmente, han de considerarse con cautela debido a la incertidumbre asociada a las relaciones empíricas utilizadas, aunque pueden dar una idea de los parámetros físicos de la estrella que hemos estudiado: estos valores son, como hemos visto, muy similares a los resultados profesionales ya expuestos.

Al iniciar nuestro proyecto fotométrico pensamos que bastaba con analizar un amplio conjunto de mediciones (4 años hasta ahora) para, de inmediato y sin problemas, determinar el período de todas las variables y nuevas variables hasta el segundo o tercer decimal... nada más lejos de la realidad. Hemos comprobado con estupor que en una campaña el período obtenido coincide con el esperado, pero que al siguiente año se obtiene uno mucho mayor o incluso doble del anterior...

Nuestro asombro empezó a finales de 2001: el análisis de las mediciones (mediocres en aquella época) proporcionaba períodos distintos a los esperados; pese a que nosotros habíamos trabajado a lo largo de casi 6 meses y disponíamos de abundantes datos los resultados no mentían: las variables no oscilaban en períodos tan cortos como los oficiales, no sólo porque los periodogramas apuntasen a valores distintos sino porque visualmente estas curvas de luz mostraban arcos (subidas, máximos, bajadas y recuperaciones de brillo) de mayor longitud que las esperadas.

Naturalmente achacamos esta discrepancia a la baja calidad de nuestras mediciones; un estudio con un poco más de calidad en 2002, de mayor precisión en 2003 y mucho más preciso en 2004 ha vuelto a mostrar lo mismo: las curvas de luz obtenidas son demasiado anchas con una dispersión excesivamente alta.

¿Cómo trabajan los profesionales?; podemos comprobarlo citando el descubrimiento de la variable V32 : del análisis de 60 placas fotográficas obtenidas a lo largo de 8 años (media: ¡7,5 placas por año!) Russev y Russeva anuncian en 1982 el hallazgo de una nueva cefeida con un período de

21.35 días... sin embargo por su color y magnituden el diagrama H-R está situada fuera de la banda de inestabilidad en la cual aparecen todas las variables cefeidas. Es usual entre los profesionales disponer de muy poco material repartido en largos períodos de tiempo, al revés de lo que nosotros hacemos (abundante material a lo largo de varios meses), con lo cual esta cobertura temporal es casi total y podemos deducir fácilmente el comportamiento real de la variable estudiada.

Enfrentemos los datos profesionales con los que nosotros obtenemos en una tabla que contiene el nombre, el período oficial, el determinado por nosotros de los datos originales de Kopacki (no observó ni V20 ni V33 al trabajar de un chip de campo pequeño) y los que hemos calculados con nuestros datos de 2003 y 2004:

Nombre	Período	Kopacki	2003	2004
V11	91.77	81?	(102)	
V15	39.23	60-70?	(43)	(70)
V17	43.27	30-60, irr?	(42)	(81)
V18	41.25	irr, 140 d?	(45)	(81)
V19	44.48	irr, 60-70?	(33)	(78)
V20	64.26		(61)	(59)
V24	45.34	40-45, irr?	(40)	(37?)
V33	40.37		(60?)	(36)

los períodos determinados tanto de las mediciones de Kopacki como de las nuestras parecen ser más largos que los oficiales, no faltando estrellas en los cuales éstos parecen ser distintos de ciclo en ciclo (marcados como irr?) o incluso son dudosos (marcados con ?); todos los encerrados entre paréntesis son aproximados.

Nuestra precisión fotométrica es inferior a la de un telescopio profesional, pero por contra nuestra cobertura temporal es mucho más amplia y los datos muy abundantes: un buen programa de análisis de datos como es A.V.E. (del G.E.A.) debe poder determinar cualquier período sin problemas. Si unimos las mediciones de las 4 campañas e intentamos obtener curvas coherentes comprobaremos asombrados dos cosas:

a) los períodos oficiales no producen casi nunca o nunca buenas curvas de luz

b) sólo se obtienen resultados (en la mayoría de los casos mediocres) con períodos más largos que los esperados.

Indudablemente algo falla: ya que no podemos dudar de los profesionales (que trabajan con telescopios de 5 a 10 veces mayores que los nuestros, y con ordenadores y programas de análisis mucho más refinados que los que nosotros utilizamos) tenemos que suponer que el problema radica en nuestras mediciones, necesariamente erróneas debido al método de trabajo o al instrumental... sin embargo en variables de menor brillo (como la cefeida V2, de la 13.5ª magnitud media) se obtienen excelentes resultados fotométricos.

En la página siguiente presentamos 6 curvas de luz en dos grupos distintos: en el de la izquierda aparece el comportamiento (brillo en banda V) de las variables V15, V17 y la nueva V38 según nuestras mediciones, en el de la derecha las curvas de luz obtenidas por Kopacki y equipo durante la campaña de 2001. En ambos casos podemos comprobar, con las curvas a la vista, que V15 no pulsa con un período de 39.23 días y que V17 no cubre un ciclo en 43.27 días como indican los datos profesionales, sino que ambas suben y bajan de brillo con períodos poco definidos o, en el caso de V38, quizá incluso sin periodicidad... Intentemos obtener algunas conclusiones de estos datos:

V15: en la gráfica de Kopacki se ve que de máximo a máximo empleó 62 días aunque del mínimo al máximo sólo necesitó 35 días, pese a que su período oficial es de 39 días; el período, por tanto, debe estar comprendido en el rango 60-70 días como poco. Nuestra curva de luz la muestra con amplitud dispar y período desigual (¿68 días?).

V17: podemos ver en la gráfica de Kopacki que de su máximo al mínimo transcurren unos 65 días, aunque del máximo (día 75) al siguiente -de menor brillo, día 125- sólo han pasado 50 días; su amplitud es dispar de ciclo en ciclo ¿con máximos alternos de distinta profundidad? Nuestros datos muestran una lenta y segura recuperación desde su mínimo; ¿período superior a los 80-85 días en el intervalo estudiado por nosotros?

V38: los datos de Kopacki la muestran de pequeña amplitud y período poco definido aunque mediano: de un mínimo (día 102) al siguiente (de menor profundidad, día 149) transcurren en torno a 45-47 días mientras que del mínimo más profundo -día 102- al máximo -día 134- han transcurrido 32-35 días; período poco definido en torno a ¿60-65 días? Nuestra curva de luz muestra amplitudes distintas (en ocasiones levemente superior a 0.1 magnitudes) y período poco definido, probablemente en torno a ¿45-50 días?

Hasta aquí el resultado que obtenemos estudiando de modo tradicional el material obtenido. Si decidimos que este material es válido no existe coincidencia con el resultado oficial; si decidimos que el período oficial es el que manda entonces ambos equipos, ellos y nosotros, hemos trabajado rematadamente mal obteniendo basura...

Figura 12. Curvas de luz de V15, V17 y V38 obtenidas durante la campaña de 2004: las tres presentan irregularidades tanto en su amplitud como en su período.

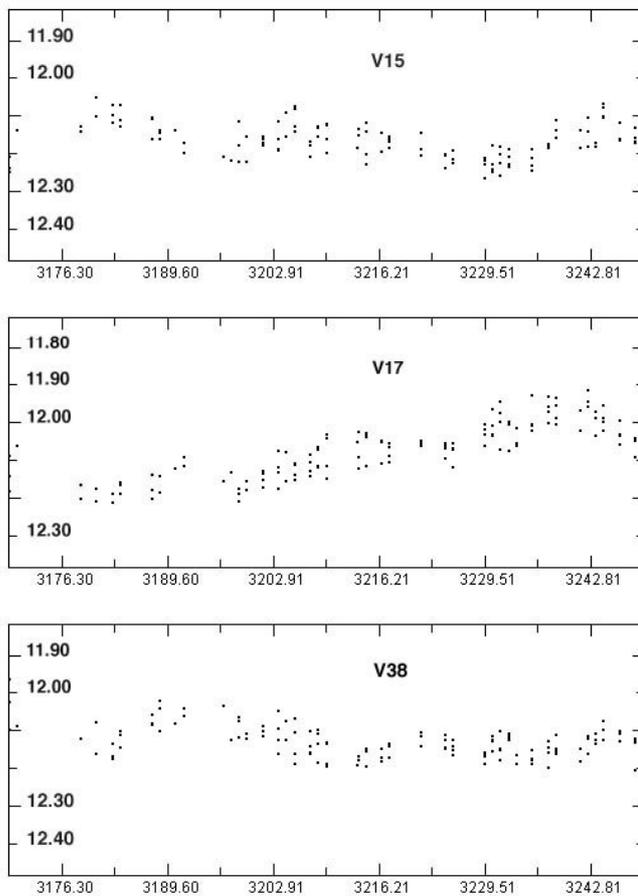
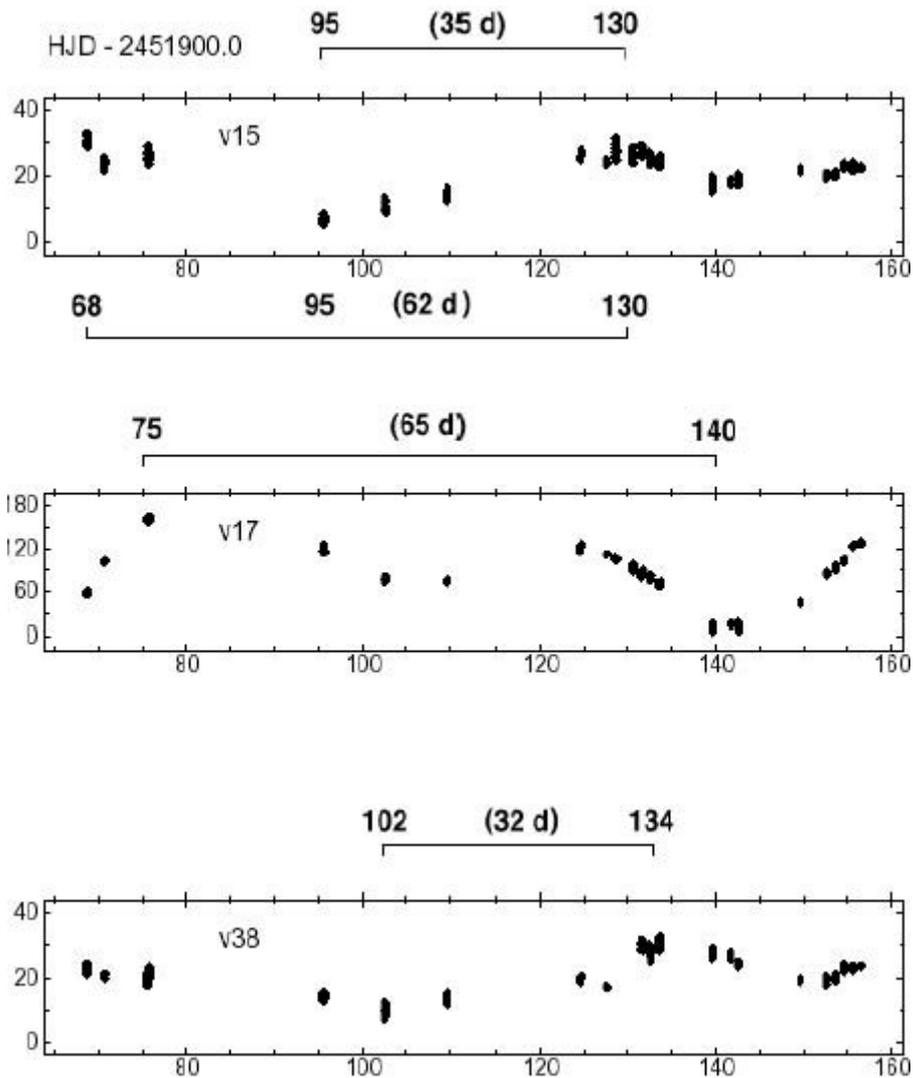


Figura 13. Curvas de luz de V15, V17 y V38 tomadas del trabajo de Kopacki

et al. Se han marcado algunos posibles ciclos utilizando mínimos, máximos, caídas de brillo y recuperaciones: podemos ver que no hay una clara regularidad en el período de estas variables ni en su amplitud.



¿Y si existe una solución alternativa?; miremos las curvas con otros ojos, con la mente más abierta y seguramente encontraremos la solución. En la página siguiente vuelvo a insertar las mismas 6 curvas de luz, aunque presuponiendo un modelo muy distinto al seguido hasta ahora. Partamos del siguiente supuesto: las variables rojas de M13 pulsan pero lo hacen con períodos que no son exactos o idénticos de ciclo a ciclo (el motivo no importa ahora), sino que son levemente distintos y, en ocasiones, se atropellan o superponen unos sobre otros. En este caso al ser algo diferentes se produce una modulación en la curva de luz: la estrella parece oscilar de un modo un tanto errático presentando máximos y mínimos de distinta altura o profundidad, a la vez que la curva de luz vacila con un período diferente de ciclo en ciclo mostrando extrañas caídas y recuperaciones inesperadas, fácilmente visibles en las seis curvas de luz.

Si analizamos ambos conjuntos de datos con esta hipótesis vemos que hemos encontrado la solución: al dibujar arcos (ciclos de pulsación) de distinta longitud comprobamos asombrados que la estrella realmente está oscilando con un período muy próximo al oficial, aunque no lo parece ya que se origina una modulación en la curva de luz que podría despistarnos... el modelo es consistente no sólo con nuestras observaciones sino también con los datos de Kopacki: basta con examinar la curva de V17 para comprobarlo.

¿Hay otro modo más científico y serio de corroborarlo?; sí, analizando los períodos ya presentado en la página 13. Los obtenidos con los datos de la campaña de 2004 pueden dividirse entre 2 si son superiores a 50 días (excepto para V11 y V20 cuyos períodos reales son superiores a 60 días): la operación nos proporciona períodos muy próximos a los oficiales; volvamos a repetir la tabla bajo este supuesto para comprobarlo:

Nombre	Período	Kopacki	2003	2004
V11	91.77	81?	(102)	
V15	39.23	60-70?	(43)	(35)
V17	43.27	40-45	(42)	(41)
V18	41.25	irr, 140 d?	(45)	(40.5)
V19	44.48	irr, 60-70?	(33)	(39)
V20	64.26		(61)	(59)
V24	45.34	40-45, irr?	(40)	(37?)
V33	40.37		30?	(36)

la aparente discrepancia entre los períodos obtenidos y los oficiales desaparece ahora y confirma la hipótesis de partida: las variables rojas de M13 pulsán con períodos levemente distintos y esto produce una modulación en su curva de luz; el caso más extremo lo tenemos en V11, ya analizada (curvas de luz en páginas 9 y 10).

¿Por qué en ocasiones el periodograma facilita un valor que es el doble del real?; porque el programa analiza matemáticamente las mediciones en busca de regularidades, pero no sabe discriminar dos o más conjunto de datos que se solapan: si dos ciclos de pulsación se parecen (porque las oscilaciones tienen períodos similares) ambas mediciones se engloban en la misma bolsa, si los dos ciclos son algo distintos entonces los datos se distribuyen en una bolsa de longitud mayor que, precisamente, suele ser de duración doble al no ser diferenciada por el algoritmo matemático (ve un grupo doble de largo en vez de dos grupos solapados o levemente sobrepuestos uno encima del otro). Este hecho explica no sólo nuestra frustración al no ser capaces de confirmar los períodos oficiales de las variables, sino la incapacidad de Kopacki y equipo para determinar el período de ninguna gigante roja con sus datos más exactos...

Figura 14. Curvas de luz de V15, V17 y V38 sobre la que se han representado las hipotéticas pulsaciones de diferente longitud para cada una de las variables.

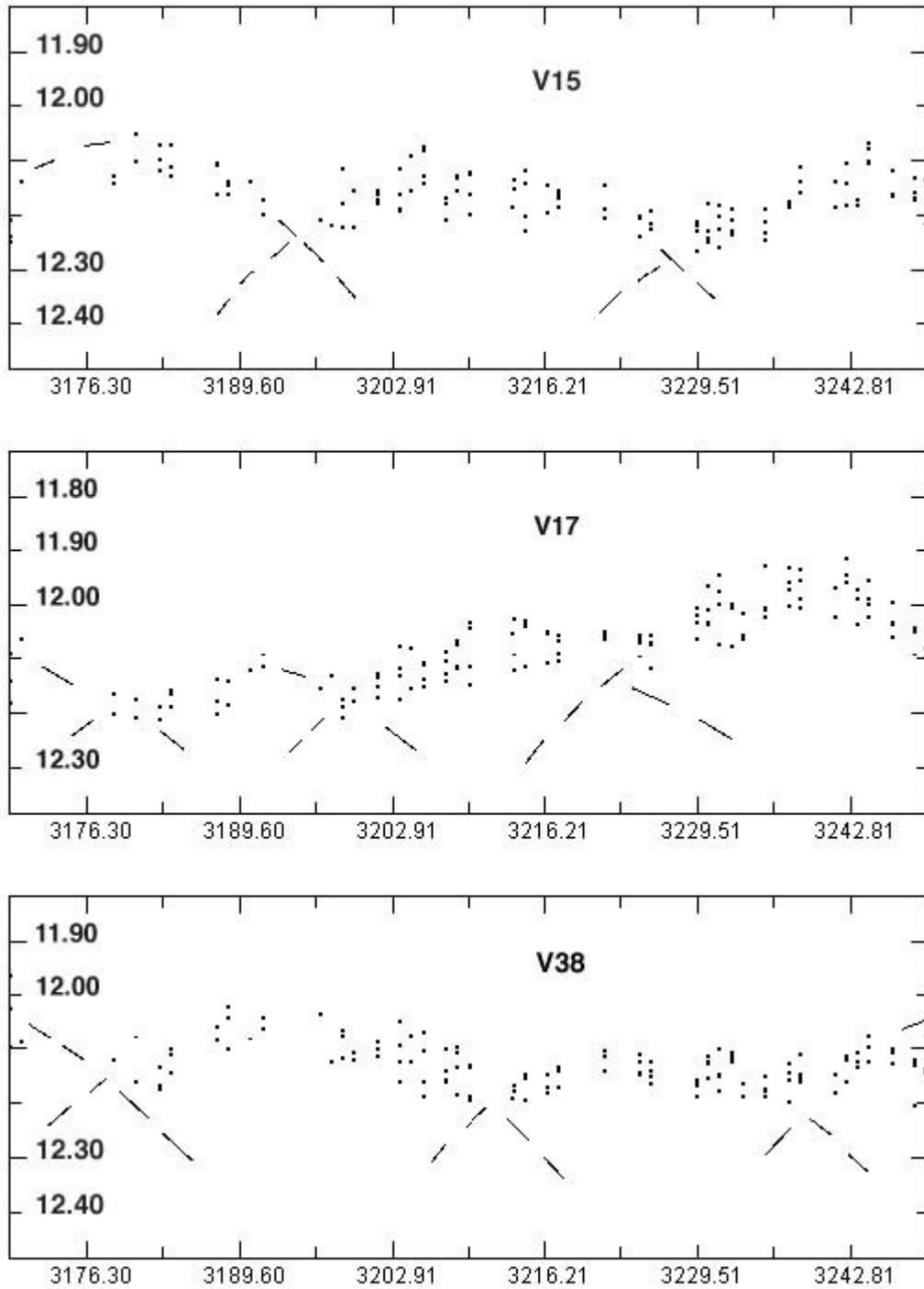
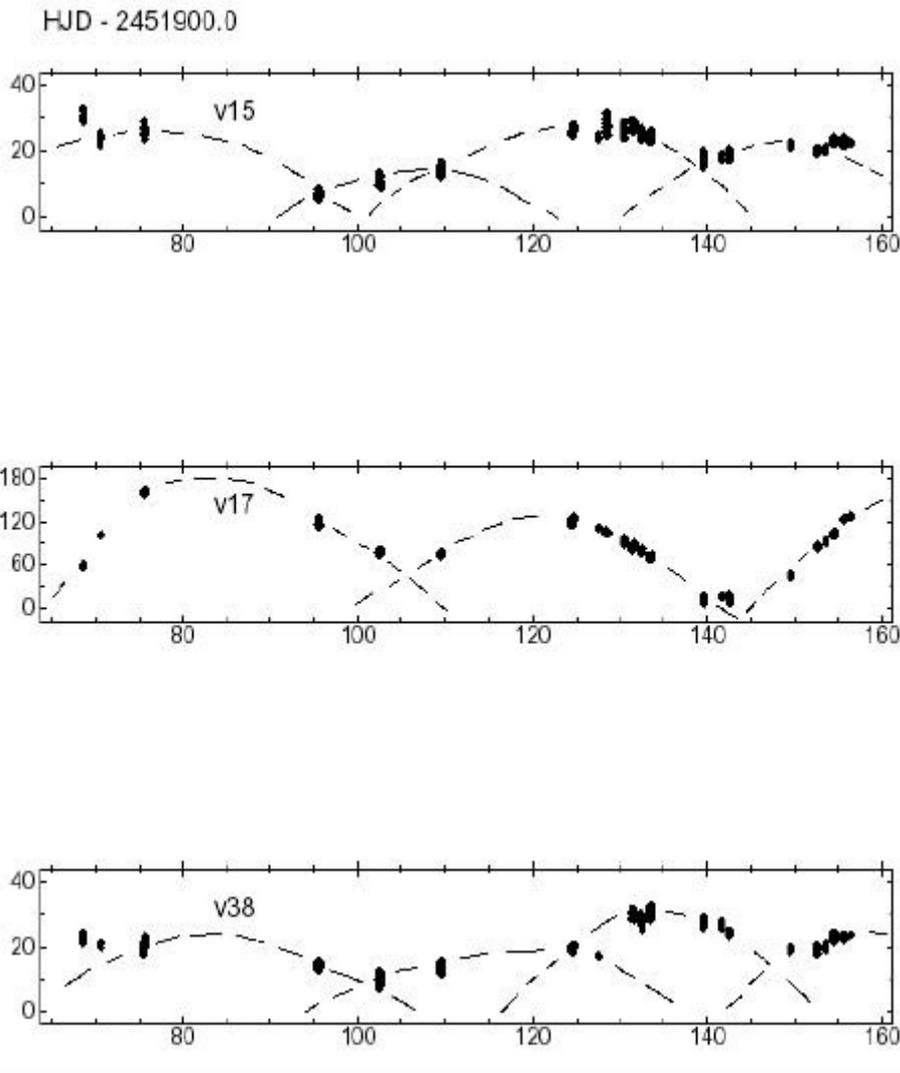


Figura 15. Curvas de luz de V15, V17 y V38 tomadas del trabajo de Kopacki *et al.*: también se ha marcado en ellas las hipotéticas pulsaciones de cada estrella.



¿Y qué hay de las nuevas variables?: tal como ya comentamos Kopacki y equipo pudieron observarlas en 2001 durante 23 noches a lo largo de casi 7 meses: las curvas de luz no muestran el verdadero comportamiento de las estrellas (figura 13) sino únicamente datos aislados o mal repartidos. Nosotros disponemos de imágenes CCD del cúmulo que empiezan en junio de 2001 y terminan en septiembre de 2004 (a una media de 6-7 meses anuales: de mayo-junio a noviembre), período más que suficiente para haber capturado varios ciclos completos de pulsación y disponer de mediciones abundantes y bien distribuidas. De todos modos no son fáciles de estudiar ya que poseen amplitudes pequeñas (<0.25 magnitudes).

Al analizar las mediciones originales de Kopacki bajadas de Internet hemos podido determinar, con cierto grado de aproximación, los posibles períodos de pulsación y al compararlos con los nuestros los encontramos bastante parecidos. La tabla en la que los comparamos contiene los siguientes datos: nombre y período oficial, período obtenido de los datos del equipo polaco y según nuestras mediciones de 2003 y 2004:

Nombre	Período	Kopacki	2003	2004
V38		(80.8)	(44?)	(76?)
V39		(55.1)	(56)	(50)

V40	(51.2)	(46)	(55)
V42	45.2	----	46.9
V43	irr?	(34)	39.5

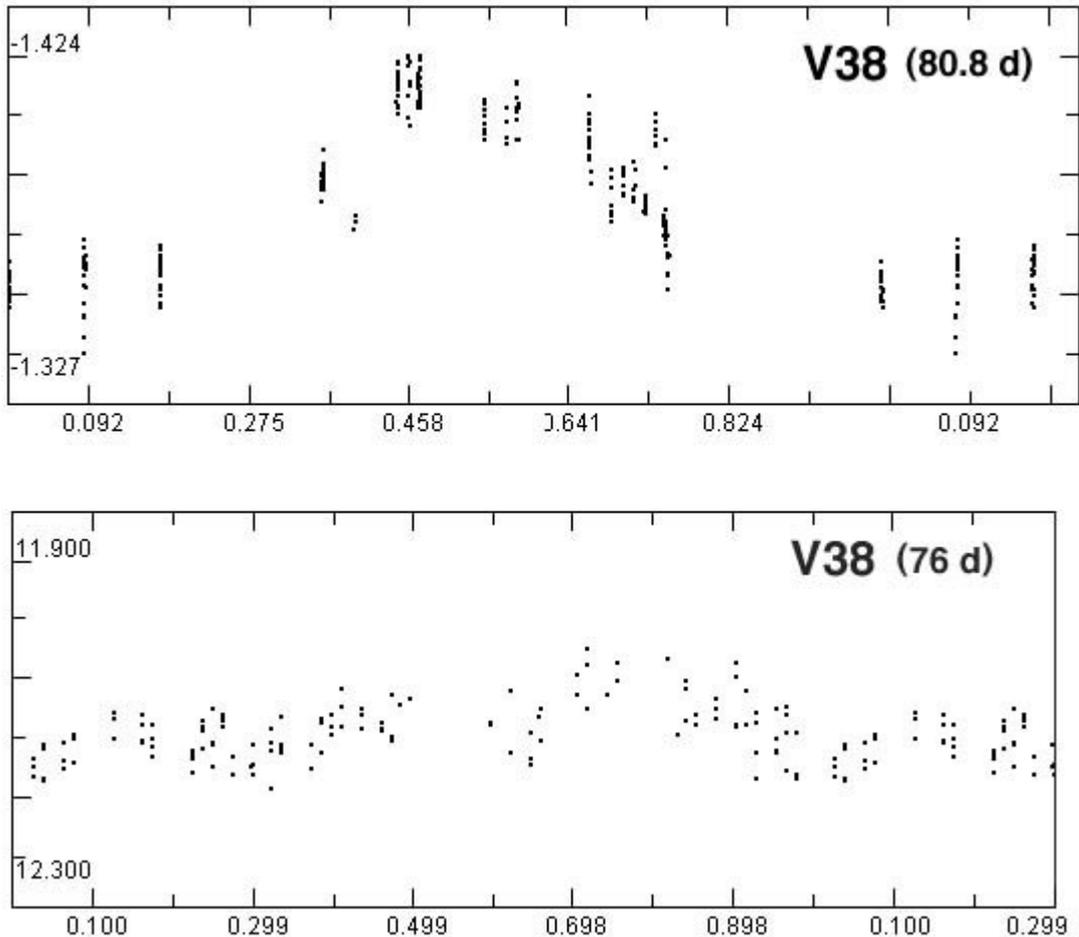


Figura 16. Curvas de luz de V38 obtenidas usando los datos de Kopacki -2001- (arriba) y nuestros -2004- (abajo) con un período de 80.8 y 76 días respectivamente.

podemos ver que, salvo para V38, en todos los casos los períodos son similares o muy similares (p. ej. en los casos de V42 y V43); los datos encurtidos entre paréntesis son todavía aproximados (sólo disponemos de 90 noches de fotometría de 2004 ya que la campaña actual está todavía sin cerrar). Notemos que nuestro período de V38 en 2003 es inexacto: el origen radica en la incapacidad del algoritmo de A.V.E. para diferenciar entre dos conjunto de datos cortos, sobrepuestos, y uno más extenso; el período así obtenido (¿44 días?) es casi la mitad del deducido de los datos de Kopacki en 2001 y nuestros en 2004 con sólo 90 noches de observación, período de tiempo que quizá sea similar a su verdadero ciclo de oscilación.

¿Por qué las variables rojas pulsan? Esto es debido a que en las capas más profundas de la estrella, cerca del núcleo, se producen irregularidades en la transformación atómica originadas por la escasez de combustible (helio, carbono u otros elementos ya más pesados: son estrellas viejas muy evolucionadas); si las capas se expansionan debido a la producción de energía y antes de que regresen al estado de equilibrio se produce otra explosión las dos capas chocan e interaccionan, expandiéndose la estrella de nuevo en otro ciclo modulado por la nueva expansión; es posible que este proceso se repita más de una vez con lo cual la estrella

presenta una curva de luz errática con subidas y bajadas inesperadas de pequeña amplitud. Si estas expansiones se producen de modo regular la estrella pulsa con un período bien definido produciendo curvas de luz con baja dispersión, delgaditas; si las pulsaciones se superponen los períodos de oscilación cambian, los algoritmos determinan períodos más largos de lo esperado (en ocasiones doble) y las curvas de luz engrosan, como hemos comprobado tanto en nuestros estudios como en los de los profesionales (p. ej. los de Osborn, Demers, Welty, etc.).

Confiamos en que nuevos datos obtenidos en una futura campaña en 2005 confirmen el modelo fotométrico que aquí presentamos, a la vez que refinan los períodos obtenidos por nosotros.

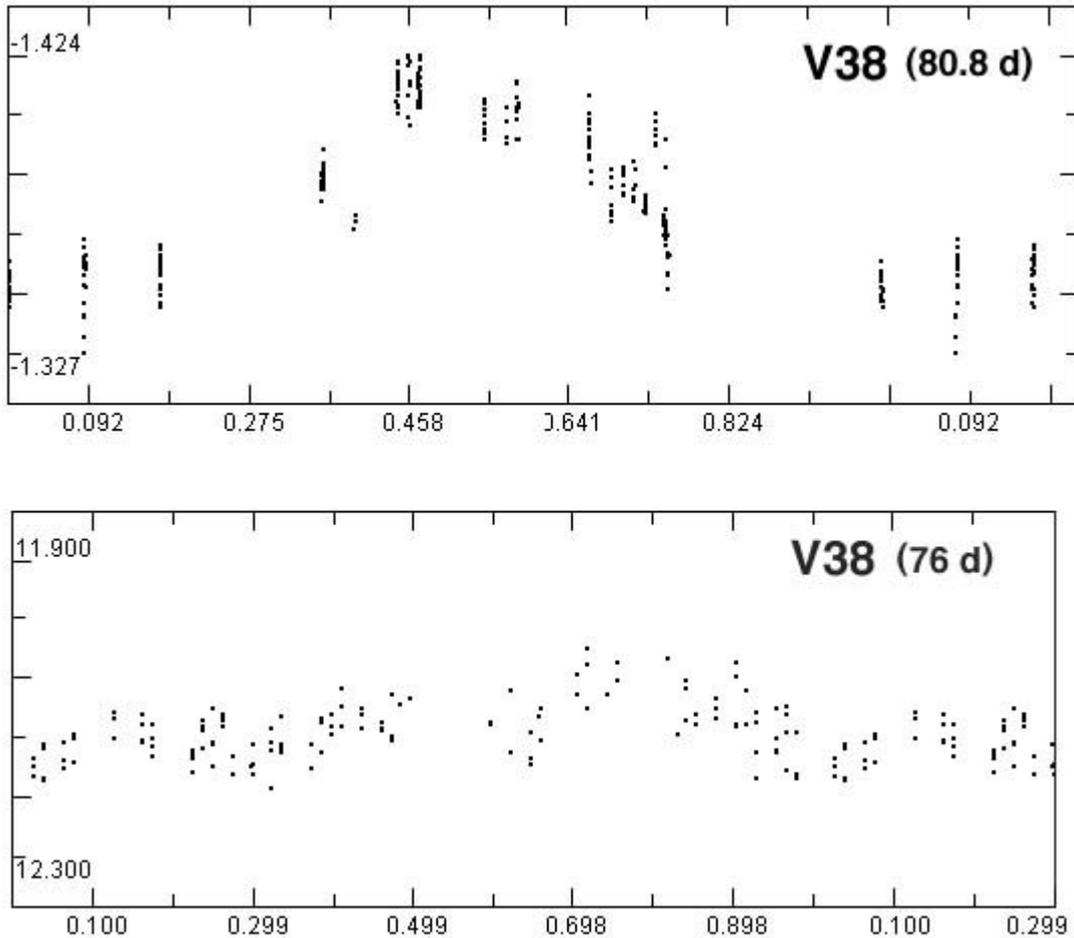


Figura 16. Curvas de luz de V38 obtenidas usando los datos de Kopacki -2001- (arriba) y nuestros -2004- (abajo) con un período de 80.8 y 76 días respectivamente.

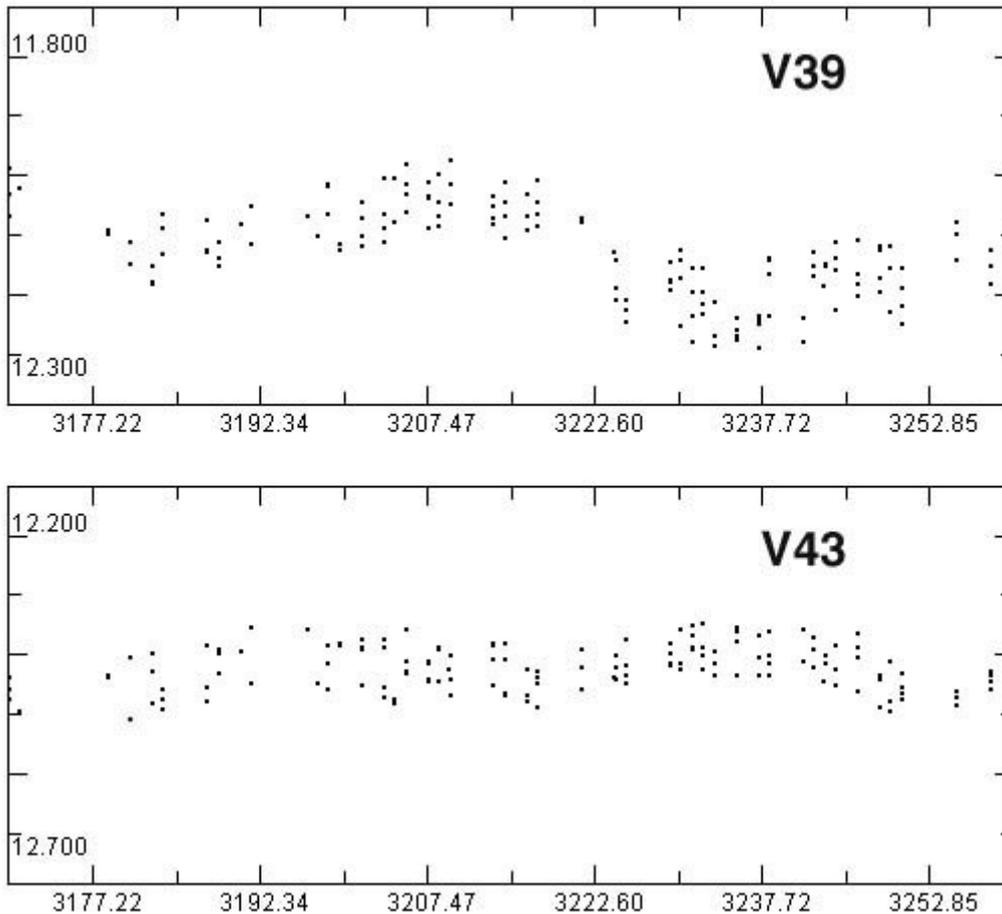


Figura 17. Curvas de luz de V39 y V43 obtenidas en la campaña de 2004: como puede comprobarse ambas son de reducida amplitud y períodos medianos (40 a 50 días).

- Some abnormal stars in the cluster M13 Hercules, E. E. Barnard (ApJ 12, 176B, 1900).
- Discovery and period of a small variable star in the cluster M13 Hercules, E. E. Barnard (ApJ 12, 182B, 1900).
- On the colors of some of the stars in the globular cluster M13 Hercules, E. E. Barnard (ApJ 29, 72B, 1909).
- Photographic determination of the colors of some of the stars in the cluster M13 (Hercules), E. E. Barnard (ApJ 40, 173B, 1914).
- On the incidence of Cepheids in globular clusters, G. Wallerstein (ApJ 160, 345W, 1970).
- Photometry of Variables in Globular Cluster. II. M13. Serge Demers (AJ, vol. 76, 5, 1976 June).
- Investigation of the red variable stars of M13, Wayne Osborn (AJ 82, 395-402, 1977 June).
- On the nature of the variables in M13. C. D. Pike y Caroline J. Meston (MNRAS, 180, 1977).
- Variable Stars in M13, Wayne Osborn (AJ 119, 2902, 2000 June).
- 3rd. Catalogue of Variable Stars in Globular Clusters. Helen Sawyer-Hogg. Publicaciones del David Dunlap Observatory, Vol. 3, Nº 6 (1973).

- A search for giant and asymptotic-giant-branch variable stars in six globular clusters. Daniel E. Welty (AJ 90, 1555, 1985 December).
- Spectral types of stars in the globular clusters Messier 3 and Messier 13, Daniel M. Popper (ApJ 105, 204P, 1947).
- Photometry of nearby globular clusters: M3, M5, M13 and M92. Jennifer A. Johnson y Michael Bolte (AJ, 115, 693-707, 1998).
- Astrometry in the globular cluster M13. I. New proper motions and membership probabilities, Cudworth, K. M. y Monet, D. G. (AJ 84, 1979).
- Comunicación personal (*e-mail*) del Dr. Osborn con algunos comentarios, consejos e ideas para nuestros estudios de gigantes rojas (octubre del 2001).
- Red variable star L973 (V17) in M13. Tatiana Russeva y Ruscho Russev (Information Bulletin on Variable Stars nº 1534, 1979 January).
- Semi-regular variable star V11 in M13. Tatiana Russeva y Ruscho Russev (Information Bulletin on Variable Stars nº 1624, 1979 June).
- Three new red variable stars in M13 (L72, L194 y L70). Tatiana Russeva y Ruscho Russev (Information Bulletin on Variable Stars nº 1769, 1980 April).
- Two new variable stars in M13 (L66 y L598). Tatiana Russeva, Lubomir Iliev y Ruscho Russev (Information Bulletin on Variable Stars nº 2223, 1982 November).
- Catalog of parameters for Milky Way globular clusters. William E. Harris (AJ, 112, 1487, 1999 June).
- Color Magnitude Diagram for the globular Cluster M13.
- M. Guarnieri, A. Bragaglia y F. Fusi Pecci (A&AS, 102,397, 1993 April).
 - The main sequence of the globular cluster M13. W. Baum, W. Hiltner, H. Johnson y A. Sandage (ApJ nº 130, 749, 1959, August).
 - A photoelectric BVRI sequence in the field of the globular cluster M13. Douglas Forbes y Peter C. Dawson (PASP, 98, 102-103, 1986 January).
 - Photometric Studies of the Globular Clusters M13 and NGC 6752, E. L. Folgheraiter, 1993, Ph.D. thesis, Leeds (Publications of the Optical Astronomy Group at Leeds).
 - CCD Photometry: Observing Program of the AAVSO.
 - Standard Stars-CCD Photometry, Transformations and Comparisons. Hwankyung Sung, Michael. S. Bessell, PASA, 17 (3), 244 (Publications of the Astronomical Society of Australia).
 - Variable star in M13. Kopacki, G., Kolaczowski, Z., and Pigulski, A.: 2003, A&A 398, 541.

Año-luz (a.l.): unidad de longitud utilizada en Astronomía equivalente a la distancia recorrida por un rayo de luz, en el vacío, durante un año: su valor es de 9,4607 billones de kilómetros, o también 63.240 Unidades Astronómicas.

Banda de inestabilidad: zona del diagrama H-R ocupada por varios tipos de estrellas variables pulsantes, como las Cefeidas clásicas, astros Delta Scuti, RR Lyrae, Cefeidas del tipo W Virginis y BL Herculis.

Barnard, Edward Emerson (1857-1923): astrónomo norteamericano, descubridor del satélite joviano Amaltea (1892), de la estrella que lleva su nombre (1916) y de 16 cometas. Pionero de la fotografía, es autor de numerosos trabajos sobre la Vía Láctea y sus campos de estrellas que plasmó en un catálogo de zonas oscuras (denominadas con la letra B). Estudioso de M13 hizo varios trabajos colorimétricos fotográficos sobre sus estrellas, determinando el período de oscilación de las variables rápidas V2 y V6.

Barnard 29: la estrella errante azul más brillante del cúmulo globular M13; catalogada también como Ludendorff 222, es un astro de magnitud V 13,15^a cuyo índice de color B-V es -0,18.

BL Herculis: variable Cefeida de Población II (abreviada CWB), de período inferior a 8 días; es un subtipo de las estrellas Cefeidas de la clase W Virginis.

CCD: detector de luz empleado en imagen astronómica basado en un chip del tipo Dispositivo de Carga Acoplada (C.C.D. en inglés); tiene una eficiencia cuántica superior a la de cualquier film fotográfico, siendo utilizado para la captura de astros débiles y la digitalización de imágenes.

Cefeida: estrella variable, pulsante, de luminosidad y radio variable. Existe una bien conocida relación entre su luminosidad absoluta (L) y su período (P) de oscilación de brillo; por lo tanto, basta medir el período de una cefeida y su brillo aparente para conocer su distancia.

Combustión del helio: producción de energía en las estrellas más viejas; consiste en la fusión de tres núcleos de helio para formar carbono.

Combustión del hidrógeno: producción de energía en las estrellas jóvenes; consiste en la fusión de núcleos de hidrógeno (protones) para formar helio, desprendiendo energía en el proceso: en estrellas con temperaturas inferiores a 18 millones de grados ocurre a través del ciclo protón-protón, mientras que a temperaturas mayores es a través del ciclo carbono-nitrógeno.

Cúmulo abierto: conjunto de estrellas de Población I (astros jóvenes), unidas por la gravedad, nacidas de la misma masa de gas y polvo; constan de un número variable de astros, siendo este valor típico entre una docena y un millar como máximo; en algunos casos (sobre todo en los más jóvenes) todavía se aprecia en ellos restos de gas (nebulosas o jirones) y polvo del cual nacieron.

Cúmulo globular: conjunto de estrellas (típicamente de 10.000 a 1 millón de masas solares), unidas por la gravedad, en forma de esfera, con un radio de 50-200 años-luz; formados por estrellas viejas de Población II, tienen edades típicas de 10-14.000 millones de años y una metalicidad inferior a la solar, señal de una enorme edad. Forman un "halo" esférico en torno al centro de nuestra Galaxia, aunque también son visibles en otras muchas galaxias vecinas y próximas.

Curva de luz: representación visual, sobre una escala graduada, de las oscilaciones lumínicas de una estrella variable; en el eje horizontal aparece el tiempo (fase, días o Día Juliano) y en el vertical la magnitud (B, azul o V, visual).

Enana blanca: estrella caliente blanca, muy compacta y poco luminosa, residuo de una estrella que ha agotado su combustible nuclear; está compuesta por un gas de electrones en estado degenerado. En un diagrama H-R aparece en la parte inferior izquierda del mismo.

Errante azul: estrella azul de la secuencia principal de un cúmulo globular, situada en el diagrama H-R en un lugar que no le corresponde (a la izquierda de la secuencia principal), lo que indica que es anómala en algún sentido. Se cree que las errantes azules nacen de la colisión de dos estrellas o de la absorción de materia de una estrella a otra, en un sistema binario cerrado, lo cual produce un enriquecimiento (en hidrógeno) de una estrella vieja y un rejuvenecimiento de la misma.

Estrella pobre en metales: estrella con una proporción de metales (elementos pesados) mucho menor que la solar (por ejemplo el 1%); son estrellas viejas de la Población II situadas en cúmulos globulares y en el halo galáctico.

Evolución estelar: diferentes fases por las cuales va pasando una estrella, desde que nace del gas y polvillo cósmico (por auto-contracción gravitatoria) hasta que termina sus días como

estrella muerta (enana blanca, estrella de neutrones o agujero negro), una vez que ha agotado todo su combustible nuclear.

Filtro "V" Johnson: filtro de color verde utilizado en fotometría para normalizar entre sí las mediciones de brillo; una letra indica el color del mismo: V (violet, violeta), B (blue, azul), V (visual, verde), R (red, rojo) o I (infrared, infrarrojo), según el sistema propuesto por el astrónomo norteamericano Harold Lester Johnson.

G, estrella: estrella de tipo espectral G, amarilla, cuya temperatura superficial es similar a la solar (5.500-6.000° K); el Sol es del tipo G2V. Las gigantes rojas de M13 son de los tipos G y K.

Gigante roja: estrella muy luminosa, de gran tamaño y baja temperatura superficial; es una fase de la evolución estelar,

genio en el núcleo estelar. En el diagrama H-R aparece en la parte superior derecha del mismo, formando la Rama de las Gigantes Rojas (RGB en la literatura profesional).

K, estrella: estrella de tipo espectral K, anaranjada, cuya temperatura superficial es inferior a la solar (3.900-5.200° K). Las gigantes rojas de M13 pertenecen a los tipos G y K.

M13: cúmulo globular (NGC 6205) visible en la constelación Hércules con magnitud conjunta 5,7^a; dista de la Tierra unos 25.102 años-luz (datos del año 1999) y tiene una masa aproximada de 500.000 soles: probablemente es uno de los más espectaculares y bellos para los observadores del Hemisferio Norte. Su velocidad es -246 km/s.

Magnitud: medida del brillo de un astro en una escala logarítmica; un salto de magnitud equivale a un cambio en el brillo de 2,512 veces (la raíz quinta de 100): un salto de 5 magnitudes equivale a una diferencia de brillo de 100 veces.

Metal: en Astrofísica cualquier elemento químico más pesado que el hidrógeno y el helio, como el litio, el carbono, el oxígeno, el neón...

Metalicidad: relación existente entre la abundancia de átomos de hierro e hidrógeno en un astro, comparada con el valor solar; para representarla se utiliza el logaritmo decimal: de este modo una estrella con una metalicidad de una décima de la solar tendrá Fe/H = -1, mientras que si ésta fuese de una centésima este valor sería Fe/H = -2.

Población I: tipo de estrella caracterizado por su alta metalicidad y relativa poca edad; se encuentran localizados en el cuerpo de las galaxias y en los cúmulos abiertos.

Población II: tipo de estrellas caracterizado por su baja metalicidad y alta edad (se cree que se formaron en los primeros mil millones de años de nuestra Galaxia); se encuentran en el halo, bulbo galáctico y en los cúmulos globulares.

Rama Asimptótica (AGB): en el diagrama H-R de un cúmulo globular, rama de estrellas que corre paralela a la rama de las gigantes rojas; contiene estrellas gigantes rojas algo más calientes y evolucionadas que las anteriores.

Rama Horizontal (HB): en el diagrama H-R de un cúmulo globular zona horizontal del mismo, formada por estrellas blancas de masa 0,4-0,8 solares, en el cual están las estrellas RR Lyrae (HB en la literatura profesional).

Rama de las Gigantes Rojas (RGB): en el diagrama H-R de un cúmulo globular zona curvada ascendente, formada por estrellas gigantes amarillas y anaranjadas de alta luminosidad, y baja temperatura, en el cual se encuentran las Gigantes Rojas (RGB en la literatura profesional).

RR Lyrae: estrella variable pulsante blanca con masas de 0,4 a 0,6 la del Sol; presenta oscilaciones de brillo de 0,2 a 1,2 días debido a los cambios en su tamaño (pulsaciones radiales). En el diagrama H-R aparecen siempre en la rama horizontal: al igual que en las Cefeidas existe una relación entre su luminosidad absoluta (L) y su período (P) de oscilación de brillo, siendo utilizadas para determinar distancias astronómicas.

Secuencia principal: zona del diagrama H-R que corre en diagonal desde la parte superior izquierda (estrellas gigantes azules) a la parte inferior derecha (estrellas enanas rojas); en ella se encuentran las estrellas la mayor parte de su vida.

Semirregular: variable pulsante gigante o super-gigante con espectros de tipo medio o tardío y oscilaciones de brillo con cierta regularidad (se abrevian SR); las amplitudes promedio (1-2 magnitudes) son menores que las de las variables de tipo Mira, siendo sus períodos de 20 a más de 2.000 días.

W Virginis: estrella variable Cefeida de Población II, su abreviatura es CW; son gigantes de pulsación radial con períodos de 0,8 a 35 días y amplitudes de 0,3 a 1,2 magnitudes, con masas de 0,4 a 0,6 la del Sol. Se clasifican en dos subtipos: CWA, con períodos superiores a 8 días y CWB con períodos inferiores (subtipo BL Herculis).

Francisco A. Violat Bordonau

violat@olanet.net / fviolat@yahoo.es

Toni Bennasar Andreu