



TRABAJO FIN DE MÁSTER E INICIACIÓN
A LA INVESTIGACIÓN (24 créditos)

MÁSTER INTERUNIVERSITARIO EN ASTROFÍSICA UCM+UAM

Photometry of M dwarfs in the CARMENES input catalogue

Alumno: Francisco Jesús Abellán de Paco¹

Directores: Dr. José A. Caballero², Prof. David Montes³

Septiembre 2013

¹**E-mail:** fran.j88@hotmail.com

²**E-mail:** caballero@cab.inta-csic.es

³**E-mail:** dmontes@ucm.es

Resumen:

Contexto: CARMENES es un espectrógrafo de alta resolución con el que el consorcio hispano-alemán del mismo nombre buscará exotierras alrededor de unas 300 estrellas de tipo espectral M por el método de velocidad radial.

Objetivos: Ayudar al consorcio internacional a completar la base de datos CARMENCITA con la información fotométrica (en todas las banda posibles desde el óptico al infrarojo) de las estrellas M. Esta información será fundamental para seleccionar la muestra final de estrellas que serán observadas por CARMENES para la búsqueda de exotierras a partir de 2014.

Métodos: Mediante la herramienta del observatorio virtual Aladin se han recopilado datos fotométricos en las bandas $uBB_TVV_{Tr}RizJHKS W1W2W3W4$ de manera individualizada para cada una de las casi 300 mejores candidatas de una muestra inicial de unas 1400 estrellas. Asimismo se ha elaborado un programa informático para estudiar las distribuciones espectrales de energía de dichas estrellas a partir de su fotometría.

Resultados: Se ha recopilado la fotometría en las bandas antes citadas de un total de 286 estrellas tipo M. Cada una de las estrellas se ha estudiado de manera individualizada “limpiando” todos aquellos datos fotométricos erróneos que se hayan podido encontrar por cualquier motivo. También se han buscado estrellas que sirvan como prototipo para cada uno de los subtipos espectrales estudiados. Además, y para una mayor caracterización, se han estudiado diferentes índices de color que se han comparado con los tabulados en Bochanski et al. (2007) característicos de enanas de tipo M.

Conclusiones: El estudio llevado a cabo de manera individualizada ha permitido elaborar una lista de datos fotométricos completa pero sobre todo muy precisa de las estrellas que CARMENES observará.

Palabras clave: Bases de datos astronómicas, Técnicas: Fotometría, Estrellas: baja masa, Estrellas: enanas M, Estrellas: parámetros fundamentales, Estrellas: tipos tardíos.

Abstract:

Context: CARMENES is a next-generation instrument being built by a consortium of German and Spanish institutions to carry out a survey of ~ 300 M-type stars with the goal of detecting exoearths by radial-velocity measurements.

Aims: To help the international consortium to complete the database CARMENCITA with the photometric data (in all possible bands from the optical to infrared) of the M stars. This information will be crucial to select the final sample of stars that will be observed by CARMENES for search exotierras from 2014.

Methods: By using the Aladin Virtual Observatory tool we have collected photometric data in the bands $uBB_TVV_{Tr}RizJHKS W1W2W3W4$ for each of the nearly 300 best candidates from an initial sample of about 1400 stars. It has also been developed a software to study the spectral energy distributions of these stars.

Results: We have collected photometric data in the aforementioned bands for a total number of 286 M-type stars. Each of the stars has been studied individually and we have deleted all those with bad photometric data found for any reason. We have also searched prototype stars for each M spectral subtype. Moreover, for further characterization, color indices values have been studied and also compared with those tabulated in Bochanski et al. (2007).

Conclusions: The study carried out individually has allowed to develop a list of complete and very accurate photometric data of the stars that CARMENES will observe.

Keywords: Astronomical databases, Techniques: photometric, Stars: low mass, Stars: M dwarfs, Stars: fundamental parameters, Stars: late-type.

Índice

1. Introducción	4
1.1. CARMENES y la búsqueda de exoplanetas	4
1.2. CARMENCITA	5
1.3. Estrellas tipo M	5
2. Análisis	7
2.1. Bandas fotométricas	7
2.2. Selección de la muestra	9
2.3. Proceso de recopilación	10
2.3.1. Catálogos	10
2.3.2. Trabajo con Aladin y prioridad de selección	11
2.4. Distribuciones espectrales de energía	13
2.5. Prototipos espectrales	14
3. Resultados	18
3.1. Diagramas	18
3.1.1. Diagramas Color vs. Tipo espectral	18
3.1.2. Diagramas Color vs. Color	22
3.2. Limpieza de los datos	25
3.3. Casos particulares	27
3.4. Colaboración con el Observatorio Virtual	28
4. Conclusiones	29
Referencias	31

Índice de figuras

1. Curva de transmisión de los filtros de Sloan.	8
2. Curva de transmisión de los filtros de Tycho-2.	8
3. Curva de transmisión de los filtros de Johnson.	8
4. Curva de transmisión de los filtros de 2MASS.	9
5. Curva de transmisión de los filtros de <i>WISE</i>	9
6. Proceso de recopilación de datos con Aladin.	11
7. SED ejemplo.	14
8. SED de todos los prototipos espectrales.	16
9. SED de todos los prototipos espectrales desde u hasta J	17
10. Diagrama $r - J$ vs. Tipo espectral.	18
11. Diagramas Color vs. Tipo espectral.	19
12. Diagramas Color vs. Tipo espectral.	20
13. Diagrama $u - g$ vs. $g - r$	22
14. Diagrama $g - r$ vs. $r - i$	23
15. Diagramas Color vs. Color.	24
16. Gráficas de VOSA.	28

1. Introducción

1.1. CARMENES y la búsqueda de exoplanetas

Desde que en el año 1995 se descubriese el primer planeta fuera de nuestro Sistema Solar, es decir, el primer *exoplaneta* (Mayor y Queloz, 1995 [11]), la búsqueda de planetas en otros sistemas estelares se ha convertido en uno de los campos de investigación más activos dentro del mundo de la astrofísica. De hecho, a día de hoy, se han descubierto ya más de 500 exoplanetas. Sin embargo, la mayoría de estos planetas son jovianos inhóspitos, que poseen temperaturas tan altas como las de las estrellas más frías, u orbitan muy cerca de sus soles.

Con el desarrollo de nuevas tecnologías para la detección de exoplanetas, especialmente con el uso de espectroscopía ultraestable para medir variaciones de velocidad radial en estrellas producidas por cuerpos que orbitan alrededor de ellas, la masa mínima de los exoplanetas descubiertos recientemente es cada vez más pequeña. No obstante, y a pesar del esfuerzo de los astrónomos, aún no se ha detectado la primera “exotierra”: un exoplaneta con una masa similar a la de nuestra Tierra ($M \sim 0.5 - 2.0 M_{\oplus}$).

En este contexto surge el proyecto CARMENES⁴ (*Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Échelle Spectrographs*). CARMENES es un instrumento de última generación que se está construyendo para el telescopio de 3.5 metros en el Observatorio de Calar Alto por un consorcio de instituciones alemanas y españolas, y que tiene como objetivo principal la detección y búsqueda de exotierras por el método de las velocidades radiales. Se compone de dos espectrógrafos separados que cubren los rangos de longitud de onda de 0.5 a 1.0 micras y de 1.0 a 1.7 micras. Poseen una resolución espectral de $R=82.000$ y cada uno de ellos realizará mediciones de velocidad radial de alta precisión (ver Quirrenbach et al., 2012 [12]).

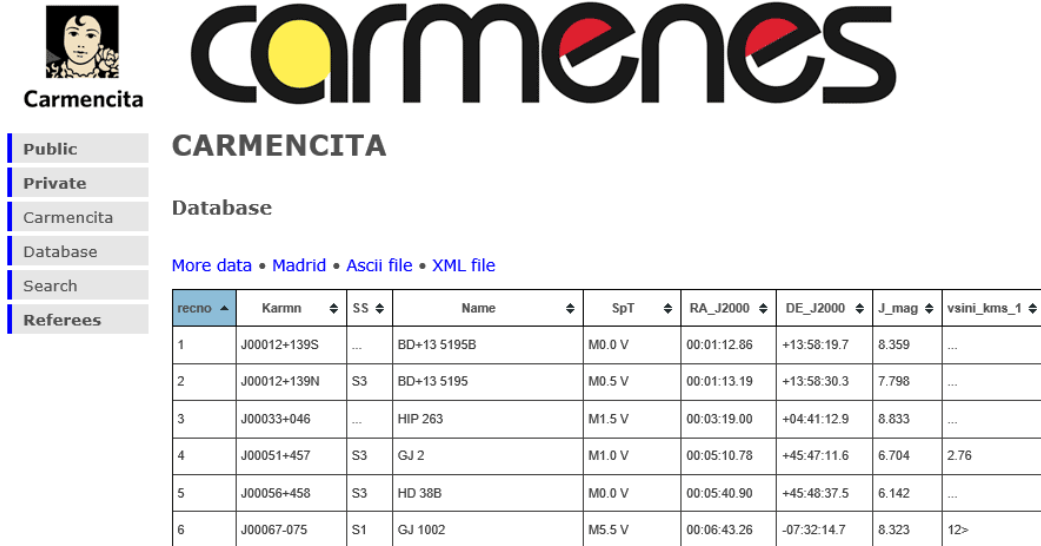


El objetivo fundamental de CARMENES es encontrar planetas de baja masa (candidatos a exotierras) y además cercanos a la estrella (candidatos a estar en la zona habitable). Para ello el proyecto se ha centrado en el estudio de estrellas enanas poco masivas, en particular estrellas de tipo espectral M. Estas estrellas son relativamente frías (aprox. entre 2200 y 4000 K) y poseen masas menores de $\sim 0.6 M_{\odot}$. Más adelante analizaremos en detalle porque CARMENES observará este tipo de objetos, pero destacar que el objetivo principal de este trabajo va a consistir en el estudio y análisis detallado de una muestra de casi 300 estrellas M. Estas estrellas serán observadas por CARMENES en un total de entre 600 y 750 noches de observación (garantizadas), y se espera que dichas observaciones puedan comenzar en el Otoño de 2014.

⁴<https://carmenes.caha.es>

1.2. CARMENCITA

CARMENCITA (*CARMENES Cool dwarf Information and daTa Archive*) es el catálogo de estrellas candidatas a ser observadas por CARMENES y será la base de datos más completa de enanas M que se haya construido hasta el momento⁵. Dicha base de datos contiene información sobre multitud de parámetros para centenares de estrellas tipo M. Algunos de esos parámetros son coordenadas, índices espectrales, fotometría en diferentes bandas, paralajes y distancias espectrofotométricas, velocidades rotacionales y radiales, anchuras equivalentes de $H\alpha$, movimientos propios, velocidades espaciales galactocéntricas, etc. Se espera que próximamente el número de parámetros disponibles en CARMENCITA sea superior a 100, todos ellos con sus respectivas referencias. Actualmente este catálogo es privado, pero se hará público en el futuro como legado del proyecto CARMENES.



recno	Karmn	SS	Name	SpT	RA_J2000	DE_J2000	J_mag	vsini_kms_1
1	J00012+139S	...	BD+13 5195B	M0.0 V	00:01:12.86	+13:58:19.7	8.359	...
2	J00012+139N	S3	BD+13 5195	M0.5 V	00:01:13.19	+13:58:30.3	7.798	...
3	J00033+046	...	HIP 263	M1.5 V	00:03:19.00	+04:41:12.9	8.833	...
4	J00051+457	S3	GJ 2	M1.0 V	00:05:10.78	+45:47:11.6	6.704	2.76
5	J00056+458	S3	HD 388	M0.0 V	00:05:40.90	+45:48:37.5	6.142	...
6	J00067-075	S1	GJ 1002	M5.5 V	00:06:43.26	-07:32:14.7	8.323	12>

Las estrellas estudiadas en este trabajo se escogerán de este catálogo. El objetivo principal será aumentar la cantidad de datos disponibles en CARMENCITA para poder seleccionar la muestra de mejores candidatas para observar con CARMENES. En este caso, nos centraremos en la recopilación de fotometría. Los criterios de selección de la muestra se explicarán en detalle más adelante (2.2 Selección de la muestra) así como cuales han sido los métodos aplicados en el proceso de recopilación y limpieza de los datos disponibles en la web.

1.3. Estrellas tipo M

Como ya se ha comentado, CARMENES se va a centrar en el estudio de estrellas M. Las estrellas de tipo M son estrellas enanas de baja masa que además son las más abundantes del Universo. Uno de los motivos por el cual CARMENES observará estos objetos en la búsqueda de exotierras es que las posibles exotierras habitables en órbita de estrellas enanas M deberían producir una variación de velocidad radial de la misma amplitud que la provocada por exojúpiteres alrededor de estrellas más calientes de tipo solar, que son mucho más brillantes en la parte visible del espectro.

⁵Ver Caballero et al. (2013) [5]

A pesar de ello, los espectrógrafos visibles no están optimizados para observar estrellas de baja masa. Debido a sus bajas temperaturas efectivas, la luminosidad de las enanas M es baja, pero también tienen “colores rojos”. Es decir, mientras que el Sol emite el máximo de su energía hacia el verde–amarillo, en 5500 Å, las enanas M lo hacen en el infrarrojo cercano, a $\lambda > 9000$ Å. De hecho, emiten la mayor parte de su energía entre 1 y 2.5 μm . Por eso los espectrógrafos de CARMENES estarán diseñados para observar en el infrarrojo, cubriendo los rangos de 0.5 a 1.7 μm , de manera que se centrará sobre todo en los tipos espectrales M3.0V–M6.0V.

En cuanto a la clasificación de las estrellas M existen diferentes sistemas todos ellos basados en sus características espectrales. Dicho espectro está caracterizado por bandas de absorción moleculares, principalmente Óxido de Titanio (TiO), Óxido de Vanadio (VO) e hidruros metálicos (MgH, FeH y sobre todo CaH) en el óptico. En cambio en el infrarrojo cercano se encuentran bandas de absorción características de H₂O y CO. Por otro lado algunas de las líneas atómicas más importantes son las de Ca I (4227 Å), los dobletes de Na I (5890/5896 Å y 8183/8195Å), el doblete de K I (7665/7699Å), y el triplete infrarrojo de Ca II (8498/8542/8662 Å).

Las estrellas M a menudo poseen cromosferas y coronas activas. Se han observado manchas y fulguraciones para este tipo de objetos. Así mismo la fracción de enanas M activas crece de manera aproximadamente monótona desde M0 a M8, donde se alcanza un pico de un $\sim 70\%$. La actividad magnética, medida mediante el indicador $L_{H\alpha}/L_{bol}$, permanece más o menos constante para los tipos M0–M5 y decrece para tipos más tardíos [13].

En la Tabla 1 se muestran algunos los parámetros más importantes de este tipo de objetos⁶:

Tabla 1: Parámetros fundamentales de enanas M

T. esp.	T_{eff} [K]	Radio [R/R _⊙]	Masa [M/M _⊙]	Luminosidad [10 ^{−2} L/L _⊙]	Log g [g cm ^{−2} s ^{−1}]	Prototipo
M0	3800	0.62	0.60	7.2	4.65	GI 278C
M1	3600	0.49	0.49	3.5	4.75	GI 229A
M2	3400	0.44	0.44	2.3	4.8	GI 411
M3	3250	0.39	0.36	1.5	4.8	GI 725A
M4	3100	0.36	0.20	0.55	4.9	GI 699
M5	2800	0.20	0.14	0.22	5.0	GI 866AB
M6	2600	0.15	0.10	0.09	5.1	GI 406
M7	2500	0.12	~ 0.09	0.05	5.2	GI 644C (vB 8)
M8	2400	0.11	~ 0.08	0.03	5.2	GI 752B (vB 10)
M9	2300	0.08	~ 0.075	0.015	5.4	LHS 2924

⁶Valores extraídos de Reid y Hawley (2005) [13].

2. Análisis

2.1. Bandas fotométricas

Con el fin de realizar un estudio detallado de las casi 300 mejores candidatas de CARMENCITA, se ha recopilado la fotometría disponible en la web desde el ultravioleta hasta el infrarrojo para cada una de ellas de manera individualizada. Para ello se ha hecho uso de la herramienta del observatorio virtual Aladin⁷ según el procedimiento que se explicará más adelante.

En la siguiente tabla se muestran, ordenados de mayor a menor banda energética, todos los filtros de los que se han obtenido datos fotométricos⁸:

Tabla 2: Filtros utilizados

Filtro	Sistema	λ_{eff} [Å]	F_{λ}^0 [erg/cm ² /s/Å]
<i>u</i>	Sloan	3594.93	8.423×10^{-9}
<i>B_T</i>	Tycho-2	4280.00	6.598×10^{-9}
<i>B</i>	Johnson	4378.12	6.293×10^{-9}
<i>g</i>	Sloan	4640.42	5.055×10^{-9}
<i>V_T</i>	Tycho-2	5340.00	3.984×10^{-9}
<i>V</i>	Johnson	5466.11	3.575×10^{-9}
<i>r</i>	Sloan	6122.33	2.904×10^{-9}
<i>i</i>	Sloan	7439.49	1.967×10^{-9}
<i>J</i>	2MASS	12350	3.129×10^{-10}
<i>H</i>	2MASS	166620	1.133×10^{-10}
<i>K_s</i>	2MASS	21590	4.283×10^{-11}
<i>W1</i>	WISE	33526	8.1787×10^{-12}
<i>W2</i>	WISE	46028	2.415×10^{-12}
<i>W3</i>	WISE	115608	6.5151×10^{-14}
<i>W4</i>	WISE	220883	5.0901×10^{-15}

Cabe decir que inicialmente también se recopiló toda la fotometría disponible del filtro *z* de Sloan, pero tras un análisis detallado se consideró su no inclusión en CARMENCITA debido a diferentes razones: errores grandes, valores erróneos probablemente debido a saturación, etc. También se recopiló toda la fotometría del filtro *R* de Sloan pero a parte de eso no se ha utilizado en este trabajo. En la Tabla 2 se muestra además el sistema al cuál pertenece cada uno de los filtros así como la longitud de onda efectiva de los mismos (λ_{eff}) y el valor de flujo en el punto cero del sistema (F_{λ}^0). Destacar que en este trabajo denotaremos a los filtros de Sloan como *u*, *g*, *r* e *i* a pesar de que en el artículo original vienen descritos como *u'*, *g'*, *r'* e *i'*. Toda la información referente a los filtros empleados en este trabajo se puede obtener en la página web de VOSA (Virtual Observatory Sed Analyzer): <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps3/>.

⁷Aladin Sky Atlas: <http://aladin.u-strasbg.fr>

⁸La fotometría en los filtros *J*, *H* y *K_s* ya había sido recopilada previamente pero se incluyen aquí porque como se verá, también se ha hecho uso de esos filtros en este proyecto.

En dicha web podemos encontrar también las curvas de transmisión de los filtros y que se muestran a continuación:

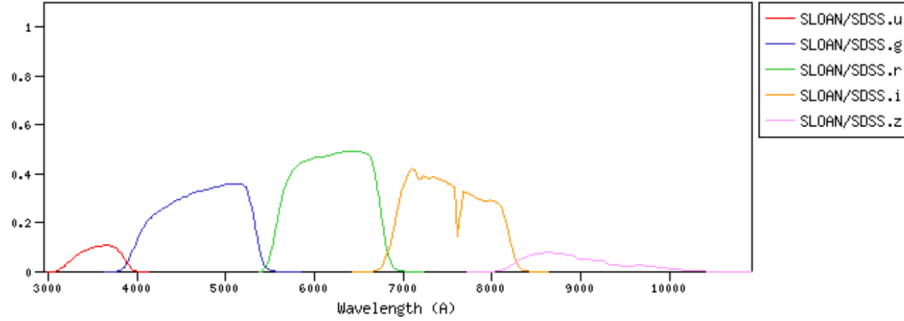


Figura 1: Curva de transmisión de los filtros de Sloan.

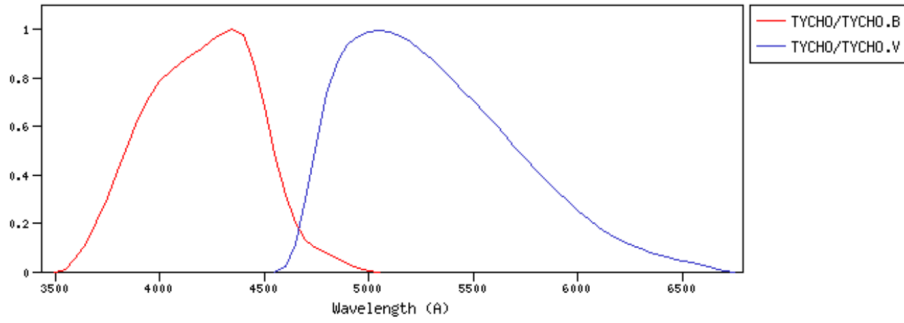


Figura 2: Curva de transmisión de los filtros de Tycho-2.

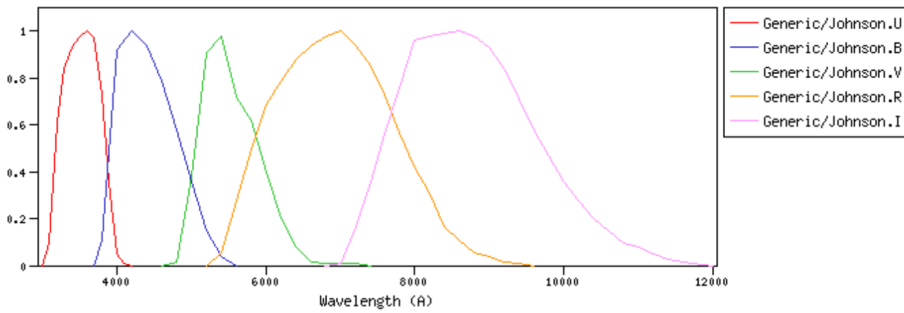


Figura 3: Curva de transmisión de los filtros de Johnson.

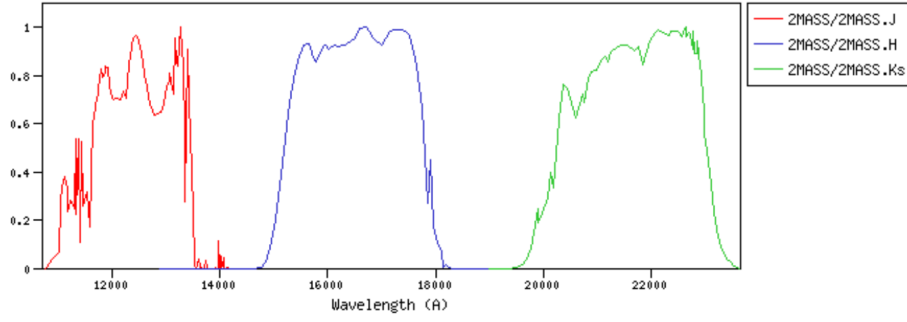


Figura 4: Curva de transmisión de los filtros de 2MASS.

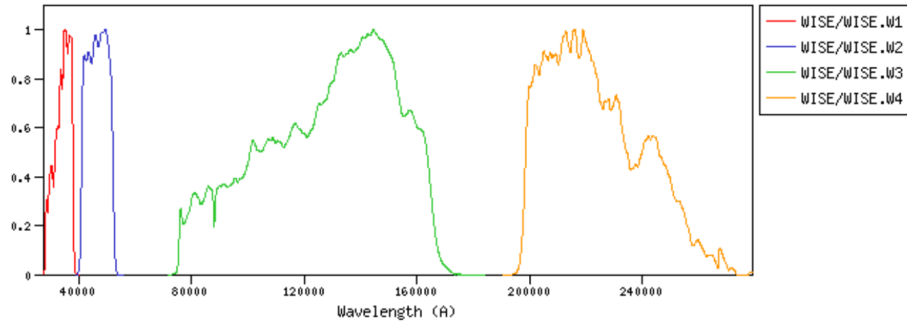


Figura 5: Curva de transmisión de los filtros de *WISE*.

2.2. Selección de la muestra

Como ya se ha comentado, en este trabajo se ha hecho un estudio de las mejores candidatas de CARMENCITA de una muestra inicial que estaba compuesta por unas 1400 estrellas en la fecha de inicio de este proyecto (Noviembre, 2012). La gran mayoría de los datos de esas estrellas se tomaron de dos catálogos: *Research Consortium of Nearby Stars* (RECONS⁹ en adelante) y *Palomar/Michigan State University* (PMSU¹⁰ en adelante).

Por otro lado, los criterios de selección que se han empleado para distinguir a una estrella como una buena candidata han sido los siguientes: que su distancia cenital fuese menor de 50° , que no tuviese ninguna compañera en un radio de $5''$, que el tipo espectral fuese mayor o igual de M0V y que además tuviera un brillo suficiente en la banda *J* dependiendo de su tipo espectral. La magnitud límite exigida para cada tipo espectral viene recogida en la Tabla 3.

Según estos criterios, el número total de estrellas que se han estudiado en este trabajo ha sido de 285 estrellas.¹¹

⁹<http://www.recons.org>

¹⁰<http://www.stsci.edu/~inr/pmsu.html>

¹¹En realidad será de 286 estrellas, ya que como se explicará más adelante, se ha añadido una estrella más a la muestra que inicialmente no pertenecía a las mejores candidatas.

Tabla 3: Criterios de selección

T. esp.	$J_{\text{máx}}$ [mag]
M0V	7.5
M1V	8.0
M2V	8.5
M3V	9.0
M4V	9.5
M5V	10.0
$\geq$ M6V	10.5

No obstante, CARMENCITA crece día a día y según la última actualización (Agosto, 2013), la muestra total de estrellas asciende a 2100 de las cuáles 376 forman parte de esa categoría de mejores candidatas.

2.3. Proceso de recopilación

2.3.1. Catálogos

Los catálogos utilizados en este proyecto vienen recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 4: Lista de catálogos empleados

Acrónimo	Nombre completo	Referencia
SDSS DR7	Sloan Digital Sky Survey, DR7	Adelman-McCarthy et al., 2009 [1]
Tycho-2	The Tycho-2 Catalogue	Høg et al., 2000 [9]
UCAC4	The fourth U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog	Zacharias et al., 2012 [15]
CMC14	Carlsberg Meridian Catalog 14	<i>VizieR</i> catalogue I/304, 2006 [6]
2MASS	2MASS 6X Point Source Working Database/Catalog	Skrutskie et al., 2006 [14]
<i>WISE</i>	WISE All-Sky Data Release	Cutri et al., 2012 [7]

Toda la información sobre estos catálogos se encuentra disponible en el servicio *VizieR*: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>. Cabe destacar que todos los catálogos utilizados en este trabajo utilizan el sistema fotométrico Vega (salvo el catálogo SDSS que utiliza el sistema AB). A partir de ellos se ha recopilado toda la fotometría posible según se explica en el siguiente apartado.

2.3.2. Trabajo con Aladin y prioridad de selección

El proceso de recopilación de la fotometría se ha llevado a cabo con la herramienta Aladin del Observatorio Virtual. Paso a paso el trabajo que se ha realizado ha sido:

1. Inicialmente se ha cargado la imagen de la estrella en cuestión a partir de sus coordenadas ascensión recta y declinación.
2. Seguidamente se ha cargado la información disponible en SIMBAD para dicha estrella y se ha representado con una línea roja su movimiento propio. Esto ha permitido conocer de manera precisa cuál ha sido el movimiento de la estrella en las últimas épocas y por tanto determinar correctamente cuales eran las medidas fotométricas que en efecto pertenecían a nuestra estrella y cuales no.
3. Una vez identificada nuestra enana, se han cargado todos y cada uno de los catálogos comentados anteriormente.
4. Por último, a partir de esos catálogos, se ha accedido a la fotometría disponible de cada uno de los filtros de interés y ha sido recopilada junto con su error.

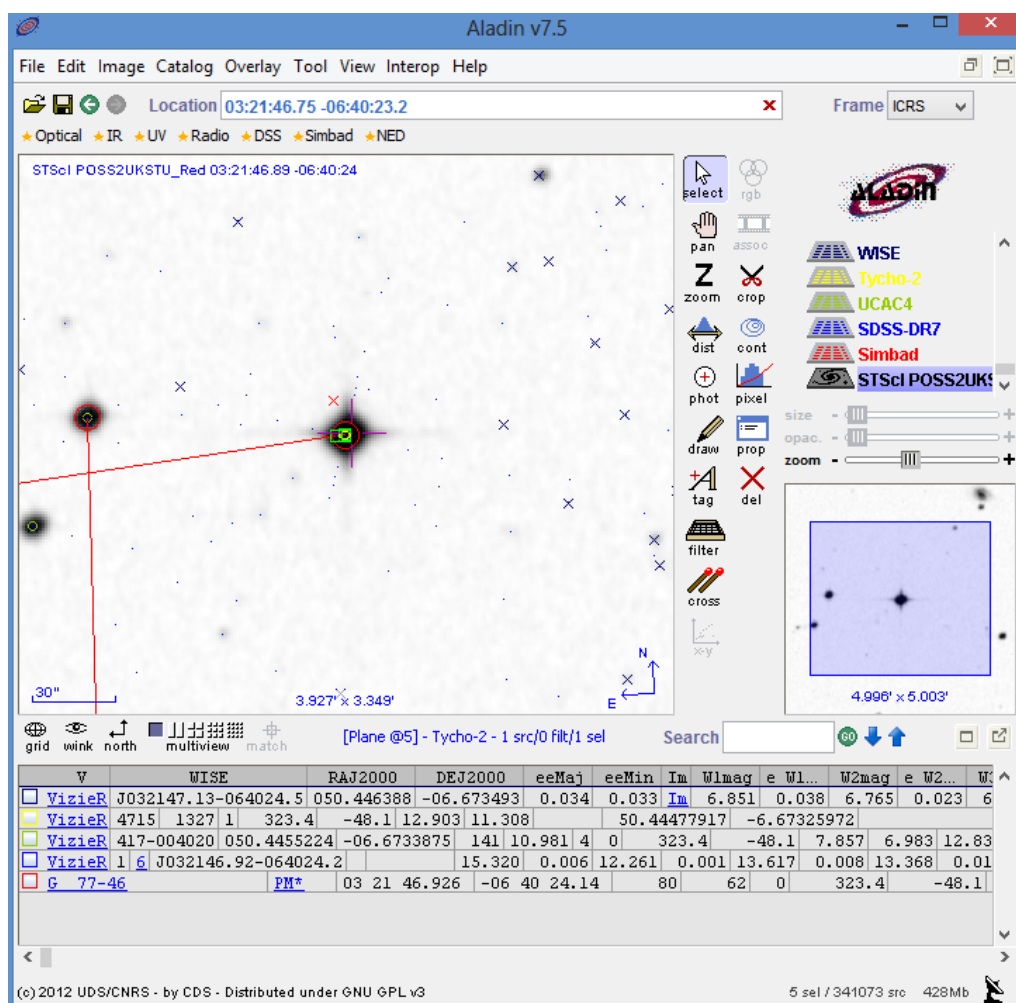


Figura 6: Recopilación de datos con Aladin: Ejemplo para la estrella G 077-046.

Todos estos datos se han ido almacenando en un fichero *ascii* (ver Tabla 8, sección 3.2) que posteriormente, tras su análisis detallado, se ha incorporado a la base de datos de CARMENCITA. En el proceso de recopilación se ha tenido en cuenta lo siguiente: cuando se han encontrado dos o más valores fotométricos presumiblemente correctos para un mismo filtro, se ha realizado la media de los valores y se ha tomado éste último como valor correcto. A su vez, siempre que no se han encontrado datos disponibles se ha representado con “...” en el fichero *ascii*.

Otro de los aspectos a comentar es que para algunos filtros se ha podido utilizar más de un catálogo. Es decir, en aquellos casos en los que no se ha encontrado fotometría en un cierto catálogo, se ha acudido a otro diferente para buscar fotometría en él. Esto solo se ha realizado para los filtros g , r e i , y en cualquier caso siempre se ha indicado claramente en el archivo *ascii* anotando como referencia el origen de los datos. Por ejemplo, si para una estrella en particular no se ha encontrado fotometría en g en el catálogo UCAC4, se ha buscado fotometría en dicho filtro en el catálogo SDSS. Esto se muestra más claramente en la Tabla 5. Los signos – indican que solo se ha buscado fotometría en el catálogo denotado como “Opción 1”.

Tabla 5: Prioridad de selección de catálogos

Filtro	Opción 1	Opción 2	Opción 3
u	SDSS	—	—
B_T	Tycho–2	—	—
B	Johnson	—	—
g	UCAC4	SDSS	—
V_T	Tycho–2	—	—
V	Johnson	—	—
r	UCAC4	CMC14	SDSS
i	UCAC4	SDSS	—
$W1$	<i>WISE</i>	—	—
$W2$	<i>WISE</i>	—	—
$W3$	<i>WISE</i>	—	—
$W4$	<i>WISE</i>	—	—

2.4. Distribuciones espectrales de energía

Una de las ventajas de tener recopilada toda la fotometría de una muestra tan amplia de estrellas M ha sido el poder llevar a cabo un estudio, por un lado general y por otro lado particularizado de las mismas. Sin duda, uno de los aspectos más importantes a estudiar ha sido su distribución espectral de energía (en adelante SED). Es decir, como es la emisión fotométrica de una estrella en las diferentes bandas energéticas del espectro electromagnético.

Dado que previamente se habían recopilado las magnitudes en los diferentes filtros de la Tabla 2, y puesto que disponía de toda la información necesaria de dichos filtros, se ha elaborado un programa en Excel para pintar distribuciones espectrales de energía.

Esquemáticamente se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. Se han transformado las magnitudes a flujos según la ecuación:

$$m_\lambda = -2,5 \log \left(\frac{F_\lambda}{F_\lambda^0} \right) \implies F_\lambda = F_\lambda^0 \cdot 10^{-m_\lambda/2,5} \quad (1)$$

donde el valor de F_λ^0 (valor de flujo en el punto cero del sistema) para cada filtro se muestra en la Tabla 2. Según esta ecuación se ha podido obtener el flujo neto F_λ en cada uno de los filtros. Los errores en los flujos se han obtenido a partir de los errores en las magnitudes simplemente por propagación de errores en la ecuación (1).

2. Seguidamente se ha multiplicado la longitud de onda efectiva de cada filtro (Tabla 2) por el flujo en dicho filtro. Una de las ventajas de estudiar la cantidad λF_λ en lugar de solo el flujo F_λ es que se cumple la relación:

$$\nu F_\nu = \lambda F_\lambda \quad (2)$$

Es decir, es equivalente trabajar en longitudes de onda que en frecuencias.

3. Finalmente se ha representado λF_λ frente a la longitud de onda λ en escala logarítmica y en unidades del Sistema Internacional (W/m² frente a m).

La elaboración de este programa ha sido una de las tareas más importantes de este trabajo, ya que ha permitido realizar un estudio muy detallado y preciso de todas las estrellas como se verá en las siguientes secciones. En la Fig. 7 se muestra a modo de ejemplo la SED de una de las estrellas estudiadas. Para mayor claridad se ha indicado al lado de cada punto el filtro al que se corresponde. Destacar que no se representan los puntos correspondientes a los filtros de B_T y V_T de Tycho-2 por motivos que se explicarán en la siguiente sección.

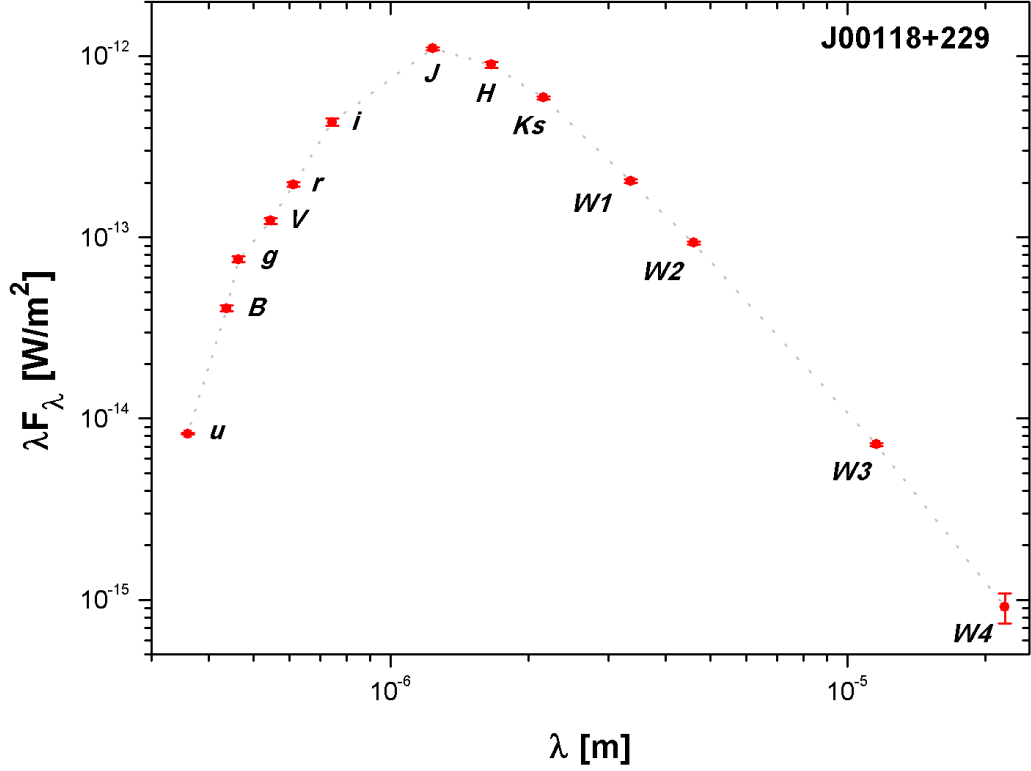


Figura 7: Ejemplo de SED para la estrella M3.5V LP 348–040 (J00118+229).

2.5. Prototipos espectrales

El hecho de tener fotometría disponible en diferentes bandas, así como un programa para pintar SED's permitía llevar a cabo diferentes estudios interesantes. En esta sección se va a explicar uno de esos estudios. Puesto que la muestra completa de estrellas de las que teníamos fotometría abarcaba todos los subtipos espectrales desde M0.0V hasta M6.5V, sería interesante buscar una SED de “referencia” o SED prototipo para cada uno de esos subtipos espectrales. Esto ya se había hecho previamente pero a partir de espectros. Es decir, a partir del estudio del espectro de cada estrella, se disponía de una o varias estrellas cuya SED servía de prototipo para cada uno de los subtipos espectrales desde M0.0V hasta M6.5V. Lo característico del estudio llevado a cabo en este proyecto es que se han buscado esos *prototipos espectrales* a partir de fotometría y no de espectroscopía.

Según esto, hemos encontrado nuestros propios prototipos espectrales basándonos solo en la fotometría recopilada. Cabe destacar la importancia de tener al menos un prototipo de estrella para cada subtipo espectral ya que el error en la determinación del subtipo espectral es de ± 0.5 . De tal forma, y como se verá más adelante, esto ha permitido reconsiderar cual es el subtipo espectral de algunas estrellas de CARMEN-CITA y ver si éste era correcto o erróneo.

En la Tabla 6 se muestran las estrellas que se han tomado como prototipo así como su magnitud en la banda J ¹²:

Tabla 6: Prototipos espectrales

Karmn^a	Nombre	J [mag]	T. esp.	Ref.^b
J12123+544S	BD+55 1519 A	6.875	M0.0V	PMSU
J18353+457	BD+45 2743	6.881	M0.5V	Klu12
J02565+554W	Ross 364	7.425	M1.0V	PMSU
J00136+806	G 242−048	7.756	M1.5V	Klu12
J22115+184	Ross 271	6.725	M2.0V	PMSU
J21019−063	Wolf 906	7.563	M2.5V	Klu12
J09011+019	Ross 625	7.932	M3.0V	PMSU
J09423+559	GJ 363	8.374	M3.5V	PMSU
J15191−127	LP 742−061	8.507	M4.0V	PMSU
J13005+056	FN Vir	8.553	M4.5V	PMSU
J20260+585	Wolf 1069	9.029	M5.0V	PMSU
J00067−075	GJ 1002	8.323	M5.5V	PMSU
J02142−039	LP 649−072	10.481	M6.0V	Klu12
J10564+070	CN Leo	7.085	M6.5V	Klu12

^aNombre que se asigna a cada estrella en CARMENCITA basado en sus coordenadas AR y DEC J2000.

^b**PMSU**: Hawley et al. (1996) [8]; **Klu12**: Klutsch et al. (2012) [10].

Veamos cual ha sido el procedimiento seguido para la elaboración de la Tabla 6:

1. Inicialmente se han distinguido todas las estrellas de la muestra según su subtipo espectral. Y dentro de cada subtipo espectral se han tomado aquellas estrellas que poseían suficiente fotometría recopilada. Es decir, si una estrella no disponía de varios puntos fotométricos se descartaba directamente como prototipo espectral.
2. El siguiente paso ha sido normalizar a $J = 10$ mag cada una de las estrellas restantes. Es decir, aquellas que sí poseían fotometría en todos (o casi todos) los filtros.
3. Por último, analizando las SED's se ha buscado un patrón u ordenamiento. Se ha exigido que las SED's de diferentes subtipos espectrales no se crucen entre sí (salvo quizá algún punto en particular). Así mismo, conociendo el mecanismo de emisión de las estrellas tipo M, se debía de cumplir que las estrellas de subtipos espectrales más tempranos emitieran más en las bandas más energéticas que las estrellas de subtipos espectrales más tardíos.

¹²Los valores de todas las magnitudes consideradas para estas estrellas prototipo seleccionadas se listan en la Tabla 11 del Anexo.

En la Fig. 8 se muestran las distribuciones espectrales de energía de las estrellas que se han tomado como prototipos espectrales tras aplicar los pasos antes comentados. Cada uno de los datos fotométricos se representa unido por líneas de puntos.

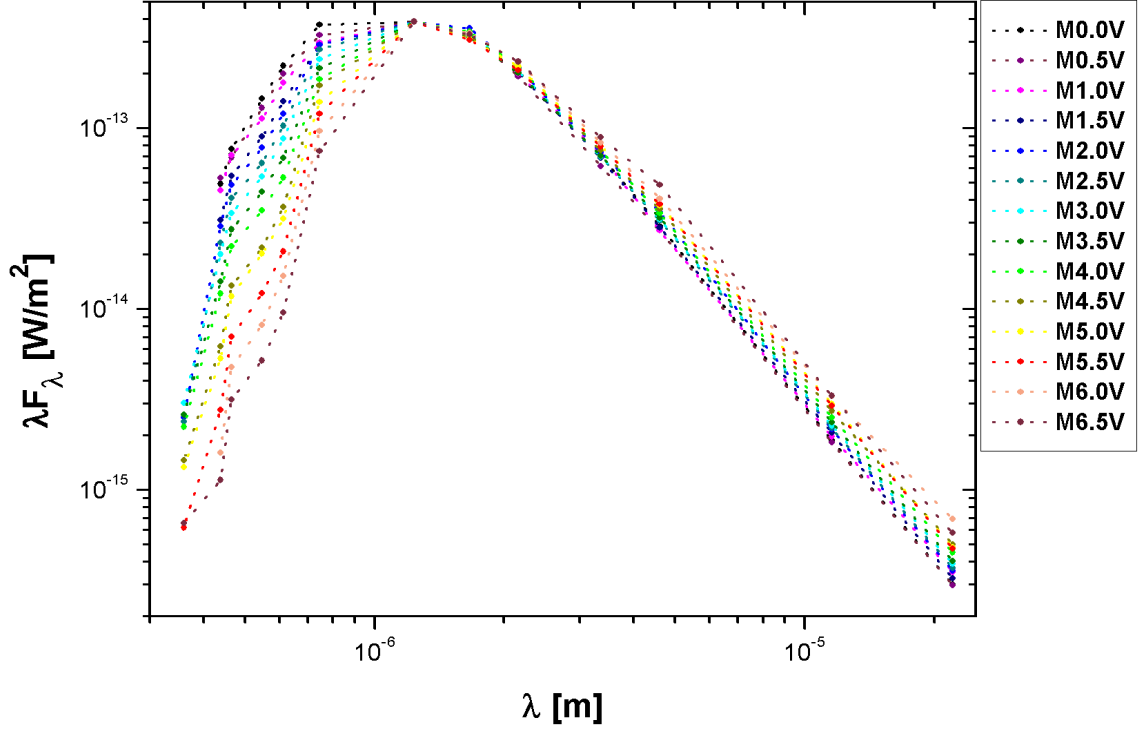


Figura 8: SED de todos los prototipos espectrales representados de distinto color e indicados en la leyenda.

En la búsqueda de estos prototipos espectrales hay que hacer dos aclaraciones:

1. No se han tenido en cuenta los filtros de Tycho-2 (B_T y V_T). Principalmente por dos razones: por un lado, debido a que muchas de las estrellas de la muestra no poseen fotometría en dichos filtros; y por otro lado, debido a que los datos disponibles de Tycho-2 en muchos casos vienen acompañados de un error bastante grande. Teniendo en cuenta estos dos factores se decidió no considerar la fotometría de Tycho-2 a la hora de pintar distribuciones espectrales de energía.
2. La estrella prototipo de M6.0V, LP 649-072, inicialmente no formaba parte de nuestra muestra de 285 estrellas. La razón por la cual se incluyó es que la única estrella de tipo M6.0V de que disponíamos inicialmente (LP 368-128) no cumplía los requisitos comentados anteriormente mientras que LP 649-072 sí. Pasó por tanto a formar parte de la lista de mejores candidatas.

Dado que en la Fig. 8 no se aprecian muy bien las líneas individuales, se ha realizado un zoom sobre dicha gráfica que se representa en la Fig. 9:

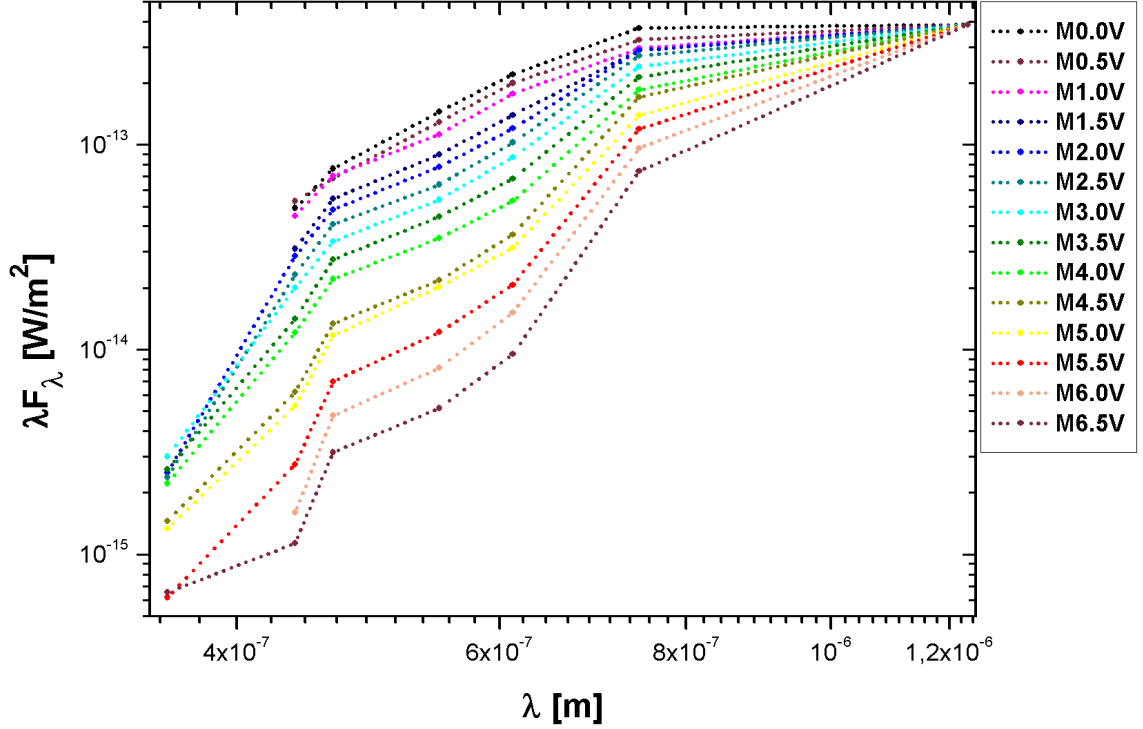


Figura 9: Lo mismo que en Fig. 8, pero desde u hasta J .

En esta imagen podemos ver claramente como las líneas no se cruzan salvo quizás en el punto fotométrico u . Además vemos como exceptuando las prototipos M0.0V, M0.5V, M1.0V, M1.5V y M6.0V que no poseen dato fotométrico en u , todas las estrellas poseen fotometría en las bandas u , B , g , V , r , i y J . Análogamente, a partir de la Fig. 8 se ve que todas las estrellas poseen también fotometría en los filtros H , Ks , $W1$, $W2$, $W3$ y $W4$.

Como ya se ha comentado, el error en la determinación del subtipo espectral es de ± 0.5 . Más adelante utilizaremos estos prototipos espectrales para comprobar los tipos espectrales de las estrellas de CARMENCITA mediante comparación. Es decir, se representará la SED de una estrella cualquiera a la que se superpondrá la SED correspondiente al tipo espectral de esa estrella junto con las SED's de los subtipos espectrales ± 0.5 . Por ejemplo, pintaremos la SED de una estrella M4.0V a la que superpondremos los puntos de las SED's de los prototipos espectrales M3.5V, M4.0V y M4.5V unidos por líneas de puntos. Esto nos ayudará a detectar puntos fotométricos erróneos así como a la comprobación o no del subtipo espectral en cuestión (ver Anexo).

3. Resultados

3.1. Diagramas

A partir de toda la fotometría recopilada se han podido calcular numerosos índices de color que se han empleado para hacer un estudio detallado de las estrellas M. Para ello se han analizado los diferentes colores en función del subtipo espectral y en función de otros colores como se verá en esta sección.

3.1.1. Diagramas Color vs. Tipo espectral

Para cada uno de los subtipos espectrales desde M0.0V hasta M6.5V se han calculado un total de 9 índices de color que vienen recogidos en la Tabla 7. En la Fig. 10 se representa a modo de ejemplo el índice de color $r - J$ frente al tipo espectral.

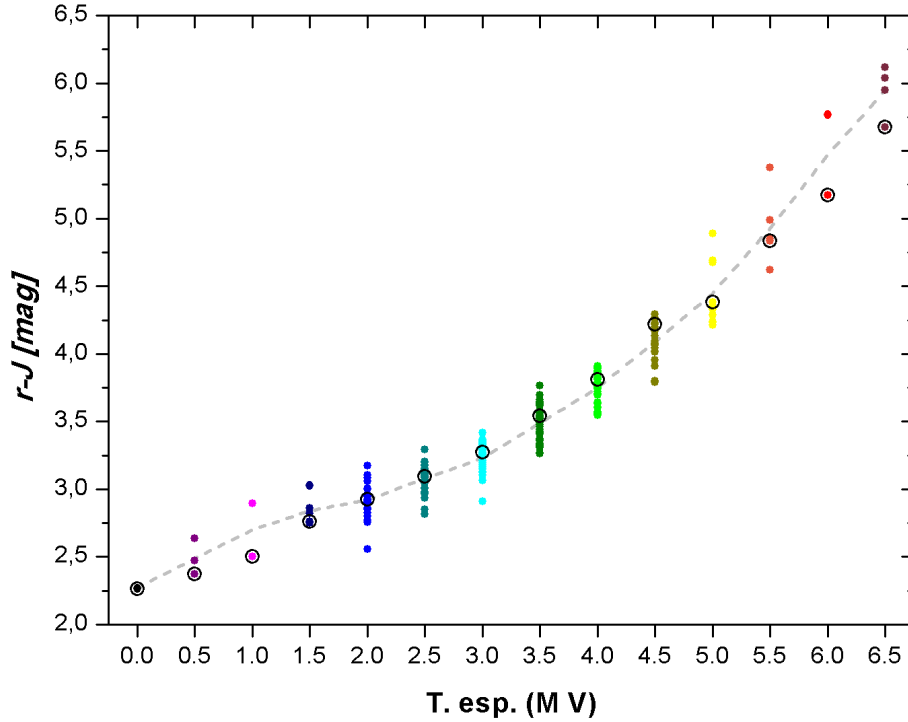


Figura 10: Diagrama $r - J$ vs. Tipo espectral.

Como se puede apreciar, cada subtipo espectral viene pintado con el mismo color que se empleó en las Figuras 8 y 9. Además, la línea discontinua gris representa los valores medios de los índices de color (ver Tabla 7), mientras que los círculos negros marcan cuál es el índice de color de la estrella prototipo para ese subtipo espectral (ver Tabla 6). Por ejemplo, para M2.0V, el punto azul rodeado de un círculo negro marca que en efecto ese es el valor del índice $r - J$ para la estrella prototipo M2.0V (Ross 271).

En la Fig. 11 se muestran los diagramas Color vs. Tipo espectral que poseen al menos un filtro en la banda óptica ($u - g$, $g - r$, $r - i$ y $r - Ks$):

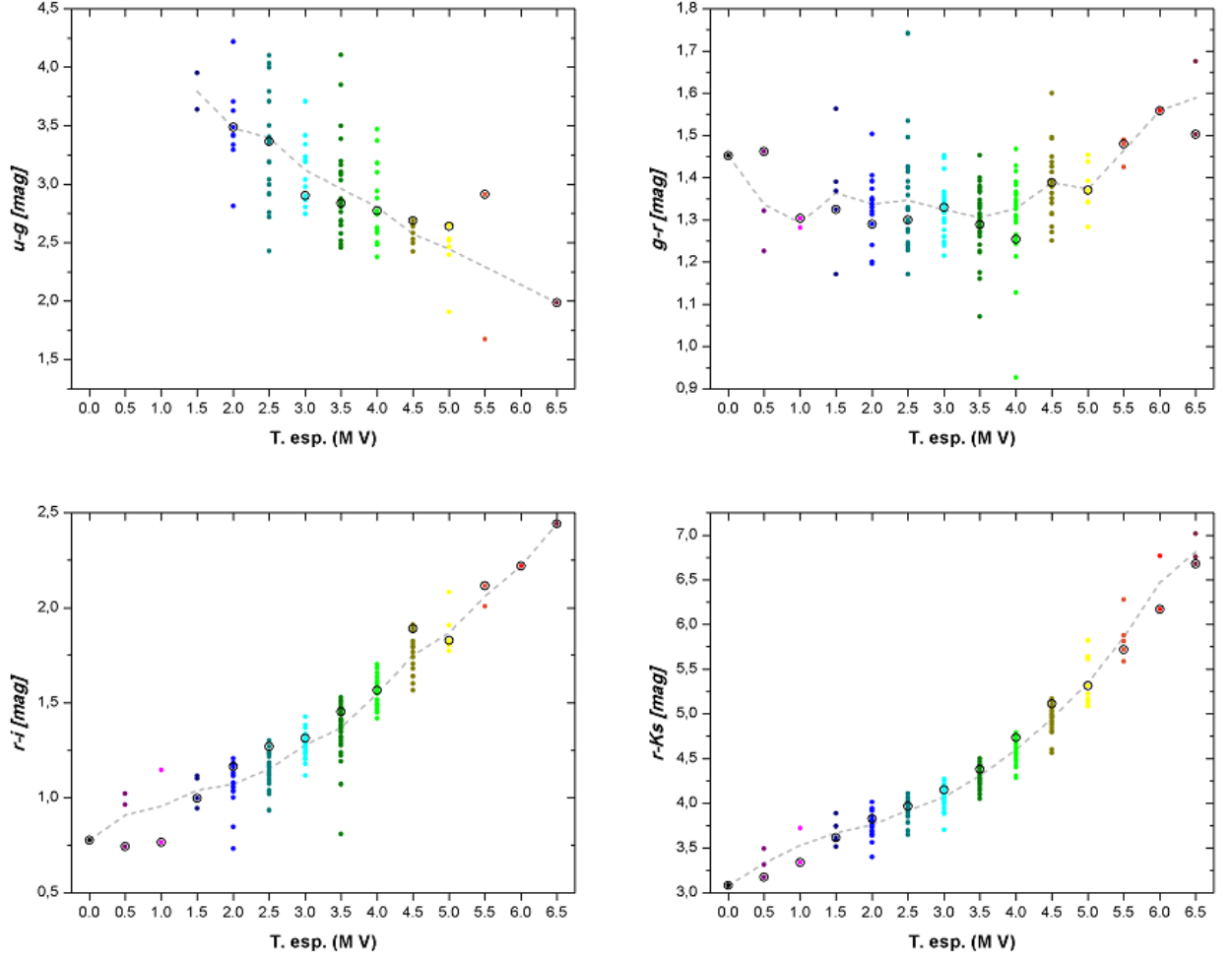


Figura 11: Diagramas Color vs. Tipo espectral (1).

Como se puede ver, en la gráfica correspondiente al color $u - g$ no se han representado puntos para los tipos espectrales M0.0V, M0.5V, M1.0V y M6.0V. El motivo es que no se dispone de ningún dato fotométrico en u , o en g , o en ambos para esos tipos espectrales, o bien han sido eliminados por ser erróneos. Es decir, los diagramas presentados en la Fig. 11 han sido sometidos previamente a un proceso de “limpieza” en el cuál se han descartado los valores que claramente estaban mal. También vemos como de manera generalizada, los índices de color correspondientes a los prototipos espectrales siguen de manera razonable la línea gris que denota los valores medios, tal y como cabría esperar.

En la Fig. 12 se muestran los diagramas Color vs. Tipo espectral que poseen al menos un filtro en la banda infrarroja ($i - J$, $J - Ks$, $W1 - W3$, $W2 - W4$):

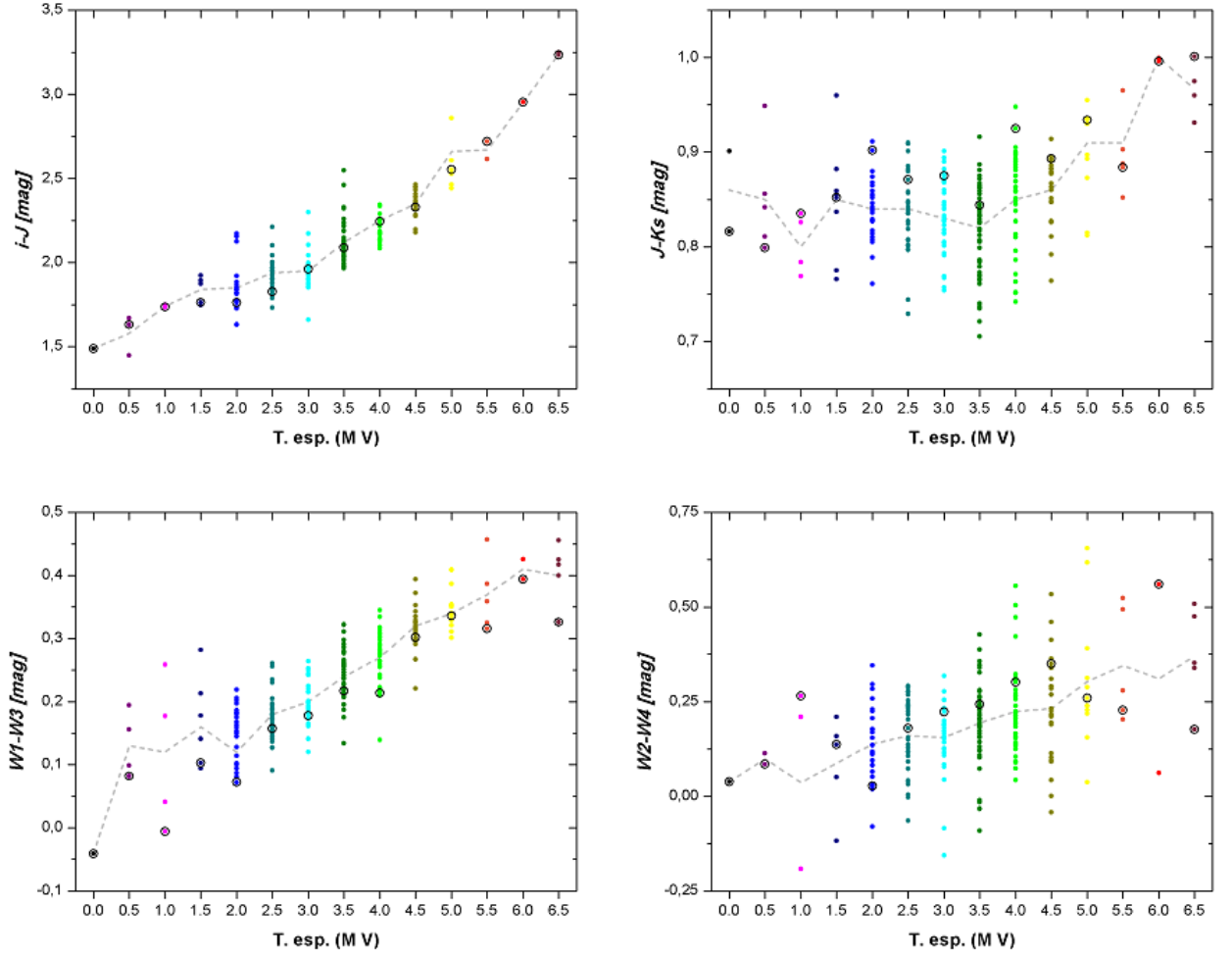


Figura 12: Diagramas Color vs. Tipo espectral (2).

De nuevo en estos diagramas se han eliminado aquellos valores que eran manifiestamente erróneos. Dichos valores no se han tenido en cuenta pues para el cálculo de la media.

Por último resaltar que, tal como se puede apreciar en las Figuras 11 y 12, se dispone de muchos más datos para subtipos espectrales intermedios (M2.0V–M4.5V). Por tanto debemos esperar que los índices de color medios obtenidos para este tipo de estrellas sean más fiables que para los subtipos espectrales más tempranos (M0.0V–M1.5V) y más tardíos (M5.0V–M6.5V).

En la Tabla 7 se presentan todos los valores medios de los índices de color obtenidos para cada subtipo espectral.

Tabla 7: Valores medios de los índices de color

T. esp.	$u - g$ [mag]	$g - r$ [mag]	$r - i$ [mag]	$r - J$ [mag]	$r - Ks$ [mag]	$i - J$ [mag]	$J - Ks$ [mag]	$W1 - W3$ [mag]	$W2 - W4$ [mag]
M0.0V	...	1.45	0.78	2.27	3.08	1.49	0.86	-0.04	0.04
M0.5V	...	1.34	0.91	2.49	3.33	1.58	0.85	0.13	0.10
M1.0V	...	1.29	0.96	2.70	3.53	1.74	0.80	0.12	0.04
M1.5V	3.80	1.36	1.04	2.84	3.67	1.84	0.85	0.16	0.09
M2.0V	3.48	1.34	1.07	2.92	3.76	1.85	0.84	0.15	0.14
M2.5V	3.40	1.35	1.15	3.08	3.92	1.93	0.84	0.18	0.16
M3.0V	3.12	1.32	1.28	3.23	4.07	1.95	0.83	0.20	0.16
M3.5V	2.96	1.31	1.37	3.49	4.31	2.12	0.82	0.24	0.19
M4.0V	2.80	1.33	1.55	3.75	4.60	2.19	0.85	0.27	0.22
M4.5V	2.57	1.39	1.75	4.09	4.95	2.35	0.86	0.32	0.23
M5.0V	2.44	1.37	1.87	4.45	5.35	2.58	0.91	0.34	0.30
M5.5V	2.29	1.47	2.06	4.93	5.86	2.67	0.91	0.37	0.35
M6.0V	...	1.56	2.22	5.47	6.47	2.95	1.00	0.41	0.31
M6.5V	1.99	1.59	2.44	5.89	6.82	3.24	0.97	0.40	0.37

Esta tabla es uno de los resultados más importantes de este trabajo. Contiene información sobre los índices de color de cada uno de los subtipos espectrales y por tanto de cuál es la emisión de cada tipo espectral en diferentes bandas fotométricas. Además, simplemente a partir de fotometría, permite hacer una rápida identificación sobre el subtipo espectral de una estrella M.

Veamos esto en detalle. Imaginemos que queremos saber el subtipo espectral de una estrella M de la cuál no tenemos su espectro ni fotometría multibanda. Nos bastaría con tener fotometría en los filtros r y Ks (por decir algunos) para obtener un primer indicio de cuál es el subtipo espectral simplemente calculando el índice $r - Ks$. Si por ejemplo obtenemos un color $r - Ks = 4.35$, podríamos afirmar casi con seguridad de que en efecto se trata de una estrella con subtipo espectral comprendido entre M3.5V y M4.5V. Y si además dispusiéramos de varios colores podríamos incluso precisar más en la determinación del tipo espectral. Todo esto insistimos sin disponer de espectrometría o de otro tipo de información complementaria.

Por supuesto esto no será válido en todos los casos. Para ello necesitaríamos mejorar la precisión de esta tabla con un número mayor de datos fotométricos, en particular para los subtipos más tempranos y tardíos como ya se ha comentado. Igualmente, algunos índices de color son mejores que otros para realizar el procedimiento explicado anteriormente. En particular los índices $r - i$, $r - J$ y $r - Ks$.

Por último comentar que de manera independiente dentro del proyecto CARMENES también se han buscado prototipos espectrales a partir de espectroscopía (ver Klutsch et al., 2012 [10]; Alonso-Floriano et al., 2013 [2]) y no de fotometría como se ha hecho aquí. Y existe coincidencia con los resultados obtenidos en esa búsqueda para cuatro de nuestras estrellas prototipo (M0.5V, M1.5V, M2.5V y M6.0V).

3.1.2. Diagramas Color vs. Color

Otro de los resultados más interesantes de este trabajo ha sido el estudio de los índices de color de las estrellas M mediante diagramas color-color. El análisis de este tipo de diagramas ha sido otra de las herramientas utilizadas para la limpieza de los posibles datos fotométricos erróneos que se habían recopilado previamente. A su vez también se ha llevado a cabo una comparación con los resultados del trabajo de Bochanski et al. (2007) [4].

En la Fig. 13 se presentan los resultados obtenidos para el diagrama $u - g$ frente a $g - r$ así como la explicación de la leyenda:

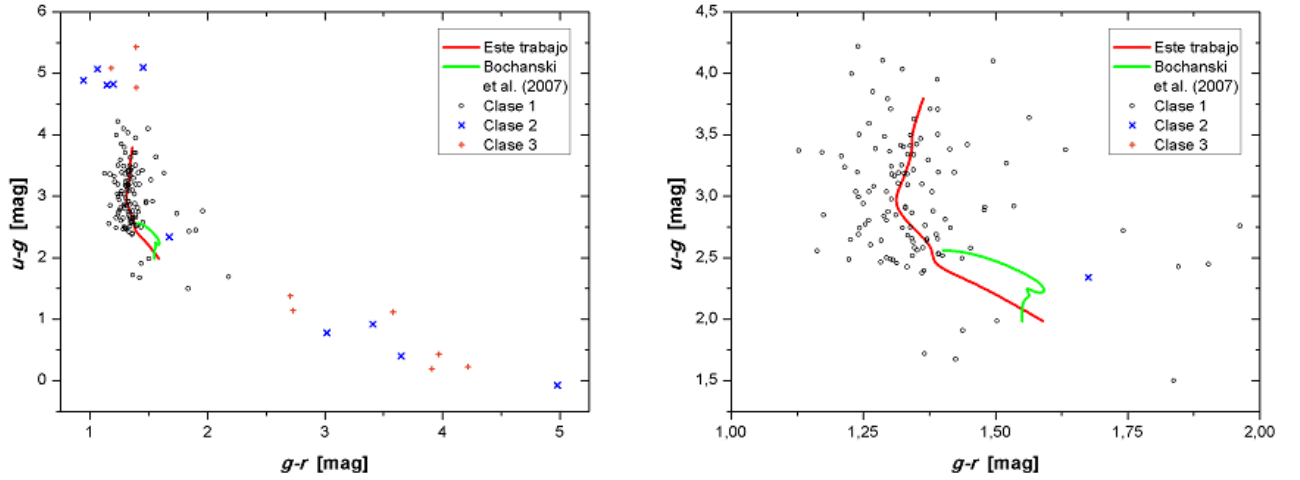


Figura 13: Diagrama $u - g$ vs. $g - r$. Se representan todos los puntos (izq.) y un zoom sobre la zona de puntos buenos (der.).

LEYENDA

- “Este trabajo” (—): La línea roja une los valores medios de los índices de color presentados en la Tabla 7 y que se han obtenido en este proyecto.
- “Bochanski et al. (2007)” (—): La línea verde que une los valores medios de los índices de color obtenidos por Bochanski et al. (2007) [4]. Se representan los tipos espectrales desde M0.0V a M7.0V.
- “Clase 1” (○): Aquellos valores de los índices de color considerados como correctos.
- “Clase 2” (×): Aquellos valores de los índices de color considerados como erróneos pero cuya SED se presenta en el Anexo de manera que se puede observar su desviación con respecto al resto de filtros.
- “Clase 3” (+): Aquellos valores de los índices de color considerados como erróneos y que además no se dispone de su SED.

Los datos fotométricos correspondientes a los símbolos $\times$ y $+$ se han eliminado del archivo que finalmente pasará a CARMENCITA. De esta manera nos aseguramos que la fotometría recopilada es en efecto correcta. Además, en los casos en los que ha sido posible se ha representado la SED incluyendo los puntos erróneos pero marcándolos con $\times$ para denotar que se trata de un dato defectuoso (ver Anexo). En cambio no se han pintado las SED's de aquellas estrellas de las que no se disponían de suficientes datos fotométricos.

Por otro lado vemos como los resultados obtenidos en este trabajo contrastan de manera significativa con los obtenidos por Bochanski. En la Fig. 13 se aprecia que los valores medios de los índices de color no solo difieren en número sino también en el rango de valores posibles, existiendo mayor discrepancia para los subtipos espectrales más tempranos. Por ejemplo, el valor medio de $u - g$ obtenido por Bochanski para las estrellas de tipo M2.0V es de 2.29 mientras que el nuestro ha sido de 3.48 (52 % de diferencia). En cambio, para estrellas de tipo M5.0V, el resultado de Bochanski es de 2.18 mientras que el nuestro ha sido de 2.44 (12 % de diferencia).

Esto mismo se puede apreciar en la Fig. 14 para $g - r$ frente a $r - i$:

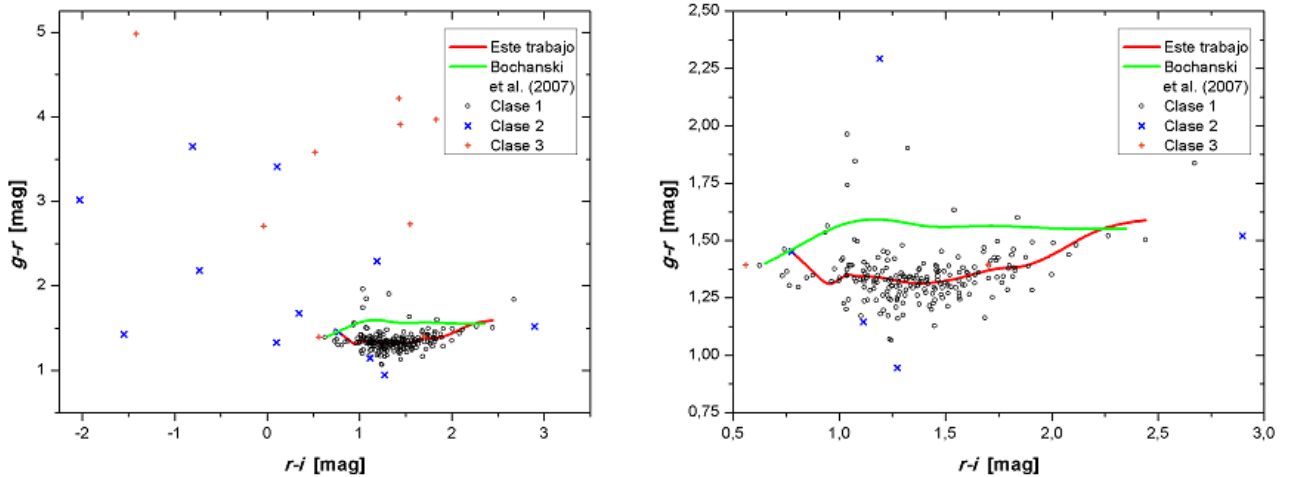


Figura 14: Lo mismo que en la Fig. 13 pero para $g - r$ vs. $r - i$.

De nuevo vemos como nuestros resultados “rebajan” los de Bochanski, sobre todo para los subtipos espectrales más tempranos (parte izquierda del diagrama). En cambio, para subtipos espectrales más tardíos la discrepancia se hace menor. Por ejemplo, para estrellas de tipo M6.0V, el valor obtenido por Bochanski para el índice $g - r$ es de 1.55 mientras que el obtenido en este trabajo es de 1.56.

Destacar que, tal y como se comentó previamente, deberíamos mejorar nuestra estadística de subtipos espectrales tempranos y tardíos para corroborar estas discrepancias. En cambio, para subtipos espectrales intermedios de los que disponemos de fotometría de bastantes estrellas sí que podemos afirmar de manera fiable que nuestros resultados son correctos.

En la Fig. 15 se muestran otros diagramas Color vs. Color también estudiados en este trabajo:

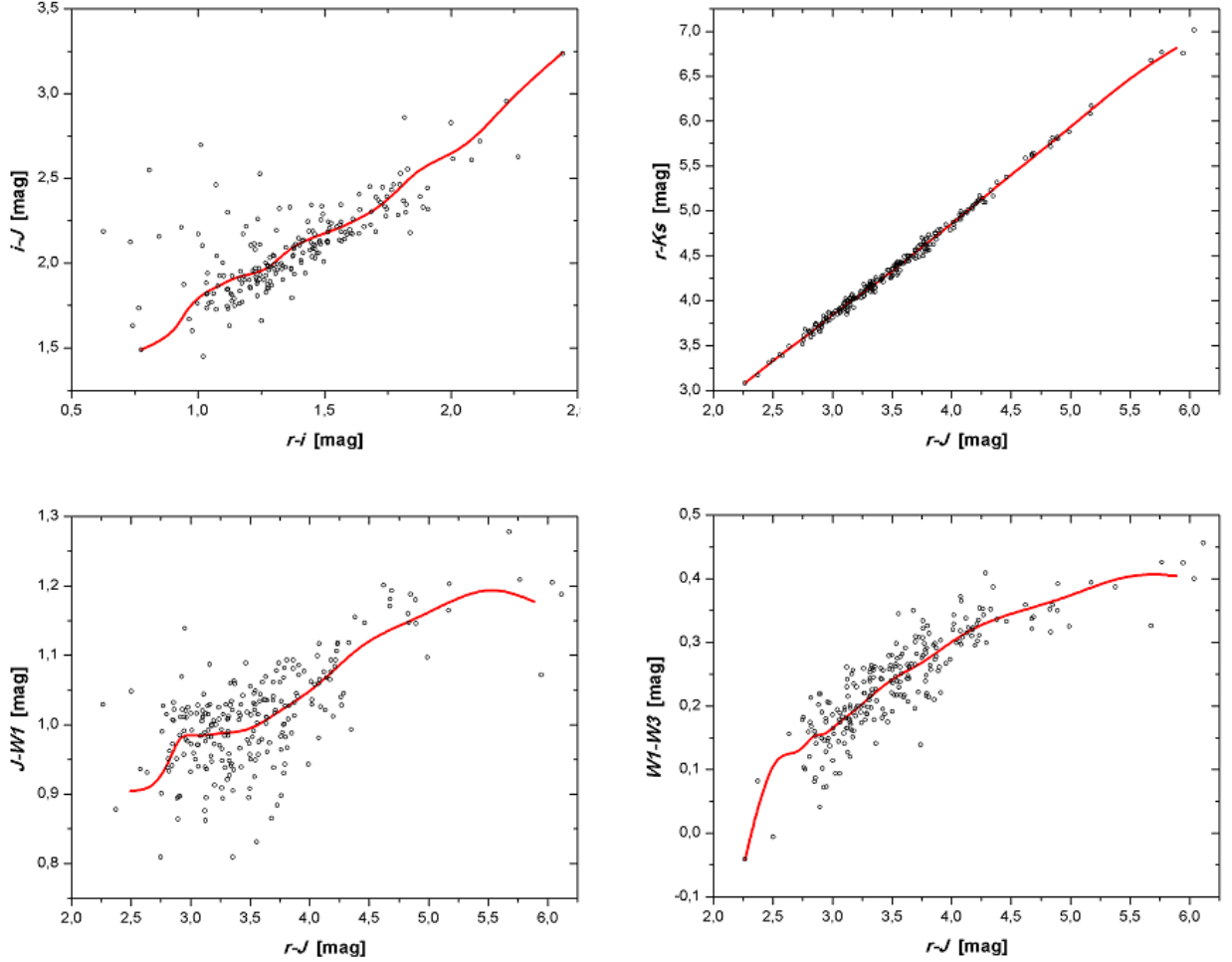


Figura 15: Diagramas Color vs. Color.

En este caso no se comparan con Bochanski porque estos índices de color no fueron calculados en su trabajo. Además, se presentan solo los puntos buenos ($\circ$) tras el proceso de limpieza realizado. De nuevo la línea roja representa los valores medios de los índices de color obtenidos en este trabajo. Vemos por ejemplo que la correspondencia entre el índice $r - Ks$ y $r - J$ es casi exacta. De hecho solo se han limpiado dos puntos erróneos en este diagrama.

Igualmente, a partir de estos diagramas se pueden identificar los puntos ya presentados en las Figuras 11 y 12.

3.2. Limpieza de los datos

Como ya se ha comentado previamente, se ha hecho uso de los diagramas Color vs. Tipo espectral y de los diagramas Color vs. Color para realizar la limpieza de los datos de nuestro catálogo.

El proceso ha sido el siguiente: Inicialmente, a partir de dichos diagramas, se han identificado posibles valores erróneos. Seguidamente se ha analizado la estrella en cuestión y se ha estudiado de manera individualizada teniendo en cuenta diferentes aspectos: su tipo espectral, una posible compañera cercana contaminando su fotometría, saturación, etc. Finalmente, para esas estrellas se ha pintado su SED y a partir de ella se ha comprobado que datos fotométricos eran erróneos y se ha procedido a su eliminación.

Este proceso se ha ido repitiendo hasta formar el archivo *ascii* (Tabla 8) que finalmente será entregado a CARMENCITA. Dicho archivo consta de 55 columnas en las que viene recopilada toda la fotometría comentada en esta memoria para las 286 estrellas M junto con su error y su referencia.

Tabla 8: Fichero *ascii* de CARMENCITA (12 de las 55 columnas)

Karmn	Comp	Class	Name	RA_J2000	DE_J2000	u_mag	eu_mag	Ref	BT_mag	eBT_mag	Ref
J00067-075	-	Alpha	GJ 1002	00:06:43.26	-07:32:14.7	17.55	0.39	SDSS8	...	...	...
J00088+208	-	Alpha	LP 404-033	00:08:53.92	+20:50:25.2	16.806	0.009	SDSS8	...	...	...
J00115+591	-	Alpha	LSR J0011+5908	00:11:31.82	+59:08:40.0	...	...	...	...	...	...
J00118+229	-	Alpha	LP 348-040	00:11:53.03	+22:59:04.7	16.412	0.009	SDSS8	...	...	...
J00136+806	A	Alpha	G 242-048 A	00:13:38.81	+80:39:56.9	...	...	...	13.381	0.296	TYC2
J00162+198E	B	Alpha	GJ 1006 B	00:16:16.08	+19:51:51.5	16.440	0.008	SDSS8	...	...	...
J00169+051	-	Alpha	GJ 1007	00:16:56.29	+05:07:26.1	16.948	0.009	SDSS8	...	...	...
J00173+291	-	Alpha	LHS 1054	00:17:20.21	+29:10:57.8	15.606	0.007	SDSS8	13.910	0.403	TYC2
J00183+440	A	Alpha	GX And	00:18:22.57	+44:01:22.2	...	...	...	10.085	0.029	TYC2
J00286-066	-	Alpha	GJ 1012	00:28:39.48	-06:39:48.1	15.692	0.006	SDSS8	...	...	...
J00184+440	B	Alpha	GQ And	00:18:25.50	+44:01:37.6	...	...	...	...	...	...
J00315-058	-	Alpha	GJ 1013	00:31:35.39	-05:52:11.6	16.121	0.007	SDSS8	...	...	...
J00361+455	-	Alpha	G 172-013	00:36:08.48	+45:30:57.6	...	...	...	13.669	0.291	TYC2
J00389+306	-	Alpha	GJ 26	00:38:58.79	+30:36:58.4	15.18	0.01	SDSS8	12.691	0.218	TYC2
J00443+126	-	Alpha	G 032-044	00:44:19.34	+12:37:02.7	16.002	0.008	SDSS8	...	...	...
J01013+613	-	Alpha	GJ 47	01:01:20.06	+61:21:56.0	...	...	...	12.976	0.207	TYC2
J01025+716	-	Alpha	BD+70 68	01:02:32.13	+71:40:47.6	...	...	...	11.862	0.078	TYC2
J01026+623	A	Alpha	BD+61 195	01:02:38.96	+62:20:42.2	...	...	...	11.474	0.056	TYC2
J01033+623	B	Alpha	V388 Cas	01:03:19.72	+62:21:55.7	...	...	...	...	...	...
J01056+284	-	Alpha	GJ 1029	01:05:37.32	+28:29:34.0	19.175	0.039	SDSS8	...	...	...
J01066+152	-	Alpha	GJ 1030	01:06:41.52	+15:16:22.9	15.630	0.008	SDSS8	...	...	...
J01069+804	-	Alpha	NLTT 3583	01:06:54.74	+80:27:24.4	...	...	...	...	...	...
J01256+097	-	Alpha	WolF 66	01:25:36.66	+09:45:24.4	...	...	...	...	...	...
J01383+572	-	Alpha	GJ 63	01:38:21.62	+57:13:57.1	16.296	0.008	SDSS8	...	...	...

La elaboración de este fichero ha sido el objetivo y la tarea principal de este trabajo.

En la Tabla 9 se presentan todos los datos fotométricos que han sido limpiados mediante el proceso explicado anteriormente. El símbolo “×” denota que datos se han eliminado del fichero *ascii*. Así mismo se tabulan los valores de *WISE* considerados erróneos.

Tabla 9: Datos fotométricos limpiados

Karmn	Nombre	<i>u</i>	<i>B</i>	<i>g</i>	<i>V</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	WISE
J00088+208	LP 404−033						×	
J00115+591	LSR J0011+5908			×				W4
J00286−066	GJ 1012	×		×			×	
J00315−058	GJ 1013			×				
J00389+306	GJ 26			×				
J01056+284	GJ 1029	×					×	
J01383+572	GJ 63	×		×		×	×	
J02022+103	LP 469−067					×		
J04311+589	Stein 2051 A		×					
J04472+206	RX J0447.2+2038						×	
J08082+211	LHS 5134			×			×	W1, W2
J08298+267	DX Cnc	×				×		
J09143+526	HD 79210	×						W2, W3, W4
J09144+526	HD 79211	×		×		×	×	
J10289+008	GJ 393	×		×		×	×	
J10416+376	GJ 1134	×		×			×	
J10482−113	LP 731−058		×	×	×	×		
J11033+359	HD 95735				×		×	W2
J11054+435	BD+44 2051A	×	×	×		×	×	W2
J11055+435	WX UMa						×	
J11421+267	GJ 436	×					×	
J11477+008	FI Vir	×		×		×	×	
J11509+483	GJ 1151	×		×		×	×	
J12123+544s	GJ 458A	×						
J12576+352E	GJ 490B			×		×	×	
J13195+351W	GJ 507 B	×		×		×	×	
J13229+244	Ross 1020						×	
J13401+437	Ross 1026			×				
J13457+148	HD 119850 B							W2
J14294+155	Ross 130	×						
J15531+347N	LHS 3129						×	
J15583+354	G 180−018						×	
J16354+350	LP 275−068						×	
J16570−043	LP 686−027	×		×		×	×	
J16167+672s	LHS 3175			×				W2
J16303−126	V2306 Oph							W2
J17198+265E	V639 Her			×			×	
J18427+596N	HD 173739							W1, W2
J18427+596s	HD 173740							W1, W2
J19169+051N	V1428 Aql							W2
J19511+464	G 208−042						×	
J20533+621	BD+61 2068		×		×			W2
J21348+515	Wolf 926							W4
J21442+066	G 093−033			×				
J21466−001	Wolf 940			×				
J22125+085	Wolf 1014	×						
J22426+176	GJ 1271			×				
J22565+165	HD 216899	×		×	×	×	×	W2
J23419+441	HH And	×		×		×	×	
J23492+024	BR Psc	×		×	×	×	×	W2

3.3. Casos particulares

Además de las estrellas mencionadas en la Tabla 8, se describen a continuación algunos casos particulares en el proceso de limpieza de los datos:

- **J02530+168 (Teegarden’s Star):** Eliminado Ks .
- **J04153–076 (o^{02} Eri C, DY Eri):** Eliminados B , g , V y r . No se ha considerado el resto de su fotometría en los cálculos.
- **J05314–036 (HD 36395):** Eliminados g , H , $W1$ y $W2$.
- **J09003+218 (LP 368–128):** Eliminados u , g e i para hacer los cálculos pero no eliminados de CARMENCITA debido a que el tipo espectral puede ser erróneo. En la SED se representan como puntos malos.
- **J09143+526 (HD 79210):** Eliminados u , H , $W2$, $W3$ y $W4$.
- **J09144+526 (HD 79211):** Eliminados u , Ks , $W2$, $W3$ y $W4$.
- **J16555–083 (vB8):** Eliminados u , g , r e i para hacer los cálculos pero no eliminados de CARMENCITA debido a que el tipo espectral puede ser erróneo. En la SED se representan como puntos malos.
- **J18436+401: (LP 229–017):** Eliminado Ks .
- **J18411+247N (GJ 1230 B):** Eliminado Ks .
- **J19169+051S (vB 10):** Eliminado Ks .
- **J19463+320 (BD+31 3767A):** Eliminados $W1$, $W2$, $W3$ y $W4$.
- **J22057+656 (G 264–018A):** El flujo en los filtros ópticos B , g , V , r e i es mayor del esperado. $W4$ también eliminado.

Mediante la comparación de la SED de cada estrella con las SED’s prototipos se ha podido ver además que en algunos casos no está muy claro si su SED se corresponde con la del subtipo espectral de CARMENCITA o con la de un subtipo ± 0.5 . En la Tabla 10 se enumeran algunas estrellas en las que su subtipo espectral podría ser diferente.

Tabla 10: Posibles cambios de tipos espectrales

Karmn	Nombre	T. esp. (CARMENCITA)	T. esp. (Fotométrico)
J00162+198E	GJ 1006 B	M4.0V	M3.5V
J09003+218	LP 368–128	M6.0V	M6.5V
J12350+098	GJ 476	M2.5V	M2.0V
J16555–083	vB8	M6.5V	M7.0V
J21348+515	Wolf 926	M3.0V	M2.5V
J23340+001	GJ 889	M2.5V	M2.0V

3.4. Colaboración con el Observatorio Virtual

En una de las secciones anteriores se ha explicado como hizo falta la elaboración de un programa para dibujar distribuciones espectrales de energía. Pero inicialmente se pensó en utilizar la herramienta VOSA (Virtual Observatory Sed Analyzer) del Observatorio Virtual [3]. No obstante, tras numerosos intentos, se descartó el uso de esta herramienta. Uno de los motivos es que no permitía pintar SED's en unidades del Sistema Internacional tal y como se pretendía y se ha hecho en este trabajo. Además una de las intenciones de usar VOSA era poder calcular diferentes parámetros de las estrellas como temperaturas efectivas, gravedades, masas o edades. Pero parece ser que VOSA presenta problemas a la hora de calcular luminosidades de estrellas M. Podría proporcionar gravedades menores (es decir, radios mayores y luminosidades mayores) que las esperadas según las temperaturas efectivas. Y la consecuencia de esto es que VOSA, mediante diagramas HR erróneos, calcula unas edades muy pequeñas para este tipo de objetos, del orden de unas decenas de millones de años cuando deberíamos tener unas edades de entre 600–8.000 millones de años. Un ejemplo se muestra en la Fig. 16:

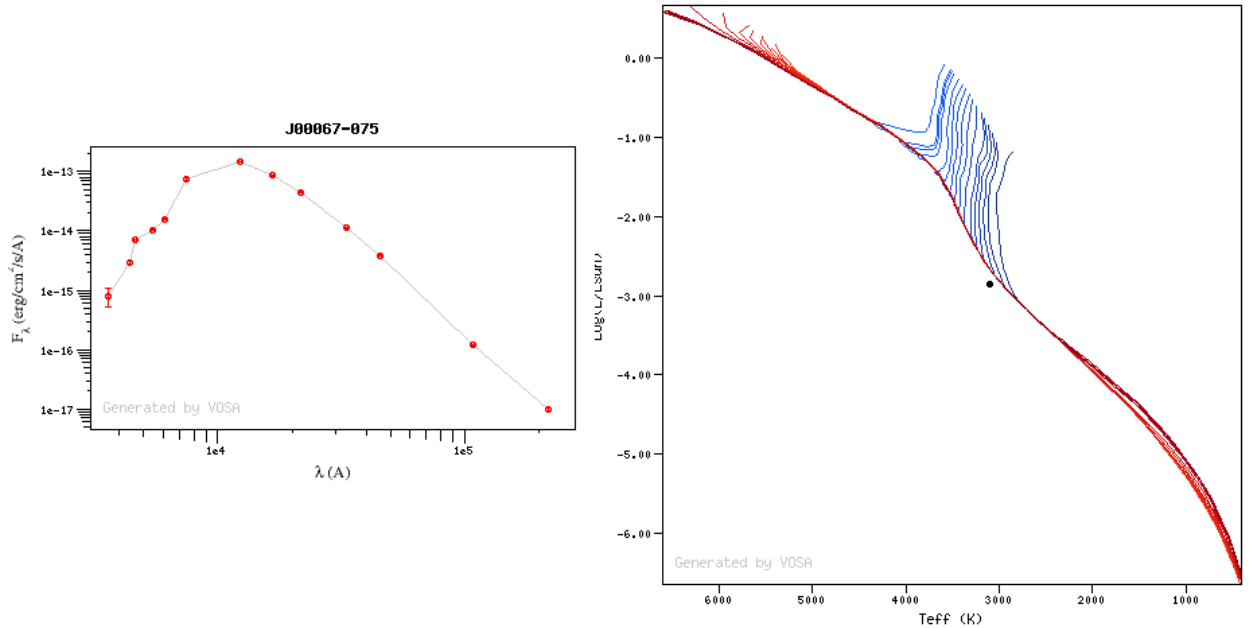


Figura 16: Gráficas proporcionadas por VOSA: A la izquierda se muestra la SED de la estrella J00067-075 y a la derecha el diagrama HR.

Estas gráficas son las que proporciona la versión 3.0 de VOSA actualmente (Septiembre 2013). Con el objetivo de solucionar estos cálculos erróneos se ha colaborado con Enrique Solano, coordinador principal del Observatorio Virtual Español. Para ello se le envió un fichero de datos con la fotometría recopilada de diferentes estrellas en el formato requerido y que cumpliesen unas ciertas condiciones: diferentes tipos espectrales, buena medida de paralaje, buena fotometría (errores pequeños, valores fiables y numerosos), etc. Este fichero era necesario para realizar diferentes pruebas con VOSA y encontrar los errores en los cálculos. Actualmente en el Observatorio Virtual se está trabajando en ello para solucionar estos problemas y poder utilizarlo también en este rango de tipos espectrales.

4. Conclusiones

Este trabajo ha permitido:

- Recopilar los datos fotométricos en las bandas $uBB_TVV_T rRizJHKsW1W2W3W4$ de manera individualizada de un total de 286 estrellas tipo M.
- Estudiar las distribuciones espectrales de energía de dichas estrellas a partir de la fotometría recopilada (en el Anexo se presentan las SED's para un número total de 100 estrellas).
- Seleccionar un conjunto de estrellas prototipo desde el tipo espectral M0.0V al tipo M6.5V (ver Tabla 6 y Tabla 11 del Anexo) en base únicamente a su fotometría que ha permitido estudiar el comportamiento de las SED's del resto de estrellas en estudio.
- Estudiar en detalle el comportamiento de varios índices de color ($u - g$, $g - r$, $r - i$, $r - J$, $r - Ks$, $i - J$, $J - Ks$, $W1 - W3$ y $W2 - W4$) y determinar los valores medios para cada subtipo espectral (ver Tabla 7). Esto es de gran utilidad para, a partir de fotometría, hacer una rápida clasificación del subtipo espectral de una estrella M. La comparación con los valores dados por otros estudios han puesto en evidencia que un estudio detallado como el llevado a cabo en este trabajo es necesario.
- Estudiar de manera individualizada cada una de las estrellas con ayuda de las SED's y los diagramas Color vs. Tipo espectral y Color vs. Color, lo que ha permitido identificar datos fotométricos erróneos y comprobar que algunos tipos espectrales previamente asignados deben revisarse.
- Elaborar una lista de datos fotométricos (ver Tabla 8) completa pero sobre todo muy precisa que será incluida en la base de datos CARMENCITA y que contribuirá significativamente a la selección de la muestra final de estrellas que CARMENES observará.
- Descartar ningún claro exceso de emisión infrarroja en las SED's que indicase la presencia de algún disco alrededor de alguna de las estrellas. Esto se habría podido observar claramente como desviaciones de las bandas más rojas respecto de la forma de la SED de las estrellas prototipo que siguen la tendencia esperada de un cuerpo negro (T^4).

Por otro lado, algunos trabajos futuros podrían ser:

- Estudiar de igual modo que se ha hecho aquí las 90 mejores candidatas restantes que ahora mismo se encuentran disponibles en CARMENCITA. De esta manera CARMENES dispondría de una lista total de 376 con fotometría recopilada.
- Hacer un esfuerzo observacional para aumentar el número de prototipos y mejorar el cálculo de los índices de color. Para ello haría falta disponer de mayor número de datos fotométricos para los subtipos espectrales más tempranos y tardíos.

- Derivar tipos espectrales a partir de fotometría mediante ajustes χ^2 sobre las SED's de manera que se reduzca el error cometido.
- Disponer de datos fotométricos del satélite GALEX en el ultravioleta para llevar a cabo estudios en las bandas más energéticas del espectro electromagnético. A partir de ellos se podrían detectar posibles excesos de flujo, etc.
- Estudiar la influencia del nivel de actividad (emisión cromosférica) y la metalicidad en las SED's y los valores de los índices de color, ya que podrían explicar las desviaciones en la SED de algunas de las estrellas así como la dispersión observada en los valores de los índices de color obtenidos para cada tipo espectral. Algunos estudios (Bochanski et al., 2007 [4]; Hawley et al., 1996 [8]) encuentran valores diferentes según si las estrellas son activas o no activas.
- Estudiar también el posible efecto de las bandas moleculares, que se sabe que dependen de la metalicidad de la estrella y que al ser tan extensas podrían afectar al valor de algunos índices de color.
- Calcular diferentes parámetros de las estrellas (edades, temperaturas efectivas, etc.) a partir del ajuste de sus SED's a modelos.

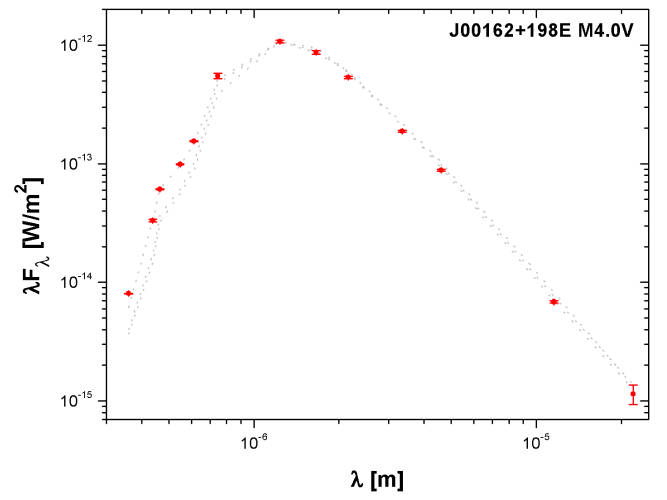
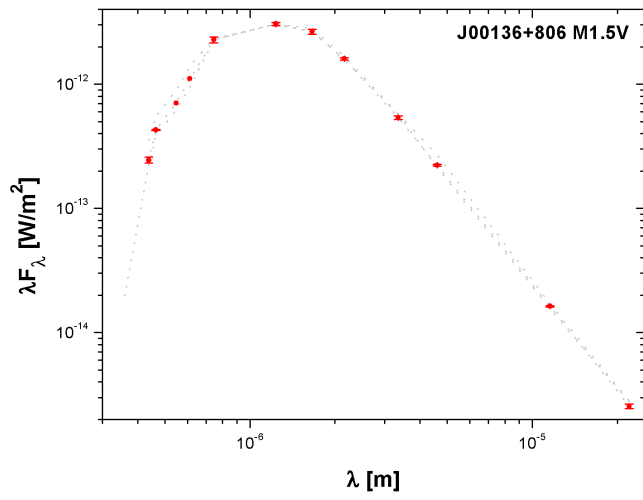
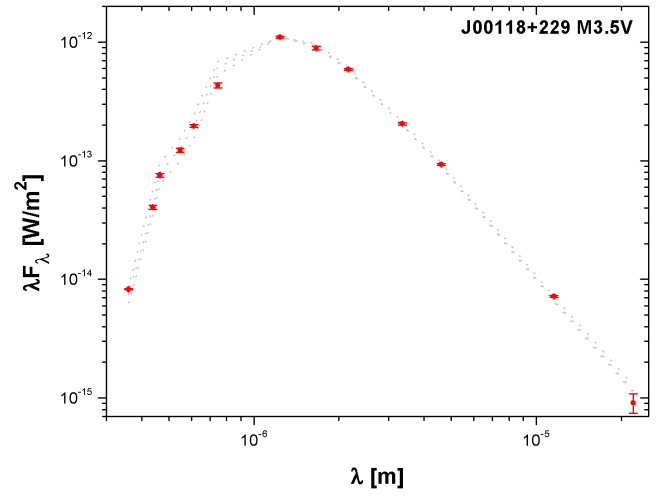
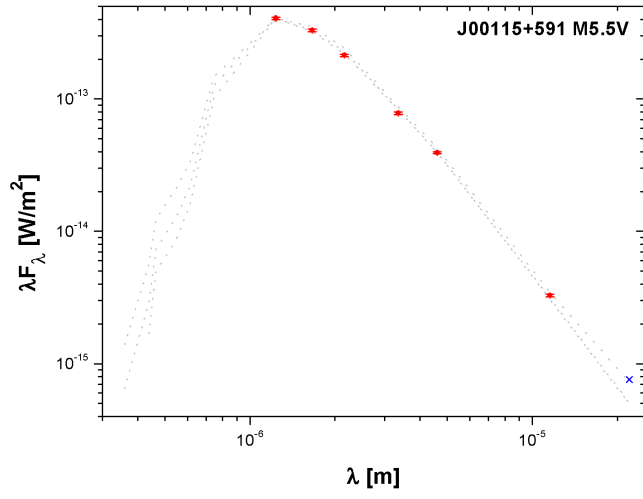
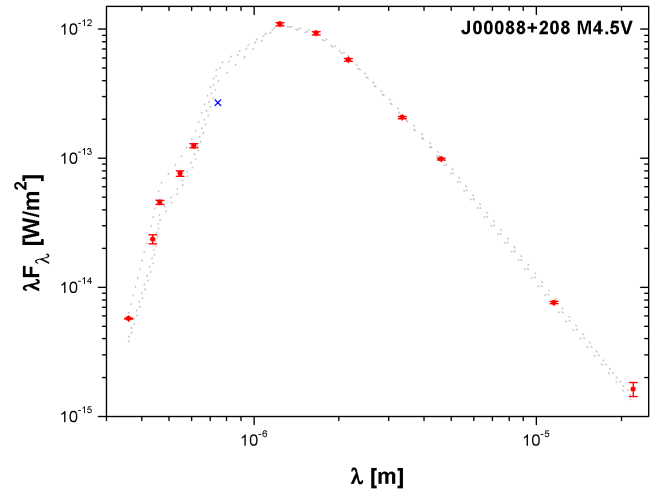
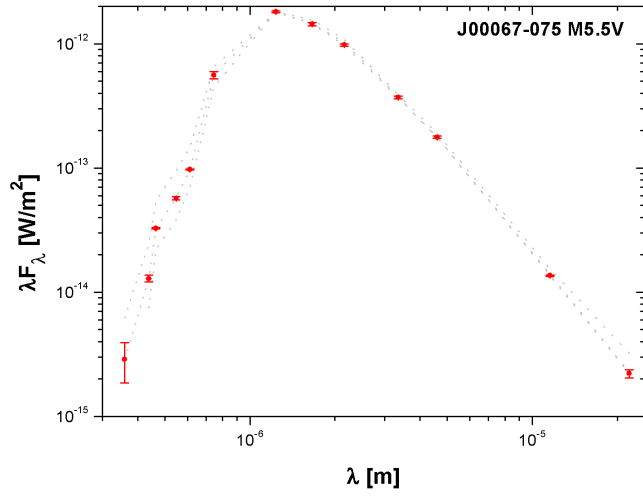
Referencias

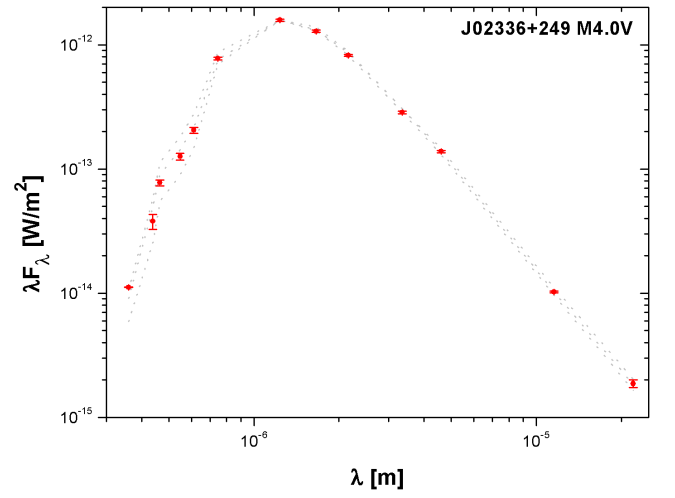
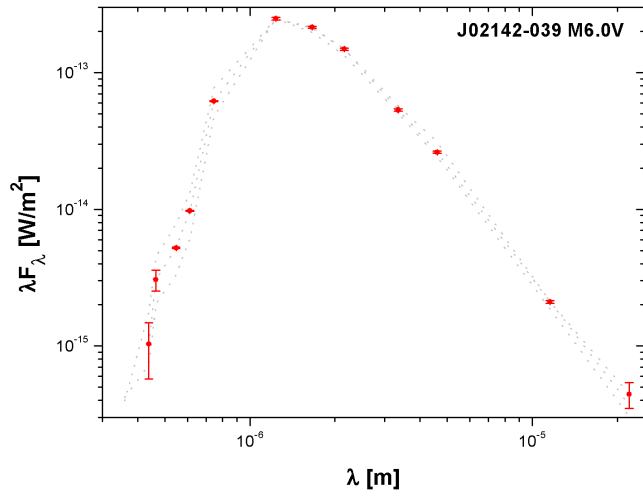
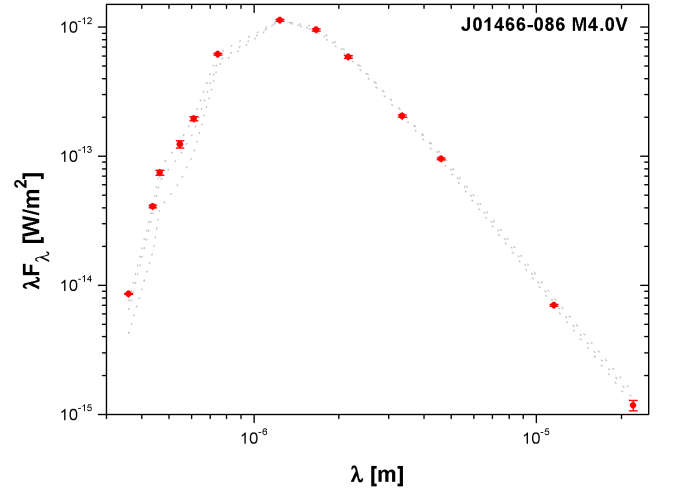
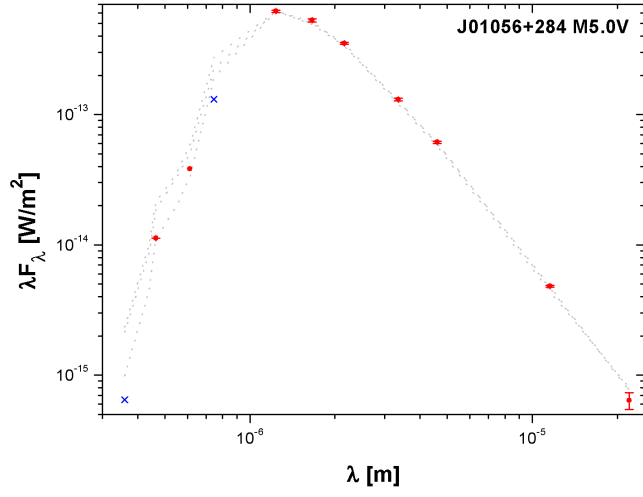
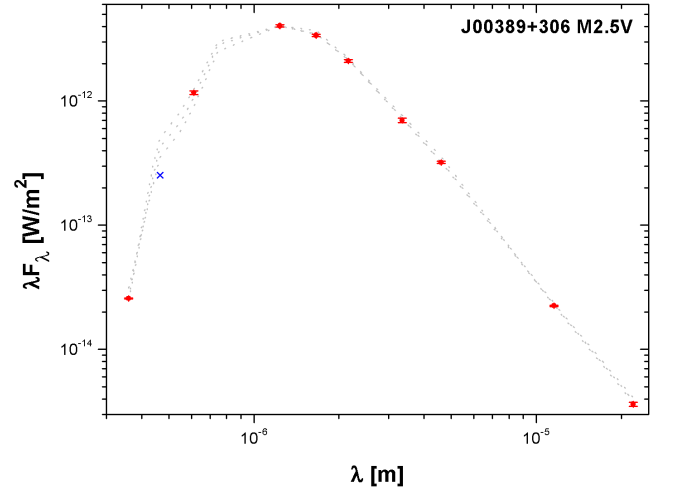
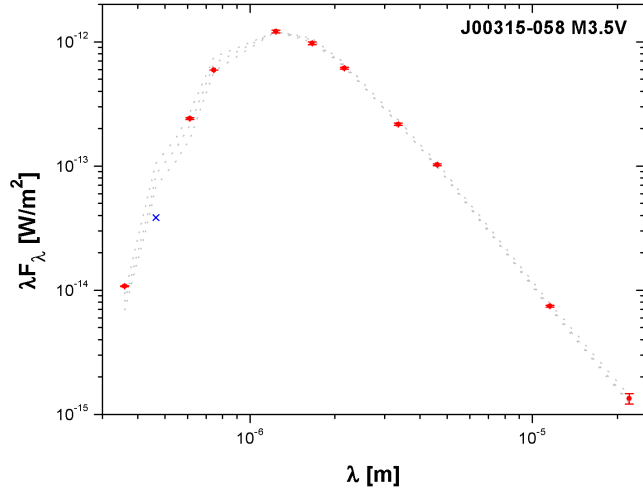
- [1] ADELMAN-McCARTHY, J.K. ET AL., 2009. ApJS, 182, 543A.
- [2] ALONSO-FLORIANO, F.J.; MONTES, D.; CABALLERO, J.A. ET AL., 2013. Highlights of Spanish Astrophysics VII, pp.431. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013hsa7.conf..431A>
- [3] BAYO, A. ET AL., 2008. A&A 492, 277.
- [4] BOCHANSKI, J.J.; WEST, A.A.; HAWLEY, S.L.; COVEY, K.R., 2007. AJ, 133, 531B.
- [5] CABALLERO, J.A.; CORTÉS-CONTRERAS, M.; ALONSO-FLORIANO, F.J ET AL., 2013. Protostars and Planets VI, (Heidelberg, July 15–20, 2013) Poster 2K020 <http://www.mpa-hd.mpg.de/homes/ppvi/posters/2K020.html>
- [6] CARLSBERG MERIDIAN CATALOG, 2006. *VizieR* Online Data Catalog I/304.
- [7] CUTRI, R.M. ET AL., 2012. CDS/ADC Electronic Catalogues, 2311.
- [8] HAWLEY, S.L.; GIZIS, J.E.; REID, I.N. ET AL., 1996. AJ, 112, 2799.
- [9] HØG, E. ET AL., 2000. A&A 355, 127.
- [10] KLUTSCH, A.; ALONSO-FLORIANO, F.J.; CABALLERO, J.A.; MONTES, D. ET AL., 2012. SF2A, 357.
- [11] MAYOR, M.; QUELOZ, D., 1995. Nature, 378, 355.
- [12] QUIRRENBACH, A.; AMADO, P.J.; SEIFERT, W. ET AL., 2012. SPIE, Volume 8446, article id. 84460R.
- [13] REID, I.N.; HAWLEY, S.L., 2005. New Light on Dark Stars: Red Dwarfs, Low-Mass Stars, Brown Dwarfs. Springer Verlag.
- [14] SKRUTSKIE, M.F. ET AL., 2006. AJ, 131, 1163S.
- [15] ZACHARIAS, N. ET AL., 2012. AJ, 145, 44.

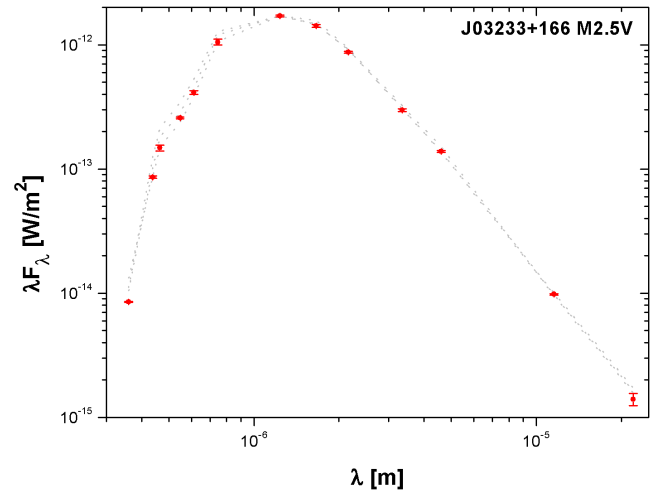
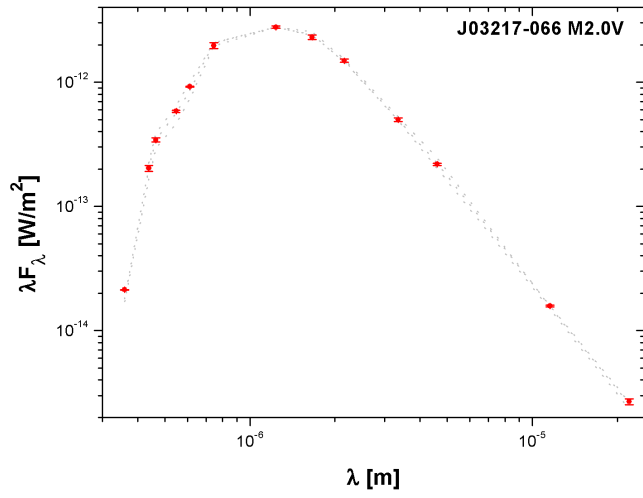
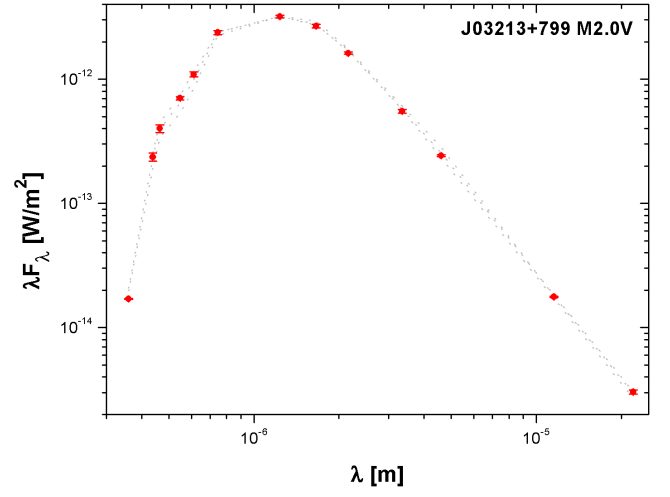
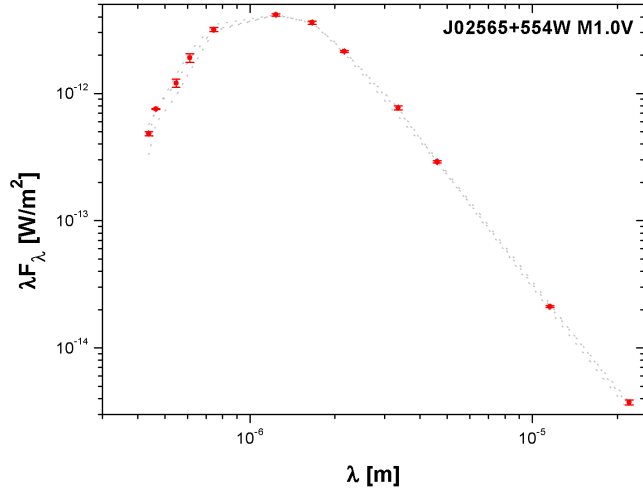
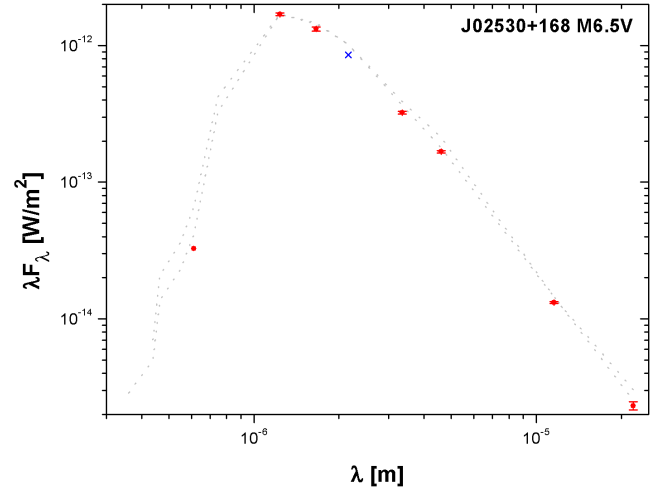
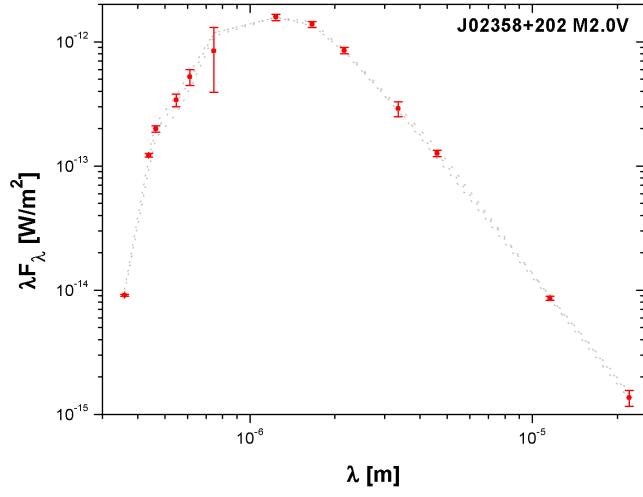
Anexo: Distribuciones espectrales de energía

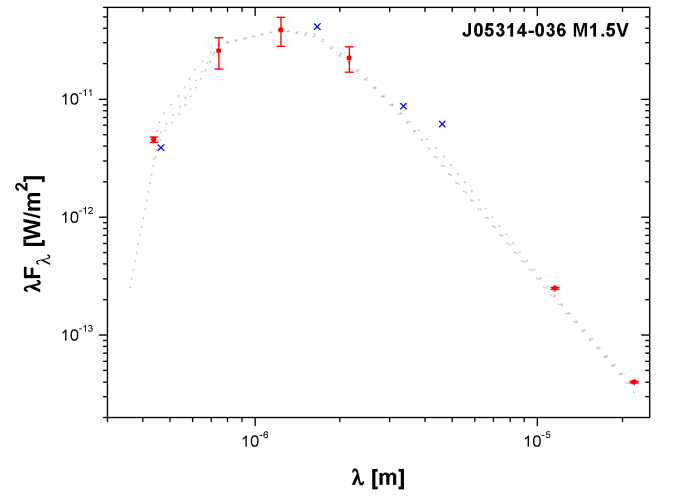
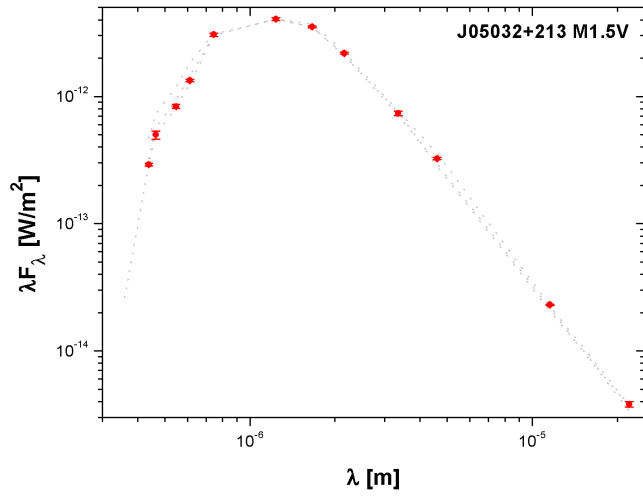
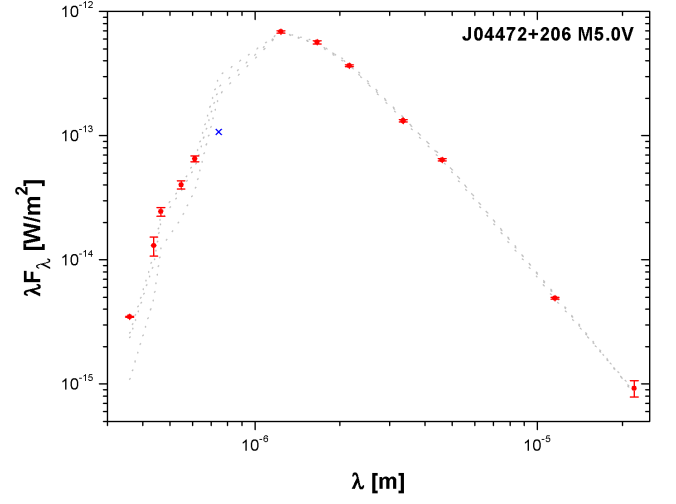
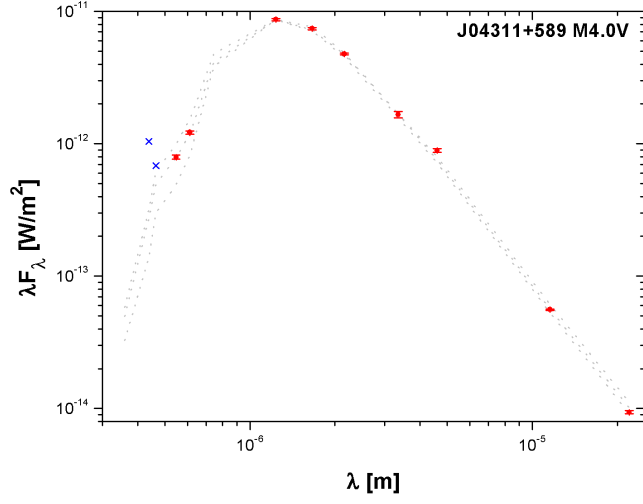
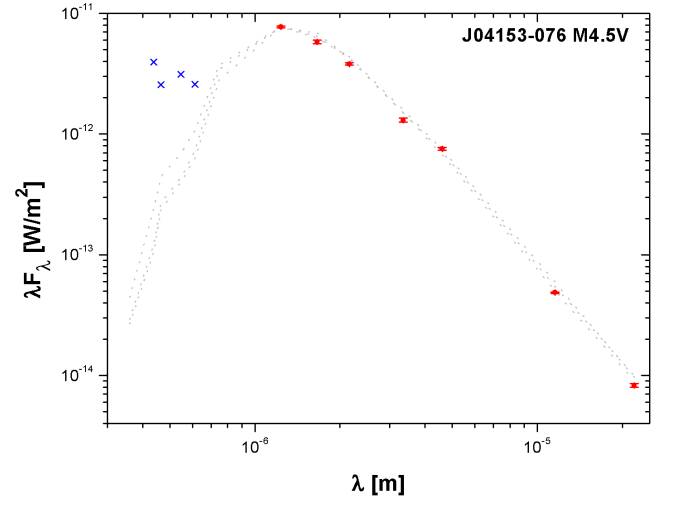
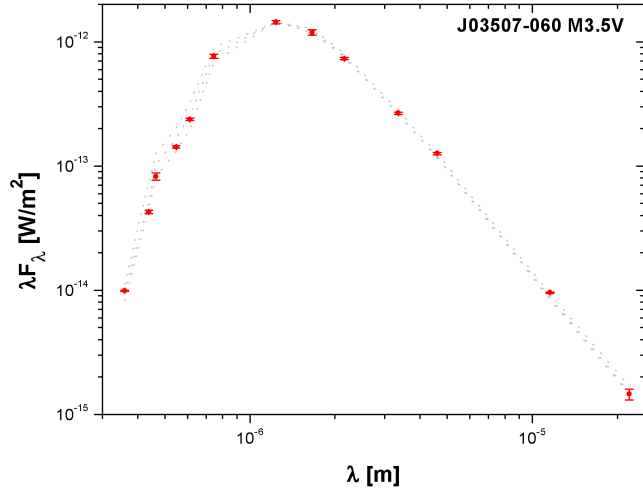
En este Anexo se presentan las distribuciones espectrales de 100 de las estrellas estudiadas indicando claramente su nombre y su tipo espectral en el catálogo CARMENCITA. Se muestran ordenadas por ascensión recta. Los valores fotométricos de cada estrella se representan junto con su error en color rojo. Además, superpuestas con líneas de puntos grises se representan las SED's de los prototipos -0.5 , 0.0 y $+0.5$. Es decir, sobre cada estrella se superpone la SED prototipo para ese subtipo espectral así como las SED's correspondientes a los subtipos ± 0.5 . Por supuesto, cada una de las SED's de los prototipos ha sido escalada a la magnitud J de la estrella en cuestión. Aquellos valores que han sido eliminados del fichero *ascii* se muestran igualmente pero se representan con un aspa azul ($\times$).

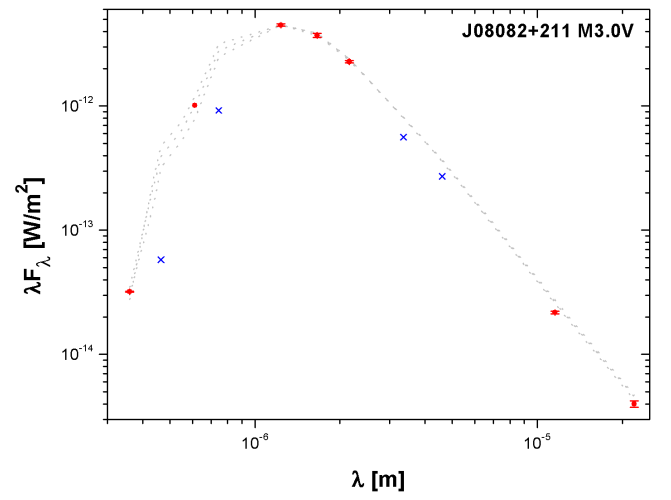
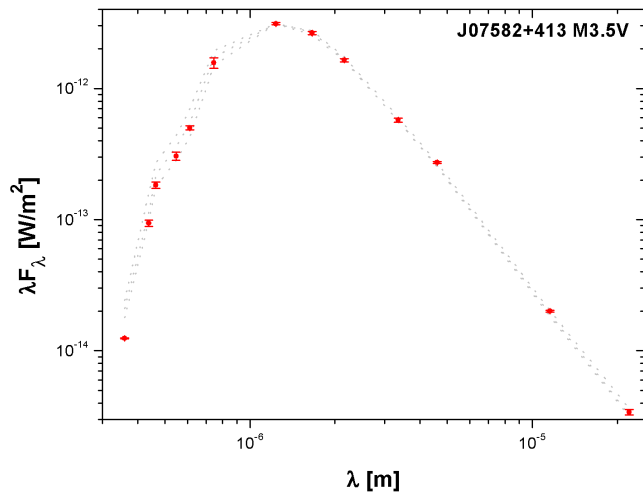
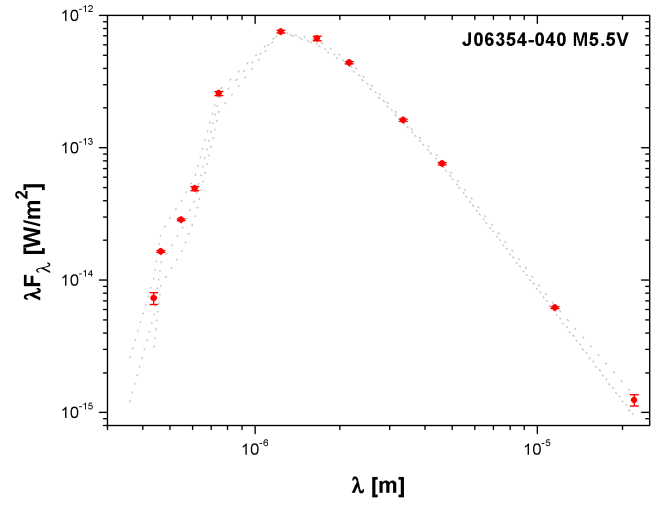
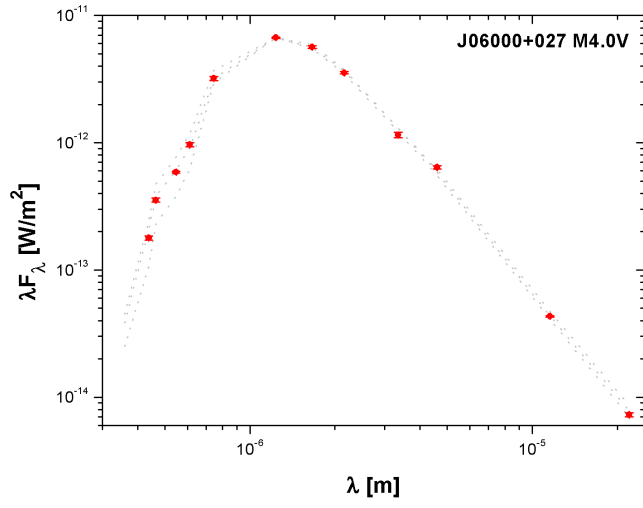
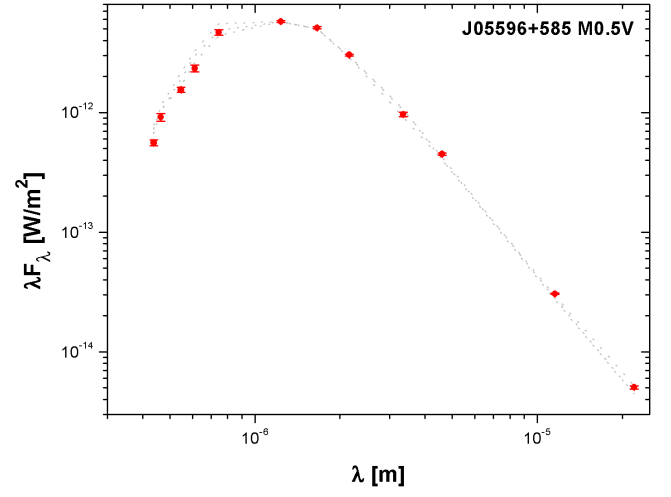
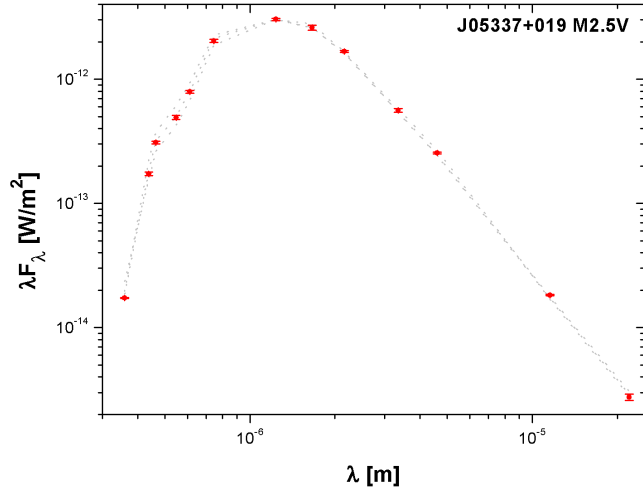
Así mismo al final del Anexo se tabulan todos los datos fotométricos de las 14 estrellas prototipo utilizadas en este trabajo (Tabla 11).

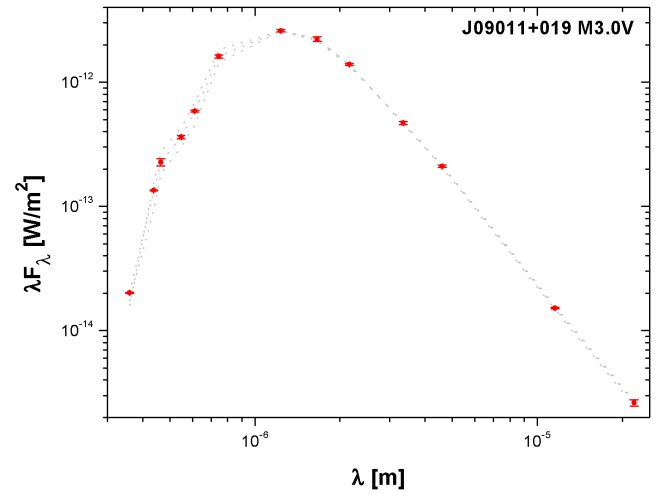
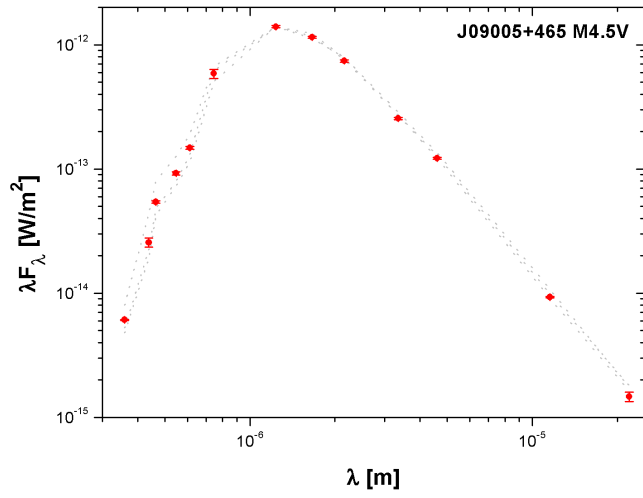
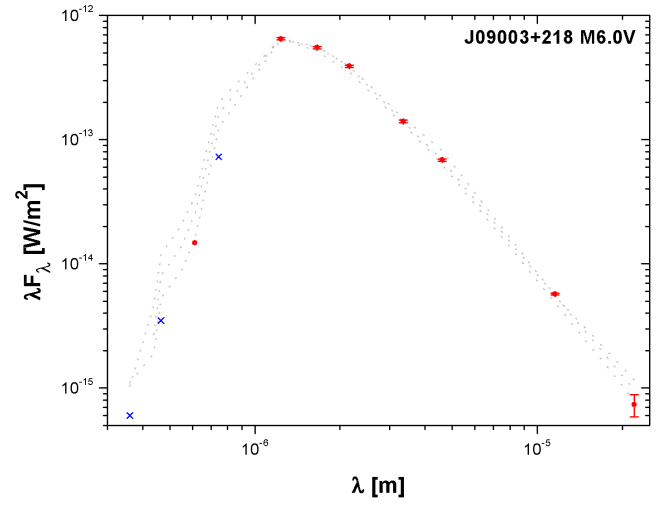
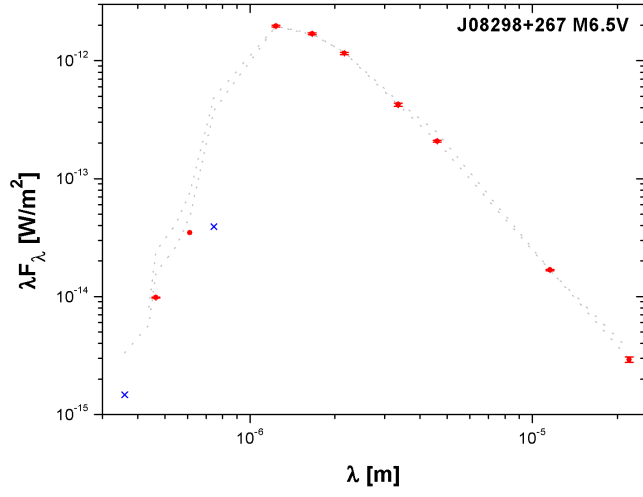
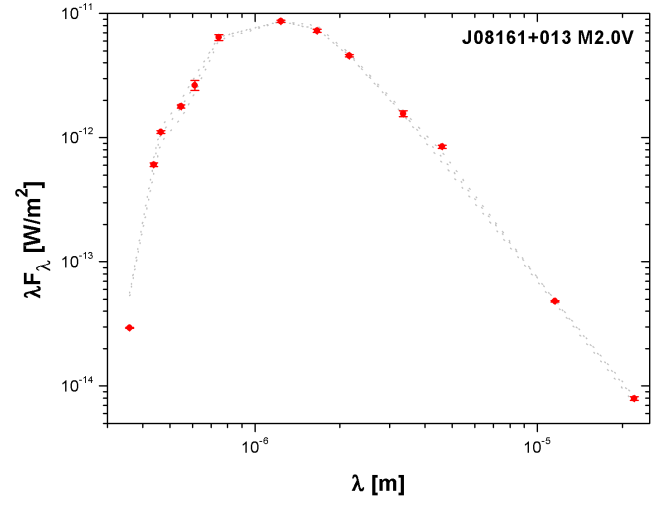
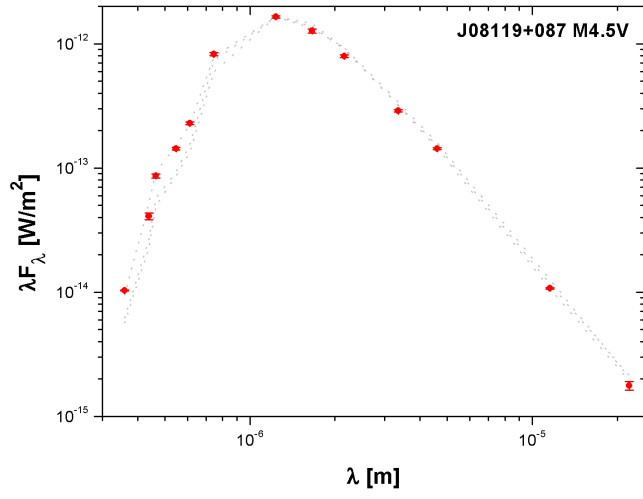


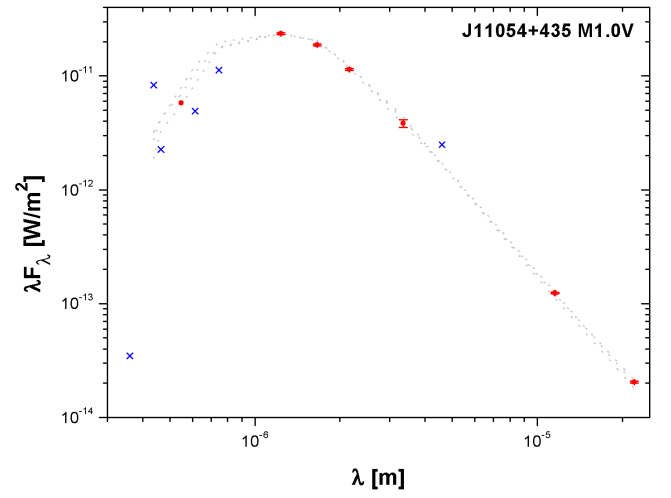
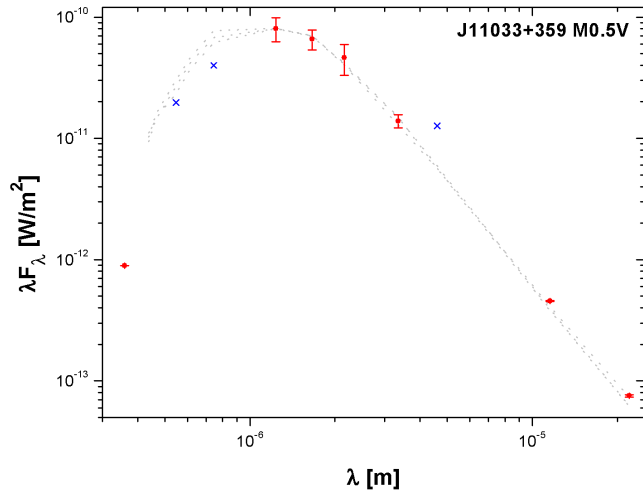
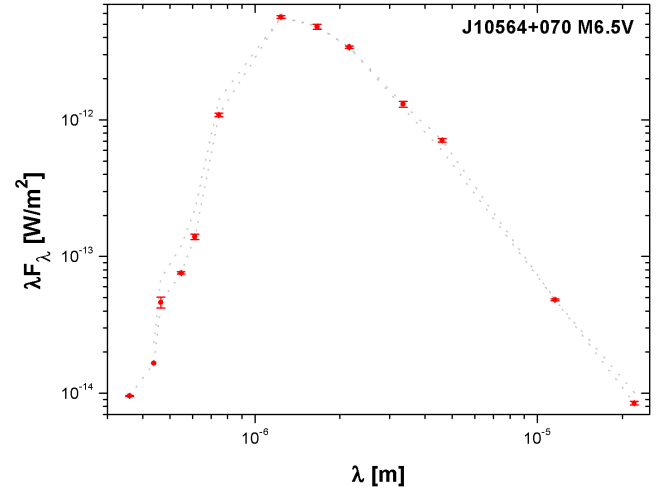
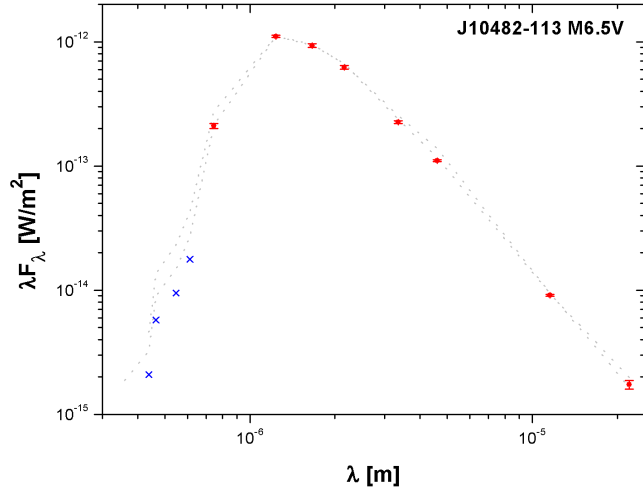
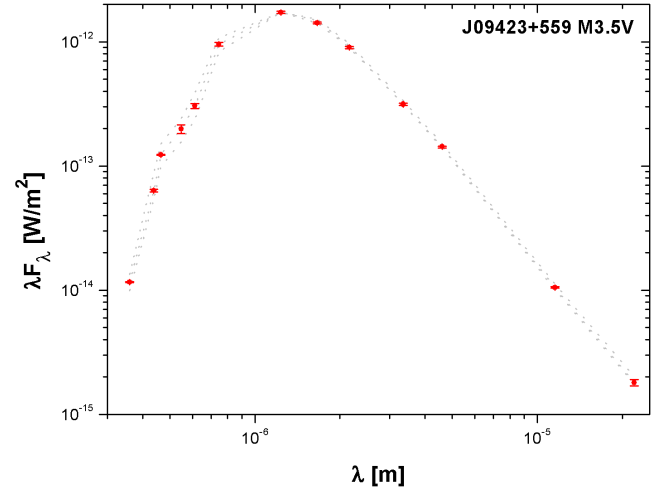
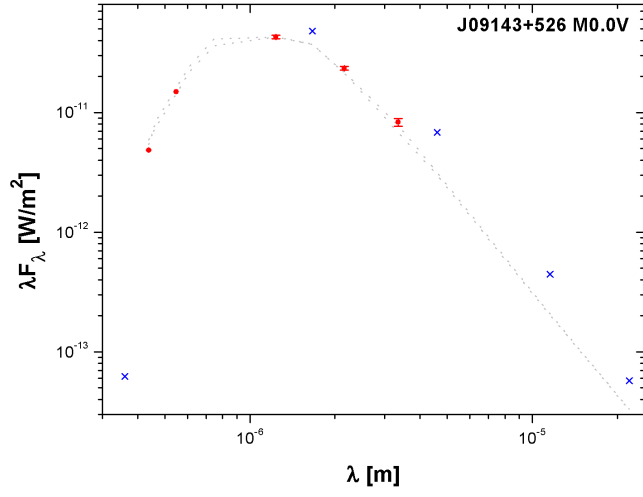


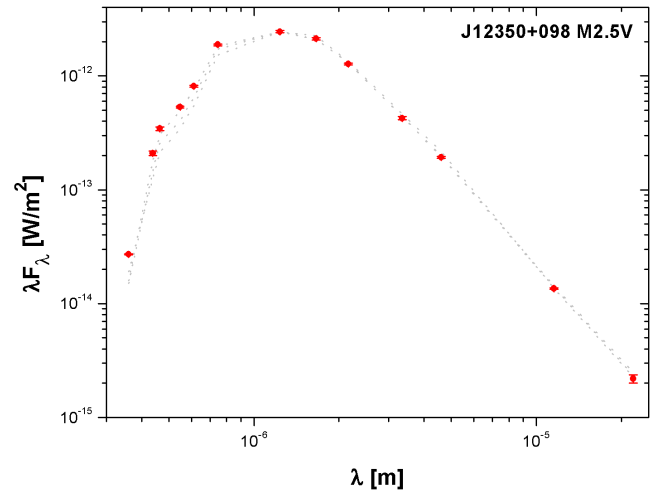
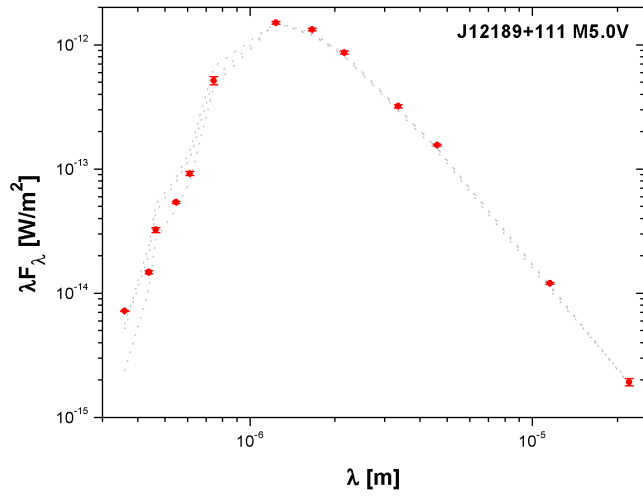
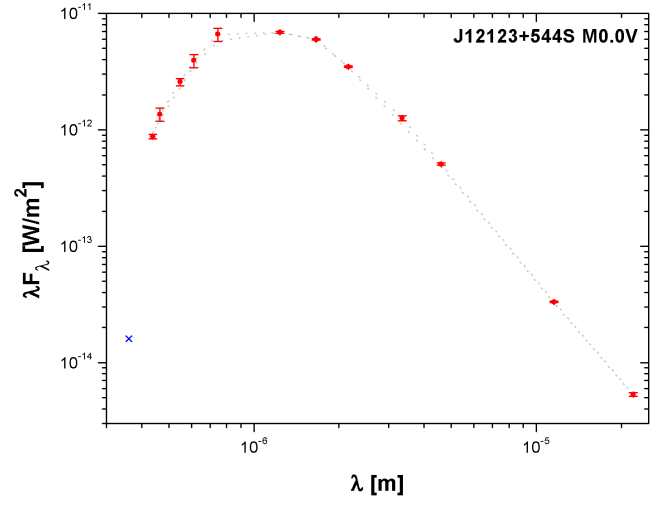
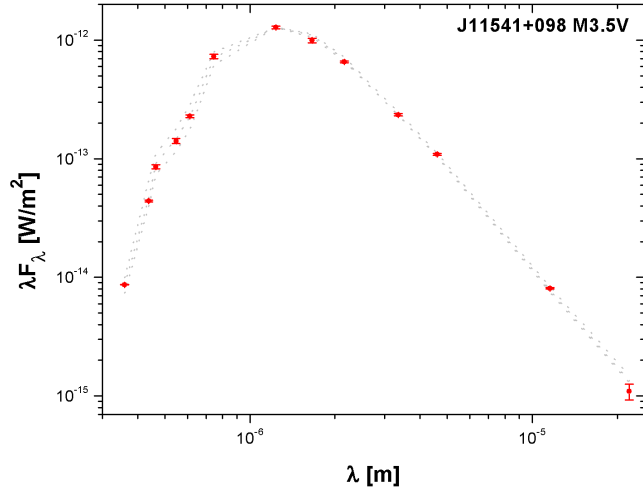
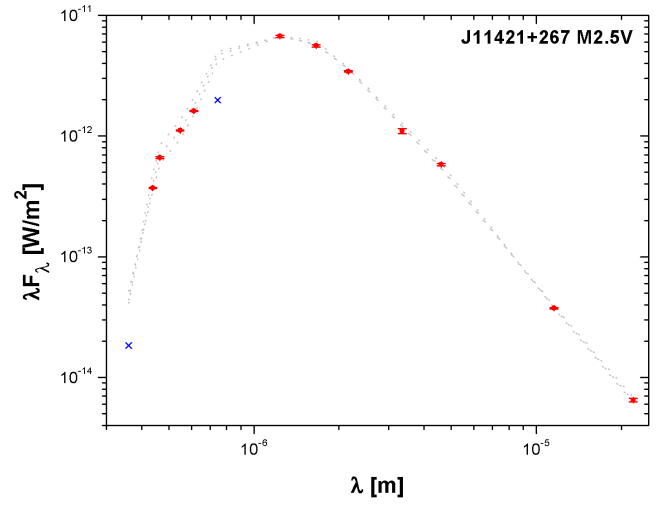
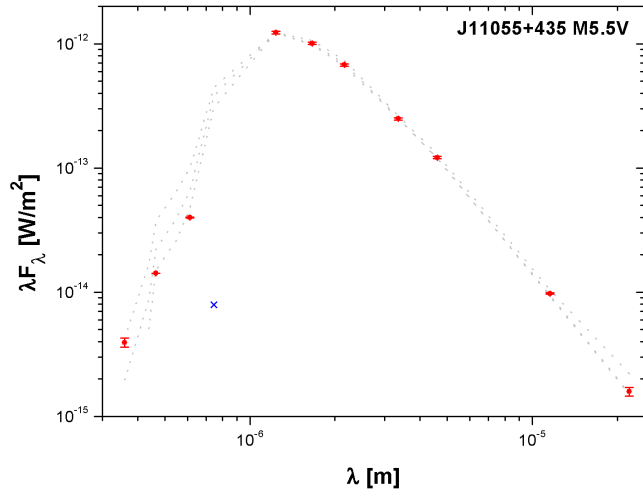


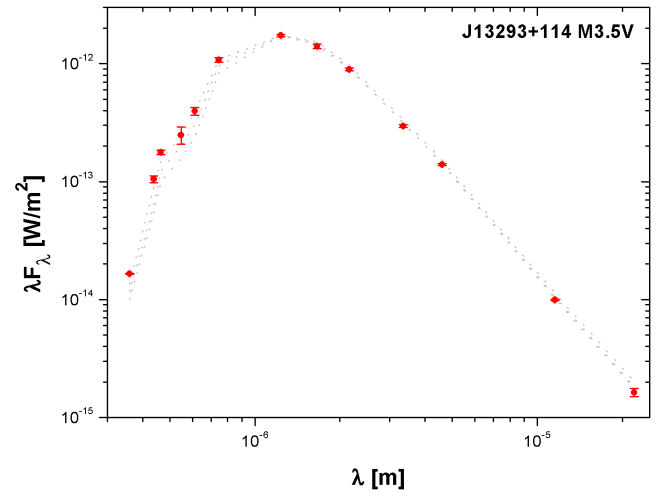
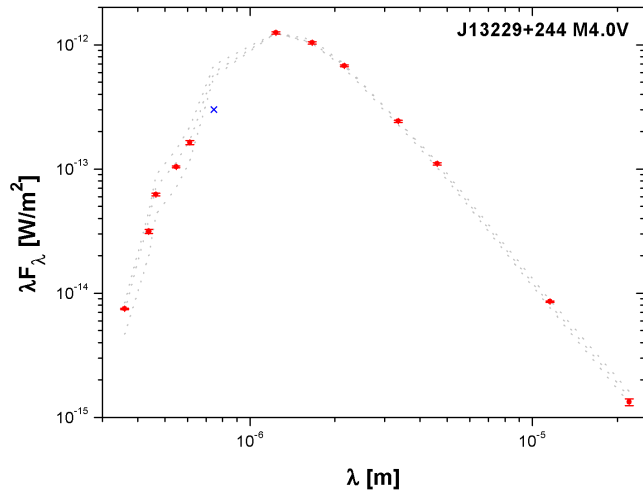
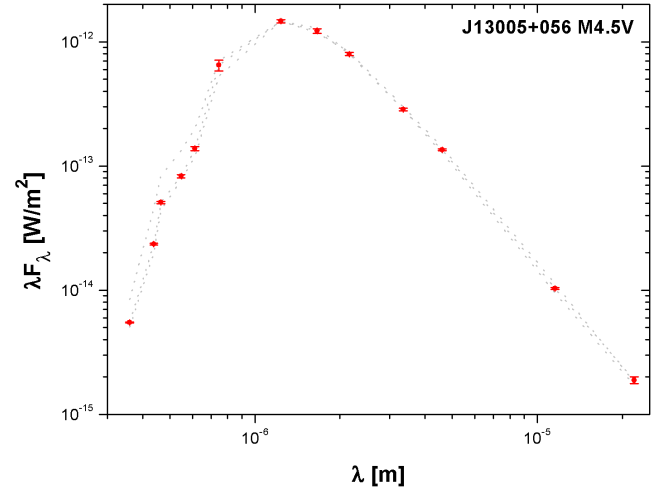
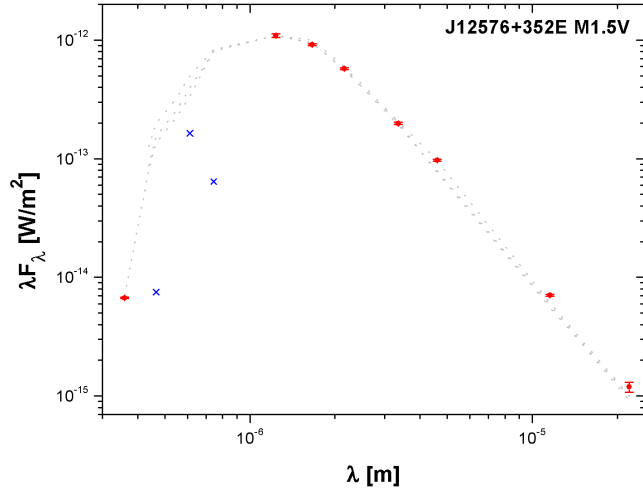
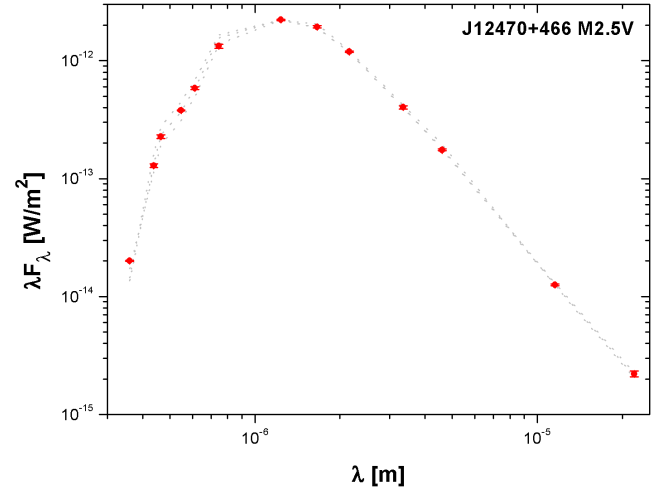
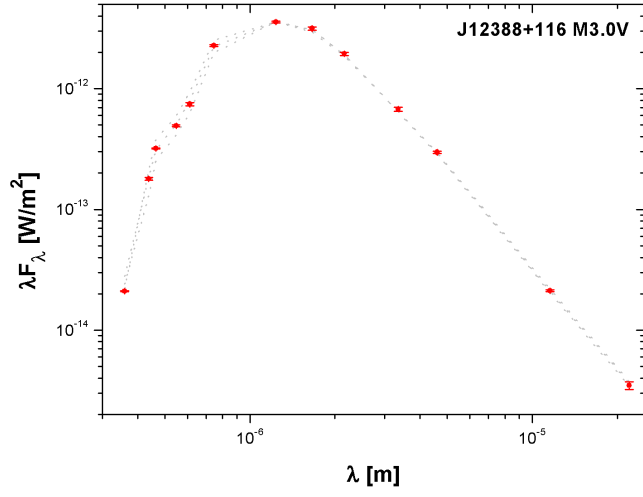


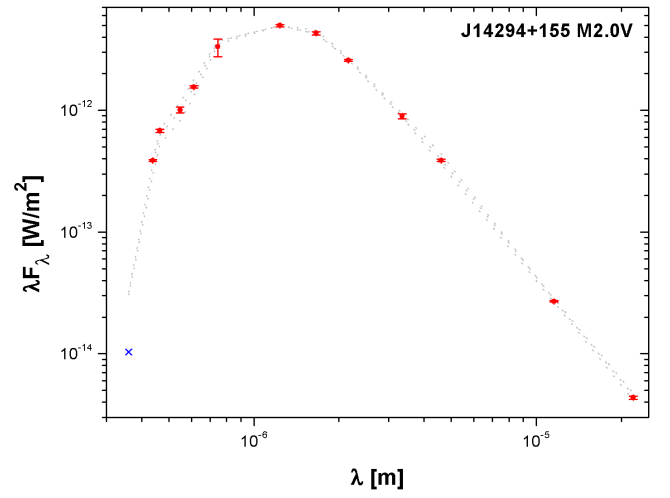
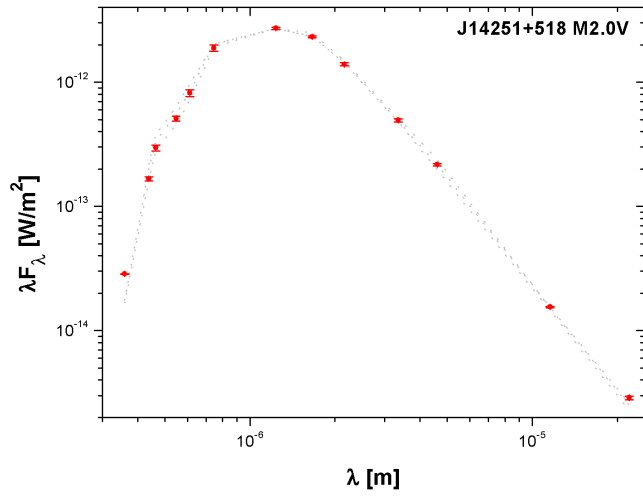
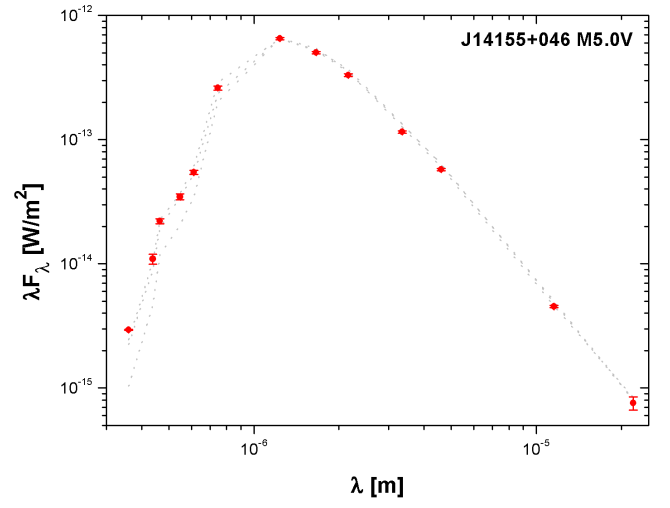
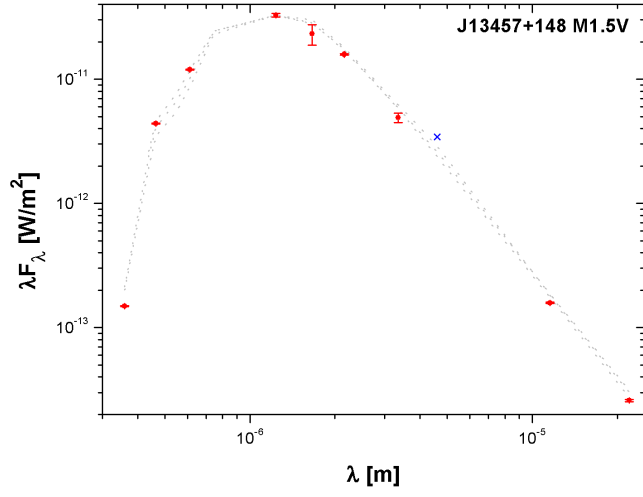
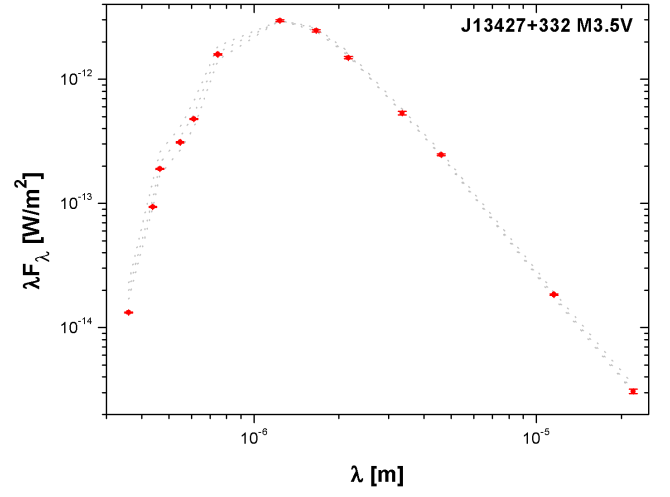
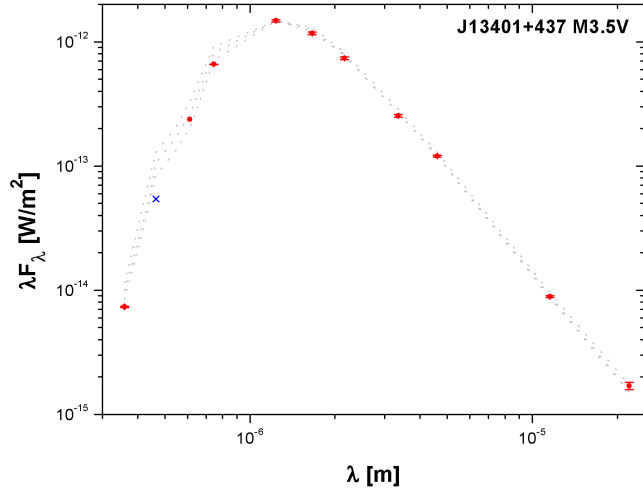


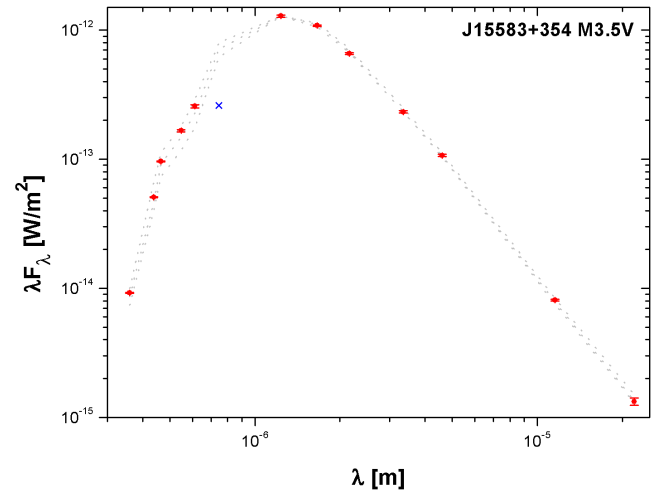
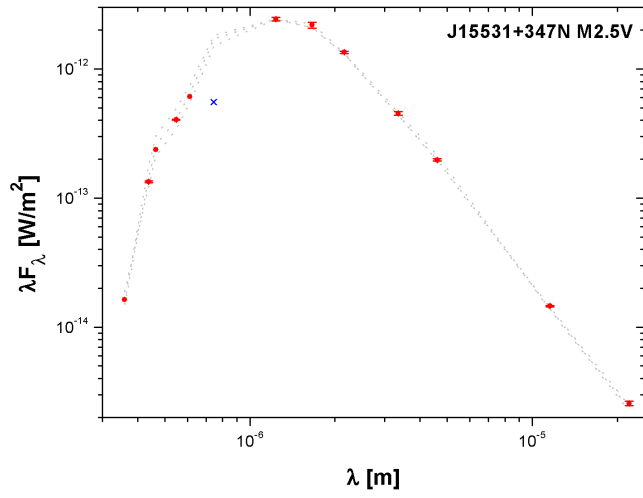
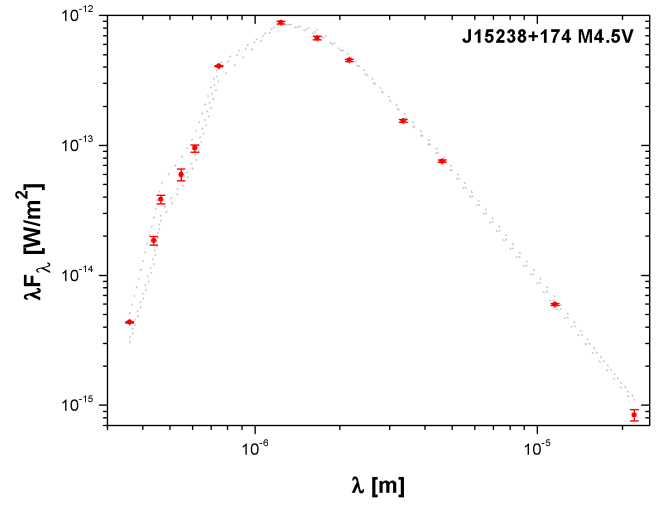
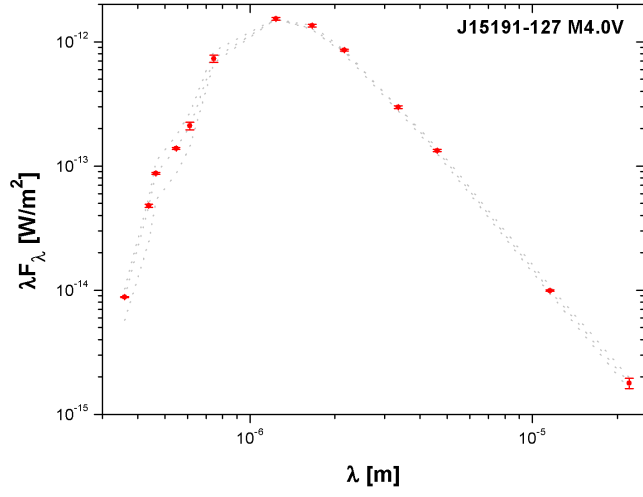
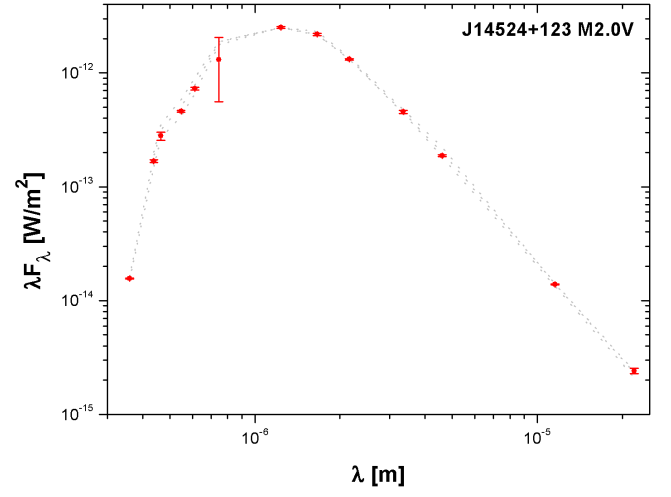
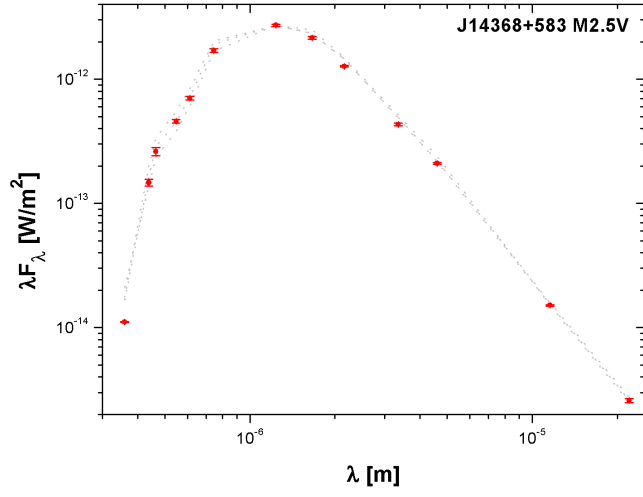


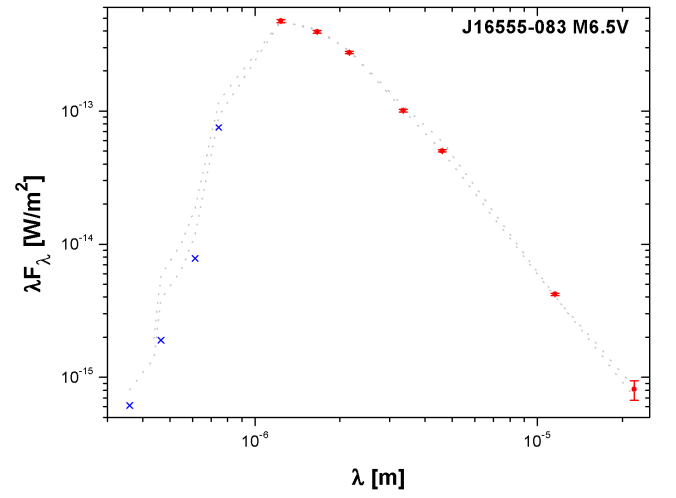
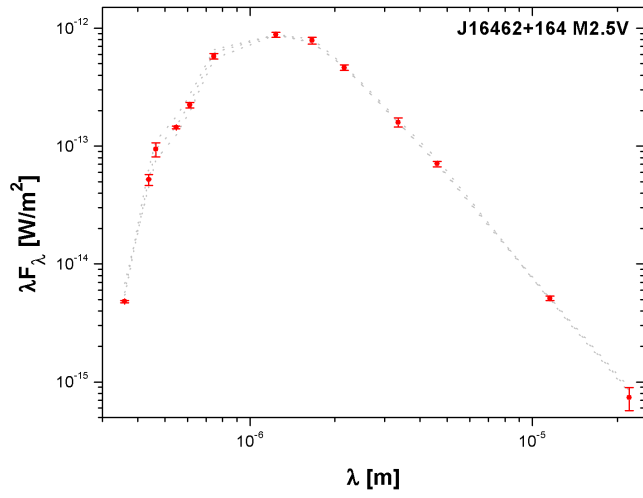
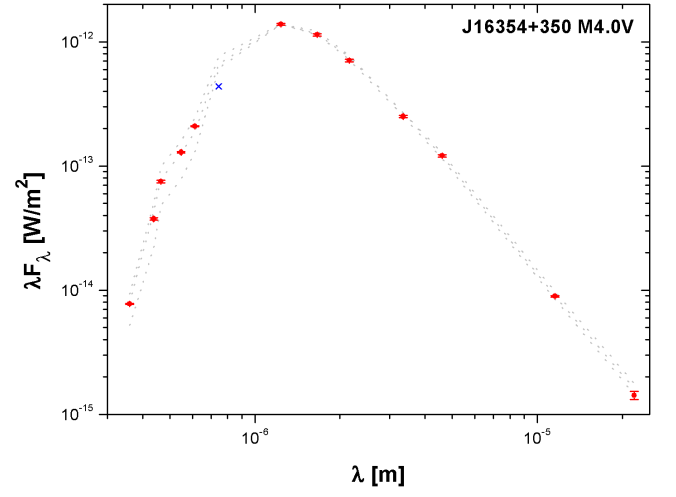
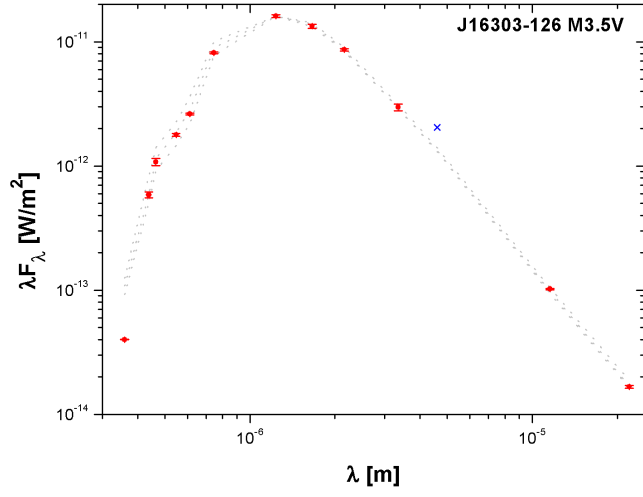
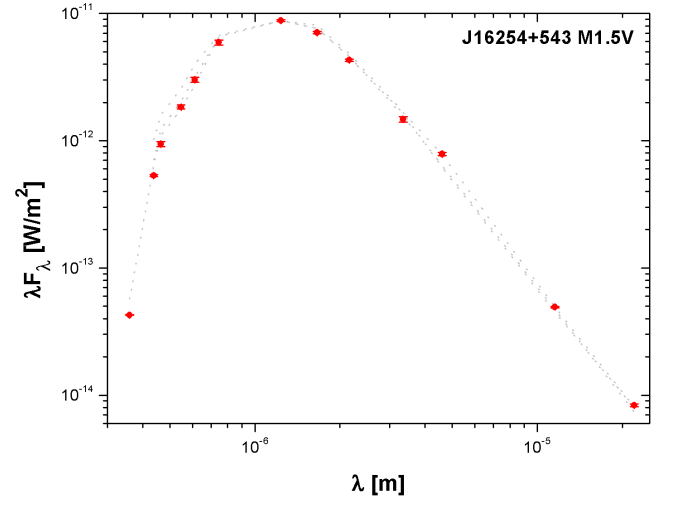
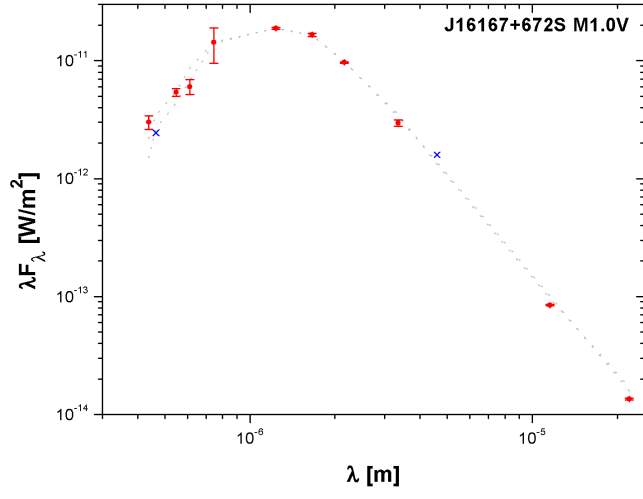


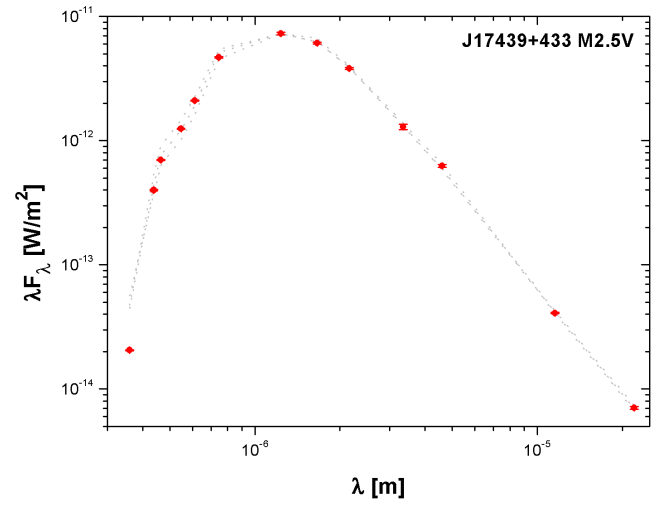
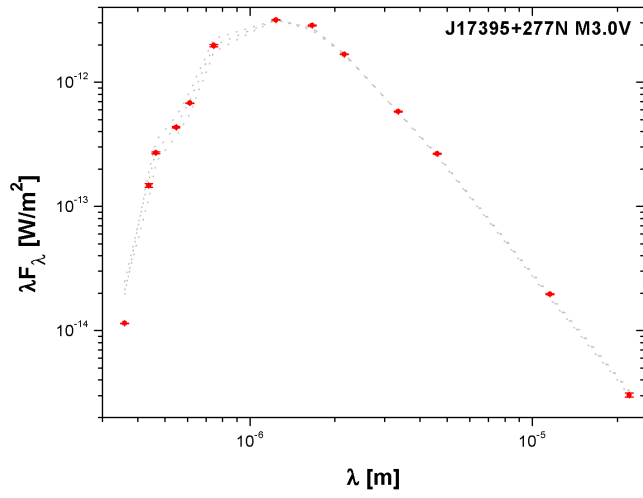
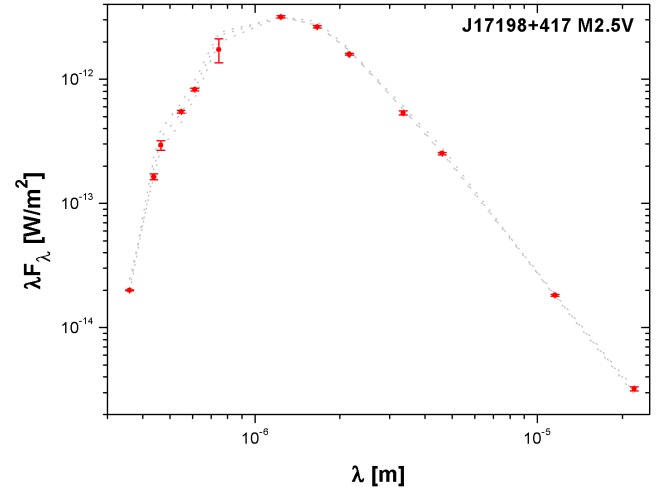
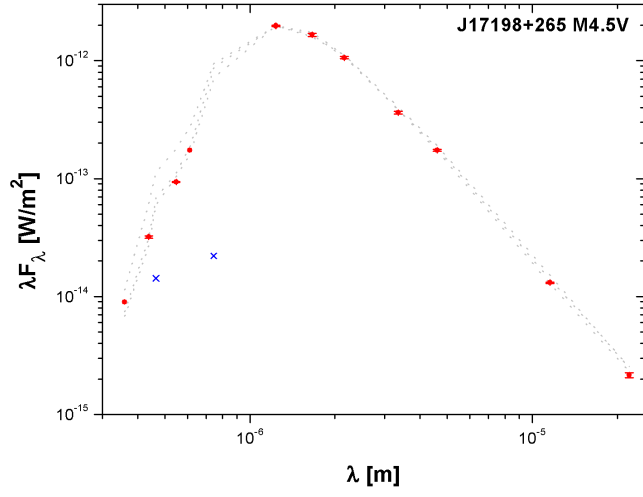
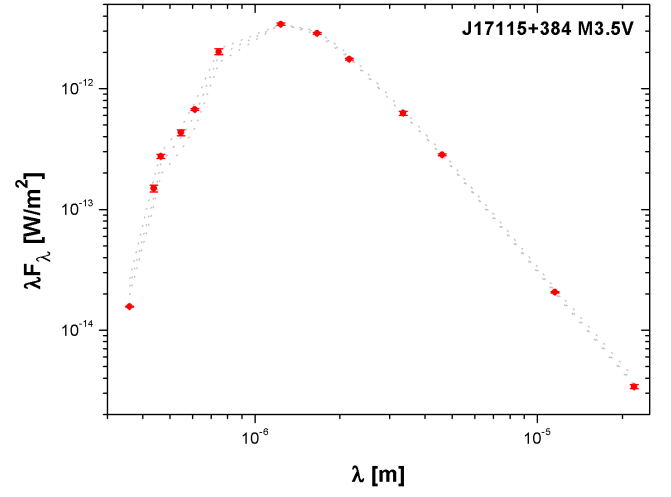
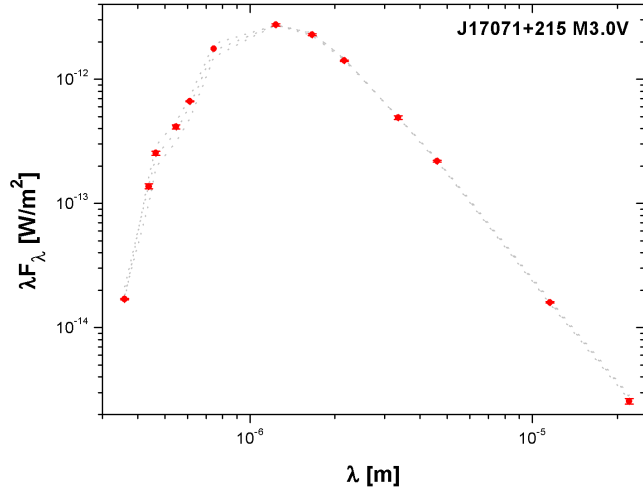


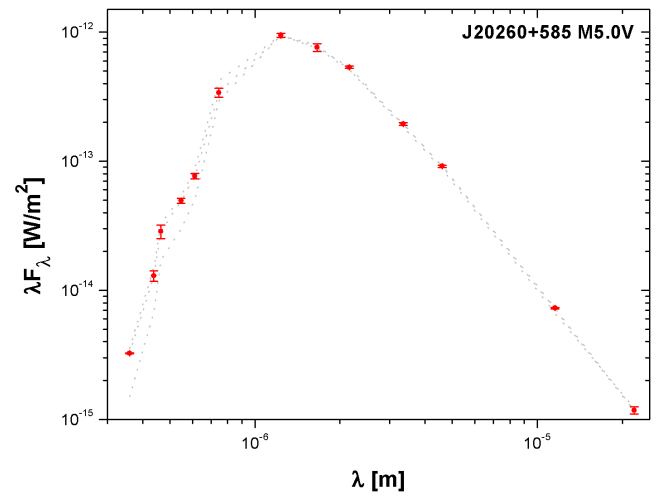
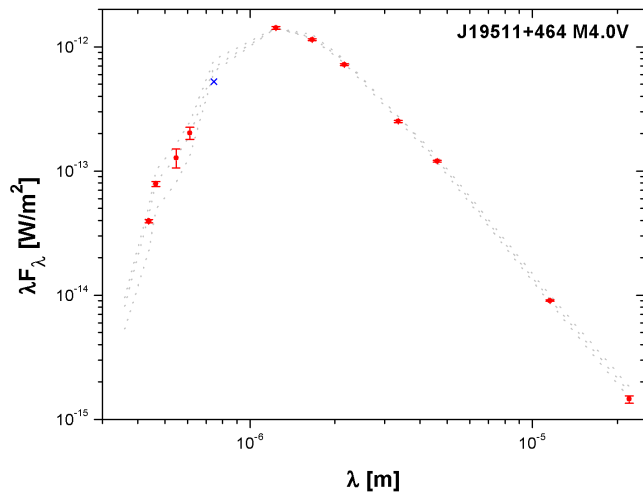
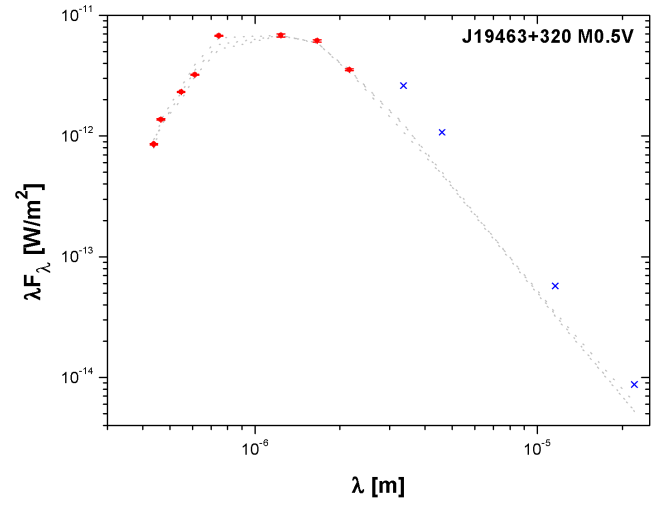
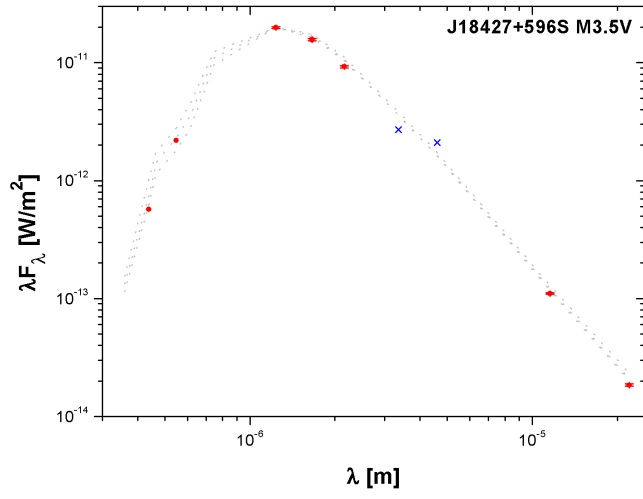
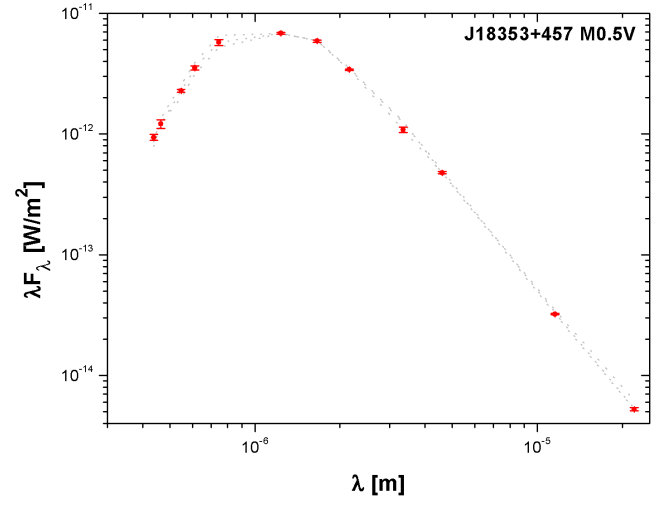
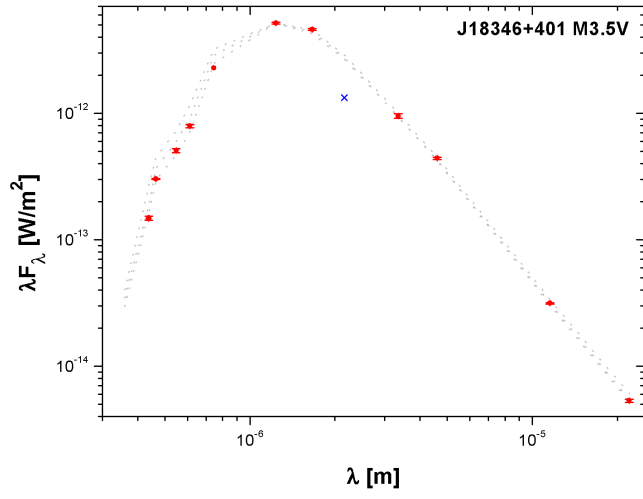


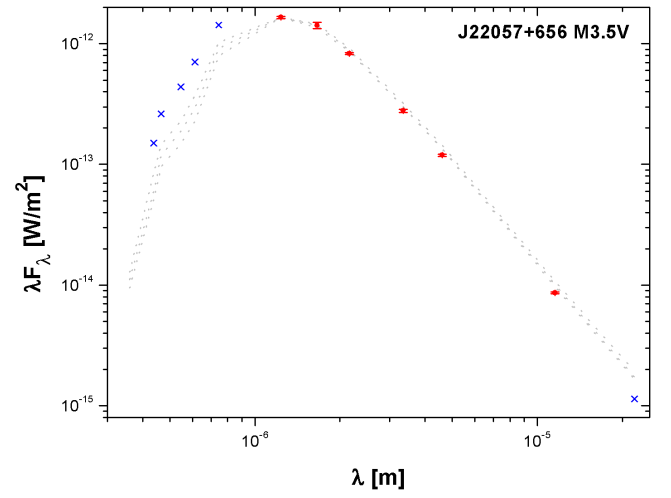
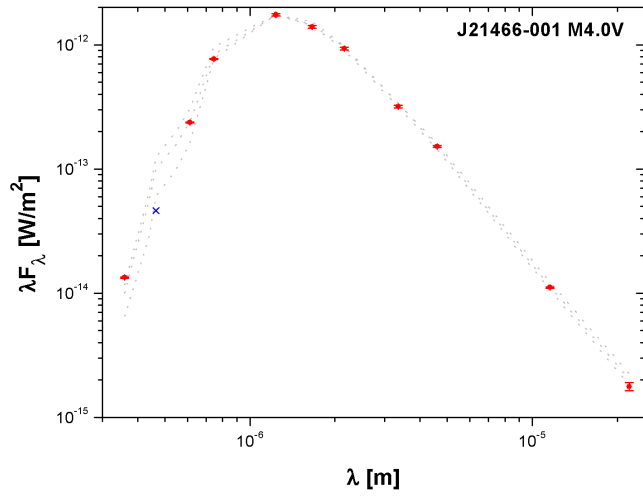
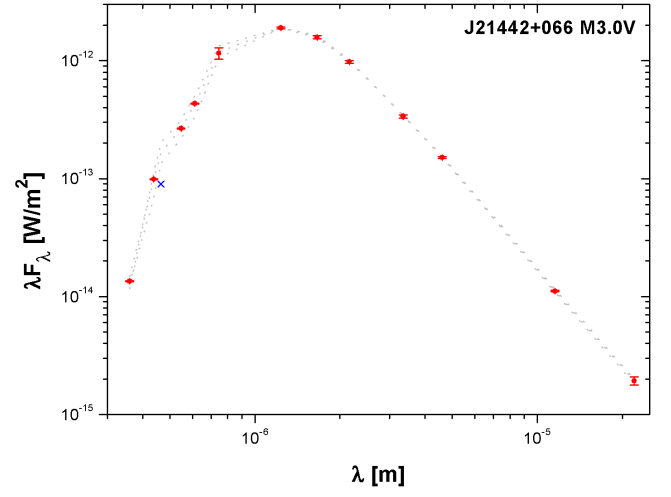
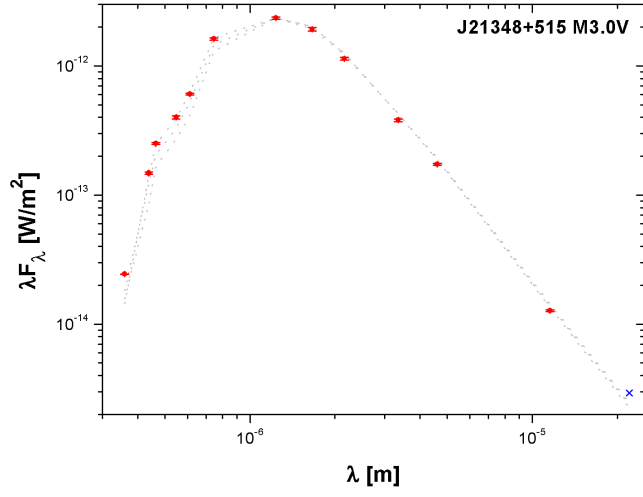
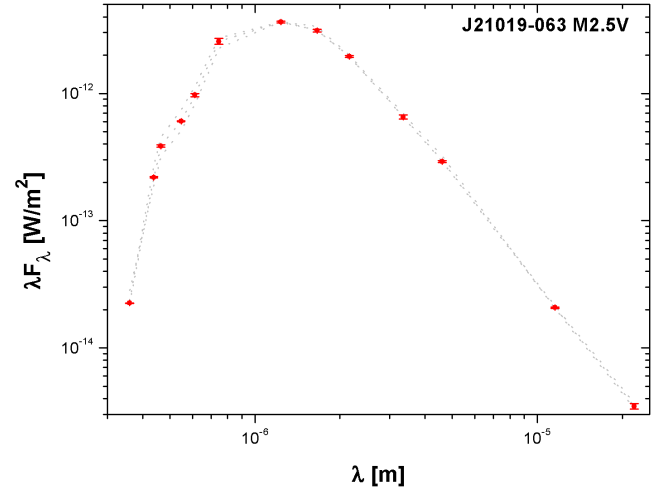
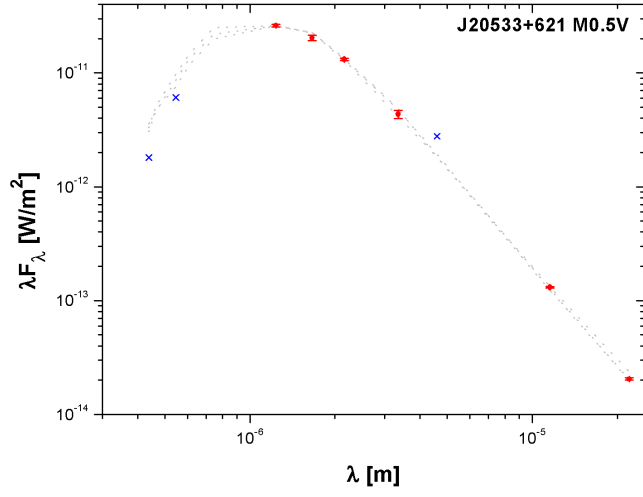


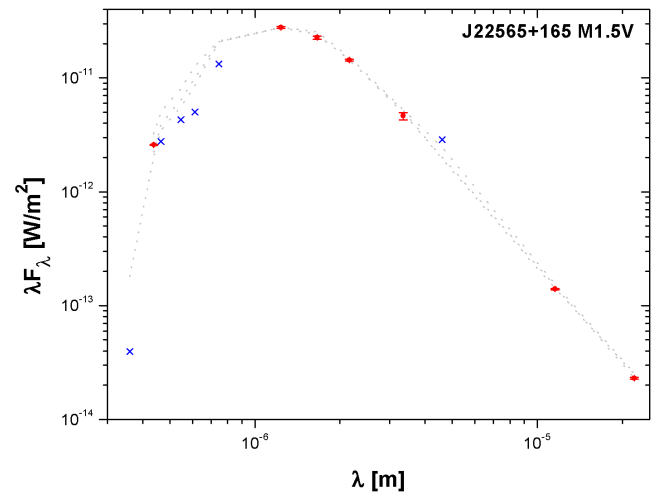
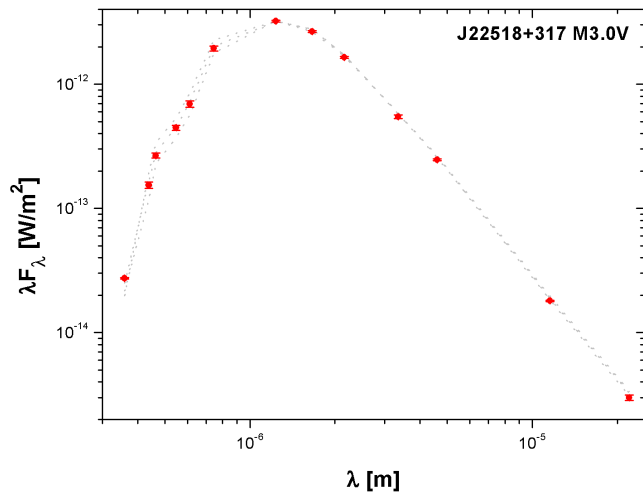
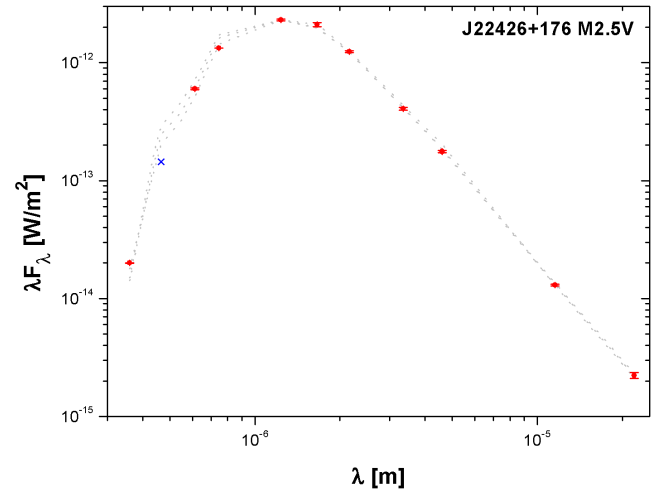
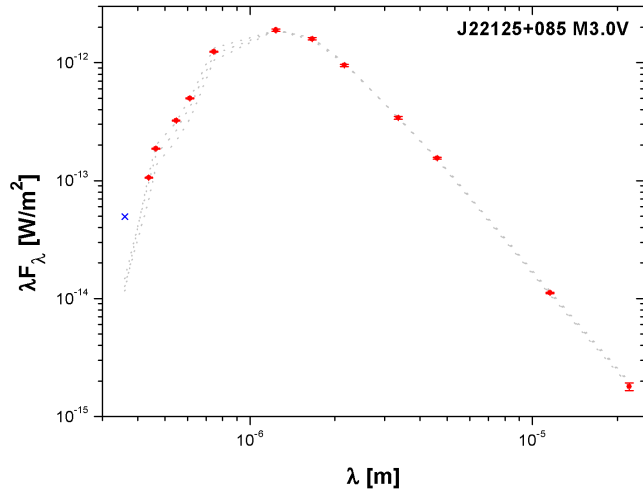
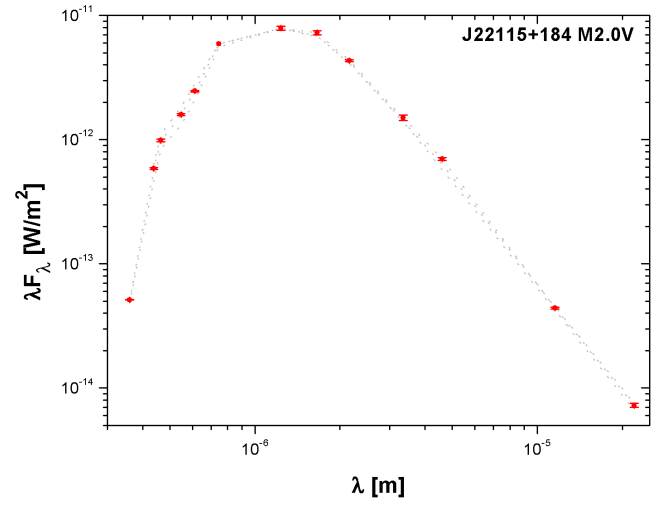
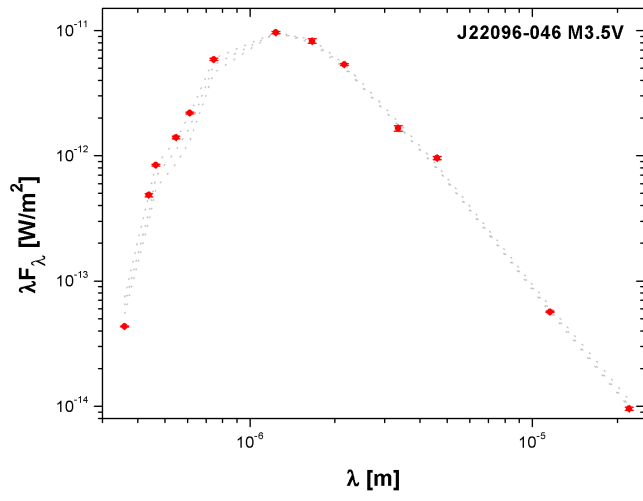












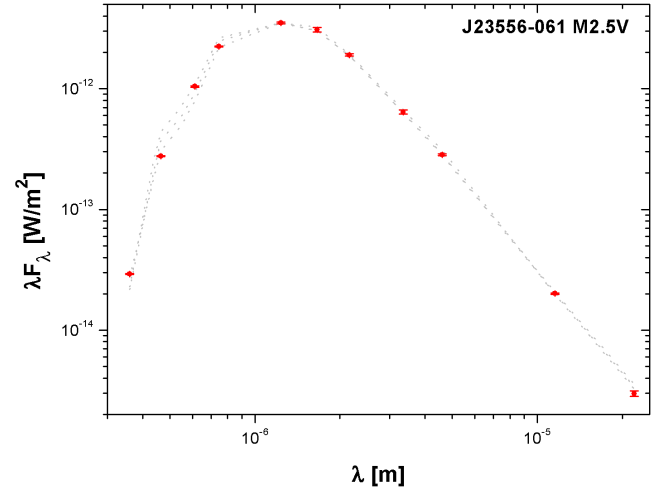
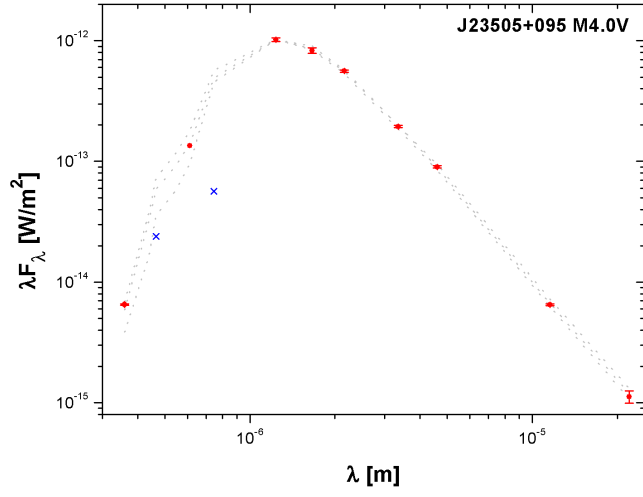
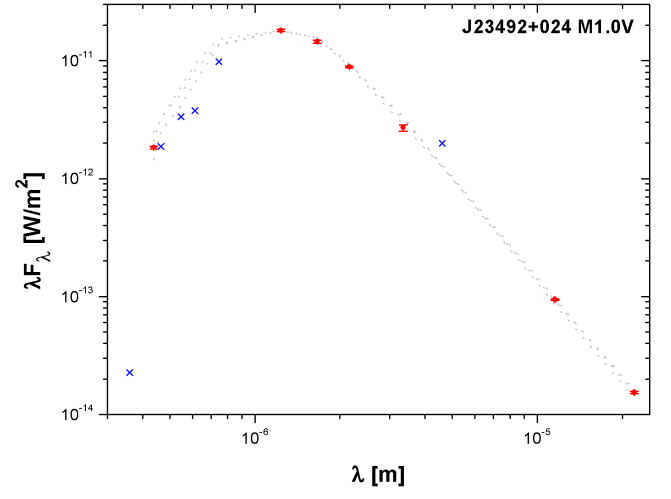
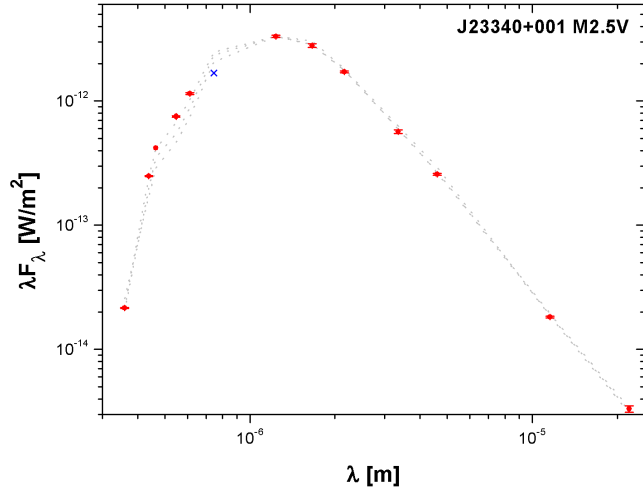


Tabla 11: Fotometría de las estrellas prototipo

Karmn	T. esp.	<i>u</i> [mag]	<i>B</i> [mag]	<i>g</i> [mag]	<i>V</i> [mag]	τ [mag]	<i>i</i> [mag]	<i>J</i> [mag]	<i>H</i> [mag]	<i>Ks</i> [mag]	<i>W1</i> [mag]	<i>W2</i> [mag]	<i>W3</i> [mag]	<i>W4</i> [mag]
J12123+544S	M0.0V	...	11.248±0.05	10.592±0.14	9.699±0.08	9.140±0.14	8.364±0.14	6.875±0.021	6.245±0.017	6.059±0.017	5.846±0.056	5.852±0.022	5.887±0.016	5.814±0.043
J18353+457	M0.5V	...	11.169±0.06	10.716±0.09	9.830±0.03	9.254±0.04	8.512±0.06	6.881±0.02	6.260±0.021	6.082±0.016	6.003±0.055	5.916±0.024	5.921±0.015	5.831±0.032
J02565+554W	M1.0V	...	11.891±0.04	11.231±0.01	10.524±0.08	9.927±0.08	9.161±0.04	7.425±0.021	6.797±0.031	6.590±0.02	6.377±0.039	6.459±0.02	6.383±0.015	6.194±0.049
J00136+806	M1.5V	...	12.626±0.06	11.842±0.01	11.104±...	10.517±...	9.519±0.06	7.756±0.034	7.131±0.047	6.904±0.02	6.766±0.037	6.748±0.019	6.663±0.014	6.611±0.046
J22115+184	M2.0V	14.428±0.005	11.681±0.02	10.941±0.03	10.223±0.02	9.651±0.01	8.487±...	6.725±0.037	6.035±0.036	5.823±0.016	5.656±0.054	5.504±0.029	5.584±0.015	5.477±0.040
J21019-063	M2.5V	15.324±0.007	12.748±0.01	11.959±0.02	11.276±0.01	10.659±0.03	9.390±0.06	7.563±0.017	6.952±0.026	6.692±0.018	6.558±0.04	6.454±0.02	6.401±0.015	6.274±0.056
J09011+019	M3.0V	15.44±0.01	13.279±0.01	12.537±0.07	11.831±0.03	11.207±0.02	9.893±0.03	7.932±0.023	7.314±0.044	7.057±0.018	6.917±0.03	6.806±0.021	6.739±0.016	6.583±0.061
J09423+559	M3.5V	16.04±0.01	14.097±0.03	13.202±0.01	12.482±0.09	11.913±0.05	10.461±0.04	8.374±0.02	7.805±0.02	7.53±0.02	7.353±0.026	7.23±0.019	7.136±0.015	6.987±0.061
J15191-127	M4.0V	16.343±0.008	14.398±0.03	13.571±0.02	12.876±0.02	12.317±0.08	10.751±0.07	8.507±0.026	7.862±0.027	7.582±0.02	7.414±0.028	7.303±0.019	7.200±0.017	7.001±0.105
J13005+056	M4.5V	16.849±0.01	15.173±0.02	14.161±0.02	13.434±0.03	12.773±0.04	10.883±0.11	8.553±0.035	7.956±0.047	7.66±0.031	7.46±0.028	7.289±0.021	7.158±0.016	6.939±0.069
J20260+585	M5.0V	17.42±0.01	15.817±0.10	14.782±0.13	13.993±0.05	13.412±0.05	11.583±0.09	9.029±0.039	8.483±0.073	8.095±0.021	7.874±0.023	7.712±0.012	7.538±0.015	7.453±0.071
J00067-075	M5.5V	17.55±0.39	15.824±0.07	14.637±0.01	13.837±0.03	13.157±0.01	11.042±0.07	8.323±0.019	7.792±0.034	7.439±0.021	7.176±0.028	6.993±0.02	6.86±0.016	6.766±0.08
J02142-039	M6.0V	...	18.57±0.48	17.214±0.19	16.433±0.01	15.655±0.01	13.435±0.01	10.481±0.024	9.858±0.02	9.485±0.02	9.278±0.023	9.072±0.021	8.884±0.023	8.512±0.233
J10564+070	M6.5V	16.25±0.01	15.551±...	14.265±0.10	13.528±0.02	12.762±0.05	10.320±0.03	7.085±0.024	6.482±0.042	6.084±0.017	5.807±0.055	5.487±0.031	5.481±0.015	5.310±0.031