



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Distribución espectral de energía de objetos estelares
jóvenes en la nube molecular galáctica MC76

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

María José Fragoso Tenorio

Asesorada por

Dr. Ricardo Retes Romero, Dr. Oscar Mario Martínez Bravo

Puebla Pue.
9 de noviembre de 2023



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Distribución espectral de energía de objetos estelares
jóvenes en la nube molecular galáctica MC76

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

María José Fragoso Tenorio

Asesorada por

Dr. Ricardo Retes Romero, Dr. Oscar Mario Martínez Bravo

Puebla Pue.
9 de noviembre de 2023

Título: Distribución espectral de energía de objetos estelares jóvenes en la nube molecular galáctica MC76

Estudiante: MARÍA JOSÉ FRAGOSO TENORIO

COMITÉ

Dr ...
Presidente

Dr. ...
Secretario

Dr. ...
Vocal

Vocal

Dr. Ricardo Retes Romero, Dr. Oscar Mario Martínez Bravo
Asesor

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá, quien siempre me ha guiado y apoyado en todo momento, cuyo amor me dio ánimos en los momentos en que rendirse parecía una opción, a mi abuela por todo su apoyo y amor, a mi papá y su consejos que hacían a los problemas más difíciles, sencillos. Agradezco a mi familia, a mis tíos ya mis primos. Y por último a mis compañeras de cuatro patas, por las que no pudieron llegar al final de este proyecto y por las que aún están acompañándome todos los días mientras este trabajo se realizaba y haciendo mis días un poco más alegres.

Índice general

Resumen	XVII
1. Introducción	1
1.1. El medio interestelar	1
1.2. Gas molecular CO y NH ₃	3
1.3. Nubes moleculares	3
1.4. Formación de estrellas	5
1.5. Evolución protoestelar	7
1.6. Distribución espectral de energía	9
1.7. Modelo numérico de distribución espectral de energía	11
1.8. Parámetros de ajuste del modelo numérico	12
2. La nube molecular galáctica MC76 y su selección de objetos estelares jóvenes	13
2.1. Parámetros físicos de MC76	13
2.2. Selección de YSOs embebidos en MC76	14
2.3. Ajuste del modelo numérico de SED a los YSOs en MC76	17
3. Resultados del ajuste de los modelos de SED y su discusión	21
3.1. Clasificación de YSOs	21
3.2. Parámetros físicos de MC76	25
3.3. Comparación de parámetros físicos de los YSOs	28
3.4. YSO M9	32
3.5. YSO M13	32
3.6. YSO M14	33
3.7. YSO M15	34
3.8. YSO M50	35
3.9. YSO M52	36
3.10. YSO M53	37
3.11. YSO M54	37
3.12. YSO M84	39
4. Conclusiones y trabajo futuro	41
A. Fotometría de los YSOs de la nube molecular MC76	43
B. Parámetros físicos derivados de los modelos numéricos de SED ajustados a la fotometría de los YSOs de la nube molecular MC76.	47
C. Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76	51
Bibliografía	69

Índice de figuras

1.1.	Diagrama de niveles energéticos para las transiciones rotacionales del hidrógeno molecular [15]. A la izquierda se muestran los niveles de la configuración para- H_2 y a la derecha la ortho- H_2	2
1.2.	Imagen Spitzer RGB (24 μm , 8 μm y 3.6 μm , respectivamente), sobrepuestos se encuentran los contornos en densidad columnar, siendo el más externo para el valor de 10^{21} cm^{-2} . Los símbolos en color azul muestran la posición de los YSOs según su clase: círculos para clase III, rombos para clase II y cuadrados para clase I/0, respectivamente. La cruz en la región central muestra la posición de la fuente IRAS [23].	5
1.3.	Esquema de evolución protoestelar para estrellas de baja masa [37]	7
1.4.	Esquema de evolución protoestelar de una estrella de baja masa [27]	9
1.5.	Distribución espectral de energía (SED) de la fuente IRS52b contruida con cuerpos grises y negro. La línea gruesa en azul muestra la suma de las componentes de polvo frío, polvo caliente y fotósferica de la SED de la fuente IRS52a y es usada para referencia [23]	10
2.1.	Imagen RGB de la nube molecular galáctica MC76, R-24 μm , G-8 μm y B-Banda H de 2MASS	14
2.2.	Ejemplo de la base de datos 1, la primera fila contiene el nombre del YSO, la segunda y tercera fila tienen las coordenadas, las siguientes 10 filas contienen las banderas, a partir de la fila 14 se encuentran los flujos y sus errores.	17
2.3.	Ejemplo script de python en donde se especifican la identidad de los filtros y los radios de las aperturas de los filtros que se le suministraron a la base datos 1	19
3.1.	Distribución espectral de energía de YSOs clase 1. Los símbolos muestran los flujos medidos en el rango espectral del cercano infrarrojo hasta el submilimétrico y milimétrico. Los diferentes tipos de símbolos son descritos en la sección 2.2.1. La línea negra muestra el mejor ajuste del modelo de SED, mientras que las líneas grises muestran potenciales ajustes de modelo de SED. La discusión de los resultados obtenidos de cada SED es dado en la sección 3.2.	22
3.1a.	YSO M14	22
3.1b.	YSO M16	22
3.1c.	YSO M20	22
3.1d.	YSO M50	22
3.1e.	YSO M52	22
3.1f.	YSO M53	22
3.2.	Distribución espectral de energía de YSOs clase 2. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1.	23
3.2a.	YSO M18	23
3.2b.	YSO M28	23

3.2c.	YSO M37	23
3.2d.	YSO M41	23
3.2e.	YSO M59	23
3.2f.	YSO M62	23
3.3.	Distribución espectral de energía de YSOs clase 3. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1.	24
3.3a.	YSO M12	24
3.3b.	YSO M49	24
3.3c.	YSO M51	24
3.3d.	YSO M82	24
3.3e.	YSO M83	24
3.4.	Comparación de masas estelares de YSOs obtenidas en tres diferentes trabajos: los valores de masa graficados con triángulos azules son del trabajo de Retes Romero (2017), con círculos naranja proceden de Retes-Romero et al. (2017) y con estrellas verdes son obtenidas en el presente trabajo.	29
3.5.	Proporción de objetos en cada clase de acuerdo con la clasificación de Lada, usada en el trabajo de RR+17 y la clasificación MJ del presente trabajo	29
3.5a.	clasificación Lada	29
3.5b.	clasificación MJ	29
3.6.	Imagen RGB (R 24 μ m, G 4.5 μ m, B banda H 2MASS) de la nube molecular galáctica MC76. En las esquinas se muestran ampliaciones de las regiones centro (izquierda superior) y región norte (derecha inferior) de la nube. Estas regiones trazan zonas de alta extinción interestelar asociadas con la formación estelar reciente. YSOs muy jóvenes son identificados en estas regiones y son caracterizados en la sección 3.3.	31
3.7.	Distribución espectral de energía del YSO M9. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	32
3.8.	Distribución espectral de energía del YSO M13. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	33
3.9.	Distribución espectral de energía del YSO M14. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	34
3.10.	Distribución espectral de energía del YSO M15. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	35
3.11.	Distribución espectral de energía del YSO M50. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	36
3.12.	Distribución espectral de energía del YSO M52. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	37
3.13.	Distribución espectral de energía del YSO M53. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	38
3.14.	Distribución espectral de energía del YSO M54. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	38
3.15.	Distribución espectral de energía del YSO M84. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	39
C.1.	Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la fig. 3.1	52
C.1a.	YSO M1	52
C.1b.	YSO M2	52
C.1c.	YSO M3	52
C.1d.	YSO M5	52
C.1e.	YSO M9	52
C.1f.	YSO M10	52

C.2. Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	53
C.2a. YSO M13	53
C.2b. YSO M14	53
C.2c. YSO M15	53
C.2d. YSO M16	53
C.2e. YSO M17	53
C.2f. YSO M20	53
C.3. Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	54
C.3a. YSO M23	54
C.3b. YSO M24	54
C.3c. YSO M32	54
C.3d. YSO M33	54
C.3e. YSO M38	54
C.3f. YSO M43	54
C.4. Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	55
C.4a. YSO M44	55
C.4b. YSO M46	55
C.4c. YSO M47	55
C.4d. YSO M48	55
C.4e. YSO M50	55
C.4f. YSO M52	55
C.5. Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	56
C.5a. YSO M53	56
C.5b. YSO M54	56
C.5c. YSO M63	56
C.5d. YSO M67	56
C.5e. YSO M72	56
C.5f. YSO M73	56
C.6. Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	57
C.6a. YSO M74	57
C.6b. YSO M76	57
C.6c. YSO M78	57
C.6d. YSO M84	57
C.7. Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	58
C.7a. YSO M89	58
C.7b. YSO M91	58
C.7c. YSO M93	58
C.8. Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	59
C.8a. YSO M4	59
C.8b. YSO M6	59
C.8c. YSO M7	59
C.8d. YSO M11	59
C.8e. YSO M18	59
C.8f. YSO M21	59

C.9. Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	60
C.9a. YSO M22	60
C.9b. YSO M25	60
C.9c. YSO M26	60
C.9d. YSO M27	60
C.9e. YSO M28	60
C.9f. YSO M29	60
C.10. Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	61
C.10a. YSO M30	61
C.10b. YSO M31	61
C.10c. YSO M36	61
C.10d. YSO M36	61
C.10e. YSO M37	61
C.10f. YSO M39	61
C.11. Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	62
C.11a. YSO M41	62
C.11b. YSO M42	62
C.11c. YSO M45	62
C.11d. YSO M55	62
C.11e. YSO M56	62
C.11f. YSO M57	62
C.12. Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	63
C.12a. YSO M58	63
C.12b. YSO M59	63
C.12c. YSO M60	63
C.12d. YSO M61	63
C.12e. YSO M62	63
C.12f. YSO M64	63
C.13. Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	64
C.13a. YSO M65	64
C.13b. YSO M66	64
C.13c. YSO M68	64
C.13d. YSO M69	64
C.13e. YSO M70	64
C.13f. YSO M71	64
C.14. Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	65
C.14a. YSO M75	65
C.14b. YSO M77	65
C.14c. YSO M80	65
C.14d. YSO M81	65
C.14e. YSO M86	65
C.14f. YSO M88	65
C.15. Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1	66
C.15a. YSO M90	66
C.15b. YSO M92	66

C.16. Distribución espectral de energía de YSOs clase 3 en MC76. Los símbolos muestran los flujos medidos en el rango espectral del cercano infrarrojo hasta el submilimétrico y milimétrico. La línea negra muestra el mejor ajuste del modelo de SED, mientras que las líneas grises muestran potenciales ajustes de modelo de SED.	67
C.16a. YSO M12	67
C.16b. YSO M34	67
C.16c. YSO M49	67
C.16d. YSO M51	67
C.16e. YSO M82	67
C.16f. YSO M79	67

Índice de tablas

1.1. Parámetros de salida del ajuste del modelo numérico de SED	12
2.1. Flujos en el cercano, medio y lejano infrarrojo de los YSOs seleccionados en la nube molecular galáctica MC76. Se muestran los primeros 21 objetos para mostrar la información fotométrica disponible para los YSOs. En el apéndice A se muestra la selección completa de YSOs.	16
2.2. Tabla de los flujos que se usaron para el ajuste de los modelos SED, el instrumento al que pertenecen, su banda y el rango espectral al que pertenecen.	18
2.3. Banderas y su representación en los modelos de SEDs	18
3.1. Parámetros físicos de YSOs obtenidos usando el ajuste de los modelos numéricos de SED	27
3.2. Parámetros de masa estelar y luminosidad bolométrica derivados del mejor ajuste de modelo SED en cada uno de una muestra de YSOs en la nube molecular MC76.	30

Resumen

El propósito de este trabajo es estudiar la distribución espectral de energía (SED) observada en objetos estelares jóvenes (YSOs) asociados a la nube molecular galáctica MC76, a fin de caracterizar su fase evolutiva y obtener parámetros físicos de estos objetos. Se utilizan datos fotométricos en el rango espectral del cercano infrarrojo hasta el milimétrico para construir una SED observada, posteriormente se usan modelos numéricos de SED realizado por Robitaille et al. (2007) para objetos estelares jóvenes y se seleccionan los parámetros físicos del mejor ajuste, los cuales caracterizan la fase evolutiva y la estructura física de los YSOs.

Las SEDs obtenidas concuerdan de manera general, con las que se reportan algunos YSOs en previos trabajos utilizando modelos simples de SED.

Los parámetros obtenidos para una muestra de objetos estelares jóvenes estudiados de esta nube molecular, son comparables a los previamente reportados y confirman la intensa actividad de formación estelar de alta masa presente en la región galáctica de formación estelar MC76.

Capítulo 1

Introducción

1.1. El medio interestelar

Es importante conocer el material y el proceso por el cual se forman las estrellas, para poder entender este proceso es necesario estudiar el medio en el que ocurre este proceso y las condiciones que favorecen y que se involucran en él. En 1904 Hartmann observó un grupo de líneas de absorción de calcio ionizado no sufrían cambios, es decir mientras que había longitudes de onda de las líneas de absorción de la fotosfera de las estrellas en el sistema binario que se movían hacia adelante y atrás, había otras que se mantenían estacionarias. Hartmann concluyó que estas líneas estacionarias se debían a la absorción producida por gas y polvo que se encontraba en medio del sistema binario y la tierra. La idea tardó en aceptarse ya que se cuestionaba la ubicación de éstas, es decir este gas podría rodear a la estrella en vez de estar a una larga distancia de esta, el gas podía ser interestelar o circunestelar. Al final la interpretación física más adecuada expuesta por Plaskett, Struve, Eddington y Bok, al mostrar que los estados ionizados o las velocidades de las “líneas estacionarias” eran incompatibles con la interpretación circunestelar [29].

Nos encontramos pues con un espacio lleno de material conformada por polvo y gas. El gas interestelar se compone de el hidrógeno (que conforma casi todo el gas interestelar) en su forma de atómica (HI) también llamada regiones frías atómicas, y en su forma molecular (H_2) o regiones frías moleculares, estas dos fases conforman aproximadamente el 100 % de todo el gas interestelar, aunque también existen las regiones calientes atómicas (gas Inter nube), las regiones ionizadas colisionalmente [4].

La formación de moléculas en el medio interestelar es difícil, las reacciones tendrán que producirse en fase gaseosa y las densidades son muy bajas, así que no podrán tener lugar las reacciones que necesiten de la interacción de tres o más partículas. Debido a esto para que suceda es necesario que la densidad de la región sea elevada y así la interacción de los átomos sea más frecuente; además es necesario un ambiente protegido por polvo interestelar para que las nuevas moléculas no se disocien por fotones ultravioleta (UV). Las reacciones con las que se forman moléculas en el medio interestelar son las llamadas reacciones ion- moléculas, son las responsables de la mayor parte de moléculas que podemos encontrar en el medio interestelar exceptuando la molécula de hidrógeno (H_2). Se puede explicar la formación de esta última, por medio de la reacción en la superficie de granos de polvo, estos sirven como catalizador y absorben el exceso de energía que se libera al formarse el H_2 y facilitan la interacción entre ellas al llevarlas adheridas en su superficie [4].

Las nubes moleculares son regiones frías y densas, compuestas principalmente de hidrógeno molecular y polvo, es en el interior de éstas que encontramos y podemos estudiar la formación estelar. En las moléculas fundamentales pueden existir 3 tipos de transiciones, la energía necesaria para excitar una transición mediante colisión es [4]:

$$E = kT_k \quad (1.1)$$

Donde k es la constante de Boltzmann, y T_k es la temperatura cinética de la nube, esta es la temperatura resultante de las colisiones entre las partículas que forman la nube.

Por lo que sólo tendremos transiciones que requieren para excitarse una temperatura característica de:

$$T = \frac{E}{k} \quad (1.2)$$

Las transiciones rotacionales son aquellas que involucran giros de núcleos respecto a otros, es necesaria una temperatura de 5 K para que tengan lugar este tipo de transiciones. Las transiciones vibracionales ocurren cuando los núcleos vibran en torno a su posición de equilibrio, su temperatura característica es de 600 K, y las transiciones eléctricas en cambio necesitan de una temperatura de 9×10^4 K [4]. Normalmente las transiciones electrónicas necesitan más energía para ocurrir, les siguen las vibracionales y por último se encuentran en el nivel más bajo las rotacionales.

En las nubes moleculares sólo podrán tener lugar las transiciones que se exciten con una energía compuesta por una temperatura del orden de la temperatura cinética de la nube, la cual usualmente es de 10 K [16]. Pero para H_2 , que es la forma en la que se encuentra el hidrógeno en las nubes moleculares, la temperatura para excitarse del estado fundamental a el estado rotacional es de 175 K, por lo tanto en las nubes moleculares no habrá ninguna molécula en esa transición energética, en consecuencia no se puede caracterizar las nubes moleculares con esta molécula. Otras moléculas usadas para el estudio de la estructura de las nubes moleculares son el monóxido de carbono (CO) y sus variantes isotópicas, el monosulfuro de carbono (CS), el amoníaco (NH_3), entre otras[4].

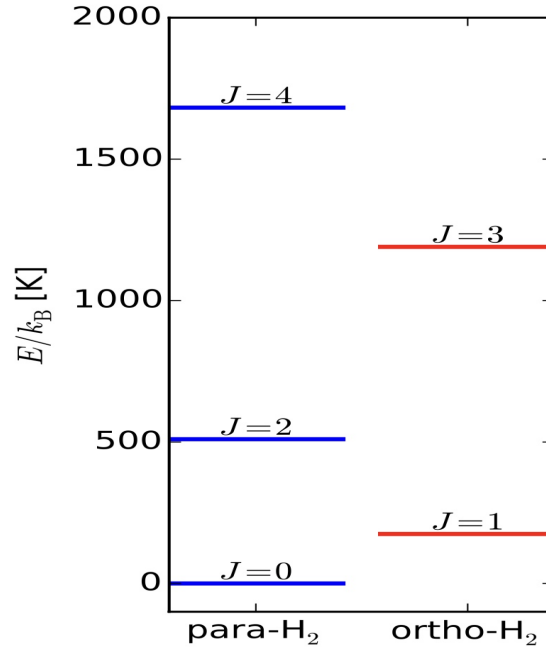


Figura 1.1: Diagrama de niveles energéticos para las transiciones rotacionales del hidrógeno molecular [15]. A la izquierda se muestran los niveles de la configuración para- H_2 y a la derecha la ortho- H_2 .

1.2. Gas molecular CO y NH₃

La molécula del CO es una buena opción en el estudio de las nubes moleculares debido a su abundancia en el medio interestelar, es la segunda más abundante después del H_2 . Es el tipo de molécula con la emisión más fácil de detectar en el medio interestelar debido a que la temperatura necesaria para sus transiciones rotacionales es el orden a las encontradas en las nubes moleculares, también posee un momento dipolar pequeño lo que hace que el coeficiente de emisión espontánea de sus transiciones rotacionales sea pequeño y por lo tanto se termaliza fácilmente en las densidades esperadas de una nube molecular. Debido a esto se usa para estudiar las distribuciones y condiciones físicas del gas molecular [4].

Para obtener los parámetros físicos de una nube molecular se hacen observaciones de las transiciones de las variedades isotópicas del CO. El CO es ópticamente grueso y permite observar la parte superficial de la nube molecular mientras que moléculas como el ^{13}CO son ópticamente delgadas y permite ver el interior de la nube. Los parámetros físicos de la nube molecular que podemos obtener gracias a estas variedades isotópicas CO son su temperatura de excitación, su densidad columnar, masa etc [31].

La temperatura de excitación es obtenida con el análisis de las líneas del CO, con el brillo y temperatura del ^{13}CO se obtendrá la profundidad óptica del mismo y la opacidad se encontrará con el cociente de ambas líneas, después de la obtención de todo lo anterior es posible el cálculo de la densidad columnar del ^{13}CO posteriormente es posible la obtención de la densidad columnar del H_2 [4].

En el caso de la molécula de NH_3 se encuentran transiciones mucho más complejas, que son útiles para el estudio de los parámetros encontrados en los núcleos densos de las nubes moleculares. Sus transiciones rotacionales emiten radiación en el infrarrojo, pero debido a su forma piramidal es capaz de tener transiciones del orden de centímetros en sus subniveles. Es posible obtener parámetros con las transiciones de esta molécula gracias a que es relativamente abundante, su abundancia respecto a H_2 es de 10^{-8} , mientras que en el caso de CO es de 5.6×10^3 . Gracias a su estructura fina es posible el estudio de parámetros como la opacidad y una estimación fiable de la temperatura cinética [4].

Es este el medio interestelar donde se albergaran y se forman las nuevas estrellas. En la siguiente sección podremos obtener sus parámetros físicos.

1.3. Nubes moleculares

No se puede asegurar una clasificación para las nubes moleculares (MCs, por sus siglas en inglés) ya que los resultados de investigaciones de sus características físicas, demuestran que dentro de las nubes moleculares existen condiciones físicas que varían de nube a nube, en consecuencia es difícil llegar a un consenso, sin embargo, ha sido posible agruparlas según sus características generales. A continuación se expondrán algunos de estos grupos.

Nubes moleculares oscuras

Las nubes moleculares oscuras se denominan así ya que se les puede encontrar como zonas oscuras en un campo de estrellas de fondo [29]. Este efecto se debe a que son más cercanas a nuestro sistema solar, en el caso de las nubes moleculares que se encuentran a mayor distancia existe un mayor número de estrellas entre ellas y nosotros lo que hace que el contraste sea menor. La denominación correcta de estos objetos es nubes moleculares enanas, pero se sigue utilizando el término original. Se ha sugerido que estos objetos pueden ser auto gravitatorios, además cuentan con formación estelar. Se ha encontrado nubes oscuras con diámetro de 2 pc a 5 pc, con masas de $10^3 M_\odot$ hasta $10^4 M_\odot$, una temperatura aproximada de 10 K y una densidad que puede ir de los 10^2 cm^{-3} a los 10^4 cm^{-3} . [4]. Tienen núcleos de baja masa con turbulencias subsónicas, se pueden

encontrar fuentes infrarrojas lo que indica que hay formación estelar, en especial estrellas del tipo T Tauri [29].

Nubes moleculares gigantes

Las nubes moleculares gigantes (GMCs, por sus siglas en inglés) son las estructuras moleculares más grandes de la galaxia con tamaños físicos que van de los 10 pc a los 100 pc, masas de hasta $10^6 M_{\odot}$ siendo la mayor parte de su masa una estructura de baja densidad que va de los 10^2 cm^{-3} a los 10^3 cm^{-3} .

Podemos encontrar a las nubes moleculares más masivas en el anillo molecular, estadísticamente se encuentran a distancias mayores de 3 kpc de nuestra posición en la Galaxia [4]. Las regiones internas de alta densidad se denominan núcleos moleculares o grumos moleculares densos, los cuales se les distingue por sus velocidades subsónicas, son el lugar de nacimiento de estrellas masivas como las de tipo espectral OB y de asociaciones estelares de baja y alta masa [4].

Las GMCs tienen una estructura compleja ya que estas contienen estructuras embebidas dentro de sí, que pueden alcanzar una mayor longitud o tener mayor densidad que la del medio ambiente molecular que las rodea, es en estas subestructuras donde se presentan las condiciones necesarias para la condensación de material interestelar necesario para la formación de objetos estelares jóvenes.

Estas condensaciones están ligadas gravitacionalmente y alcanzan diferentes tamaños. Las pequeñas tienen una masas de entre $1 M_{\odot}$ y $50 M_{\odot}$ y tamaños 0.1 pc hasta 0.5 pc son llamados cores (núcleos) mientras que las grandes pueden tener masa de entre $10 M_{\odot}$ a $1000 M_{\odot}$ y se les llama clumps (grumos) tienden a tener tamaños que van desde los 0.1 pc hasta 2 pc [3, 2, 5]. De acuerdo a su densidad tenderán a formar diferentes objetos, las primeras forman objetos individuales, estrellas, mientras que las segundas formarán asociaciones estelares complejas como lo son los cúmulos.

El colapso de las nubes moleculares no es un proceso que ocurre en toda la nube, es algo que sucede en algunas regiones de las nubes en donde se incrementa la densidad de la región por algún proceso físico local.

Es importante cuestionarse sobre cuáles son los factores que inducen a las Nubes moleculares a colapsar. El teorema de virial puede ser usado para estimar las condiciones necesarias para el colapso de las GMCs, ya que este describe las condiciones de equilibrio para sistemas estables gravitacionalmente unidos.

La expresión para el teorema del virial es:

$$\frac{1}{2}\ddot{I} = 2(\tau - \tau_s) + B + W - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \int_s (\rho v r^2) \cdot ds \quad (1.3)$$

τ es el total de energía cinética y térmica de la nube, τ_s es la presión confinada en la superficie de la nube, esta incluye la presión térmica y la presión de cualquier gas fluyendo en la superficie. B es la diferencia entre la presión magnética dentro de la nube que la sostiene y la presión magnética en la superficie más la tensión superficial de la nube. W es la energía gravitacional que une la nube. La integral final representa el rango de cambio del momento de flujo a través de la superficie de la nube.

$\ddot{I}$ es la forma integral de la aceleración, para una nube con forma fija, nos dice la velocidad de cambio de la expansión de la nube. Las GMCs se pueden encontrar en 3 diferentes estados: de equilibrio, expansión o colapso. Para una nube de forma fija, nos dice el rango de cambio de la expansión y contracción de la nube. Si es negativo, los términos que están tratando de colapsar la nube, la presión de la superficie, la presión magnética, la tensión de la superficie y la gravedad, son grandes y la nube se acelera hacia adentro y colapsará la nube. Si es positiva, los términos que están a favor de su expansión, presión térmica y la presión magnética, son largas y la nube acelera es hacia el exterior. Si es cero la nube no acelera ni desacelera. Una vez el colapso empieza, se desencadenan una serie de procesos físicos que son parte de la formación de la nueva protoestrella.

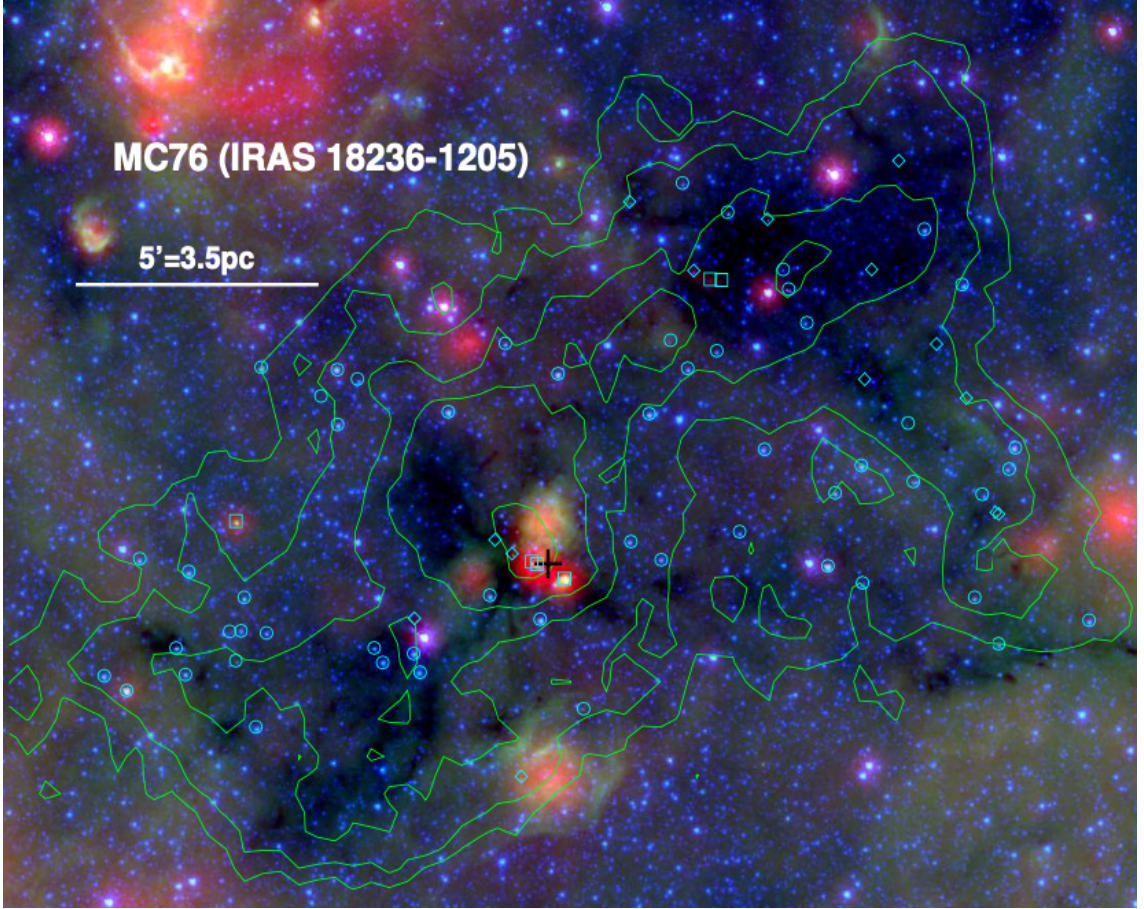


Figura 1.2: Imagen Spitzer RGB ($24\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$ y $3.6\ \mu\text{m}$, respectivamente), sobrepuestos se encuentran los contornos en densidad columnar, siendo el más externo para el valor de $10^{21}\ \text{cm}^{-2}$. Los símbolos en color azul muestran la posición de los YSOs según su clase: círculos para clase III, rombos para clase II y cuadrados para clase I/0, respectivamente. La cruz en la región central muestra la posición de la fuente IRAS [23].

Estos eventos serán detallados en la siguiente sección y dependiendo de la cantidad de medio interestelar involucrados en el fenómeno, darán resultado a dos tipos de objetos estelares jóvenes.

1.4. Formación de estrellas

En 1934 Bart Bok, notó que los cúmulos estelares tenían que ser objetos jóvenes debido a que su densidad no era suficiente como para mantener a las estrellas unidas por tanto tiempo. Después se encontró que las estrellas masivas, viven menos tiempo que las de menor masa y ya que se puede seguir observando estrellas de este tipo, se infiere que debieron haberse formado en épocas recientes [28]. Con todas estas evidencias, se concluyó que la formación estelar es un proceso físico reciente que se mantiene activo en la Galaxia.

La formación estelar inicia con el colapso de una zona de la nube, esto puede suceder por estimulación externa, que pueden ser los vientos estelares de estrellas jóvenes que llegan a alterar los procesos energéticos de zonas de la nube molecular. Para el caso de las estrellas de baja masa, se han desarrollado dos modelos para describir lo que sucede durante este colapso que da inicio a

la existencia de las protoestrellas.

El primero fue enunciado por Larson y Shu, suponemos que un fragmento de la nube es una esfera de material interestelar, con una temperatura constante y cuyo polvo es transparente ante su propia radiación de enfriamiento [29], la esfera será comprimida por la presión entonces el volumen del material circundante disminuirá y mientras esto ocurre la auto gravedad irá en aumento, después de ocurrido esto la esfera se volverá dinámicamente inestable al colapso gravitacional, lo que será más rápido en las zonas más densas. El proceso es posible cuando la energía térmica y gravitacional se transforman y puedan ser radiadas, el final de este proceso ocurrirá cuando la densidad columnar y envolvente aumente y el núcleo se vuelva opaco y el calor de compresión ya no podrá ser radiado tan pronto como es generado, entonces el colapso pasará a ser adiabático, la temperatura del gas aumenta e incrementa la presión térmica. Se detiene la contracción del núcleo, se llega a un equilibrio hidrostático entre gravedad y presión termica es entonces que se ha formado la protoestrella [19].

El segundo modelo es sin simetría esférica, en este se reconoce la rotación de la nube como un factor en el colapso. Investigaciones sugieren que el efecto de rotación será despreciable para las zonas externas de la nube, pero conforme se acerca al centro se notan curvaturas en la trayectoria del material que cae, formando una barrera centrífuga, que provoca que el material caiga en trayectorias parabólicas a la superficie de la protoestrella, lo que provoca la formación de un disco, con esto último logra explicar un factor que el otro omite y es la existencia del disco y cavidades en la nube que se cree dan origen a los sistemas planetarios [4].

Observacionalmente, se puede distinguir dos tipos de estrellas dependiendo de sus masas, las estrellas de baja y alta masa. En el caso de las de baja masa, tienen un desarrollo lento y una vida en la secuencia principal larga, que permite que se pueda estudiar con detalle sus etapas evolutivas, gracias a ellos se ha podido establecer modelos como los anteriormente mencionados.

Las estrellas masivas ($M_{\star} > 8M_{\odot}$) son de vital importancia para el desarrollo de procesos físicos en la galaxia que las hospeda. Estas producen retroalimentación química al medio ambiente local por medio de supernovas, además de mantener la dinámica del medio interestelar por medio de procesos radiativos y mecánicos [34]. Sin embargo, aún no existe acuerdo al respecto de su formación, la problemática reside en las largas distancias y las grandes extinciones que existen alrededor de las protoestrellas masivas, es difícil obtener evidencia observacional en las etapas iniciales y los procesos involucrados son muchos y muy complejos.

Los primeros modelos que se propusieron al respecto son tres diferentes escenarios del acrecentamiento: el propuesto por Shu y Lada en 1987, llamada acrecentamiento amplificado, el escenario de acrecentamiento competitivo y el escenario de colisión protoestelar ambos propuestos por Bonnell et al. en 1997 y en 1998 respectivamente.

El escenario de acrecentamiento amplificado [30] es el mismo proceso que pasan las estrellas de baja masa, pero a mayor escala. En este caso el material que se condensa es mayor, por lo que la fuerza de atracción gravitatoria también aumenta y con ella se adquirirá cada vez más cantidad de material de distancias más lejanas. Al acumularse más material, el núcleo se hará más opaco ya que retendrá la energía irradiada y aumentará su temperatura dando lugar a la ionización de la nube circundante y a los flujos bipolares. La masa de la protoestrella es mucho menor que la masa de la envolvente en esta fase, pero pronto continuará acrecentando masa hasta que haya acrecentado la mayor parte de la envolvente circundante a partir de aquí su masa será mayor a la del núcleo y la envolvente que la rodea, empezará a formar un disco circunestelar en la zona ecuatorial, seguirá acrecentando masa, pero de una manera más moderada y a través del disco. En esta fase el objeto aún está embebido dentro de su nube progenitora. Esto y su baja temperatura de la envolvente circunestelar hacen que solo sea observable en el medio y lejano infrarrojo, así como en el milimétrico ($5 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$) [29]. Finalmente agota el material de la envolvente circundante, pero sigue acrecentando una pequeña porción de masa a través del disco, los flujos bipolares disminuyen o incluso desaparecen. Ya cuando se está muy cerca de la secuencia principal, el disco ya no brinda más material a la protoestrella, pudiendo quedarse como un disco debrís.

Teóricamente si una estrella masiva se forma de la misma manera que una de baja masa, se

puede esperar la aparición de un disco del acrecentamiento masivo (desde varios cientos hasta 1000 unidades astronómicas), flujos bipolares, además de núcleos masivos en etapas tempranas de formación [9]. Se han observado flujos bipolares de protoestrellas masivas, aunque se especula que los flujos limiten la eficiencia de la formación debido a las cantidades de material expulsado. Otra diferencia es la idea que la formación de estrellas masivas puede ser a través de fusiones estelares, es decir, que acumulen la mayor parte de su masa a partir de material inicialmente no unido [36].

En el modelo de acrecentación competitiva el material interestelar que forma las estrellas es obtenido continuamente de regiones más amplias del “clump”, sin nunca estar unida gravitacionalmente a un masivo, coherente y sin estrellas núcleo. También la formación de estrellas masivas siempre estará rodeada de proto-estrellas de baja masa. Esto lleva naturalmente a una IMF, así la estrella masiva será una pequeña fracción de la masa estelar de los grumos [31]. Se sugiere que para la formación de estrellas masivas es relevante que estas estén en el centro de proto cúmulos, donde hay un ambiente de alta densidad de gas. Esto termina por la retroalimentación estelar o por la fragmentación inducida por la inanición [31]. Otras predicciones de la acrecentación competitiva son los discos de acrecentación relativamente pequeños con caóticas variaciones de orientación que influyen en la dirección de los outflows proto estelares [31].

En último modelo de colisión protoestelar Bonnell et al. (1998) propone que las estrellas de alta masa pueden formarse (obtener masa) debido a colisiones de protoestrellas. Este modelo surgió a partir de caer en cuenta la dificultad que significaba acrecentar esa cantidad de material interestelar. Las protoestrellas de baja masa son ópticamente gruesas y su material no se ve afectado por la presión de radiación generada por la retroalimentación. Que las estrellas masivas se formen de esta forma implica que se encuentran en clusters densos [31].

Puede que no sea posible discernir de todas estas cuestiones con las observaciones y modelos actuales, pero con la ayuda de nuevos telescopios espaciales y avances tecnológicos en las longitudes de onda del infrarrojo, y la creación de nuevos y más complejos modelos, se hacen avances para entender el funcionamiento de la formación de estrellas masivas.

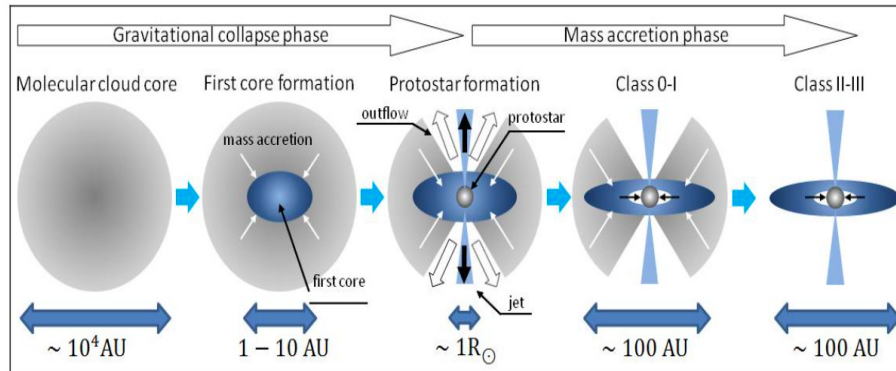


Figura 1.3: Esquema de evolución protoestelar para estrellas de baja masa [37]

1.5. Evolución protoestelar

El estudio del desarrollo de las protoestrellas es complejo debido a los factores mencionados en la sección anterior, pero al igual que con el colapso de la nube molecular y el inicio la condensación del núcleo, los investigadores han decidido modelar la evolución de las protoestrellas masivas a partir de los modelos de las protoestrellas de baja masa. Así que es indispensable primero entender el proceso por el cual pasan las estrellas de baja masa. Este proceso es esquematizado en la figura 1.3.

Las estrellas de baja masa tendrán una masa mínima inicial de $10^{-3} M_{\odot}$ [30], pero incrementará conforme gas y polvo circunestelar caen dentro de ella en un periodo aproximado de 10^4 a 10^6 años, esta fase se conoce como fase de acrecentamiento [4]. La protoestrella tiene un núcleo hidrostático, en la superficie del núcleo encontramos una onda de choque radiante en la que la materia fluye y es detenida, la capa de materia que cae crea una capa que transforma los fotones del rango espectral visible en fotones infrarrojos en fotones infrarrojos por esto durante la fase de acrecentamiento no es visible en el óptico y en el infrarrojo sólo se podrá observar la falsa fotósfera, que es donde los fotones infrarrojos son generados y pueden escapar del núcleo [28].

Durante esta etapa la futura estrella tendrá una temperatura aproximada de 4400 K y una luminosidad de $1.3 L_{\odot}$. Una vez que inicien las reacciones termonucleares del hidrógeno en el núcleo hidrostático, se dará como terminada esta etapa y podremos decir que el objeto es una estrella [4]. Desde la etapa protoestelar hasta antes de entrar a la secuencia principal los objetos son denominados objetos estelares jóvenes (YSOs, Young Stellar Objects; por sus siglas en inglés) y se clasifican usando las características físicas de emisión de energía. La emisión principal de los objetos estelares jóvenes es en infrarrojo ya que poseen una envoltente de polvo que absorbe y reemite la energía radiada por la fuente central del YSO. Así que podemos encontrar una relación entre el estado evolutivo del objeto y la distribución espectral de energía (SED, por siglas en inglés), usando el índice espectral (α) que se define como [18]:

$$\alpha = \frac{-d\log(\nu F_{\nu})}{d\log(\nu)} \quad (1.4)$$

Utilizando el índice espectral definido en el infrarrojo se puede clasificar a los YSOs de baja masa en su correspondiente estado evolutivo [13].

- YSOs de clase I y 0.- Son los objetos más jóvenes, también llamada fase protoestelar o de acrecentamiento de material [1]. Los objetos de clase 0 son aquellos que están rodeados de una gran cantidad de material circunestelar (núcleo hidrostático) de la envoltente protoestelar inicial, lo cual indica que aún están en una plena fase de acrecentamiento así que son extremadamente jóvenes, su SED se ajusta muy bien a la emisión de un cuerpo negro (panel superior de la figura 1.4) [29]. Los objetos de clase I son aquellos que aún están embebidos en la nube molecular, no son detectables en el visible y están caracterizados por una SED con una distribución más ancha que la de un cuerpo negro que se eleva en el infrarrojo (IR) medio [14], con una pendiente positiva $0 < \alpha \leq 3$ y un pico de emisión en el lejano IR (figura 1.4, segundo panel de arriba hacia abajo) [29]. También se espera que sean sistemáticamente más luminosos debido al acrecentamiento de material.
- YSOs de clase II.- Esta etapa también es conocida como etapa de flujos bipolar [1]. Posee una distribución espectral de energía más ancha que la de un cuerpo negro que tendrá un pico de emisión en el infrarrojo cercano para luego decrecer en el infrarrojo medio (figura 1.4, tercer panel de arriba hacia abajo), su pendiente esta vez presenta valores negativos $-2 < \alpha \leq 0$ [31, 14]. Son objetos que poseen menos material circunestelar, son observables en el visible y se caracterizan por el acrecentamiento de material circunestelar y la formación de flujos bipolares de forma simultánea. También la SED indica la existencia de un disco circunestelar. Ejemplos de estos objetos son las T-Tauri y los que presentan episodios de tipo FU Orionis [14].
- YSOs de clase III.- Estos objetos se encuentran en la última etapa de evolución protoestelar, su SED es similar al de un cuerpo negro con un ligero exceso en el cercano y mediano infrarrojo (figura 1.4, panel inferior) debido a la emisión de un delgado disco circunestelar. Sus valores de índice espectral son negativos $-3 < \alpha \leq -2$. Todo esto nos indica que posee poco o ningún material circunestelar. Estos objetos están por entrar en su fase de secuencia principal [29].

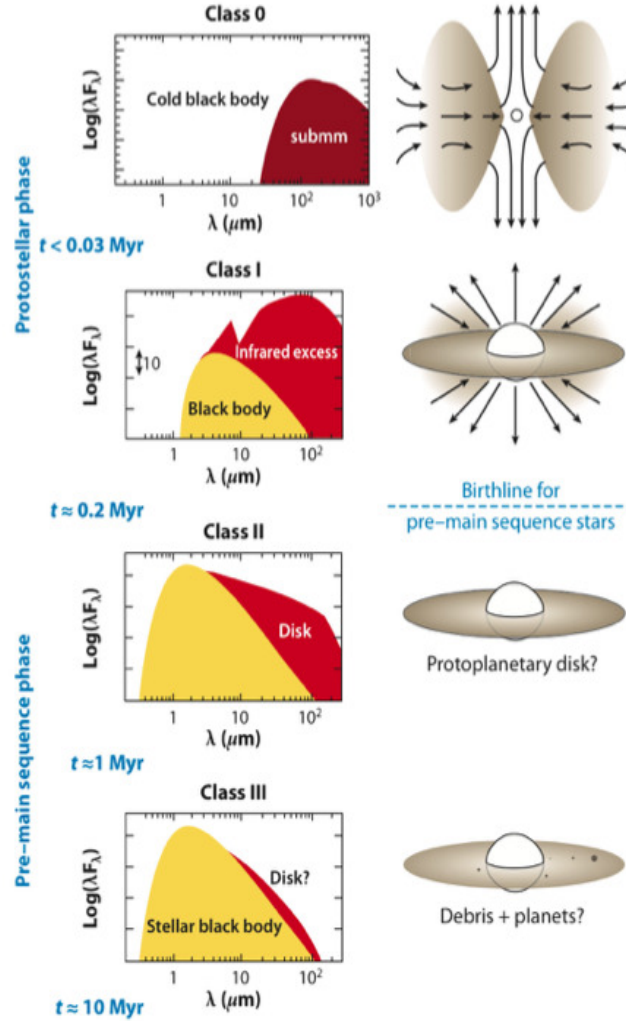


Figura 1.4: Esquema de evolución protoestelar de una estrella de baja masa [27]

No existe un equivalente de la clasificación anterior para protoestrellas de alta masa ya que los diferentes modelos predicen diferentes geometrías del gas y el polvo que rodean la protoestrella, también se ha observado que el SED varía del ángulo de visión y hace que haya cambios para la misma etapa evolutiva [31]. Sin embargo, trabajos anteriores sugieren que la anterior clasificación sirve para las protoestrellas masivas, ya que estas siguen un proceso similar [20, 23].

1.6. Distribución espectral de energía

Para poder estudiar y obtener propiedades físicas de estos objetos masivos jóvenes es necesario hacer uso de una herramienta que mencionamos anteriormente, las distribuciones espectrales de energía (SED). El modelo de emisión de radiación de una estrella es el de un cuerpo negro. Este tipo de modelo el objeto absorbe toda la radiación incidente sobre éste. Esta radiación es emitida completamente, dando lugar a un equilibrio térmico [28]. La radiación emitida por estos cuerpos es llamada radiación de cuerpo negro. Sin embargo, la radiación emitida no es constante para todas las frecuencias sino que siguen una ley de emisión, llamada ley de Planck, quién la describió

siguiendo la mecánica estadística y el electromagnetismo de Maxwell [28]. Esta ley de emisión es definida por la siguiente expresión [4]:

$$B_\nu(I) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1.5)$$

Donde k es la constante de Boltzman, la h es la constante de Plank, ν es la frecuencia y T es la temperatura.

Las estrellas emiten radiación electromagnética y su distribución de energía espectral permite mostrar la relación entre la energía emitida por el objeto y la longitud de onda a la cual se emite tal energía. En palabras más simples, la distribución espectral de energía es la representación gráfica del comportamiento de la energía electromagnética con respecto a la frecuencia o longitud de onda.

Existen varias maneras de modelar una distribución espectral de energía, una de ellas es sumando la emisión de 2 cuerpos grises a diferentes temperaturas y un cuerpo negro con extinción interestelar, como se ilustra en la figura 1.5. Los cuerpos grises representan el polvo en la envoltante y en el disco, y el cuerpo negro la fotosfera. Modelos como estos requieren parámetros iniciales como son el radio y la temperatura que se van modificando gradualmente según los valores de extinción y frecuencia hasta obtener un buen ajuste.

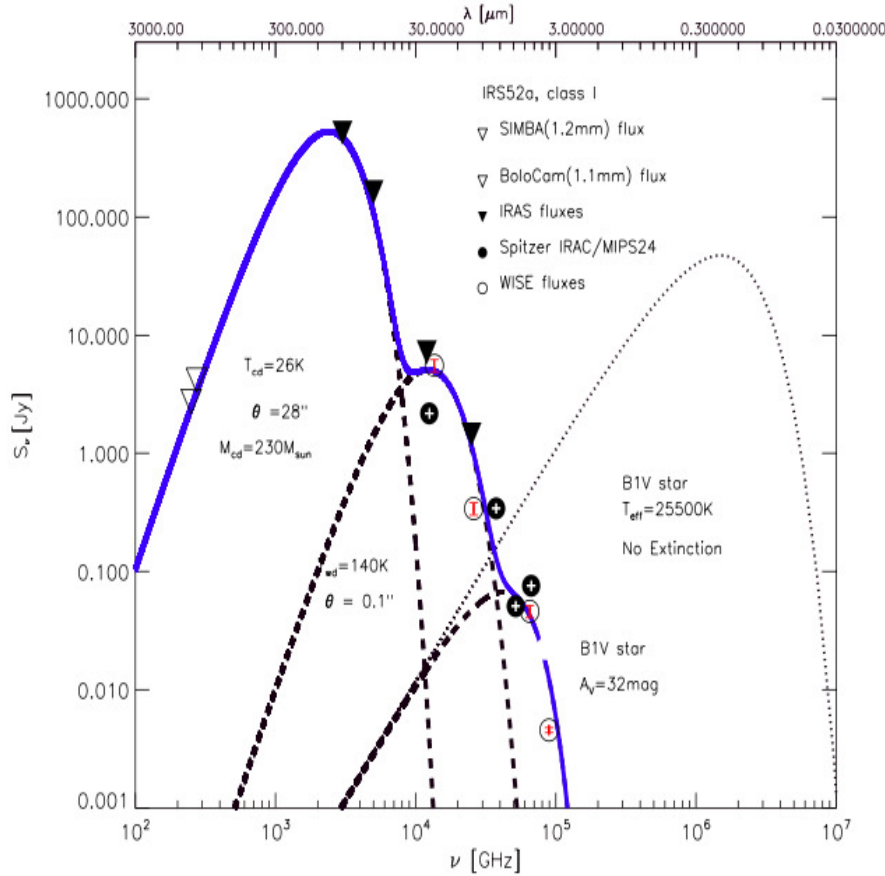


Figura 1.5: Distribución espectral de energía (SED) de la fuente IRS52b contruida con cuerpos grises y negro. La línea gruesa en azul muestra la suma de las componentes de polvo frío, polvo caliente y fotósferica de la SED de la fuente IRS52a y es usada para referencia [23]

En modelos como estos, las SEDs se dividirán en la componente estelar y la componente de

la envolvente o el exceso de infrarrojo. La primera estará compuesta por los flujos del infrarrojo cercano y medio, mientras que la parte del exceso de infrarrojo se compone con los flujos del medio y lejano infrarrojo. Conforme el YSO evolucione, la forma de la SED se irá modificando. Al principio, clase I, se espera que la componente estelar sea de menor tamaño y que la componente del exceso de infrarrojo domine la SED, ya que el YSO debido al material interestelar en la que se encuentra embebido y a la temperatura a la que se encuentra este, debido a los procesos térmicos que genera el acrecentamiento de material al joven núcleo. En los objetos de clase II veremos una disminución de la componente fría, como también se le llama a la envolvente, que se observara disminuida, pero su presencia nos indica la existencia de un disco, mientras que la componente estelar tomar casi la forma de un cuerpo negro. En la última fase, clase III, la componente estelar será la única componente que quede con la forma de un cuerpo gris [23]. Otro método que se ha buscado implementar para el ajuste de SEDs es la creación de programas informáticos que automatizan el trabajo, que sea eficiente y con resultados más exactos que permitan un mejor entendimiento.

1.7. Modelo numérico de distribución espectral de energía

Robitaille et al. (2006) realizaron una “red” con las realizaciones de los modelos para YSOs SEDs, y plantillas de galaxias y AGB, con mediciones de fotometría de múltiples longitudes de onda de esta fuente en particular mediante regresión lineal. Al cual se refieren como ***SEDfitter***, como me referiré en este trabajo de él. Se proponen un método para analizar las distribuciones espectrales de energía (SEDs) de objetos estelares jóvenes, en el que se ajusta los flujos observados con modelos pre-computarizados de transferencia en 2 dimensiones. El método de ***SEDfitter*** hace uso de los modelos numéricos de transferencia de radiación, considerando de una geometría circunestelar del polvo y del gas ajusta un conjunto de parámetros a las observaciones [25].

Para el ajuste de datos, ***SEDfitter*** hace uso de modelos convolucionados, interpola los flujos con las aperturas usadas para hacer la fotometría, para un rango de distancias mínima y máxima y así escalarlas a la distancia adecuada. La intención de todo esto es que el parámetro de extinción “ A_v ” sea un parámetro libre. Todo este procedimiento se realiza con los modelos de extinción realizados por Kim et al. (1994).

A cada una de las distancias dadas, se ajustan los flujos del modelo convolucionado a los datos usando una escala óptima, permitiendo que A_v sea un parámetro libre. Escribe los flujos del modelo convolucionado, interpolado y escalado como $M_\nu(\lambda_i)$. el patrón general $P_\nu(\lambda_i)$ que está siendo ajustado a los datos es

$$\log_{10}[P_\nu(\lambda)] = \log_{10}[M_\nu(\lambda)] - 0.4A_v \frac{k_\lambda}{k_\nu} \quad (1.6)$$

Donde el parámetro libre A_v puede ser determinado por el escalado óptimo en un rango de extinción, por su lado k_λ y k_ν están dados por la ley de extinción adecuado al valor de extinción en la línea de visión del YSO medido por RR+17. Los flujos y su varianza imparciales están dados por:

$$\langle \log_{10}[F_\nu] \rangle = \log_{10}\langle F_\nu \rangle \quad (1.7)$$

Una vez se determina el parámetro A_v se puede calcular el χ^2 por punto de datos.

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\langle \log_{10}[F_\nu(\lambda_i)] \rangle - \log_{10}[P_\nu(\lambda_i)])^2}{(\sigma(\langle \log_{10}[F_\nu(\lambda_i)] \rangle))^2} \quad (1.8)$$

Lo anterior es una explicación general del trabajo interno del código con el cual funciona ***SEDfitter*** [25].

1.8. Parámetros de ajuste del modelo numérico

Para obtener parámetros físicos del ajuste de modelo SED el programa utiliza un código de transferencia de radiación de Monte Carlo para la red de modelos, que incluyen dispersión no isotrópica, polarización y emisión térmica del polvo usando geometría esférico-polar [25]. La geometría consta de una envoltente que cae aplanada rotacionalmente, cavidades bipolares y un disco de acrecentamiento acampanado y para resolver la temperatura utiliza el método de Bjorkman & Wood (2001).

Durante el ajuste de los diversos parámetros de los modelos se muestran para poder producir un rango de etapas evolutivas, en estas podremos apreciar que durante la acumulación temprana de la envoltente el radio del disco aumentará y el tamaño de la envoltente de acrecentamiento disminuirá con el tiempo, a su vez las cavidades bipolares se ensacharon y el polvo en éstas se volverá más denso [25], también es importante tomar en cuenta cuando analicemos estos ajustes que *SEDfitter* toma a las fuentes luminosas como la estrella central y el disco de acrecentamiento [33, 34]. *SEDfitter* hace uso de modelos de grano de polvo, con los que se promedian las propiedades ópticas sobre la distribución de tamaño y composición de los granos y se contempla una mezcla de silicatos y grafitos astronómicos con una abundancia solar [25]. Al no separar las propiedades de calentamiento y emisión de los diferentes tamaños y componentes, se puede afectar las propiedades térmicas y químicas del disco, sin embargo Robitaille et al. (2006) aclaran que los efectos al resultado final son mínimos. Para las fotósferas estelares *SEDfitter* considera la temperatura de la fuente estelar, haciendo uso de los modelos de Brott & Hauschild [6] y Kurucz [15] para las temperaturas menores y mayores (respectivamente) a 10000 K [26].

El programa construido por Robitaille et al [25, 26] no pretende sugerir nuevos modelos evolutivos, si no que proveer modelos SEDs para etapas evolutivas que ya han sido examinadas y observacionalmente propuestas. El conjunto de parámetros que son ajustados al SED, son bastantes únicos, ya que todos los parámetros afectan la forma del SED. Con esto es posible obtener las propiedades físicas de la fuente y no solo cuantificar la forma del SED si no que es posible hacer uso de cualquier dato de flujo disponible [25]. Los parámetros resultantes del ajuste son 14, estos pueden dividirse en tres categorías.

Categoría	Parámetros
Fuente estelar	Masa estelar($M_{\star}$), radio del núcleo($R_{\star}$), temperatura del núcleo($T_{\star}$).
Envoltente	Acrecentamiento de la envoltente($\dot{M}_{env}$), radio exterior(R_{env}^{max}), radio interior(R_{env}^{min}), ángulo de apertura(θ), densidad de la cavidad(ρ).
Disco	Masa del disco(M_{disk}), radio interior(R_{disk}^{min}), radio exterior(R_{disk}^{max}), ángulo ancho del disco(β)
Ambiental	Densidad del ambiente($\rho_{ambient}$).

Tabla 1.1: Parámetros de salida del ajuste del modelo numérico de SED

Capítulo 2

La nube molecular galáctica MC76 y su selección de objetos estelares jóvenes

La nube molecular, que hospeda los YSOs del presente estudio, MC76, es parte de una muestra de 12 MCs del trabajo de Retes-Romero et al. (2017; RR+17 se le llamará de aquí en adelante). Esta muestra de nubes moleculares se apegan con los siguientes criterios de selección: estas debían contener una fuente IRAS con características de una región HII ultra compacta, las fuentes IRAS debían asociarse con núcleos densos detectados por la línea de emisión CS(2-1) y la línea de visión para cada nube molecular debía de carecer de cualquier componente molecular en la línea de visión. Estas condiciones aseguran que las MCs tuvieran formación estelar de alta masa, además de garantizar que todos los YSOs espacialmente asociados con las MCs estuvieran físicamente asociados a ella [24].

La nube molecular MC76 se encuentra en el interior del brazo de sagitario carina, dentro del anillo molecular de la vía láctea. Esta se encuentra centrada en la coordenadas galácticas longitud 19.36° y latitud -0.02° , su tamaño angular aproximado es de 25×12 minutos de arco, el cual a la distancia de la nube, 2.5 kpc es de $15 \text{ pc} \times 10 \text{ pc}$ [23]. La fuente infrarroja más luminosa de la nube molecular es denominada como IRAS 18236-1205, cuya posición está centrada en las coordenadas galácticas antes mencionadas y con una luminosidad bolométrica de $7.2 \times 10^3 L_\odot$. Esta fuente IRAS, se encuentra espacialmente en la región central de la nube molecular (la zona señalada con una cruz negra en la figura 1.2), es candidata a región HII UC y está asociada a una rica fenomenología de formación estelar de alta masa, incluyendo la asociación espacial con varios YSOs masivos muy jóvenes (YSOs M52, M53).

2.1. Parámetros físicos de MC76

Como se vió en la sección 1.2, para obtener los parámetros físicos de las nubes moleculares son necesarios los datos de emisión de los isotopologos ^{13}CO , CO y la distancia al objeto [29]. La distancia de la nube molecular es de $2.5 \pm 0.3 \text{ kpc}$ [12, 24] con un área angular de 25×12 minutos de arco que cubre un área física de 82 pc^2 . Asumiendo que la nube molecular tiene geometría circular, se obtiene un radio efectivo de 5.11 pc .

La masa LTE es de $3.14 \pm 1.74 \times 10^4 M_\odot$. Usando una técnica de ajuste gaussiana en el espectro de emisión del ^{13}CO , se obtuvo una velocidad pico de 26.4 km s^{-1} con una velocidad de dispersión de 4.8 km s^{-1} . Usando este último parámetro y el radio efectivo, se obtiene la masa virial que es de $1.48 \pm 1.30 \times 10^4 M_\odot$ [24].

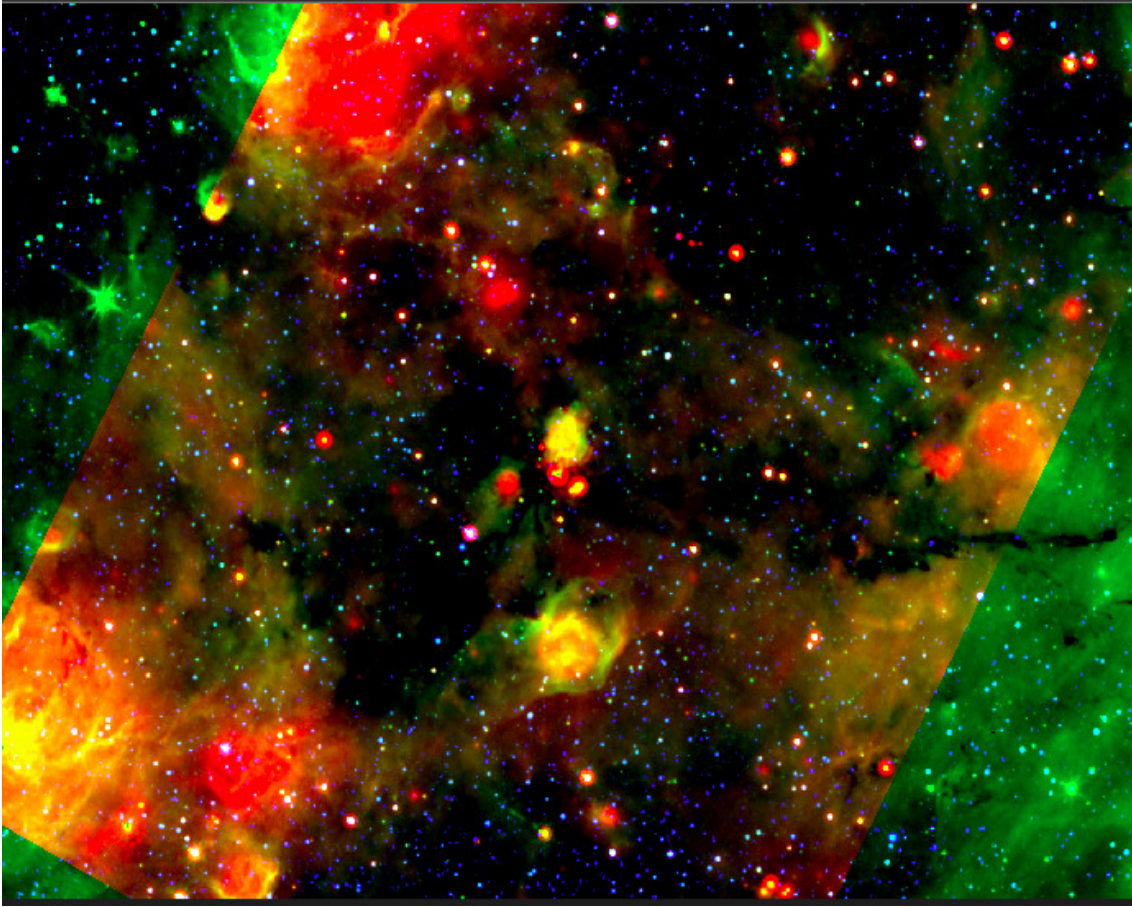


Figura 2.1: Imagen RGB de la nube molecular galáctica MC76, R-24 μm , G-8 μm y B-Banda H de 2MASS

2.2. Selección de YSOs embebidos en MC76

Los objetos que eran de interés para el artículo de RR+17, eran aquellos que podían ser candidatos a YSOs masivos. Gutermuth et al. (2008, 2009) y Ragan et al. (2012, 2013) después de identificar y estudiar YSOs, encontraron una relación entre los objetos identificados como YSOs y su emisión en 24 μm con datos del telescopio espacial Spitzer. Estos autores sugieren que un buen criterio para la identificación de YSOs era incluir un valor en esta banda. Siguiendo este método RR+17 usó filtros formados por la combinación de colores de GLIMPSE y MIPS GAL 24 μm , para seleccionar los candidatos a YSOs. En su muestra final se encuentran 125 objetos embebidos a la nube molecular MC76, la cual está asociada a la fuente IRAS 18236-1205, que tiene fuentes puntuales dentro de una densidad columnar $N_{\text{H}_2} = 1 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$.

La nube molecular galáctica MC76 cuenta con dos tipos de objetos, las fuentes puntuales infrarrojas tipo M y G. Los tipos de tipo M (99 YSOs) tienen fotometría medida en 24 μm , mientras que los objetos G carecen de esta. Al haber indentificado emisión de 24 μm por encima de un umbral en 84 de las fuentes M, se les considera potencialmente YSOs potencialmente masivos. Estos objetos fueron seleccionados y caracterizados en RR+17.

En el presente trabajo es de interés comparar parámetros físicos derivados del ajuste de modelo de SED usados en la caracterización de YSOs, con respecto a los resultados obtenidos por Retes-Romero et al. [24] y Retes Romero [23]. Usando el programa *SEDfitter* publicado por Robitaille

et al. [25, 26], se les ajustó un mejor modelo de SED a los candidatos a YSOs seleccionados por RR+17

En la tabla 2.1 se observa una muestra de los objetos y los flujos del cercano y medio infrarrojo que fueron usados para el ajuste de este trabajo (la tabla completa es mostrada en los anexos), la primera fila contiene el identificador del objeto, la segunda y tercera sus coordenadas galácticas, a partir de la cuarta a la sexta columna se encuentran los flujos del cercano infrarrojo de 2MASS utilizados: banda J ($1.23 \mu\text{m}$), banda H ($1.66 \mu\text{m}$), banda K ($2.15 \mu\text{m}$). De la columna 7 a 10 tenemos los flujos del medio infrarrojo correspondientes a IRAC Spitzer: $3.6 \mu\text{m}$, $4.5 \mu\text{m}$, $5.8 \mu\text{m}$, $8.0 \mu\text{m}$. En la última fila tenemos los flujos correspondientes al lejano infrarrojo de Spitzer MIPS $24 \mu\text{m}$.

ID	GLON (deg)	GLAT (deg)	J-2MASS (Jy)	H-2MASS (Jy)	K-2MASS (Jy)	3.6 μ m (Jy)	4.5 μ m (Jy)	5.8 μ m (Jy)	8 μ m (Jy)	24 μ m (Jy)
M1	19.41848	0.12182	3.38E-1 $\pm$ 1.00E-10	7.43E-4 $\pm$ 1.00E-10	7.00E-3 $\pm$ 2.57E-4	2.05E-2 $\pm$ 5.95E-5	2.41E-2 $\pm$ 4.98E-5	4.45E-2 $\pm$ 1.04E-4	8.71E-2 $\pm$ 2.43E-4	9.30E-2 $\pm$ 4.77E-3
M2	19.40581	0.12191	6.20E-3 $\pm$ 3.79E-4	5.80E-2 $\pm$ 1.79E-3	1.45E-1 $\pm$ 3.38E-3	7.32E-2 $\pm$ 2.45E-4	4.51E-2 $\pm$ 1.00E-4	7.26E-2 $\pm$ 1.82E-4	1.08E-1 $\pm$ 3.11E-4	3.66E-2 $\pm$ 1.85E-3
M3	19.24238	0.10355	8.93E-4 $\pm$ 6.20E-2	2.21E-3 $\pm$ 1.20E-4	1.08 $\pm$ 2.65E-3	2.36E-3 $\pm$ 1.67E-5	3.12E-3 $\pm$ 1.84E-5	8.97E-4 $\pm$ 3.65E-5	2.58E-4 $\pm$ 3.44E-6	8.23E-3 $\pm$ 4.14E-4
M4	19.31591	0.09626	4.86E-3 $\pm$ 4.75E-4	6.36E-3 $\pm$ 3.65E-4	1.13E-2 $\pm$ 6.57E-4	3.74E-2 $\pm$ 7.72E-5	3.52E-2 $\pm$ 7.59E-5	3.20E-2 $\pm$ 7.20E-5	2.97E-2 $\pm$ 1.07E-4	1.92E-2 $\pm$ 9.56E-4
M5	19.33389	0.09009	1.26E-3 $\pm$ 9.50E-5	4.11E-3 $\pm$ 2.47E-4	9.65E-3 $\pm$ 1.67E-4	1.18E-2 $\pm$ 3.24E-5	9.26E-3 $\pm$ 3.46E-5	1.43E-2 $\pm$ 7.33E-5	3.67E-2 $\pm$ 1.81E-4	3.63E-2 $\pm$ 1.83E-4
M6	19.44327	0.08959	4.36E-2 $\pm$ 8.92E-4	2.29E-3 $\pm$ 6.75E-3	3.68E-3 $\pm$ 6.00E-3	3.08E-1 $\pm$ 1.25E-3	2.10E-1 $\pm$ 8.59E-4	1.63E-1 $\pm$ 6.87E-4	1.07E-1 $\pm$ 4.61E-4	2.03E-2 $\pm$ 1.02E-3
M7	19.42995	0.08773	6.40E-3 $\pm$ 3.48E-4	7.31E-2 $\pm$ 2.22E-3	2.51E-1 $\pm$ 1.00E-10	4.33E-1 $\pm$ 1.23E-3	3.12E-1 $\pm$ 1.36E-3	2.71E-1 $\pm$ 1.24E-3	1.57E-1 $\pm$ 7.20E-4	2.80E-2 $\pm$ 7.40E-3
M8	19.30055	0.08664	2.29E-3 $\pm$ 8.0E-5	2.73E-3 $\pm$ 1.08E-4	2.79E-3 $\pm$ 1.00E-10	3.88E-2 $\pm$ 8.04E-5	8.60E-2 $\pm$ 3.11E-4	8.60E-2 $\pm$ 3.11E-4	9.82E-2 $\pm$ 4.18E-4	2.46E-2 $\pm$ 1.24E-3
M9	19.28698	0.08437	...	...	...	5.60E-3 $\pm$ 2.38E-5	2.08E-2 $\pm$ 4.23E-5	2.78E-2 $\pm$ 9.23E-5	1.14E-3 $\pm$ 7.58E-4	2.03E-2 $\pm$ 1.02E-3
M10	19.45285	0.08293	4.28E-3 $\pm$ 9.50E-5	1.97E-2 $\pm$ 5.50E-4	3.10E-2 $\pm$ 5.00E-4	2.36E-2 $\pm$ 4.63E-5	1.88E-2 $\pm$ 5.67E-5	1.36E-2 $\pm$ 5.54E-5	6.61E-3 $\pm$ 5.96E-5	6.02E-3 $\pm$ 2.97E-4
M11	19.23370	0.08105	5.69E-4 $\pm$ 1.00E-10	1.16E-2 $\pm$ 6.00E-4	8.48E-2 $\pm$ 3.36E-3	2.54E-1 $\pm$ 1.00E-3	2.53E-1 $\pm$ 1.06E-3	2.52E-1 $\pm$ 1.14E-3	1.41E-1 $\pm$ 6.35E-4	2.40E-2 $\pm$ 1.20E-3
M12	19.4263	0.07791	..	...	...	2.54E-1 $\pm$ 7.12E-5	2.30E-1 $\pm$ 9.54E-4	1.86E-1 $\pm$ 7.99E-3	1.01E-1 $\pm$ 4.32E-4	8.94E-3 $\pm$ 4.43E-4
M13	19.31205	0.06743	5.72E-2 $\pm$ 1.15E-3	9.02E-2 $\pm$ 3.12E-3	7.76E-2 $\pm$ 1.38E-3	3.88E-2 $\pm$ 8.04E-5	3.36E-2 $\pm$ 7.21E-5	2.15E-2 $\pm$ 9.23E-5	2.58E-4 $\pm$ 3.63E-6	1.72E-1 $\pm$ 8.07E-3
M14	19.30643	0.06460	...	...	...	1.68E-3 $\pm$ 1.42E-5	5.58E-3 $\pm$ 2.48E-5	5.87E-3 $\pm$ 5.47E-5	2.58E-4 $\pm$ 3.63E-6	1.53 $\pm$ 1.55E-1
M15	19.30266	0.06440	8.60E-4 $\pm$ 4.70E-5	5.80E-4 $\pm$ 1.00E-10	5.67E-4 $\pm$ 1.00E-10	1.19E-3 $\pm$ 1.24E-5	2.26E-3 $\pm$ 1.66E-5	5.50E-5 $\pm$ 6.27E-7	2.58E-4 $\pm$ 3.63E-6	3.83E-2 $\pm$ 1.89E-3
M16	19.25159	0.06779	...	...	...	2.04E-3 $\pm$ 1.43E-5	3.09E-3 $\pm$ 2.59E-5	3.70E-3 $\pm$ 4.61E-5	2.58E-4 $\pm$ 3.63E-6	8.01E-4 $\pm$ 3.97E-5
M17	19.28164	0.06782	1.35E-4 $\pm$ 1.00E-10	5.67E-3 $\pm$ 2.00E-4	2.89E-2 $\pm$ 6.86E-4	4.29E-2 $\pm$ 8.99E-5	3.01E-2 $\pm$ 6.38E-5	2.71E-2 $\pm$ 8.96E-5	1.36E-2 $\pm$ 1.18E-4	9.28E-3 $\pm$ 4.63E-4
M18	19.22086	0.06288	5.23E-2 $\pm$ 1.40E-3	3.80E-1 $\pm$ 9.00E-3	7.17E-1 $\pm$ 1.30E-2	5.16E-1 $\pm$ 1.51E-3	3.39E-1 $\pm$ 1.49E-3	2.86E-1 $\pm$ 1.32E-3	1.53E-1 $\pm$ 6.99E-4	1.01E-2 $\pm$ 5.10E-4
M19	19.46007	0.06132	2.65E-4 $\pm$ 1.00E-10	6.16E-4 $\pm$ 1.00E-10	4.00E-3 $\pm$ 1.76E-4	3.05E-2 $\pm$ 8.92E-5	5.0E-2 $\pm$ 2.20E-4	5.98E-2 $\pm$ 2.76E-4	4.62E-2 $\pm$ 2.11E-4	5.96E-2 $\pm$ 3.01E-3
M20	19.27979	0.06138	...	...	...	4.33E-2 $\pm$ 9.09E-5	7.22E-3 $\pm$ 2.00E-4	7.96E-2 $\pm$ 3.02E-4	3.60E-2 $\pm$ 1.33E-4	1.30E-2 $\pm$ 6.45E-4
M21	19.27361	0.05029	6.45E-2 $\pm$ 1.80E-3	2.55E-3 $\pm$ 4.83E-3	3.16E-3 $\pm$ 3.00E-4	1.14E-1 $\pm$ 4.03E-4	9.61E-2 $\pm$ 3.52E-4	8.33E-2 $\pm$ 3.18E-4	5.16E-2 $\pm$ 1.33E-4	1.53E-2 $\pm$ 7.79E-4

Tabla 2.1: Flujos en el cercano, medio y lejano infrarrojo de los YSOs seleccionados en la nube molecular galáctica MC76. Se muestran los primeros 21 objetos para mostrar la información fotométrica disponible para los YSOs. En el apéndice A se muestra la selección completa de YSOs.

[RML2017]MC76_M86	019.22069	+00.06235	1	1	1	1	4.96E+02	1.80E+01	3.44E+02	1.10E+01	2.90E+02	8.50
[RML2017]MC76_M88	019.39673	-00.13246	1	1	1	1	1.56E+02	5.50	1.02E+02	4.40	1.06E+02	3.40
[RML2017]MC76_M90	019.47559	-00.10701	1	1	1	1	4.54E+02	2.45E+01	4.41E+02	1.30E+01	3.04E+02	8.50
[RML2017]MC76_M92	019.38808	-00.09414	1	1	1	1	2.51E+02	9.00	1.84E+02	7.00	1.91E+02	4.00

Figura 2.2: Ejemplo de la base de datos 1, la primera fila contiene el nombre del YSO, la segunda y tercera fila tienen las coordenadas, las siguientes 10 filas contienen las banderas, a partir de la fila 14 se encuentran los flujos y sus errores.

En este estudio algunos objetos aún carecían de flujos en el cercano infrarrojo, 2MASS, esta falta de datos se ve indicada en la tabla con puntos suspensivos, pero afortunadamente en esta ocasión, los objetos que sí tienen con estos flujos, cuentan con las tres bandas.

Para asegurar un buen ajuste en las SEDs de cada objeto también se añadieron los filtros de WISE, en específico las bandas de W3 ($12 \mu\text{m}$) y W4 ($22 \mu\text{m}$), IRAS Y SCUBA. Solo para aquellos objetos cuyos datos incluían estos flujos y eran beneficiosos para asegurar un mejor ajuste.

2.3. Ajuste del modelo numérico de SED a los YSOs en MC76

Para hacer el ajuste del modelo numérico de SED a cada YSO, se usaron los flujos en lejano, medio y cercano infrarrojo, de los instrumentos SCUBA (Submillimetre Common-User Bolometer Array), IRAS (por las siglas Infrared Astronomical Satellite), MIPS (Multiband Imaging Photometer for SIRTf), IRAC (Spitzer space telescope Infrared Array Camera) y 2MASS (two micron all sky survey, respectivamente). Los datos en las bandas de IRAC y $24 \mu\text{m}$ de MIPS, usadas para el ajuste con *SEDfitter* provienen de Retes-Romero 2017. Para obtener los flujos del cercano y lejano infrarrojo se hizo uso de SIMBAD ¹, que contiene un visor fotométrico, con la cual es posible encontrar la fotometría de un objeto, esto nos dará todos los flujos fotométricos que hay para unas coordenadas alrededor de un radio dado, en este caso se usó un radio de 5 segundos de arco ya que se consideró que este es el tamaño correcto para obtener solo los datos pertenecientes al objeto de interés, pero este radio, para algunos objetos se llegó a ampliar hasta 8 segundos de arco.

Es necesario usar el paquete de python *SEDfitter* ² que desarrollo Robitaille et al. (2007). Para el ajuste de los SEDs es necesario brindar al programa una base de datos que incluya: nombre del objeto, coordenadas, banderas, los flujos y los errores de estos. Los flujos y sus errores deben de estar en miliJansky (mJy), dará dos columnas por cada filtro, una con el valor del flujo y la otra con su respectivo error. Para un mejor ajuste hay que designar la bandera para cada dato (tabla 2.2), estas banderas indican al programa si el dato es válido, es decir el programa tomará el 100 % del valor y su error, cuando es necesario establecer a que los modelos no deben sobrepasar cierto dato, se selecciona a este como cota superior y por último al introducir un dato como cota inferior se permitirán los modelos superiores a este pero se penaliza el χ^2 de estos datos. Todo esto se ve ilustrado en la imagen 2.2

Igualmente debe llenarse otra base de datos (base de datos 2, imagen 2.3) en la que se especificarán los filtros a los que corresponde cada flujo que contenga la anterior base de datos en el orden en el que se colocaron los flujos. Asimismo se deben indicar las aperturas correspondientes a cada filtro. El valor de las aperturas para cada flujo se seleccionó de acuerdo a lo que señala la documentación de cada instrumento [20, 11, 22]. Se utilizaron 3 segundos de arco para las bandas correspondientes a IRAC Y 2MASS, 4.5 segundos de arco para MIPS, 6 segundos de arco para SCUBA y en el caso de IRAS se usó una apertura de hasta 10 segundos de arco. También es necesario brindar dos intervalos que correspondan a la distancia a la que se encuentran nuestros YSOs y la extinción ambiental que los rodea. Para definir la primera se usó un intervalo de [2.2 a 2.8]

¹<https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>

²<https://sedfitter.readthedocs.io/en/stable/>

La nube molecular galáctica MC76 y su selección de objetos estelares jóvenes

2.3 Ajuste del modelo numérico de SED a los YSOs en MC76

Instrumento	Banda	Rango espectral
2MASS	J 1.23 μm	cercano Infrarrojo
	H 1.66 μm	cercano Infrarrojo
	K 2.15 μm	cercano Infrarrojo
IRAC	I1 3.6 μm	medio Infrarrojo
	I2 4.5 μm	medio Infrarrojo
	I3 5.8 μm	medio Infrarrojo
	I4 8.0 μm	medio Infrarrojo
MIPS	M1 24 μm	lejano infrarrojo
WISE	W3 12 μm	lejano infrarrojo
	W4 22 μm	lejano infrarrojo
IRAS	S3 60 μm	lejano infrarrojo
	S4 100 μm	lejano infrarrojo
SCUBA	N1 350 μm	submilimétrico
	N2 450 μm	submilimétrico
	N4 850 μm	submilimétrico

Tabla 2.2: Tabla de los flujos que se usaron para el ajuste de los modelos SED, el instrumento al que pertenecen, su banda y el rango espectral al que pertenecen.

Kpc, mientras que para definir la extinción fue necesario cambiar entre tres intervalos dependiendo de la ubicación espacial del objeto en la nube, se define un intervalo de $[10, 20]$ magnitudes para los objetos que se encuentran en una zona de baja extinción, $[10, 25]$ magnitudes para aquellos en las orillas de las nubes y $[20, 30]$ magnitudes para aquellos en las zonas de alta extinción.

Existe una sintaxis para la selección del modelo, este consiste de una tupla que contiene una cadena de un solo carácter y un valor. Esta es usada para indicar cuantos modelos trazar, generar, conservar, etc. El carácter indicará el tipo de selección que se está realizando y el número cuantifica la selección. En este trabajo se seleccionó la tupla “(‘F’, 3)” que selecciona todos los modelos con $\chi^2 - \chi_{best}^2$, valor por punto de datos por debajo de un umbral dado, este caso <3 , donde χ^2 es el valor por punto de datos, como sugiere Robitaille et al. (2006).

Bandera	Dato	Símbolo
0	no válido	—
1	válido	●
2	cota inferior	▲
3	cota superior	▼

Tabla 2.3: Banderas y su representación en los modelos de SEDs

En el SED resultante, la línea negra es el mejor ajuste, las líneas grises muestran todos los modelos que también se ajustan a los datos definidos por la tupla (fig 3.2, 3.3), según se haya seleccionado la bandera del dato, será el símbolo que aparezca en el lugar correspondiente a dicho flujo, según se haya seleccionado. Cada flujo y bandera fueron introducidos uno por uno para poder modificar las banderas según el ajuste lo necesitara, no se utilizaron cotas inferiores y en casos extremos se eliminaron datos cuando estos alteraban de forma extrema el ajuste.

Al iniciar el ajuste de los datos de un YSO solo se tomaron en cuenta aquellos que pertenecían a IRAC y a 24 μm , era necesario observar el comportamiento de la SED con solo estos 5 flujos para saber cómo proceder y donde podría existir un dato problemático más adelante. Era preferente que el χ^2 de estos ajuste fuera pequeño, eso nos aseguraba que al añadir más datos no habría más complicaciones, también se esperaba que el ajuste de estos cinco datos se apegaba a la línea correspondiente al “mejor ajuste”. Los datos de 2MASS y WISE eran después ajustados uno por

La nube molecular galáctica MC76 y su selección de objetos estelares jóvenes

2.3 Ajuste del modelo numérico de SED a los YSOs en MC76

```
import os
import glob
from astropy import units as u
from sedfitter import (fit, plot, plot_params_1d, plot_params_2d,
                      write_parameters, write_parameter_ranges)
from sedfitter.extinction import Extinction
from sedfitter import filter_output

# Define path to models
model_dir = './models_r06'

# Read in extinction law. We read in columns 1 (the wavelength in microns) and
# 4 (the opacity in cm^2/g)
extinction = Extinction.from_file('kmh94.par', columns=[0, 3],
                                wav_unit=u.micron, chi_unit=u.cm**2 / u.g)

# Define filters and apertures
filters = ['I1', 'I2', 'I3', 'I4', 'H1', 'ZJ', '2K', '2H', 'XC', 'XE', 'BR', 'BB', 'BI']
apertures = [3., 3., 3., 3., 6., 3., 3., 3., 3., 3., 3., 3.] * u.arcsec

# Run the fitting
fit('M25nuda', filters, apertures, model_dir,
    'prueba_M25.fitinfo',
    extinction_law=extinction,
    distance_range=[2.2, 2.8] * u.kpc,
    av_range=[10., 20.])

# For the remaining commands, we always select the models with chi^2-chi_best^2
# per datapoint less than 3.
s_f = ('F', 3)
```

Figura 2.3: Ejemplo script de python en donde se especifican la identidad de los filtros y los radios de las aperturas de los filtros que se le suministraron a la base datos 1

uno para así vigilar el cambio que sufre el SED con cada nuevo flujo, en estas nuevas corridas se esperaba que la línea correspondiente mejor ajuste de la SED siguiera los datos o que estos estuvieran por debajo de ella, también se observaba con el aumento del χ^2 . En los casos en los que el χ^2 subía más de 4 cifras, se cambiaba la bandera del dato a cota superior si el error persistía se cambiaba la bandera a 0, indicando que el dato no era válido. Lo mismo se hacía cuando un dato desviaba la trayectoria de la SED o se alejaba demasiado de ella.

Existían objetos cuya fotometría incluía datos del lejano infrarrojo, como son IRAS y del submilimétrico, SCUBA. En el caso de los objetos con IRAS se eligió colocarlos como cotas superiores, debido a su amplia apertura, su existencia en el SED no se descarta por completo ya que en algunos casos funcionaba como indicador o limitador de la SED, pero intervenían de manera negativa con la SED cuando se les consideraba dato válido.

Capítulo 3

Resultados del ajuste de los modelos de SED y su discusión

3.1. Clasificación de YSOs

Para clasificar a los YSOs embebidos en la nube molecular MC76, aquí se especifica cómo hemos usado los ajustes de los modelos SEDs obtenidos con el ajuste. En este trabajo nos basamos en la clasificación de las etapas evolutivas descritas por Estalellas & Anglada y por Lada [13, 21, 18]. Se decidió que para clasificar los SEDs obtenidas en esta investigación se debía observar sus características gráficas como son el inicio y el final de estos además de los picos de emisión y la tendencia de los flujos. También se tomaron en cuenta los parámetros resultantes del ajuste. En especial los que corresponden al acrecentamiento de la envoltura y la masa de la protoestrella. La clasificación así realizada es denominada clasificación MJ y se compone por clase 1, clase 2 y clase 3.

Las SEDs de los objetos clase 1 se conforman de dos componentes (ver sección 1.6), la primera se forma por los flujos del cercano y medio infrarrojo, esta crece conforme aumenta la longitud de onda alcanzando el pico de emisión en los flujos de IRAC en especial entre $4.5 \mu\text{m}$ y $8.0 \mu\text{m}$, justo después de estas bandas la SED desciende a las $10 \mu\text{m}$. En ocasiones este descenso es observado como una fuerte absorción alrededor de $10 \mu\text{m}$, la cual es incluida en los modelos de SED. Esta característica crea un SED con una componente en el cercano y mediano infrarrojo, mientras que otra muy pronunciada se encuentra en el lejano IR y submilimétrico. La segunda componente comienza a partir del descenso en el flujo de las $10 \mu\text{m}$, se forma con los flujos del medio y lejano infrarrojo, conforme aumenta la longitud de onda la SED crece, esta componente tiene su pico de emisión entre las $60 \mu\text{m}$ y $80 \mu\text{m}$, la SED acabará después de las $1000 \mu\text{m}$.

Los YSOs clasificados como clase 2 comienzan su SED entre las $0.8 \mu\text{m}$ y $1 \mu\text{m}$ ascienden con los flujos del cercano IR, entre mejor sea el ajuste el inicio de la SED tenderá a la $1 \mu\text{m}$, el pico de emisión está alrededor de los flujos de $2.15 \mu\text{m}$ (banda K de 2MASS) y $3.6 \mu\text{m}$ de IRAC para inmediatamente empezar a descender, este descenso terminará en las $7 \mu\text{m}$ para formar un segundo pico de emisión en $8 \mu\text{m}$, posteriormente conforme aumente la longitud de onda la SED desciende hasta acabar. Finalizará de una forma paulatina alrededor de las $40 \mu\text{m}$, o abruptamente a partir de las $24 \mu\text{m}$. En algunos casos, existe la presencia de una débil componente en el lejano IR.

Los objetos de clase 3 serán aquellos cuya SED inicia en la región espectral del visible, $0.1 \mu\text{m}$, tienen un único pico de emisión en el cercano infrarrojo, entre $1.2 \mu\text{m}$ y $2.16 \mu\text{m}$, posteriormente desciende conforme la longitud de onda aumenta y terminará antes de llegar a las $100 \mu\text{m}$.

Resultados del ajuste de los modelos de SED y su discusión

3.1 Clasificación de YSOs

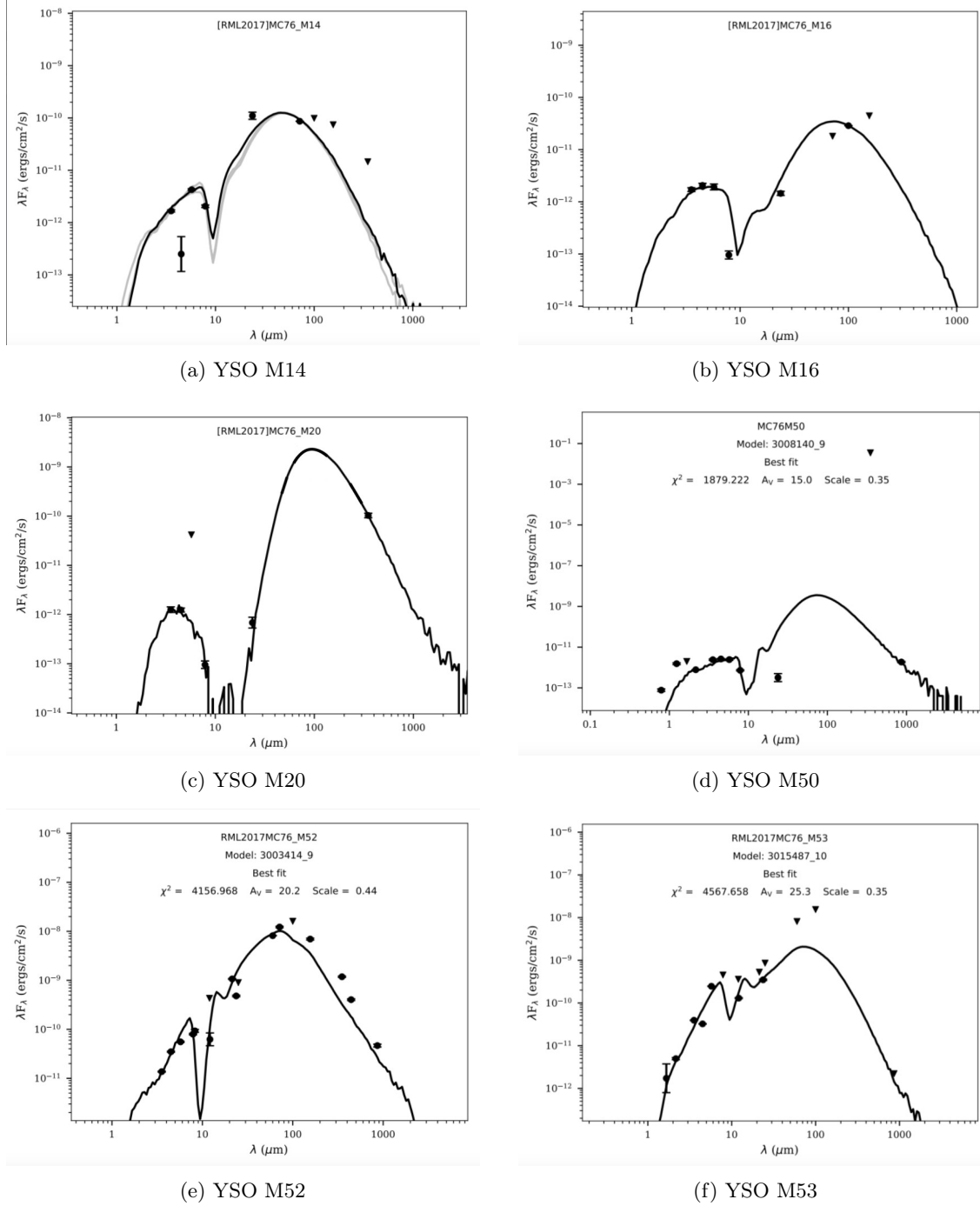


Figura 3.1: Distribución espectral de energía de YSOs clase 1. Los símbolos muestran los flujos medidos en el rango espectral del cercano infrarrojo hasta el submilimétrico y milimétrico. Los diferentes tipos de símbolos son descritos en la sección 2.2.1. La línea negra muestra el mejor ajuste del modelo de SED, mientras que las líneas grises muestran potenciales ajustes de modelo de SED. La discusión de los resultados obtenidos de cada SED es dado en la sección 3.2.

Resultados del ajuste de los modelos de SED y su discusión
3.1 Clasificación de YSOs

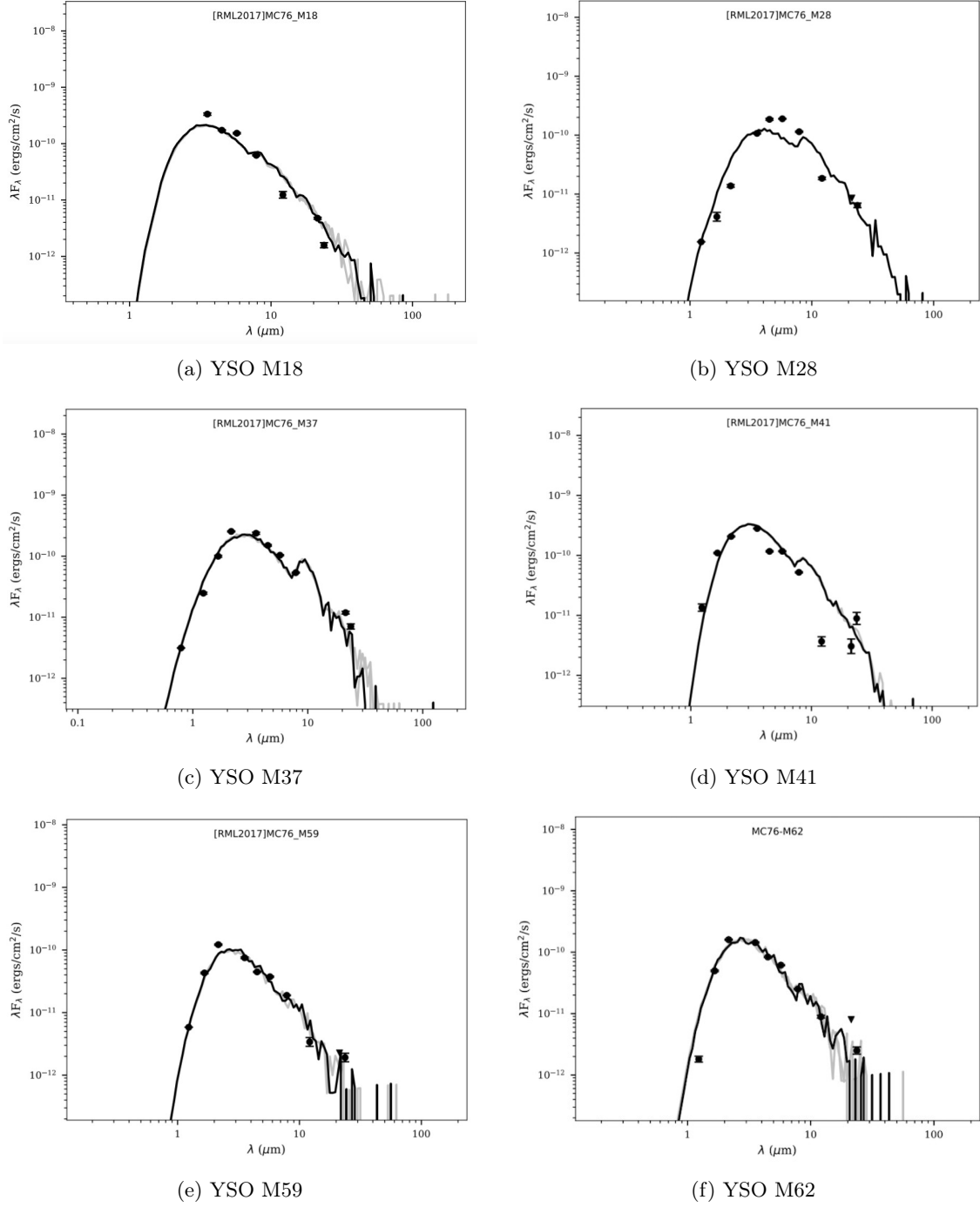
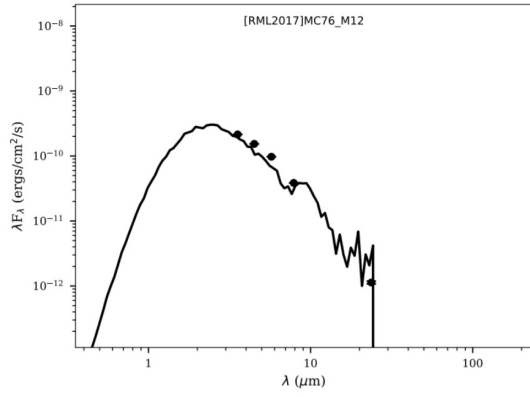
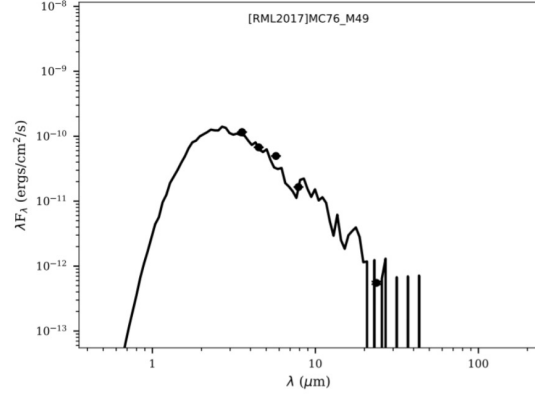


Figura 3.2: Distribución espectral de energía de YSOs clase 2. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1.

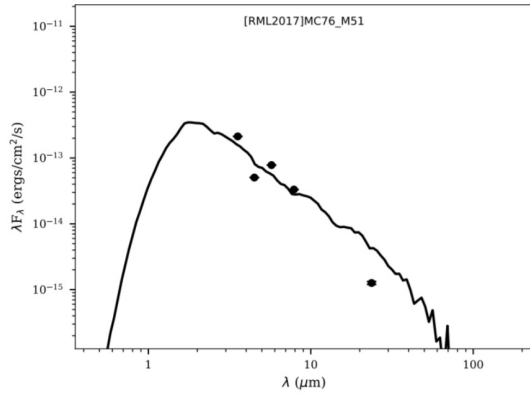
Resultados del ajuste de los modelos de SED y su discusión
3.1 Clasificación de YSOs



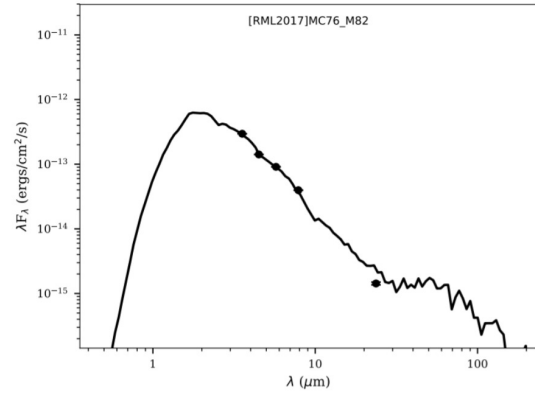
(a) YSO M12



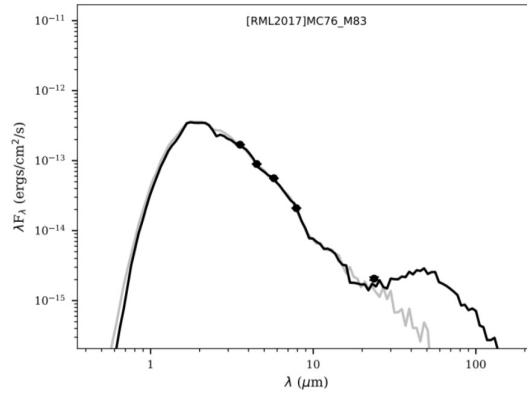
(b) YSO M49



(c) YSO M51



(d) YSO M82



(e) YSO M83

Figura 3.3: Distribución espectral de energía de YSOs clase 3. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1.

3.2. Parámetros físicos de MC76

Como ya se describió en la sección 1.7 el programa procesa la información fotométrica del YSO ajusta los datos proporcionados con una ley de extinción y los modelos ya existentes para brindar la SED del mejor ajuste a la cual le corresponden dos archivos: “*Parameters*” y “*Parameters Range*”. Ambos archivos contiene los parámetros que se mencionaron en la tabla 1.1, primero solo contiene los valores correspondientes al “mejor ajuste” (líneas negras en las figuras 3.1, 3.2, 3.3), mientras que el segundo enlista los valores mínimo, máximo y mejor ajuste (las líneas grises y negras en las figuras 3.1, 3.2, 3.3), en la tabla 3.1 observamos una lista de los parámetros obtenidos en el primer archivo, para algunos de los YSOs estudiados en este trabajo. Las primera columna contiene el nombre del objeto, la segunda tiene el χ^2 del ajuste de modelos SED, la tercera contiene el A_v correspondiente al mejor ajuste, de columna cuatro a nueve tenemos una muestra de los parámetros resultantes del ajuste: masa de la estrella, en $M_\odot$, radio del núcleo en $R_\odot$, la temperatura del núcleo en K, el acrecentamiento de la envoltente en $M_\odot \text{yr}^{-1}$, masa del disco en $M_\odot$ y luminosidad bolométrica en $L_\odot$. Algo que notar en estos ajuste es la falta de acrecentamiento de la envoltente que muestran los YSOs clasificados como clase 2 y 3, esto se debe al programa *SEDfitter*, se aclara en Robitaille et al. (2006) que los valores del rango de la masa de acrecentamiento de la envoltente se ajustaron para valores estimados para objetos tanto de baja masa como de alta masa, pero en casos donde el valor cae por debajo de $10^{-9} M_\odot \text{yr}^{-1}$, se descarta la envoltente y se considera que el YSO es parte de un modelo compuesto solo por un disco de acrecentamiento. Con un valor máximo de 10×10^{-4} [21], sin embargo en esta investigación se alcanzaron mayores valores.

En la figura 3.1 podemos observar 6 SEDs representativos YSOs clasificados como clase 1, todos estos provenientes de zonas de extinción visual en un intervalo de [15, 30] mag. La componente de la derecha es la que corresponde al exceso de infrarrojo, mientras que la de la izquierda corresponde a la componente estelar del YSO. Para los objetos de esta clase es primordial que tengan la componente de la derecha, ya que esta nos indica que aún existe material interestelar rodeando a la protoestrella y disco circunestelar. Por está razón es indispensable que esta sección del SED esté justificada por los flujos del medio y lejano infrarrojo. Aunque esta es una característica que comparten gran parte de los YSOs en esta clasificación, hay algunos objetos que carecen de los flujos necesarios, por lo cual decimos que cuentan una “falsa envoltente” que podría ser descartada o justificada con nueva información en estas bandas. Sin embargo, por el momento basta con que los flujos de MIPS (24 μm) y WISE (22 μm) tiendan a elevarse con la línea del mejor ajuste, como se observa en las seis SEDs de la fig 3.1, para considerar que el YSO es un candidato a clase 1. En esta pequeña muestra los parámetros indican dos YSOs con bajas masas, M14 con 1 $M_\odot$ y M16 con 2 $M_\odot$, dos tienen masas altas, M50 8 $M_\odot$ y M52 9 $M_\odot$, el resto tiene masas de 5 $M_\odot$ y 6 $M_\odot$. Aunado a las masas nos fijamos en la acrecentación de la envoltente y notamos los valores de la mayoría son altos, $10^{-3} M_\odot \text{yr}^{-1}$ y $10^{-4} M_\odot \text{yr}^{-1}$, mientras que aquello que tiene valores bajos, $10^{-5} M_\odot \text{yr}^{-1}$, aún se pueden tomar como altos, considerando que el límite es $10^{-9} M_\odot \text{yr}^{-1}$ [26], es decir se puede interpretar que todos estos objetos aún tiene bastante material interestelar que acrecentar, en particular M20, M50, que tienen valores bajos de acrecentación, lo que puede indicar que aún están embebidos en su material interestelar.

Los seis YSO expuestos en la fig 3.1, tienen los tres grupos de infrarrojo, cercano, medio y lejano, en 5 de ellas se puede observar las cotas superiores que marcan la existencia de flujos correspondientes a IRAS, que por su antigüedad poseen una apertura muy amplia que deja entrar demasiada información externa al objeto de interés y por lo tanto agrega un gran error al ajuste, sin embargo, siguen de ayuda para el buen ajuste de la componente de la derecha, como en los casos de M14, M16, M52 y M53, y en el caso de M50 delimita el rango de flujo que puede crecer la SED para este objeto. Estos seis objetos estan en la clase MJ 1

En la figura 3.2 se exponen 6 SED de YSO de clase MJ 2, estos parecieran contar con solo una componente, la que corresponde al núcleo del YSO, pero como se mencionó al inicio de esta sección, cuenta con un pico que señala la existencia de un disco circunestelar y de la restante envoltente

que sigue siendo acrecentada, estas deben tener poco exceso de infrarrojo, lo cual se nota en la falta de los flujos del lejano infrarrojo, que notamos no hacen falta por la tendencia de los flujos del medio infrarrojo a descender, incluso como en casos como los de M59 y M62 repentinamente después de los flujos de $24\ \mu\text{m}$. 43 YSOs de la muestra original fueron clasificados como clase dos, de estos se muestran 6 en la figura 3.2, todos estos pertenecientes a zonas de extinción de $[15, 30]$ mag. Estos YSOs tienen masas arriba de las $8\ M_{\odot}$, con las más altas correspondientes a M59 y M62 con $15\ M_{\odot}$ y la menor de $8\ M_{\odot}$ perteneciente al ajuste de M28. En estos YSOs carecemos de valor de acreción de la envoltura, lo que según Robitaille deja al modelo con solo un disco circumestelar que sigue suministrando de material al núcleo.

Los objetos de clase MJ 3 solamente poseen los flujos perteneciente a IRAC y a $24\ \mu\text{m}$ de MIPS. Según la literatura estos objetos deberían tener una SED similar a la de un cuerpo negro además poseer emisión en el visible y carecer de emisión en el cercano y medio infrarrojo, debido a la escasez de polvo circumestelar. Aquí hay que tener en cuenta que la descripción anterior fue hecha para estrellas de baja masa y los mecanismos que se esperan de una estrella de masa alta son mayores.

En general, los parámetros obtenidos con el ajuste de los modelos SED se observa que en la mayoría de los casos, la acrecentamiento del disco es mayor que la de la envoltura lo cual es físicamente consistente, pero ambas son pequeñas, en el caso del acrecentamiento del disco, en ocasiones, insignificante, esto nos lleva a que la luminosidad bolométrica también debe ser pequeña, aunque lo que más limita a la luminosidad es el ángulo de observación, ya que le es difícil distinguir un disco de canto o una protoestrella joven con una envoltura descendente y esto da a lugar a dos diferentes componentes de luminosidad para la luminosidad bolométrica.

Los modelos de Robitaille et al. (2006) cubren un gran número de parámetros físicos obtenidos, pero estos modelos son para protoestrellas de baja masa, lo que hace que carezcan de algunas propiedades que se cree son importantes para el desarrollo de fotosferas masivas o los parámetros del modelo del núcleo turbulento o la presencia de un disco gaseoso ópticamente grueso dentro de la frontera de destrucción de polvo [29]. Todo lo anteriormente dicho influyen en los resultados especialmente en los obtenidos en el disco de acrecentamiento y la envoltura.

Los objetos que se ajustaron en este trabajo, como se mencionó anteriormente, han sido revisados en dos trabajos anteriores, RR+17 y RR17. En estos, se obtuvieron propiedades físicas de los objetos que se encuentran en la zona central de la nube molecular, más específicamente los objetos que están asociados a la presencia de una IRDC, G19.36-0.02. A Continuación se hará una comparación de los resultados de 9 YSOs que se analizaron a detalle en RR17 y RR+17 con respecto a los obtenidos en este trabajo con *SEDfitter*.

ID	χ^2	A_v (mag)	$M_{\star}$ ($M_{\odot}$)	$R_{\star}$ ($R_{\odot}$)	$T_{\star}$ (K)	$\dot{M}_{env}$ ($M_{\odot}yr^{-1}$)	M_{disk} ($M_{\odot}$)	$\log(L_{bol})$ ($L_{\odot}$)	CLASE L	CLASE MJ
M1	417	25	3	19	4199	1.27E-03	4.25E-02	2.01	I	1
M2	495	10	6	19	4724	7.13E-05	1.75E-02	2.20	I	1
M3	7031	15	5	18	4680	1.17E-04	1.95E-01	2.16	III	3
M4	34	10	3	6	6500	0	3.73E-03	1.72	I	2
M5	381	10	2	8	4501	1.39E-06	9.78E-04	1.33	II	1
M6	2165	10	10	4	25160	0	9.227E-08	3.74	II	2
M7	1171	10	9	4	24070	0	5.31E-07	3.61	II	2
M9	485	25	1	11	3945	1.47E-04	7.73E-03	1.461	I	1
M10	1940	10	4	6	7642	0	2.65E-05	2.01	I	1
M11	725	24	12	4	27720	0	3.03E-08	3.99	II	2
M12	11689	10	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	III	3
M13	6956	16	5	12	5225	9.47E-07	4.48E-05	2.01	I	1
M14	78	24	1	12	4323	1.67E-05	1.85E-01	0.88	I	1
M15	70	18	1	16	4468	1.15E-05	6.08E-04	1.94	I	1
M16	212	15	2	8	4385	5.45E-05	1.79E-02	1.35	I	1
M17	2282	25	5	18	4561	2.74E-05	6.18E-04	2.12	II	1
M18	518	29	10	4	25160	0	9.23E-08	3.74	II	2
M19	75	18	4	2	13650	0	8.34E-02	2.32	II	3
M20	10	15	6	38	4250	1.47E-03	3.58E-02	2.65	I	1
M21	9724	15	7	3	20330	0	7.30E-08	3.19	II	2

Tabla 3.1: Parámetros físicos de YSOs obtenidos usando el ajuste de los modelos numéricos de SED

3.3. Comparación de parámetros físicos de los YSOs

Derivado del mejor ajuste de modelo de SED en cada uno de los YSOs, se obtienen una lista con los parámetros físicos (ver tabla 3.1) que caracterizan al YSO como son: masa, temperatura y luminosidad de la fuente estelar central, así como masa, luminosidad y tasa de acrecentamiento del disco y envolvente circunestelar, además de otros parámetros como ángulos de apertura.

En trabajos previos (Retes et al. (2011), RR17, RR+17), se han caracterizado los YSOs de la nube molecular MC76 usando métodos diferentes a los mostrados en el presente trabajo para obtener parámetros físicos, en particular en los parámetros de masa estelar y luminosidad. A fin de verificar los resultados de los ajustes hechos en este trabajo, se procede a realizar una comparación de masa y luminosidad bolométrica de una muestra de 9 YSOs. Los parámetros físicos de estos objetos se encuentran en los anexos y su comparación en masa y luminosidad contra las de trabajos previos se encuentra en la tabla 3.2. La posición espacial de estos objetos se muestra en la figura 3.6 En esta figura tipo RGB se muestra la emisión de las bandas de MIPS 24 μm (Red), IRAC 8 μm (Green) y banda H de 2MASS (Blue) en la región de nube molecular MC76. En estas imágenes las regiones con alta extinción interestelar se encuentran delimitadas por las regiones en absorción (oscurecidas) mientras que las regiones con alta excitación por radiación son mostradas con la zonas difusas brillantes. La emisión puntual dominante en la banda H de 2MASS está asociada con emisión estelar fotosférica, la emisión en 8 μm es dominada por la emisión de polvo pequeño y gas circunestelar excitado radiativamente. Finalmente, la emisión en 24 μm es debida a la excitación radiativa de polvo grande circunestelar. Superpuestas en la figura están las posiciones de la muestra de YSOs cuyos parámetros son comparados. A la derecha de la figura se muestran ampliaciones de las regiones central (derecha-abajo) y norte (derecha-arriba) en donde se aprecia mejor la posición espacial de cada YSO que se compara en la tabla 3.2, respecto a las zonas de alta extinción interestelar (zonas oscurecidas). Estas regiones de alta extinción son asociadas a valores mayores de 10 magnitudes de extinción visual y con valores promedio de aprox. 20 magnitudes de extinción visual estimadas por RR+17.

Los parámetros físicos derivados del ajuste de los YSOs son mostrados en la tabla 3.2 y en las siguientes secciones son discutidos en detalle para cada uno de los objetos. En la la figura 3.4 se muestran los valores obtenidos de masa estelar de YSOs, los cuales son graficados con estrellas llenos en color verde. Los valores de masa de los trabajos de RR17 y de RR+17 de los mismos YSOs se muestran con los triángulos llenos azules y círculos naranja, mientras que los resultados de esta investigación están en estrellas verde.

Al comparar las masas estelares conseguidas en este trabajo con las obtenidas en los anteriores trabajos, RR17 y RR+17, vemos que los resultados de los 9 YSOs son comparables o consistentes. La mayor parte de ellos entran en la segunda categoría. Masas de YSO como M9, M14, M52, M53 y M54 están dentro del error estipulado en uno o ambos de los trabajos anteriores, mientras que YSOs como M13, M50 se encuentran 0.5 $M_{\odot}$ abajo del valor anterior más cercano. Existen dos YSOs que son consistentes con los resultados de uno o ambos trabajos anteriores. M15 es consistente con el resultados de RR17, ambos son exactamente 4 $M_{\odot}$, mientras que la masa de M84 coincide exactamente tanto con el resultado de RR17 y RR+17, los tres trabajos tienen el valor de 7 $M_{\odot}$.

Es satisfactorio que los parámetros de las masas estelares de esta pequeña muestra, sean 77.7 % comparables con los de los trabajos RR17 y/o RR+17 y que aquellos que no estén dentro del margen de error, solo les haya faltado 0.5 $M_{\odot}$ para coincidir con los anteriores resultados. A continuación se hará una descripción de cada uno de los 9 YSOs que fueron comparados.

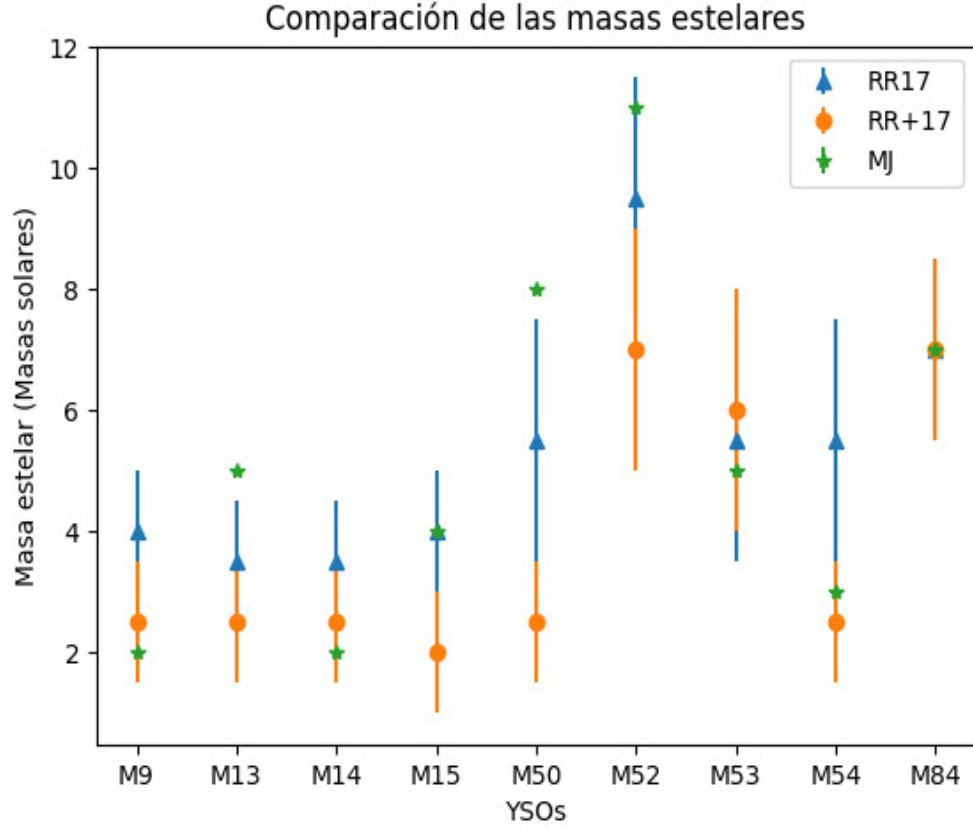


Figura 3.4: Comparación de masas estelares de YSOs obtenidas en tres diferentes trabajos: los valores de masa graficados con triángulos azules son del trabajo de Retes Romero (2017), con círculos naranja proceden de Retes-Romero et al. (2017) y con estrellas verdes son obtenidas en el presente trabajo.

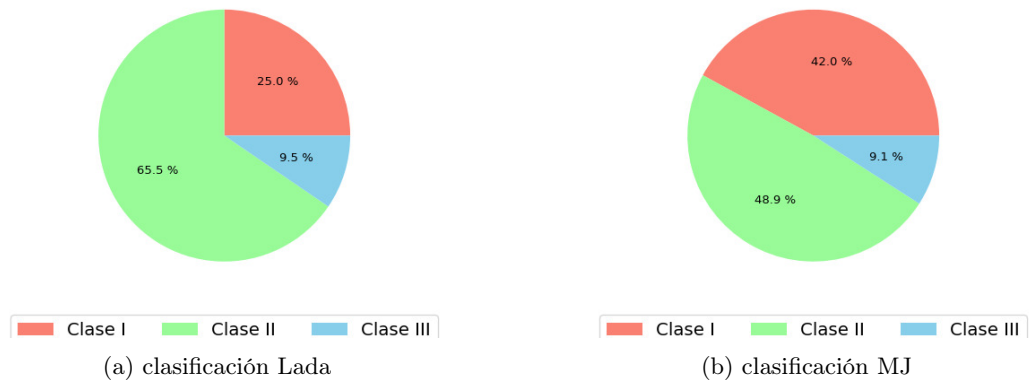


Figura 3.5: Proporción de objetos en cada clase de acuerdo con la clasificación de Lada, usada en el trabajo de RR+17 y la clasificación MJ del presente trabajo

ID	RR17			RR+17		Este trabajo			Clase L	Clase MJ
	A_v (mag)	$M_{\star}$ ($M_{\odot}$)	$\log(L_{bol})$ ($L_{\odot}$)	$M_{\star}$ ($M_{\odot}$)	$\log(L_{bol})$ ($L_{\odot}$)	A_v (mag)	$M_{\star}$ ($M_{\odot}$)	$\log(L_{bol})$ ($L_{\odot}$)		
M9	40	4.0 ± 1.0	2.68	2.5 ± 1.0	1.57	25	2	1.46	II	1
M13	32	3.5 ± 1.0	1.95	2.5 ± 1.0	1.72	16	5	2.01	II	1
M14	32	3.5 ± 1.0	1.95	2.5 ± 1.0	1.61	24	2	0.88	I	1
M15	50	4.0 ± 1.0	2.68	2.0 ± 1.0	1.06	18	4	1.94	I/II	1
M50	50	5.5 ± 2.0	3.20	2.5 ± 1.0	1.78	15	8	2.82	II	1
M52	32	9.5 ± 2.0	3.90	7.0 ± 2.0	3.14	28	11	3.46	I	1
M53	40	5.5 ± 2.0	3.20	6.0 ± 2.0	3.03	25	5	2.61	I	1
M54	40	5.5 ± 2.0	3.20	2.5 ± 1.0	1.03	40	3	2.03	II	2
M84	32	7.0 ± 1.5	3.46	7.0 ± 1.5	3.14	19	7	2.48	I	1

Tabla 3.2: Parámetros de masa estelar y luminosidad bolométrica derivados del mejor ajuste de modelo SED en cada uno de una muestra de YSOs en la nube molecular MC76.

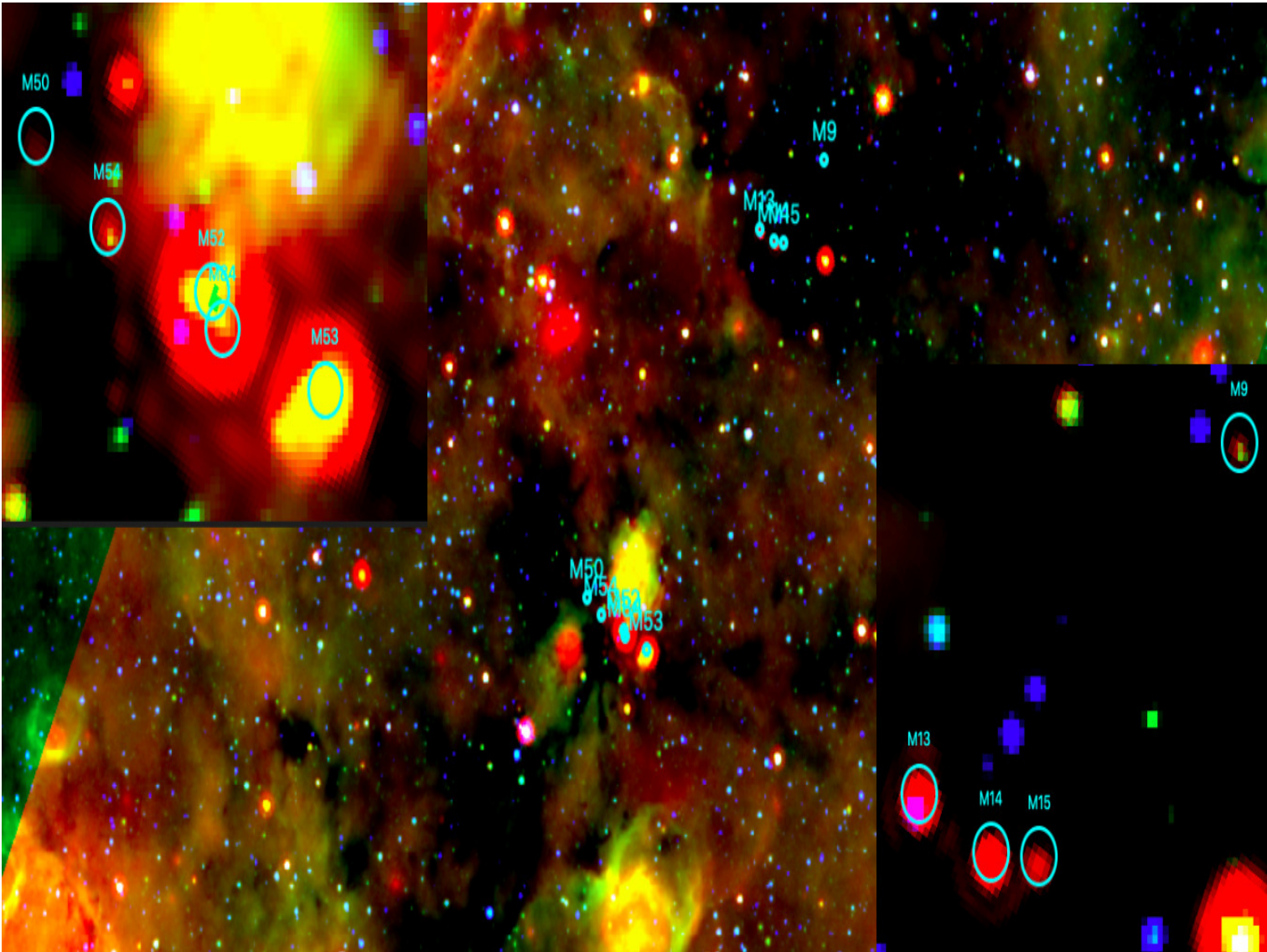


Figura 3.6: Imagen RGB (R $24 \mu\text{m}$, G $4.5 \mu\text{m}$, B banda H 2MASS) de la nube molecular galáctica MC76. En las esquinas se muestran ampliaciones de las regiones centro (izquierda superior) y región norte (derecha inferior) de la nube. Estas regiones trazan zonas de alta extinción interestelar asociadas con la formación estelar reciente. YSOs muy jóvenes son identificados en estas regiones y son caracterizados en la sección 3.3.

3.4. YSO M9

Este objeto se encuentra localizado en la zona de alta extinción al norte de la nube molecular (ver figura 3.6, derecha inferior). El ajuste le da un valor de extinción de 20 magnitudes de extinción, una cantidad aceptable ya que entra en el intervalo de alta extinción y concuerda con el resultado RR17 de que sostiene que en las regiones con valores altos de alta densidad columnar también se encuentra una alta extinción interestelar. Este YSO cuenta con 10 datos de flujos pero ninguno de ellos es de 2MASS, es posible que esta sea la razón por la que la componente estelar de este objeto sea tan pequeña. La SED de este objeto cuenta con dos cotas superiores, una en la banda de $12\ \mu\text{m}$ y la otra en los $100\ \mu\text{m}$, esto para asegurar un buen ajuste. En la imagen 3.6, el recuadro inferior derecho, podemos ver el objeto y como carece de 2MASS en un radio de 5 arcos de segundo. El flujo más brillante es el de $24\ \mu\text{m}$, sin embargo este y el flujo de $8\ \mu\text{m}$ son tenues comparados con otros objetos. Esto lo podemos ver reflejado en el SED, donde el flujo de $8\ \mu\text{m}$ se encuentra sobre la pendiente del pico de la componente estelar y el flujo de $24\ \mu\text{m}$, aunque es de los pocos de esta banda que se ajusta al modelo, este se encuentra en la curva en la que inicia la componente fría. Es de clase MJ 1 con una masa $1\ M_{\odot}$, este valor es comparable con el obtenido por RR+17, $2.5 \pm 1.0\ M_{\odot}$.

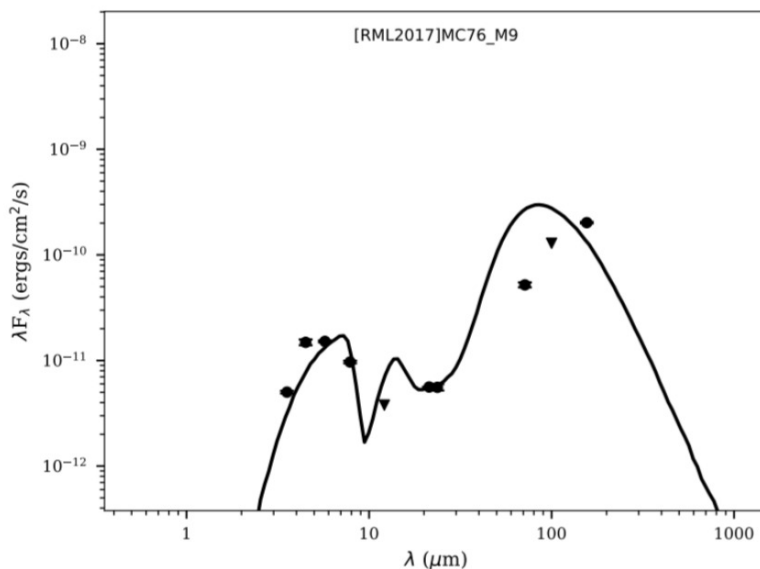


Figura 3.7: Distribución espectral de energía del YSO M9. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

3.5. YSO M13

Este objeto se encuentra en la orilla de la zona central en la que el ajuste le asigna un valor de 16 magnitudes de extinción, es decir tiene una zona de alta extinción que concuerda con su localización en la nube. Este YSO tiene flujos en el cercano, medio, lejano infrarrojo y submilimétrico, sin embargo las bandas J y H de 2MASS, fueron omitidas para mejorar el ajuste a la distribución de todos los datos de los flujos. Los flujos del lejano infrarrojo se pusieron como cotas superiores para justificar a la segunda componente. Ambas componentes son pequeñas y del mismo tamaño siendo ligeramente más grande la correspondiente a la componente estelar con una pendiente marcada por los flujos de IRAC. Al observar las componentes con atención podemos notar que la componente

de la izquierda es ligeramente más grande de la de la derecha, resultado de las cotas que están limitando el crecimiento de la componente de la derecha que en el ajuste pasados, que se realizaron en esta investigación, está siempre crecía sobre la componente de la izquierda, sin embargo se eligió este ajuste por el valor bajo de su χ^2 . Este YSO se clasificó como clase MJ 1, esta clase coincide con la que anteriormente se le había asignado. Su masa es de $5 M_{\odot}$, la tabla 3.2 muestra cómo este parámetro es mayor que el de los anteriores trabajos, RR17 y RR+17, al primero lo rebasa por $0.5 M_{\odot}$ mientras que con el segundo está $1.5 M_{\odot}$ por arriba, todo esto tomando en cuenta el margen de error. la tasa de acrecentamiento de su envoltente es del orden de $10^{-7} M_{\odot} yr^{-1}$, este valor está muy cerca del límite a partir del cual el modelo pierde la envoltente, según el modelo el polvo interestelar usado en el ajuste.

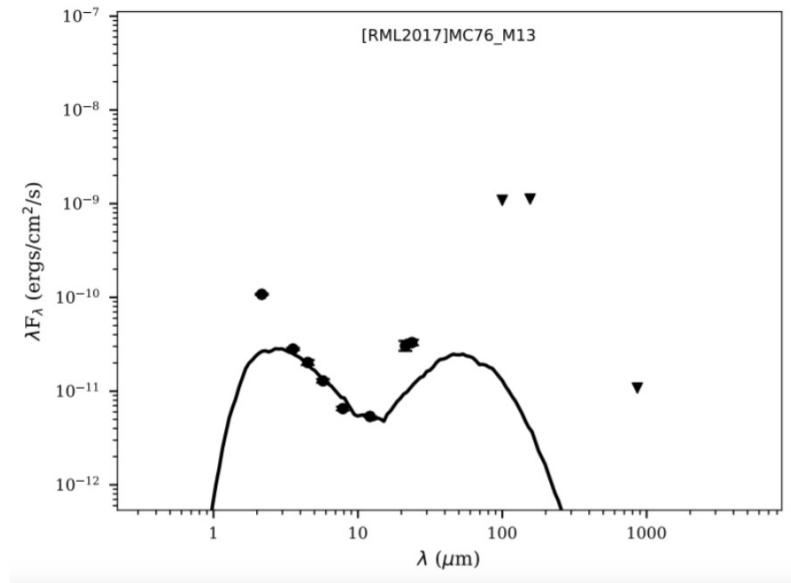


Figura 3.8: Distribución espectral de energía del YSO M13. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

3.6. YSO M14

Se encuentra en la misma zona de extinción que M9, junto a M13 y M15, estos tres objetos se ven sumamente brillantes en la banda de $24 \mu m$, siendo el único flujo que se aprecia en la imagen RGB. La SED de este objeto está conformada por los flujos del medio, lejano infrarrojo y submilimétrico, a partir de los $70 \mu m$ los flujos se consideraron cotas superiores para asegurar un buen ajuste justificando la componente fría. Tiene una extensión de 24 magnitudes de extinción visual que coincide con su localización, es del conjunto de YSOs que se puede apreciar únicamente en su flujo de $24 \mu m$ en el zoom inferior derecho de la imagen 3.6, flujo que se encuentra por encima de la componente de la derecha. En las anteriores investigaciones, RR17 y RR+17, este objeto fue clasificado como clase I, en este se clasificó como clase MJ 1. Los parámetros obtenidos con este ajuste nos indican una masa de $2 M_{\odot}$, anteriormente en RR17 y RR+17 su masa era de $3.5 \pm 1.0 M_{\odot}$ y $2.5 \pm 1.0 M_{\odot}$ respectivamente, lo que, contando el error, coloca al valor de esta investigación en medio de los dos anteriores como se aprecia en la fig 3.6. Con sus flujos en el lejano infrarrojo, esta sigue teniendo un tamaño considerable aún así es un valor cercano, el acrecentamiento ya no es tan alto, del orden de $10^{-5} M_{\odot} yr^{-1}$, pero por la falta de flujos en el cercano infrarrojo y la alta extinción nos dice que aún puede acrecentar masa y es posible que se encuentre en una etapa

temprana de la clase 1.

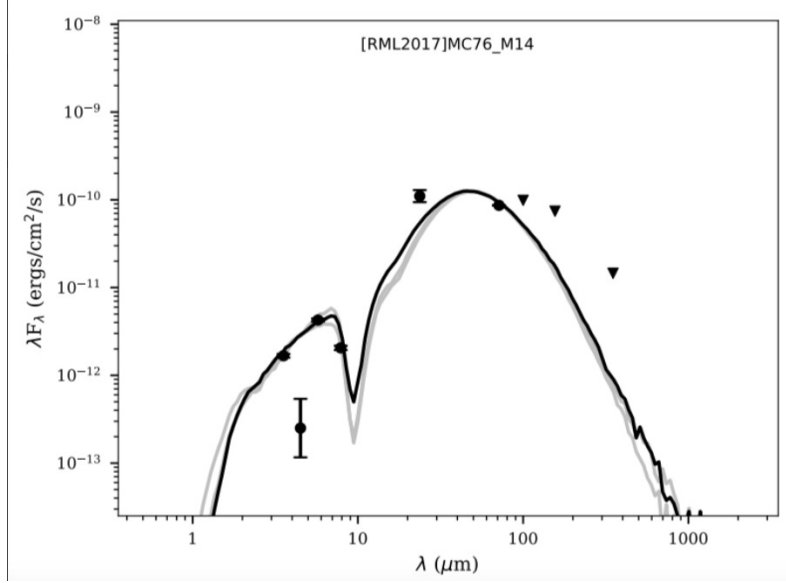


Figura 3.9: Distribución espectral de energía del YSO M14. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

3.7. YSO M15

Este objeto se encuentra espacialmente cercano a M14 y M13 y por lo tanto debería tener una extinción interestelar similar a la de estos objetos anteriormente descritos, sin embargo esta es baja, de 18 magnitudes de extinción visual, esto podría ser resultado del intervalo que se eligió para su ajuste. Este YSO carece de flujos en el lejano infrarrojo, sin embargo podemos sugerir de su existencia, gracias a la tendencia de los flujos a ascender conforme aumenta la longitud de onda, siendo el más alto el flujo de 24 μm . Las bandas J y H de 2MASS son cuestionables por interrumpir el patrón del que se habló anteriormente, en especial la banda J que se eleva sobre los demás flujos, así que se ajustó como cota superior, lo anterior podría indicar que esta banda no corresponde a este objeto. Su masa y luminosidad bolométrica son comparables con el resultado expuesto en la tesis doctoral de Retes-Romero (2017), ambas con 4 $M_{\odot}$, valor con el que coincide exactamente. Su acrecentamiento es del mismo orden que su compañera M14, ambas podrían estar acrecentando la misma cantidad de material. La forma de su SED y todo lo anteriormente mencionado nos lleva a la conclusión que este objeto es clase MJ 1, un YSO todavía muy embebido. La clasificación de este objeto en los anteriores trabajos, RR17 y RR+17, era de un clase I/II, en este trabajo todo indica que su clase MJ es 1, para un mejor ajuste es necesario esperar a los resultados de observaciones en longitudes de onda de mayor longitud a las actualmente disponibles.

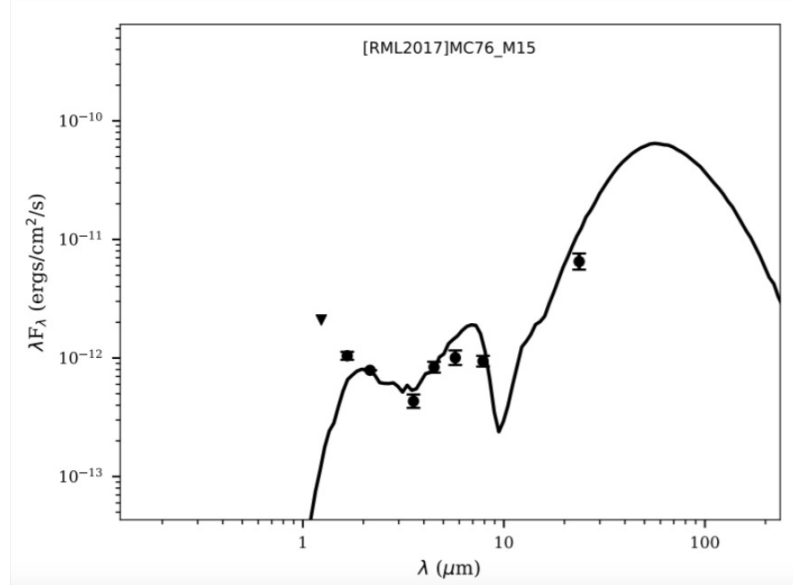


Figura 3.10: Distribución espectral de energía del YSO M15. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

3.8. YSO M50

Este YSO se localiza espacialmente en la zona central de la nube molecular, en la imagen RGB, apenas y se le aprecia en alguna banda, solo un ligero atisbo del flujo de $24 \mu\text{m}$, lo que nos indica que este flujo será menor o igual que aquellos del cercano infrarrojo además que está todavía muy embebido en la nube pero la extinción dada por el ajuste es de 15 magnitudes de extinción visual. Los flujos que se usaron para este ajuste son del cercano, medio y lejano infrarrojo, usando como cotas superiores a la banda H de 2MASS y $350 \mu\text{m}$ de SCUBA, el flujo de SCUBA funge la función de “contener” a la envolvente, ya que aunque pareciese que este no pertenece al objeto, si esta es retirada, la componente fría crece más allá del ajuste. El SED cuenta con una componente fría pronunciada que empieza a partir de las $10 \mu\text{m}$ y una componente estelar algo plana pero que ajusta bien los flujos del medio infrarrojo. Tiene una masa estelar de $8 M_{\odot}$, que solo se puede comparar con el resultado RR17, este es de $5.5 \pm 2.0 M_{\odot}$, que con el margen del error se aleja de este resultado por $0.5 M_{\odot}$, así que los valores de ambos trabajos no se alejan mucho uno de otro. Tiene una considerable tasa de acrecentamiento de la envolvente, de $10^{-3} M_{\odot}\text{yr}^{-1}$, lo que según Robitaille et al. (2006) es un valor de acrecentamiento alto, esto aunado a lo anterior dicho podemos clasificar a este YSOs masivo como clase MJ 1.

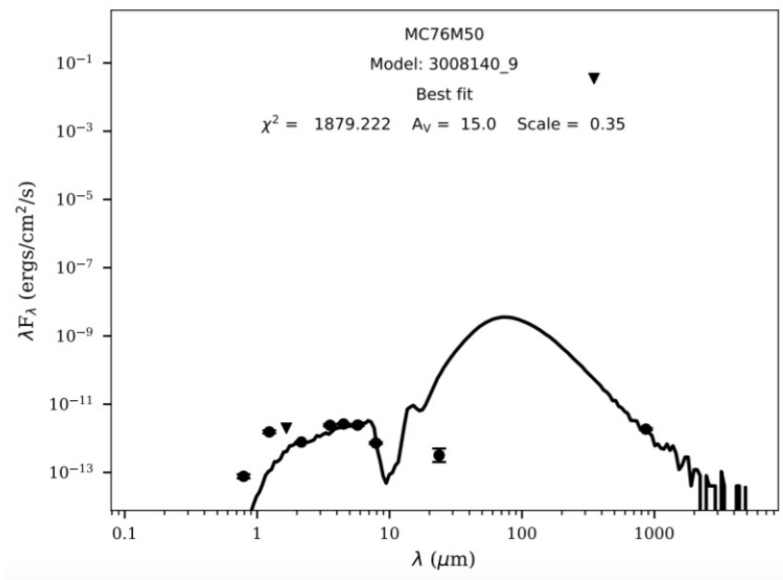


Figura 3.11: Distribución espectral de energía del YSO M50. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

3.9. YSO M52

También se encuentra en la zona central de la nube, esta vez sí con una fuerte emisión tanto las 24 μm como de 8 μm . Esta fuente contribuye con la emisión más importante de las fuentes en 24 μm a la fuente IRAS 18236-1205 y se encuentra dentro de un contorno de alta densidad columnar [23]. Carece de flujos en el cercano infrarrojo, esto podría deberse a que se encuentra muy embebida en la nube molecular, pero posee muchos flujos tanto del medio como del lejano infrarrojo, la componente de la izquierda está bien definida por los flujos del medio infrarrojo, es decir los flujos en las bandas IRAC-Spitzer están acoplados a la línea perteneciente al mejor ajuste. En la componente de la derecha hay pocos datos que sigan el modelo, la mayoría son cotas superiores de IRAS y SCUBA, pero estas siguen la forma de la SED y justifican perfectamente a la envolvente. La extinción del ajuste es de 20 magnitudes de extinción visual, una extinción dentro del intervalo de alta extinción que se definió para este trabajo, pero baja en comparación a las ocupadas en los trabajos RR17 y RR+17. La masa estelar producto del ajuste de este objeto es de 11 $M_{\odot}$, una de las más altas de este trabajo, es comparable con el resultado obtenido en el trabajo RR17, $9.5 \pm 2.0 M_{\odot}$, que con el margen de error, solo hay una diferencia de 0.5 $M_{\odot}$ entre ambos trabajos. Para este objeto el ajuste nos dice que su acrecentación es bastante alta, del orden de $10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$, así podemos concluir que este objeto es de clase MJ 1, es un YSO masivo al que aún le queda mucho material por acrecentar y por lo tanto seguirá creciendo en masa. En los anteriores trabajos, RR17 y RR+17, su clase es I.

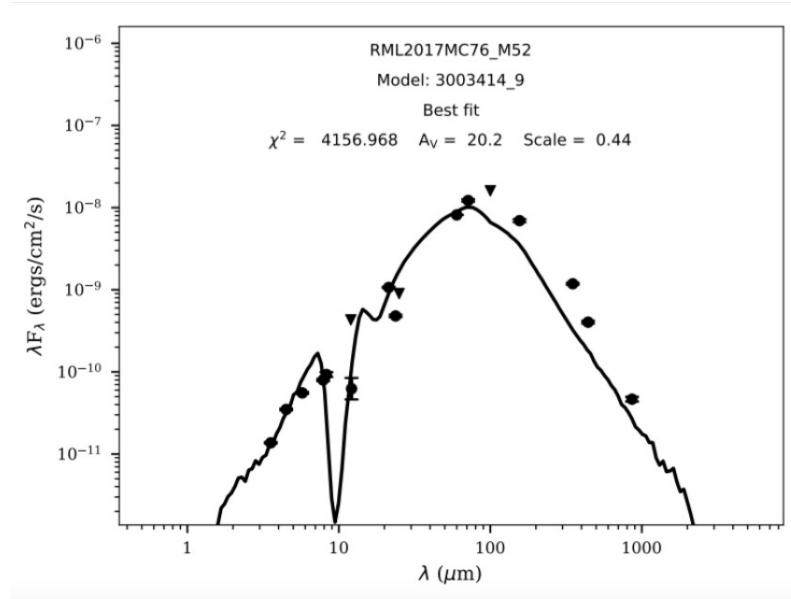


Figura 3.12: Distribución espectral de energía del YSO M52. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

3.10. YSO M53

Este objeto se encuentra en la misma zona que los dos últimos objetos descritos, parece estar asociado a un núcleo. Se le observa con un exceso del flujo de $24 \mu\text{m}$ rodeándolo en la imagen RGB. Tiene una extinción de 25 magnitudes de extinción visual, más alta que la de sus compañeros de zona. En su SED se aprecia una componente fría que domina la imagen, carece de la banda J de 2MASS, y tiene como cotas al lejano infrarrojo, todo para poder justificar la envoltura y asegurar un buen ajuste para todos los demás flujos. La masa resultante del ajuste es de $5 M_{\odot}$ está también queda en medio de las masas obtenidas en los dos anteriores trabajos, $5.5 \pm 2.0 M_{\odot}$ de RR17 y $6.0 \pm 2.0 M_{\odot}$ de RR+17, el resultado obtenido en este trabajo es muy cercano a cualquiera de los dos anteriores, en cuanto a la tasa de acrecentamiento de la envoltura esta es de $10^{-4} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$. Con estos resultados se sugiere que este YSO se encuentra en una fase temprana de la clase MJ 1.

3.11. YSO M54

Se encuentra en la zona central de la nube molecular con fuerte emisión en $24 \mu\text{m}$, algo alejado de la fuente IRAS, esto se puede apreciar en la imagen RGB, de un color rojo, por la presencia del flujo de $24 \mu\text{m}$ de MIPS, pero no es tan brillante como M52, M53 y M84, sin embargo, su color no es tan tenue como el de M50, así que podemos esperar que el flujo de $24 \mu\text{m}$ este al mismo nivel que los demás flujos de IRAC. Por los flujos que la describen podemos decir que aún está muy embebida en material interestelar, la extinción que le asignó el ajuste es de 28 magnitudes de extinción visual, lo que concuerda con su ubicación espacial y su cantidad de flujos disponible, ya que carece del infrarrojo cercano además de la mayoría de los flujos del lejano infrarrojo, de los objetos aquí analizados, es el que menor número de flujos posee. Tiene un gran número de modelos en gris, la mayoría insinúan una distribución más plana, con las dos componentes casi del mismo tamaño, pero el mejor ajuste nos señala una gran envoltura, que termina en las $850 \mu\text{m}$, esto se debe a la falta de datos en el rango entre $24 \mu\text{m}$ y $850 \mu\text{m}$, La masa de este objeto es de $3 M_{\odot}$, y aunque al igual que en anterior YSO, y como se observa en la imagen 3.6, esta se ajusta bien a

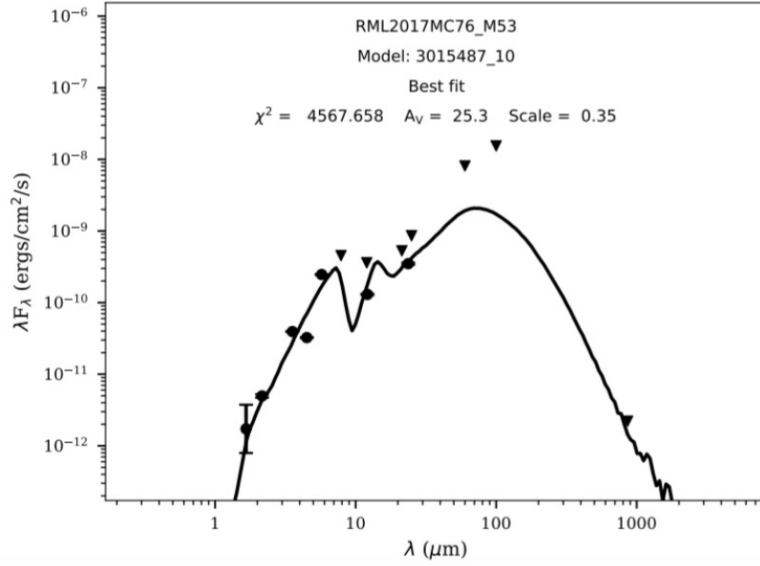


Figura 3.13: Distribución espectral de energía del YSO M53. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

ambos resultados de masas de los dos trabajos anteriores pero es más cercana a el resultado de RR+17 de $2.5 \pm 1.0 M_{\odot}$. El objeto es de clase MJ 1.

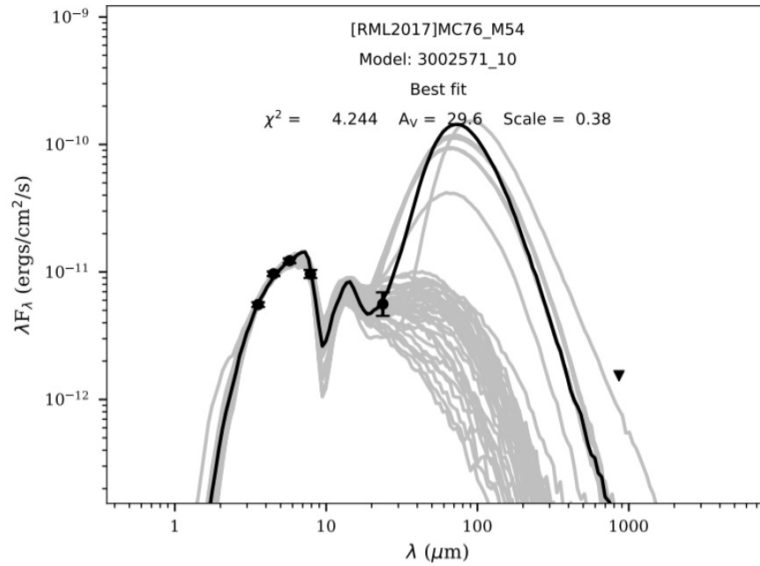


Figura 3.14: Distribución espectral de energía del YSO M54. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

3.12. YSO M84

Esta fuente contribuye con la emisión más importante en $24 \mu\text{m}$, se encuentra dentro de una región de alta densidad columnar. Al observar en la imagen RGB, figura 3.6, notamos que no se diferencia del YSO M52, pareciese que comparte flujos con este YSO. La extinción brindada por el ajuste resultó ser de 19 magnitudes de extinción visual, lo cual está bien dado el intervalo que se usó para su ajuste. En este objeto encontramos flujos correspondientes al cercano, medio y lejano infrarrojo, los flujos correspondientes al infrarrojo cercano y medio están bien ajustados siguiendo el mejor ajuste marcado, mientras que los flujos de MIPS son cotas superiores que justifican la segunda componente. Observamos que la componente de la izquierda tiene un menor tamaño que la componente de la derecha. Su masa es de $7 M_{\odot}$, este parámetro es el que coincide con los dos resultados de RR17 y RR+17, está semejanza nos da confianza en los anteriores resultados. La tasa de acrecentamiento de la envoltente es $10^{-4} M_{\odot}\text{yr}^{-1}$, así que le vemos potencial de seguir creciendo más. Es clase MJ 1 lo que comparte con las anteriores clasificaciones.

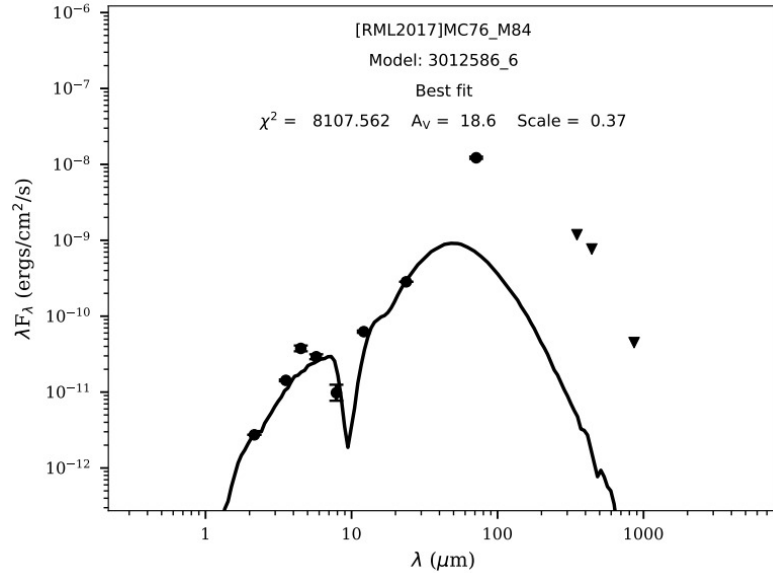


Figura 3.15: Distribución espectral de energía del YSO M84. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo futuro

En esta tesis se utilizó el modelo numérico de SED publicado por Robitaille et al. (2006, 2007) llamado *SEDfitter* para ajustar una SED a los flujos medidos en YSOs masivos de la nube molecular galáctica MC76, anteriormente catalogados y caracterizados por Retes-Romero et al. (2017).

Recientemente, existe una mayor cantidad de fotometría disponible para los YSOs usados en el presente trabajo, además que se han publicado actualizaciones de programas de ajuste de SED, logrando una mejora en la obtención de parámetros físicos de los YSOs. Con esto, es posible obtener parámetros físicos más precisos que brinda el ajuste de modelos de SED, para caracterizar físicamente a los YSOs y comparar con los resultados de investigaciones previas.

Se ajustó un modelo SED a la mayoría de los objetos y en algunos de los casos se les añadieron nuevos flujos que anteriormente no estaban disponibles. Con el ajuste en cada YSO se realizó una clasificación siguiendo la forma de la SED. Los objetos se clasificaron en clase 1, clase 2 y clase 3. Cada clase tiene características bien definidas y éstas están relacionadas con la etapa evolutiva de los objetos. De las tres clases, la clase 2 fue la que tuvo los mejores resultados, gracias a la homogeneidad de sus flujos, en cambio la clase tres tiene el peor ajuste, este problema y algunos defectos anteriormente mencionados pueden ser solucionados con nuevos datos y modelos numéricos de SED.

Los modelos de Robitaille no alcanzan a abarcar todos los procesos físicos por los que se cree pasan las estrellas jóvenes masivas en su formación evolutiva. Sin embargo, este programa nos proporcionó parámetros físicos comparables como la masa y la luminosidad bolométrica para los YSOs masivos en la nube molecular MC76, los cuales son consistentes para algunos casos (M15 y M84) y comparables para otros objetos (M9, M52, M53), lo cual nos permite mostrar la suficiencia del modelo numérico de SED para caracterizar YSOs masivos. Recientemente existen intentos de replicar lo realizado por Robitaille et al. (2006, 2007) , por ejemplo, Zhang et al. (2014) entre otros, para ajustar SEDs a protoestrellas masivas. Se ha encontrado que en general son similares a los obtenidos con el *SEDfitter* de Robitaille pero con deficiencias en cuanto a la eficiencia energética de los procesos físicos en objetos masivos. Nuestro trabajo futuro propone realizar ajustes de modelos numéricos modificados de SED para YSOs masivos y comparar parámetros físicos obtenidos con estos programas para los objetos que se discutieron en la presente investigación.

Apéndice A

Fotometría de los YSOs de la nube molecular MC76

ID	GLON (deg)	GLAT (deg)	J-2MASS (Jy)	H-2MASS (Jy)	K-2MASS (Jy)	3.6 μ m (Jy)	4.5 μ m (Jy)	5.8 μ m (Jy)	8 μ m (Jy)	24 μ m (Jy)
M1	19.941848	0.12182	3.38E-1 $\pm$ 1.00E-10	7.43E-4 $\pm$ 1.00E-10	7.00E-3 $\pm$ 2.57E-4	2.05E-2 $\pm$ 5.95E-5	2.41E-2 $\pm$ 4.98E-5	4.45E-2 $\pm$ 1.04E-4	8.71E-2 $\pm$ 2.43E-4	9.30E-2 $\pm$ 4.77E-3
M2	19.40581	0.12191	6.20E-3 $\pm$ 3.79E-4	5.80E-2 $\pm$ 1.79E-3	1.45E-1 $\pm$ 3.38E-3	7.32E-2 $\pm$ 2.45E-4	4.51E-2 $\pm$ 1.00E-4	7.26E-2 $\pm$ 1.82E-4	1.08E-1 $\pm$ 3.11E-4	3.66E-2 $\pm$ 1.85E-3
M3	19.24238	0.10355	8.93E-4 $\pm$ 6.20E-2	2.21E-3 $\pm$ 1.20E-4	1.08 $\pm$ 2.65E-3	2.36E-3 $\pm$ 1.67E-5	3.12E-3 $\pm$ 1.84E-5	8.97E-4 $\pm$ 3.65E-5	2.58E-4 $\pm$ 3.44E-6	8.23E-3 $\pm$ 4.14E-4
M4	19.31591	0.09626	4.86E-3 $\pm$ 4.75E-4	6.36E-3 $\pm$ 3.65E-4	1.13E-2 $\pm$ 6.57E-4	3.74E-2 $\pm$ 7.72E-5	3.52E-2 $\pm$ 7.59E-5	3.20E-2 $\pm$ 7.20E-5	2.97E-2 $\pm$ 1.07E-4	1.92E-2 $\pm$ 9.56E-4
M5	19.33389	0.09009	1.26E-3 $\pm$ 9.50E-5	4.11E-3 $\pm$ 2.47E-4	9.65E-3 $\pm$ 1.67E-4	1.18E-2 $\pm$ 3.24E-5	9.26E-3 $\pm$ 3.46E-5	1.43E-2 $\pm$ 7.33E-5	3.67E-2 $\pm$ 1.81E-4	3.63E-2 $\pm$ 1.83E-4
M6	19.44327	0.08959	4.36E-2 $\pm$ 8.92E-4	2.29E-3 $\pm$ 6.75E-3	3.68E-3 $\pm$ 6.00E-3	3.08E-1 $\pm$ 1.25E-3	2.10E-1 $\pm$ 8.59E-4	1.63E-1 $\pm$ 6.87E-4	1.07E-1 $\pm$ 4.61E-4	2.03E-2 $\pm$ 1.02E-3
M7	19.42995	0.08773	6.40E-3 $\pm$ 3.48E-4	7.31E-2 $\pm$ 2.22E-3	2.51E-1 $\pm$ 1.00E-10	4.33E-1 $\pm$ 1.23E-3	3.12E-1 $\pm$ 1.36E-3	2.71E-1 $\pm$ 1.24E-3	1.57E-1 $\pm$ 7.20E-4	2.80E-2 $\pm$ 7.40E-3
M8	19.30055	0.08664	2.29E-3 $\pm$ 8.0E-5	2.73E-3 $\pm$ 1.08E-4	2.79E-3 $\pm$ 1.00E-10	3.88E-2 $\pm$ 8.04E-5	8.60E-2 $\pm$ 3.11E-4	8.60E-2 $\pm$ 3.11E-4	9.82E-2 $\pm$ 4.18E-4	2.46E-2 $\pm$ 1.24E-3
M9	19.28698	0.08437	...	...	...	5.60E-3 $\pm$ 2.38E-5	2.08E-2 $\pm$ 4.23E-5	2.78E-2 $\pm$ 9.23E-5	1.14E-3 $\pm$ 7.58E-4	2.03E-2 $\pm$ 1.02E-3
M10	19.45285	0.08293	4.28E-3 $\pm$ 9.50E-5	1.97E-2 $\pm$ 5.50E-4	3.10E-2 $\pm$ 5.00E-4	2.36E-2 $\pm$ 4.63E-5	1.88E-2 $\pm$ 5.67E-5	1.36E-2 $\pm$ 5.54E-5	6.61E-3 $\pm$ 5.96E-5	6.02E-3 $\pm$ 2.97E-4
M11	19.23370	0.08105	5.69E-4 $\pm$ 1.00E-10	1.16E-2 $\pm$ 6.00E-4	8.48E-2 $\pm$ 3.36E-3	2.54E-1 $\pm$ 1.00E-3	2.53E-1 $\pm$ 1.06E-3	2.52E-1 $\pm$ 1.14E-3	1.41E-1 $\pm$ 6.35E-4	2.40E-2 $\pm$ 1.20E-3
M12	19.4263	0.07791	...	...	...	2.54E-1 $\pm$ 7.12E-5	2.30E-1 $\pm$ 9.54E-4	1.86E-1 $\pm$ 7.99E-3	1.01E-1 $\pm$ 4.32E-4	8.94E-3 $\pm$ 4.43E-4
M13	19.31205	0.06743	5.72E-2 $\pm$ 1.15E-3	9.02E-2 $\pm$ 3.12E-3	7.76E-2 $\pm$ 1.38E-3	3.88E-2 $\pm$ 8.04E-5	3.36E-2 $\pm$ 7.21E-5	2.15E-2 $\pm$ 9.23E-5	2.58E-4 $\pm$ 3.63E-6	1.72E-1 $\pm$ 8.07E-3
M14	19.30643	0.06460	...	...	...	1.68E-3 $\pm$ 1.42E-5	5.58E-3 $\pm$ 2.48E-5	5.87E-3 $\pm$ 5.47E-5	2.58E-4 $\pm$ 3.63E-6	1.53 $\pm$ 1.55E-1
M15	19.30266	0.06440	8.60E-4 $\pm$ 4.70E-5	5.80E-4 $\pm$ 1.00E-10	5.67E-4 $\pm$ 1.00E-10	1.19E-3 $\pm$ 1.24E-5	2.26E-3 $\pm$ 1.66E-5	5.50E-5 $\pm$ 6.27E-7	2.58E-4 $\pm$ 3.63E-6	3.83E-2 $\pm$ 1.89E-3
M16	19.25159	0.06779	...	...	...	2.04E-3 $\pm$ 1.43E-5	3.09E-3 $\pm$ 2.59E-5	3.70E-3 $\pm$ 4.61E-5	2.58E-4 $\pm$ 3.63E-6	8.01E-4 $\pm$ 3.97E-5
M17	19.28164	0.06782	1.35E-4 $\pm$ 1.00E-10	5.67E-3 $\pm$ 2.00E-4	2.89E-2 $\pm$ 6.86E-4	4.29E-2 $\pm$ 8.99E-5	3.01E-2 $\pm$ 6.38E-5	2.71E-2 $\pm$ 8.96E-5	1.36E-2 $\pm$ 1.18E-4	9.28E-3 $\pm$ 4.63E-4
M18	19.22086	0.06288	5.23E-2 $\pm$ 1.40E-3	3.80E-1 $\pm$ 9.00E-3	7.17E-1 $\pm$ 1.30E-2	5.16E-1 $\pm$ 1.51E-3	3.39E-1 $\pm$ 1.49E-3	2.86E-1 $\pm$ 1.32E-3	1.53E-1 $\pm$ 6.99E-4	1.01E-2 $\pm$ 5.10E-4
M19	19.46007	0.06132	2.65E-4 $\pm$ 1.00E-10	6.16E-4 $\pm$ 1.00E-10	4.00E-3 $\pm$ 1.76E-4	3.05E-2 $\pm$ 8.92E-5	5.0E-2 $\pm$ 2.20E-4	5.98E-2 $\pm$ 2.76E-4	4.62E-2 $\pm$ 2.11E-4	5.96E-2 $\pm$ 3.01E-3
M20	19.27979	0.06138	...	...	...	4.33E-2 $\pm$ 9.09E-5	7.22E-3 $\pm$ 2.00E-4	7.96E-2 $\pm$ 3.02E-4	3.60E-2 $\pm$ 1.33E-4	1.30E-2 $\pm$ 6.45E-4
M21	19.27361	0.05029	6.45E-2 $\pm$ 1.80E-3	2.55E-3 $\pm$ 4.83E-3	3.16E-3 $\pm$ 3.00E-4	1.14E-1 $\pm$ 4.03E-4	9.61E-2 $\pm$ 3.52E-4	8.33E-2 $\pm$ 3.18E-4	5.16E-2 $\pm$ 1.33E-4	1.53E-2 $\pm$ 7.79E-4
M22	19.45937	0.04991	6.45E-2 $\pm$ 1.80E-3	2.44E-3 $\pm$ 4.83E-3	3.16E-3 $\pm$ 3.00E-4	4.88E-1 $\pm$ 1.41E-3	4.19E-1 $\pm$ 1.27E-3	3.44E-1 $\pm$ 1.64E-3	2.13E-1 $\pm$ 1.03E-3	7.51E-2 $\pm$ 3.79E-3
M23	19.31994	0.04453	7.41E-3 $\pm$ 2.90E-4	1.47E-2 $\pm$ 5.00E-4	1.68E-2 $\pm$ 5.00E-4	1.79E-2 $\pm$ 5.12E-5	1.47E-2 $\pm$ 4.32E-4	1.43E-2 $\pm$ 5.86E-5	2.58E-2 $\pm$ 9.11E-5	6.72E-2 $\pm$ 3.31E-3
M24	19.22954	0.04331	...	...	...	4.49E-3 $\pm$ 2.62E-5	6.01E-3 $\pm$ 2.69E-5	3.51E-4 $\pm$ 2.98E-5	2.58E-4 $\pm$ 3.63E-6	5.80E-4 $\pm$ 2.89E-5
M25	19.30425	0.04112	2.02E+4 $\pm$ 3.17E-4	8.75E-3 $\pm$ 1.57E-4	2.02E+4 $\pm$ 3.17E-4	1.32E-1 $\pm$ 4.76E-4	1.02E-1 $\pm$ 3.77E-4	9.74E-2 $\pm$ 3.80E-4	4.45E-2 $\pm$ 1.13E-4	11.4E-2 $\pm$ 5.70E-4
M26	19.37612	0.04352	2.13E-3 $\pm$ 1.00E-10	2.10E-2 $\pm$ 1.00E-10	9.08E-2 $\pm$ 1.00E-10	1.32E-1 $\pm$ 4.76E-4	1.03E-1 $\pm$ 3.81E-4	9.48E-2 $\pm$ 3.69E-4	5.65E-2 $\pm$ 1.48E-4	2.27E-2 $\pm$ 1.13E-3
M27	19.43321	0.03488	1.17E-2 $\pm$ 3.00E-4	8.78E-2 $\pm$ 2.60E-3	2.29E-1 $\pm$ 5.00E-3	4.25E-1 $\pm$ 1.21E-3	3.79E-1 $\pm$ 1.13E-3	3.74E-1 $\pm$ 1.20E-3	3.28E-1 $\pm$ 1.71E-3	1.75E-1 $\pm$ 8.25E-3
M28	19.4591	0.03566	8.26E-4 $\pm$ 1.00E-10	1.65 $\pm$ 3.38E-3	2.41E-3 $\pm$ 1.90E-4	1.69E-1 $\pm$ 6.30E-4	2.80E-1 $\pm$ 1.20E-3	3.84E-1 $\pm$ 1.24E-3	2.89E-1 $\pm$ 1.47E-3	3.56E-2 $\pm$ 1.79E-3
M29	19.31414	0.03534	9.63E-3 $\pm$ 1.00E-10	9.58E-3 $\pm$ 1.00E-10	7.73E-3 $\pm$ 1.00E-10	1.45E-1 $\pm$ 5.29E-4	1.19E-1 $\pm$ 4.49E-4	1.13E-1 $\pm$ 4.51E-4	6.61E-2 $\pm$ 2.65E-4	2.93E-2 $\pm$ 1.27E-3
M30	19.35819	0.03356	4.47E-4 $\pm$ 1.00E-10	2.41E-2 $\pm$ 1.00E-10	1.96E-1 $\pm$ 1.00E-10	3.99E-1 $\pm$ 1.12E-3	4.95E-1 $\pm$ 1.55E-3	5.02E-1 $\pm$ 1.00E-3	2.89E-1 $\pm$ 1.47E-3	7.65E-2 $\pm$ 3.88E-3
M31	19.42637	0.03184	1.47E-3 $\pm$ 9.00E-5	1.25E-2 $\pm$ 4.00E-4	5.47E-2 $\pm$ 2.88E-3	1.07E-1 $\pm$ 3.75E-4	8.29E-2 $\pm$ 2.98E-4	7.81E-2 $\pm$ 2.96E-4	4.02E-2 $\pm$ 1.00E-4	1.54E-2 $\pm$ 7.62E-4

M32	19.25396	0.03173	1.75E-2±1.00E-10	2.48E-2±1.00E-10	2.04E-2±1.00E-10	5.76E-3±2.46E-5	6.47E-3±2.91E-5	5.50E-5±3.48E-7	2.58E-4±3.63E-6	3.56E-2±1.67E-3
M33	19.21944	0.02553	1.03E-3±1.00E-10	1.25E-3±1.00E-10	2.64E-3±1.00E-10	4.71E-3±2.76E-5	3.15E-3±2.12E-5	5.56E-3±4.64E-5	1.98E-2±9.01E-5	4.83E-2±2.40E-3
M34	19.43877	0.02623	...	...	...	6.86E-3±2.97E-5	4.56E-3±2.38E-5	2.54E-3±3.27E-5	3.80E-4±4.36E-6	1.30E-2±6.45E-4
M35	19.39550	0.02104	1.77E-3±1.00E-10	1.33E-2±5.82E-4	1.08E-1±1.00E-10	3.91E-1±1.10E-3	4.51E-1±1.39E-3	4.84E-1±1.63E-3	3.28E-1±1.71E-3	4.05E-2±2.02E-3
M36	19.32721	0.02043	3.23E-1±6.50E-3	6.56E-2±1.60E-3	1.71E-3±6.00E-5	3.91E-1±1.10E-3	3.62E-1±1.07E-3	3.74E-1±1.20E-3	2.11E-1±1.02E-3	3.90E-2±1.93E-3
M37	19.43313	0.01688	4.65E-3±1.00E-10	8.14E-2±1.00E-10	2.78E-1±1.00E-10	3.32E-1±1.36E-3	2.62E-1±1.11E-3	2.38E-1±1.06E-3	1.39E-1±6.25E-4	4.16E-2±2.08E-3
M38	19.23921	0.01738	...	...	...	5.30E-3±2.24E-5	5.95E-3±2.66E-5	3.88E-3±3.12E-5	2.58E-4±3.63E-6	4.16E-2±2.06E-3
M39	19.20240	0.02923	4.07E-4±1.00E-10	2.17E-3±1.55E-4	4.42E-3±2.34E-4	4.93E-1±1.43E-3	4.00E-1±1.21E-3	4.06E-1±1.32E-3	2.19E-1±1.06E-3	5.54E-2±2.73E-3
M40	19.28800	0.02870	9.41E-3±1.00E-10	9.04E-3±3.20E-4	7.70E-4±3.10E-4	5.11E-1±1.49E-3	3.12E-1±1.36E-3	2.52E-1±1.14E-3	1.37E-1±6.14E-4	1.55E-2±7.68E-4
M41	19.25512	0.02341	5.61E-3±1.70E-4	6.08E-2±1.40E-3	1.40E-1±3.00E-3	5.06E-1±1.48E-3	4.27E-1±1.30E-3	3.67E-1±1.18E-3	23.1E-1±1.13E-3	7.24E-2±3.63E-3
M42	19.20453	0.02222	7.08E-4±6.50E-5	4.46E-3±2.40E-4	7.81E-3±4.10E-4	2.13E-1±8.19E-4	1.45E-1±4.63E-4	1.24E-1±5.01E-4	6.80E-2±1.83E-4	2.25E-2±1.11E-3
M43	19.26402	-0.02560	2.31E-4±1.00E-3	1.52E-3±1.20E-4	4.33E-3±1.90E-4	2.11E-1±8.10E-4	1.64E-1±6.47E-4	1.54E-1±6.43E-4	9.29E-2±3.92E-4	3.02E-2±1.53E-3
M44	19.21403	-0.02602	3.96E-4±1.00E-10	1.94E-3±1.00E-4	4.58E-3±1.50E-4	1.24E-1±4.43E-4	9.34E-2±3.41E-4	8.33E-2±3.18E-4	4.41E-2±1.11E-4	1.47E-2±7.44E-4
M45	19.23743	-0.02185	7.25E-3±1.40E-4	7.26E-3±2.80E-4	5.15E-3±2.80E-4	7.67E-2±2.58E-4	8.44E-2±3.04E-4	8.80E-2±3.39E-4	7.73E-2±3.17E-4	3.02E-2±1.53E-3
M46	19.20928	-0.01204	...	...	...	8.48E-3±3.00E-5	1.17E-2±3.35E-5	1.38E-2±5.63E-5	6.86E-3±8.28E-5	2.01E-2±1.01E-3
M47	19.20808	-0.01253	...	...	...	4.54E-3±2.27E-5	8.06E-3±2.97E-5	9.05E-3±4.41E-5	2.23E-3±3.00E-5	2.01E-2±1.01E-3
M48	19.46768	-0.01485	...	...	...	5.02E-3±2.96E-5	1.68E-2±5.00E-5	3.14E-2±7.05E-5	1.53E-1±6.99E-4	6.42E-1±3.19E-2
M49	19.29648	-0.01834	...	...	...	1.37E-1±4.96E-4	1.01E-1±3.73E-4	9.48E-2±3.69E-4	4.33E-2±1.09E-4	4.36E-3±2.17E-4
M50	19.37965	-0.02105	6.37E-4±6.30E-5	1.09E-3±1.00E-6	5.59E-4±1.00E-6	3.23E-3±1.83E-5	4.35E-3±2.26E-5	3.54E-3±5.65E-5	2.58E-4±3.63E-6	2.78E-3±1.40E-4
M51	19.33343	-0.02159	...	...	...	2.52E-1±9.92E-4	7.56E-3±3.03E-4	1.49E-1±6.19E-4	8.71E-2±3.64E-4	9.99E-3±5.04E-4
M52	19.36526	-0.02897	...	...	...	2.21E-2±4.31E-5	7.56E-2±2.69E-4	1.79E-1±7.65E-4	3.50E-1±1.85E-3	3.80±1.65E-1
M53	19.35603	-0.03383	1.17E-4±1.00E-10	2.90E-4±1.00E-10	5.80E-4±1.90E-4	4.66E-2±1.48E-4	4.86E-2±1.63E-4	4.71E-1±1.58E-3	1.19±5.48E-3	2.25±1.07E-1
M54	19.37381	-0.02558	...	...	...	6.44E-3±2.22E-5	1.54E-2±4.54E-5	1.59E-2±9.89E-5	9.38E-4±1.47E-5	3.56E-2±1.79E-3
M55	19.26647	-0.02960	1.68E-3±9.00E-5	3.97E-2±9.50E-4	2.23E-1±4.50E-3	5.30E-1±1.56E-3	6.06E-1±1.96E-3	7.60E-1±2.79E-3	6.20E-1±2.46E-3	1.51E-1±7.57E-3
M56	19.32311	-0.02757	1.09E-2±4.00E-4	4.76E-2±4.97E-2	1.45E-1±1.52E-1	1.84E-1±7.18E-4	1.41E-1±5.47E-4	1.32E-1±5.42E-4	7.45E-2±3.03E-4	1.43E-2±7.15E-4
M57	19.50036	-0.02724	1.06E-3±7.00E-5	2.97E-2±7.00E-4	1.20E-1±2.00E-3	1.84E-1±6.93E-4	1.41E-1±5.45E-4	1.32E-1±5.39E-4	7.45E-2±3.03E-4	1.43E-2±7.20E-4
M58	19.48371	-0.03145	1.89E-1±3.29E-4	5.22E-2±1.21E-2	1.79E-1±7.36E-2	3.95E-1±1.11E-3	2.85E-1±1.22E-4	2.54E-1±1.15E-3	1.32E-1±5.88E-4	1.85E-2±9.15E-4
M59	19.25469	-0.03517	4.79E-3±1.00E-10	2.29E-2±7.00E-4	8.24E-2±2.15E-3	1.30E-1±4.68E-4	9.26E-2±3.38E-4	8.33E-2±3.18E-4	4.79E-2±1.22E-4	1.06E-2±5.24E-4
M60	19.36427	-0.04710	6.11E-4±5.60E-5	1.31E-2±3.00E-4	1.91E-1±4.00E-3	5.38E-1±3.00E-2	5.42E-1±2.4E-2	6.21E-1±2.0E-2	3.26E-1±1.10E-2	1.36E-1±3.00E-3
M61	19.40701	-0.04685	...	...	...	5.08E-3±2.90E-4	8.78E-3±6.50E-4	1.26E-2±8.0E-4	1.27E-2±1.00E-3	8.58E-4±4.01E-4
M62	19.46596	-0.05092	7.52E-4±8.26E-5	2.76E-2±7.88E-4	1.15E-1±2.00E-3	1.70E-1±3.92E-3	1.25E-1±3.09E-3	1.17E-1±3.10E-3	6.60E-2±1.18E-3	1.99E-2±2.52E-3
M63	19.46982	-0.05115	4.96E-4±1.00E-10	2.19E-3±1.80E-4	7.38E-3±3.10E-4	2.56E-2±5.07E-5	1.95E-2±5.90E-5	1.56E-2±6.45E-5	1.05E-2±7.75E-5	2.19E-2±1.08E-3
M64	19.20814	-0.05519	1.30E-4±1.00E-10	1.18E-3±1.00E-10	1.5E-2±4.00E-4	7.66E-2±3.60E-3	8.05E-2±3.50E-3	8.75E-2±2.90E-3	5.63E-2±1.65E-3	2.71E-2±4.55E-3
M65	19.48804	-0.0566	8.20E-4±7.90E-5	1.72E-3±1.10E-4	2.69E-2±6.00E-4	1.50E-1±5.00E-3	1.44E-1±6.00E-3	1.50E-1±6.00E-3	7.18E-2±3.50E-3	7.17E-3±1.03E-2
M66	19.42068	-0.05655	1.38E-3±7.50E-5	1.87E-3±1.00E-10	1.67E-2±3.38E-4	1.20E-1±4.28E-4	1.20E-1±4.28E-4	1.26E-1±4.53E-4	6.20E-2±5.11E-4	1.21E-2±6.11E-4

M67	19.46775	-0.06074	1.40E-3±1.00E-10	2.79E-3±1.00E-10	5.78E-3±3.55E-4	1.59E-2±4.49E-5	1.76E-2±5.27E-5	1.94E-2±6.17E-5	2.36E-2±1.10E-4	2.05E-2±6.40E-3
M68	19.41779	-0.06138	1.23E-3±8.50E-5	1.66E-2±1.00E-10	1.46E-1±1.00E-10	3.32E-1±1.20E-2	2.57E-1±7.00E-3	2.52E-1±7.00E-3	1.38E-1±4.00E-3	2.15E-2±1.00E-3
M69	19.40507	-0.06457	1.44E-3±7.00E-5	6.27E-2±1.20E-3	3.19E-1±6.00E-3	3.73E-1±1.19E-2	2.99E-1±7.24E-3	3.54E-1±8.40E-3	1.48E-1±3.06E-3	1.86E-2±3.10E-3
M70	19.48484	-0.0653	1.13E-3±6.00E-5	4.05E-2±1.00E-3	1.78E-1±3.00E-3	2.71E-1±1.08E-3	2.03E-1±9.54E-4	1.89E-1±8.15E-4	9.73E-2±4.13E-4	2.01E-2±3.61E-4
M71	19.51245	-0.06571	2.70E-3±1.00E-4	1.20E-1±2.75E-3	1.95E-1±8.50E-3	4.62E-1±1.33E-7	3.6E-1±1.48E-3	3.17E-1±1.49E-3	1.60E-1±7.36E-4	7.30E-3±5.02E-3
M72	19.50483	-0.0706	3.58E-04±1.00E-10	3.85E-04±1.00E-10	6.33E-03±2.00E-04	4.06E-01±1.12E+02	6.71E+01±1.20E-02	1.01±3.00E-2	8.85E-01±1.60E-02	2.82E-01±1.95E-02
M73	19.3495	-0.07657	4.19±1.95E-01	1.33±1.20E-01	2.93E-01±1E-7	8.59±4.45E-01	9.56±3.46E-01	1.34E+01±4.00E-01	1.78E+01±7.56E-01	1.96E+01±3.83
M74	19.37066	-0.09885	3.75±1.90E-01	1.89±1.00E-07	1.93E-01±1.00E-07	6.10±3.25E-01	7.88±4.20E-01	1.81E+01±9.00E-01	3.31E+01±1.75	1.46E+02±2.70E+01
M75	19.36693	-0.09144	5.87E-4±7.02E-5	1.09E-3±1.00E-6	4.57E-3±1.56E-4	3.23E-2±6.59E-2	3.59E-2±7.76E-5	4.25E-2±1.98E-4	5.45E-2±4.25E-4	1.01E-1±1.00E-10
M76	19.49515	-0.09024	1.04E+02±2.00	3.42E+01±8.00E-01	2.3±1.10E-01	9.01E+01±2.11	9.44E+01±2.48	8.82E+01±2.75	5.19E+01±1.2	2.06E+01±3.75
M77	19.38754	-0.09424	3.69E-3±1.21E-4	7.35E-2±2.37E-3	2.57E-1±6.91E-3	3.74E1±1.10E-2	2.48E-1±9.00E-3	2.34E-1±5.00E-3	1.32E-1±4.00E-3	1.63E-2±1.30E-3
M78	19.40257	-0.10103	...	...	...	1.79±1.24E-01	4.95±2.70E-01	6.44±4.20E-01	1.82E+01±7.00E-01	4.08E+01±2.2
M79	19.47522	-0.10708	...	...	...	4.88E-1±1.41E-3	4.39E-1±1.34E-3	2.94E-1±1.36E-3	1.68E-1±7.79E-4	2.56E-2±1.77E-3
M80	19.41974	-0.10845	2.04E-3±8.09E-5	4.83E-2±1.30E-3	2.37E-1±4.82E-3	3.70E-1±1.03E-3	3.07E-1±1.33E-3	3.00E-1±1.39E-3	1.75E-1±8.18E-4	3.04E-2±1.54E-3
M81	19.37276	-0.11565	2.78E-3±1.75E-4	4.68E-2±1.58E-3	1.42E-1±2.05E-3	2.32E-1±9.02E-4	1.59E-1±6.25E-4	1.42E-1±5.86E-4	9.47E-2±2.67E-4	3.53E-2±5.64E-4
M82	19.39826	-0.12543	...	...	...	3.50E-1±9.64E-4	2.12E-1±8.69E-4	1.74E-1±7.40E-4	1.04E-1±4.4E-4	1.13E-2±8.14E-4
M83	19.46978	-0.13905	...	...	...	2.00E-1±7.62E-4	1.34E-1±1.40E-2	1.07E-1±4.23E-4	5.50E-2±1.43E-4	1.63E-2±1.33E-3
M84	19.3644	-0.0307	1.97±1.00E-07	2.48±1.30E-01	2.2±9.00E-02	1.69E+01±4.9	5.66E+01±4.95	5.60E+01±4.20E+00	2.65E+01±6.45E+00	2.24E-03±1.20E-02
M85	19.41092	0.06227	1.38E-2±4.00E-4	6.66E-2±1.95E-3	9.99E-2±2.00E-3	7.57E-2±2.93E-3	4.74E-2±2.07E-3	3.76E-2±1.60E-3	1.96E-2±1.60E-3	1.72E-2±1.44E-3
M86	19.22069	0.06235	6.90E+02±1.25E+01	3.66E+02±9.00	5.22E+01±1.45	4.96E+02±1.80E+01	3.44E+02±1.10E+01	2.90E+02±8.50	1.63E+02±4.00	1.25E+01±1.30
M87	19.36151	0.08223	...	...	...	...	...	...	...	...
M88	19.39673	-0.13246	8.68E+01±3.40	2.15E+01±1.32	7.29±4.00E-01	1.56E+02±5.50	1.02E+02±4.40	1.06E+02±3.40	6.25E+01±1.55	2.33E+01±7.23E-01
M89	19.36035	-0.09891	5.78±3.85E-01	1.73±1.40E-01	1.83E+03±6.00E+01	5.14±6.50E-01	3.38±5.70E-01	4.53±6.80E-01	...	3.83E+02±3.20E+01
M90	19.47559	-0.10701	8.94E+02±2.00E+01	7.40E+02±1.35E+01	3.40E+02±8.00	4.54E+02±2.45E+01	4.41E+02±1.30E+01	3.04E+02±8.50	1.68E+02±5.00	1.83E+01±3.57
M91	19.40213	-0.10143	9.54±1.80E-01	1.14E+01±3.00E-01	1.10E+01±2.00E-01	2.52±2.30E-01	2.98±3.26E-01	4.49±3.80E-01	1.82E+01±7.00E-01	2.60E+01±3.80
M92	19.38808	-0.09414	2.00E+02±6.50	5.47E+01±1.93	3.60±1.25E-01	2.51E+02±9.00	1.84E+02±7.00	1.91E+02±4.00	9.47E+01±1.01E+01	1.60E+01±1.13
M93	19.54188	-0.09341	2.59E-3±1.30E-4	3.96E-3±2.90E-4	5.09E-3±1.00E-10	1.66E-3±1.94E-4	1.26E-3±1.62E-4	...	...	1.39E-2±1.00E-10

Apéndice B

Parámetros físicos derivados de los modelos numéricos de SED ajustados a la fotometría de los YSOs de la nube molecular MC76.

Parámetros físicos derivados de los modelos numéricos de SED ajustados a la
fotometría de los YSOs de la nube molecular MC76.

ID	χ^2	A_v (mag)	$M_\star$ ($M_\odot$)	$R_\star$ ($R_\odot$)	$T_\star$ (K)	M ($M_\odot \text{yr}^{-1}$)	M_{disk} ($M_\odot$)	L_{bol} ($L_\odot$)	CLASE L	CLASE MJ
M1	495	25	3	19	4199	1.27E-03	4.25E-02	2.01	I	1
M2		10	6	19	4724	7.13E-05	1.75E-02	158.8	I	1
M3	7031	15	5	18	4680	1.17E-04	1.95E-01	2.16	III	1
M4	34	10	3	6	6500	0	3.73E-03	1.72	I	2
M5	381	10	2	8	4501	1.39E-06	9.78E-04	1.33	II	1
M6	2165	10	10	4	25160	0	9.227E-08	3.74	II	2
M7	1171	10	9	4	24070	0	5.31E-07	3.61	II	2
M8	...	...	...	...	...	...	...	...	II	...
M9	485	25	2	11	3945	1.47E-04	7.73E-03	1.461	I	1
M10	1940	10	4	6	7642	0	2.65E-05	2.01	I	1
M11	725	24	12	4	27720	0	3.03E-08	3.99	II	2
M12	11689	10	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	III	3
M13	6956	16	5	12	5225	9.47E-07	4.48E-05	2.01	I	1
M14	78	24	2	12	4323	1.67E-05	1.85E-01	0.88	I	1
M15	70	18	4	16	4468	1.15E-05	6.08E-04	1.94	I	1
M16	212	15	2	8	4385	5.45E-05	1.79E-02	1.35	I	1
M17	2282	25	5	18	4561	2.74E-05	6.18E-04	2.12	II	1
M18	518	29	10	4	25160	0	9.23E-08	3.74	II	2
M19	75	18	4	2	13650	0	8.34E-02	2.32	II	3
M20	10	15	6	38	4250	1.47E-03	3.58E-02	2.65	I	1
M21	9724	15	7	3	20330	0	7.30E-08	3.19	II	2
M22	2202	11	10	4	25160	0	9.23E-08	3.74	II	2
M23	187	10	4	7	6645	6.94E-09	1.09E-04	1.99	II	1
M24	1279	25	6	40	4221	1.16E-03	3.12E-01	2.66	II	1
M25	6389	11	6	3	18660	0	3.21E-08	2.99	II	2
M26	271	20	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	II	2
M27	493	10	6	3	18690	0	5.06E-03	2.99	II	2
M28	3482	20	8	4	23260	0	1.90E-07	3.54	II	2
M29	2521	16	10	4	25160	0	9.227E-08	3.74	II	2
M30	4772	18	8	3	22150	0	2.19E-06	3.40	II	2
M31	2198	10	6	3	19250	0	4.39E-08	3.06	II	2
M32	24	17	4	6	5231	6.88E-08	1.82E-02	1.44	II	1
M33	51	12	2	3	7448	0	1.64E-03	1.44	I	1
M34	19566	10	4	7	5353	3.49E-08	1.08E-06	1.62	III	3
M35	602	16.427	6	3	18020	0	1.03E-02	3.19	II	2
M36	1555	20	10	4	25160	0	9.23E-08	3.74	II	2
M37	1249	10	12	4	27720	0	3.03E-08	3.99	II	2
M38	583	15	4	5	9494	0	1.63E-06	2.25	II	1
M39	354	20	8	3	21570	0	1.14E-07	3.35	II	2
M40	...	...	...	...	...	...	...	...	II	...
M41	2244	20	10	4	25160	0	9.23E-08	3.74	II	2
M42	265	18	9	4	24900	0	7.16E-08	3.71	II	2
M43	1568	20	5	8	8506	1.52E-07	1.35E-02	2.45	II	1
M44	743	11	5	13	5657	4.66E-05	3.09E-03	2.18	II	1
M45	354	20	8	3	21570	0	1.14E-07	3.35	II	...
M46	3	19	2	8	4264	1.42E-05	4.95E-02	1.30	II	1
M47	3	15	2	10	4311	6.01E-05	3.46E-03	1.46	I	1
M48	591	11	7	3	20570	0	8.83E-04	3.22	I	1
M49	13034	15	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	III	3
M50	1879	15	8	43	4450	1.12E-03	4.30E-02	2.82	II	1
M51	33850	33850	1	1	4188	4.19E+03	3.937e-08	-0.25	III	3

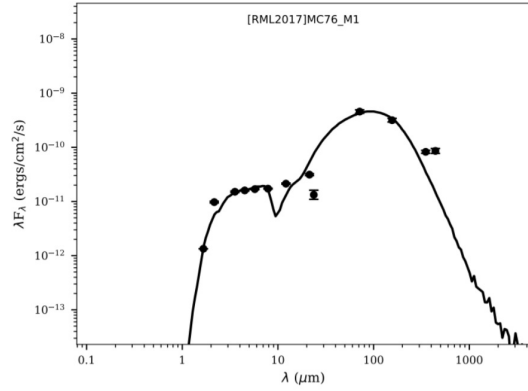
**Parámetros físicos derivados de los modelos numéricos de SED ajustados a la
fotometría de los YSOs de la nube molecular MC76.**

M52	8869	28	11	94	4188	5.34E-04	5.42E-01	3.46	I	1
M53	4774	25	5	38	4165	4.87E-04	1.39E-02	2.61	I	1
M54	105	10	3	3	11440	0	1.97E-02	2.03	I	1
M55	371	18	6	3	18020	0	1.03E-02	3.19	II	2
M56	214	14	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	II	2
M57	180	14	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	II	2
M58	2599	19	10	4	25160	0	9.23E-08	3.74	II	2
M59	466	18	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	II	2
M60	1950	19	8	3	22150	0	2.19E-06	3.40	II	2
M61	23	25	4	2	14390	0	7.05E-09	2.33	II	2
M62	691	19	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	II	2
M63	95.00	18	4	8	5867	1.63E-05	2.63E-03	1.73	II	1
M64	2521	16	10	4	25160	0	9.227E-08	3.74	II	2
M65	1408	19	12	4	27790	0	1.50E-07	4.00	II	2
M66	3519	25	9	4	24900	0	7.16E-08	3.71	II	2
M67	40.80	19	4	9	12550	2.60E-05	1.40E-01	1.99	II	1
M68	793	21	10	4	25160	0	9.23E-08	3.74	II	2
M69	2521	16	10	4	25160	0	9.227E-08	3.74	II	2
M70	1840	13	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	II	2
M71	4361	14	10	4	25160	0	9.23E-08	3.74	II	2
M72	2521	16	10	4	25160	0	9.23E-08	3.55	II	1
M73	2520	16	10	4	25160	0	9.227E-08	3.74	I	1
M74	103	13	4	14	4531	5.48E-04	7.98E-02	1.89	I	1
M75	499	13	2	13	4259	1.72E-05	1.85E-02	1.78	II	1
M76	664	17	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	II	2
M77	3526	10	5	5	30960	0	9.04E-09	4.28	II	2
M78	14	11	4	2	14980	0	1.61E-03	2.43	I	1
M79	887	19.67	2	2	5182	0	4.60E-08	0.49	III	3
M80	916	19	10	4	25160	0	9.23E-08	3.74	I	2
M81	2247	15	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	II	2
M82	719	10	1	2	3968	0	8.362E-10	-0.04	III	3
M83	312	11	1	1	4809	0	1.87E-06	0.01	III	3
M84	8108	19	7	29	4481	1.28E-04	0.007688	2.48	I	1
M85	...	...	...	...	...	...	...	0	...	...
M86	669	21	10	4	25160	0	9.23E-08	3.74	0	2
M87	...	...	...	...	...	...	...	0	...	...
M88	627	17	15	5	30960	0	9.04E-09	4.28	0	2
M89	524	11	7	32	4790	1.62E-05	2.65E-01	2.69	0	1
M90	677	15	10	4	25160	0	9.23E-08	3.74	0	2
M91	246	10	4	7	5035	0	6.48E-05	1.40	0	1
M92	766	15	12	4	27720	0	3.03E-08	3.99	0	2
M93	81	10	3	3	11410	0	5.93E-09	2.19	0	1

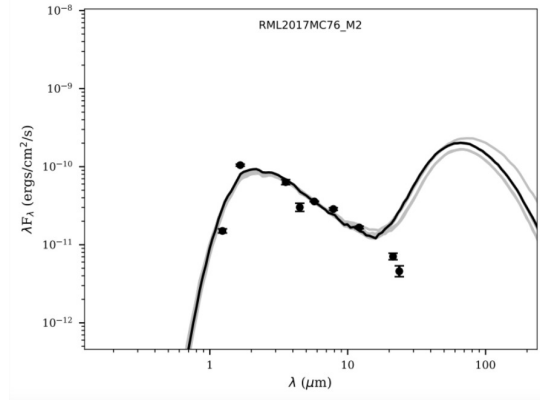
Apéndice C

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

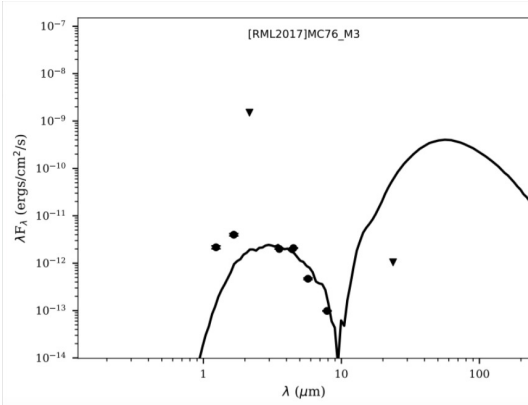
Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76



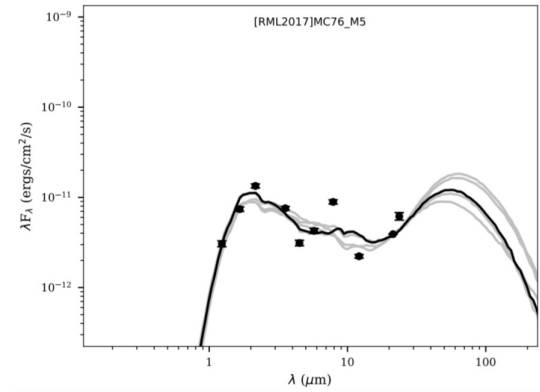
(a) YSO M1



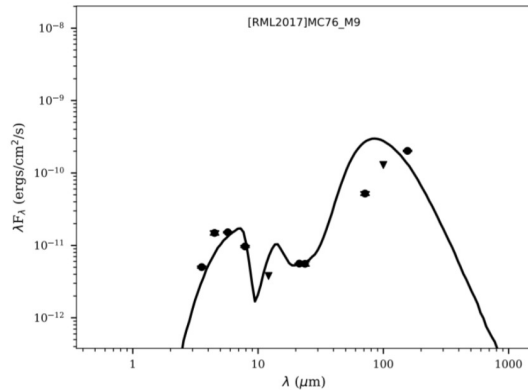
(b) YSO M2



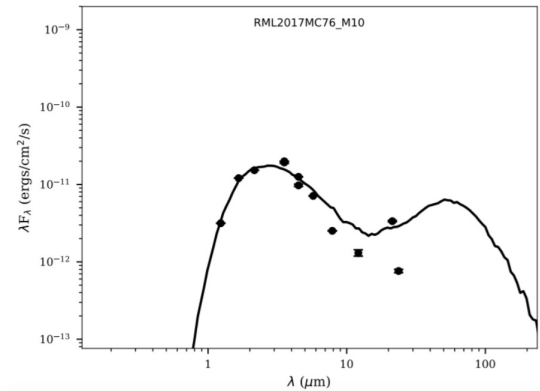
(c) YSO M3



(d) YSO M5



(e) YSO M9



(f) YSO M10

Figura C.1: Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la fig. 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

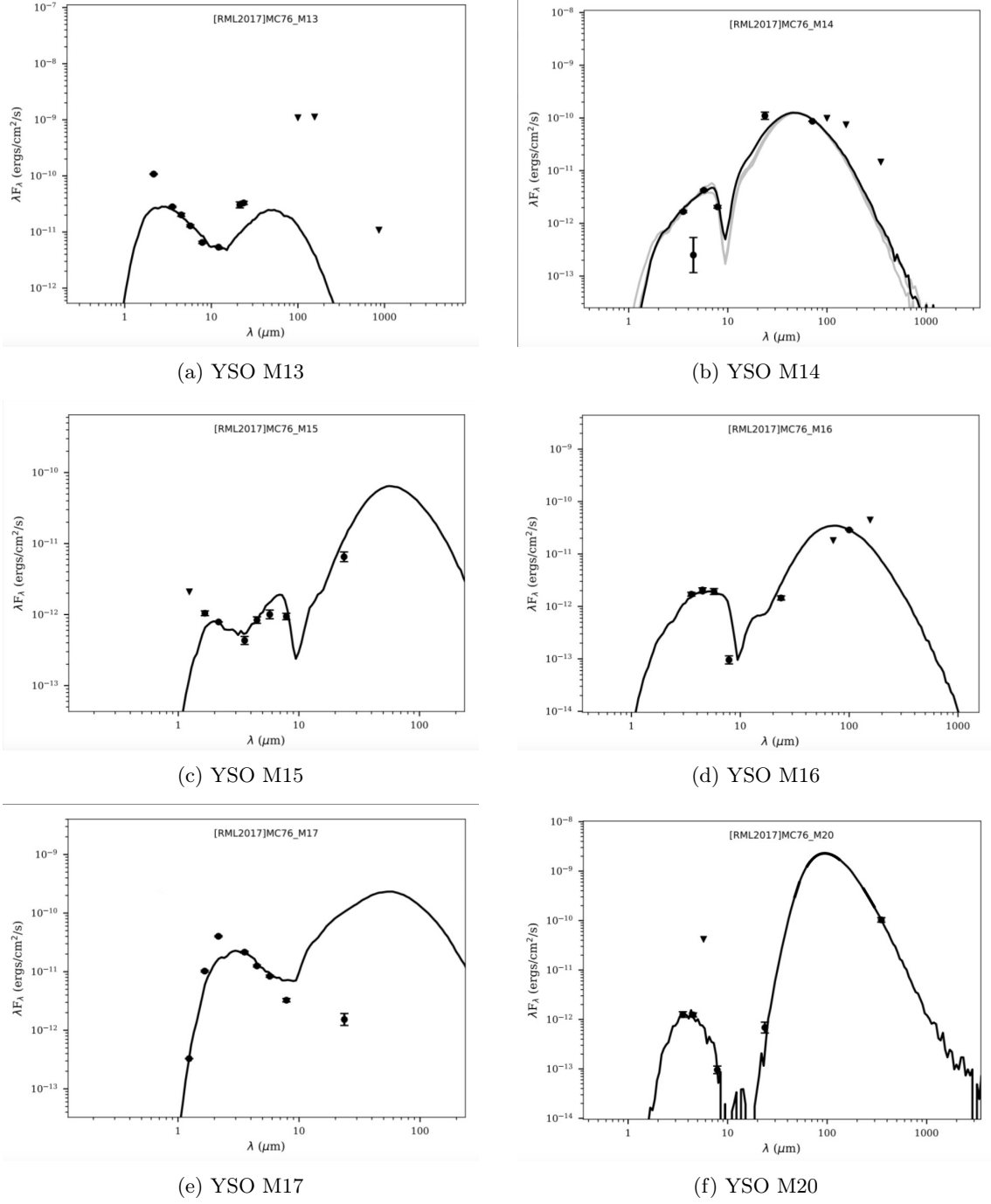


Figura C.2: Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

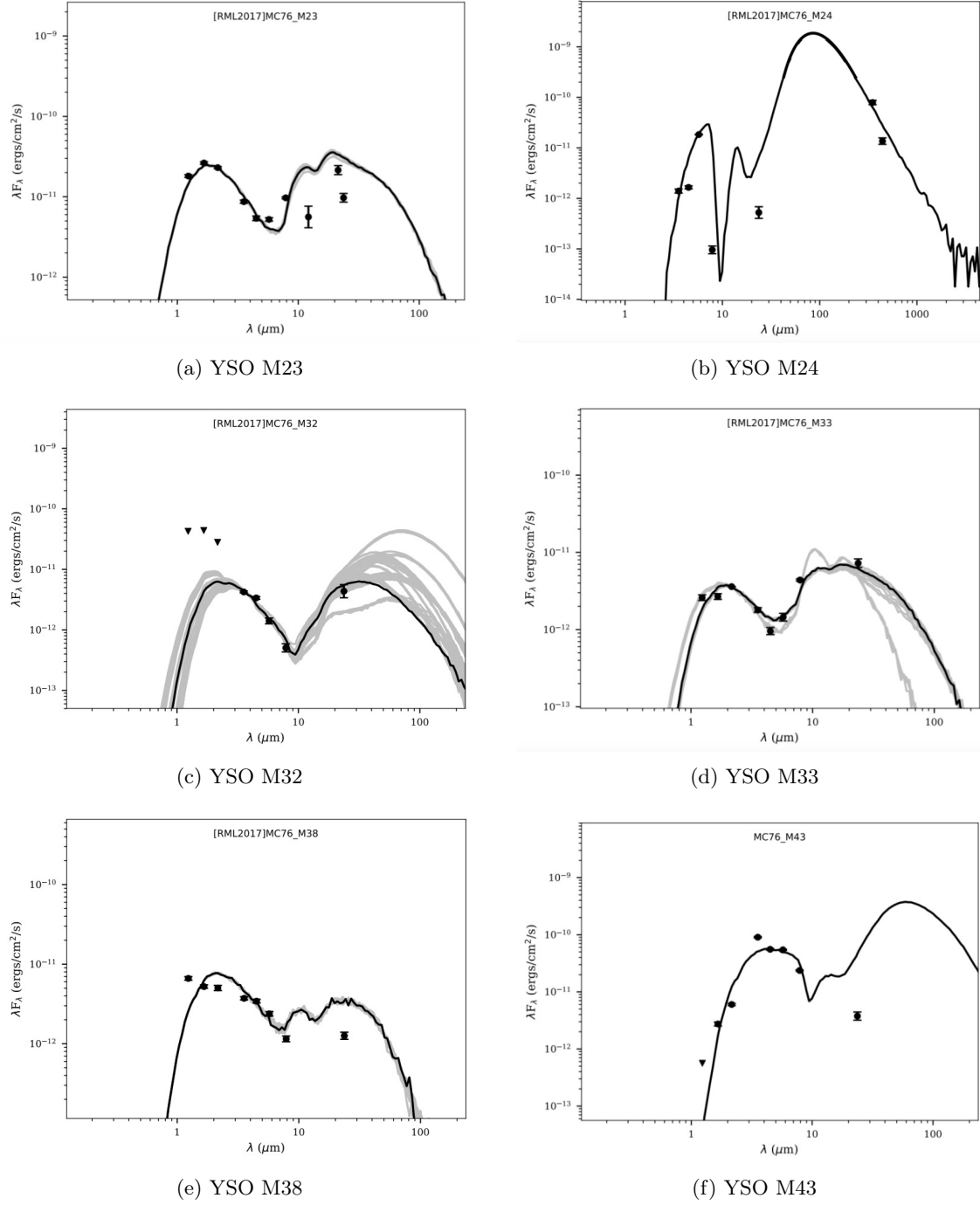


Figura C.3: Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

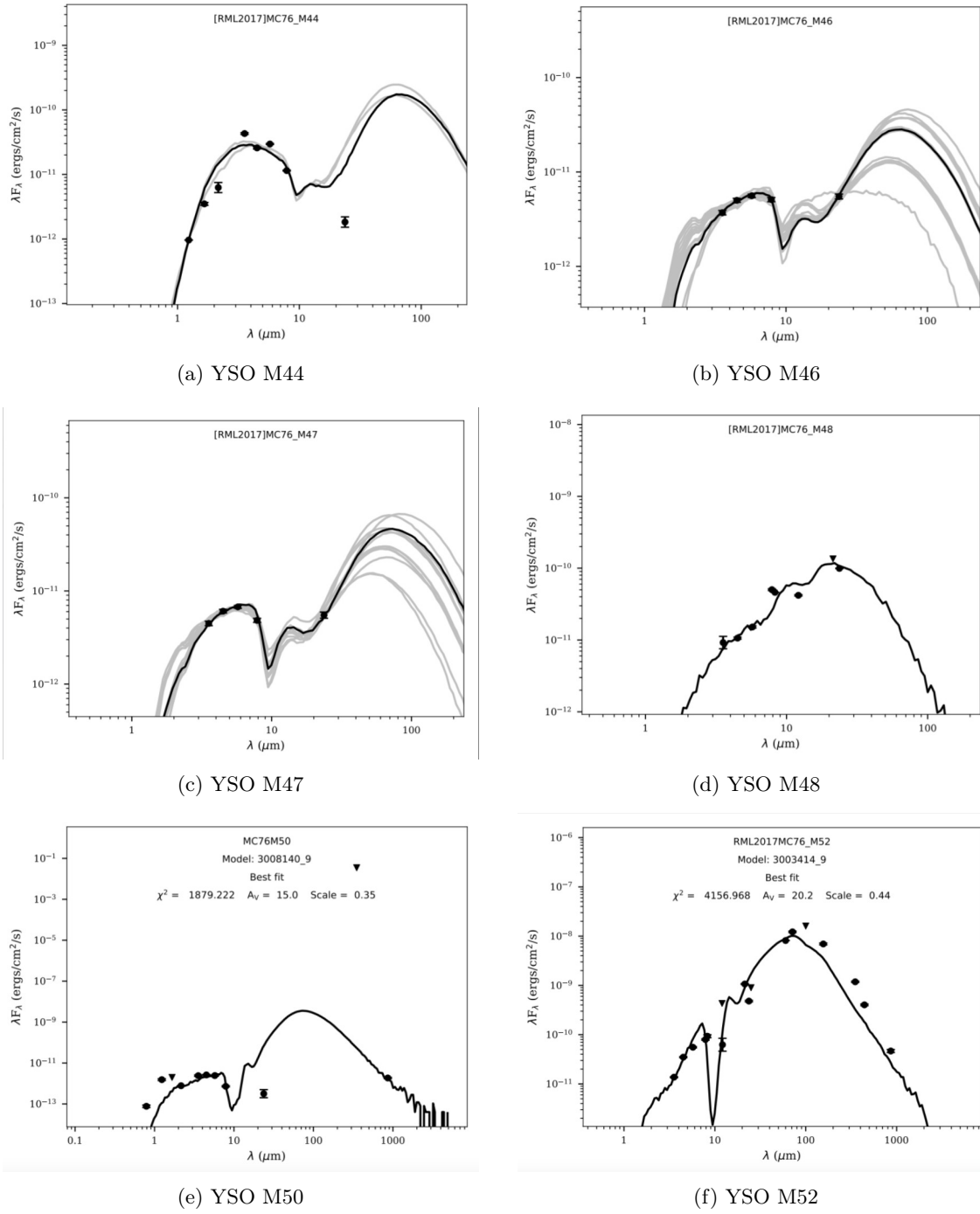
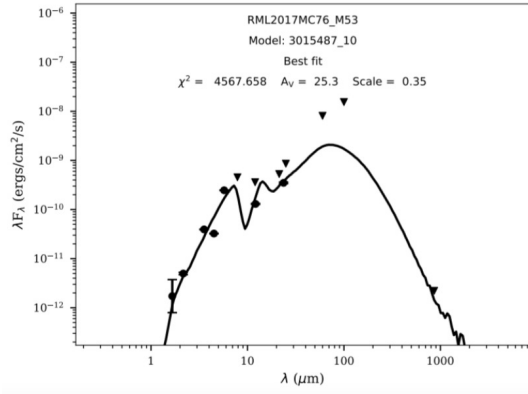
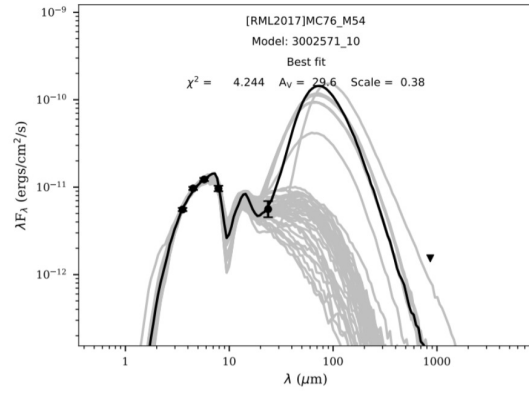


Figura C.4: Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

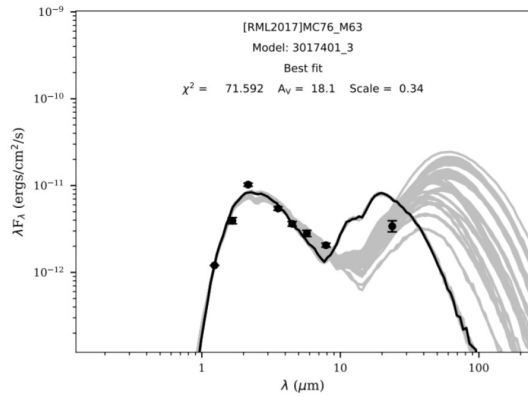
Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76



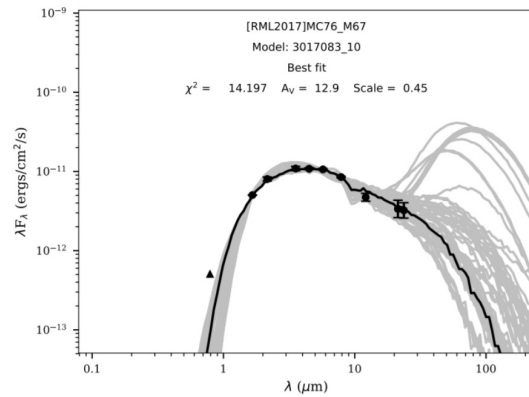
(a) YSO M53



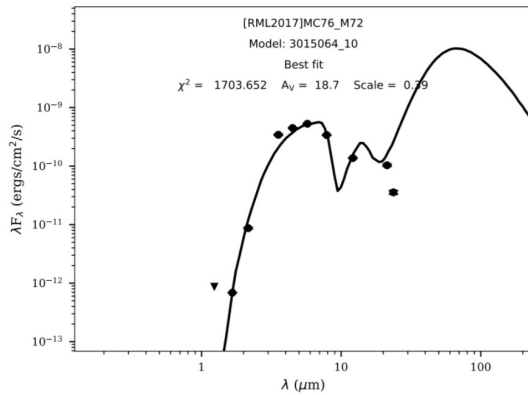
(b) YSO M54



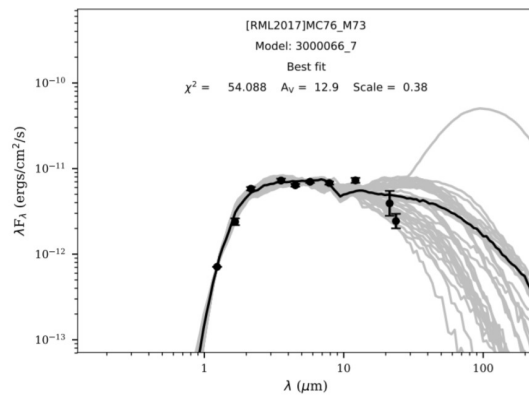
(c) YSO M63



(d) YSO M67



(e) YSO M72



(f) YSO M73

Figura C.5: Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

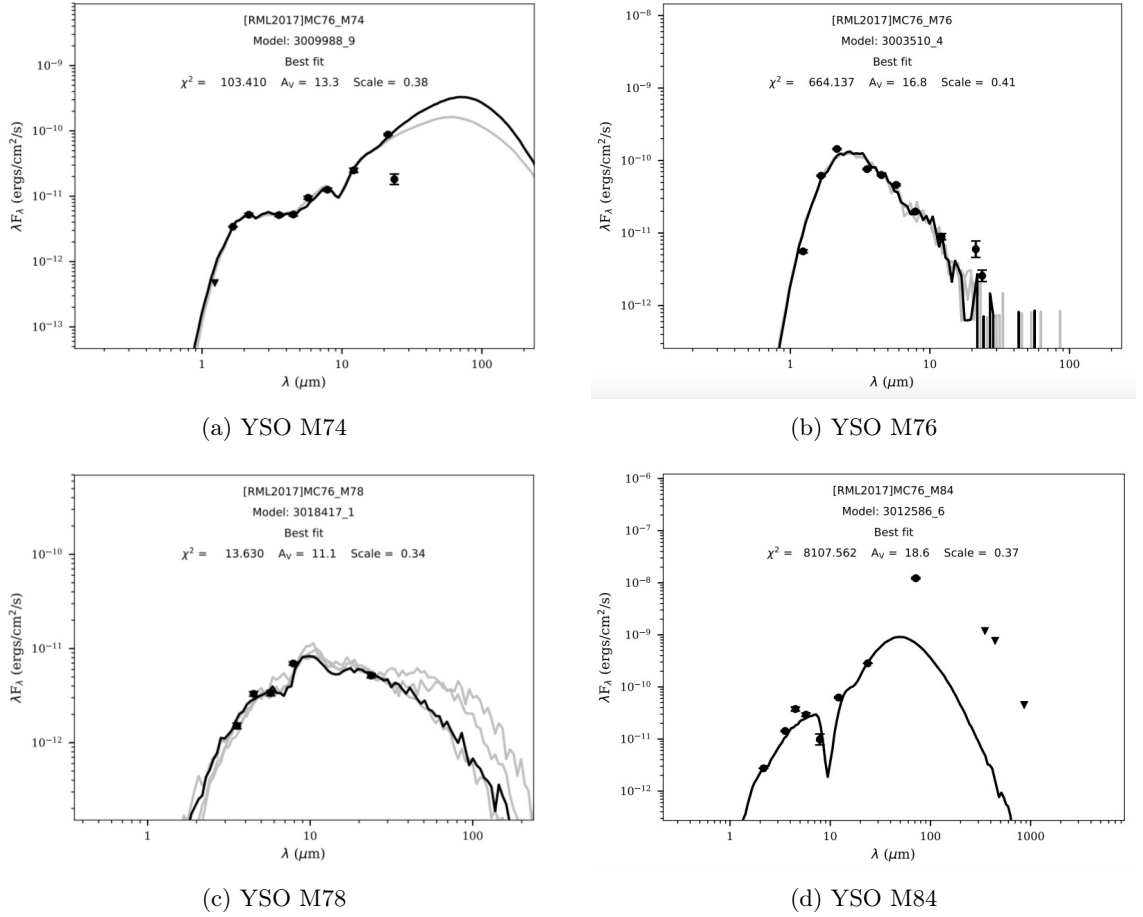


Figura C.6: Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

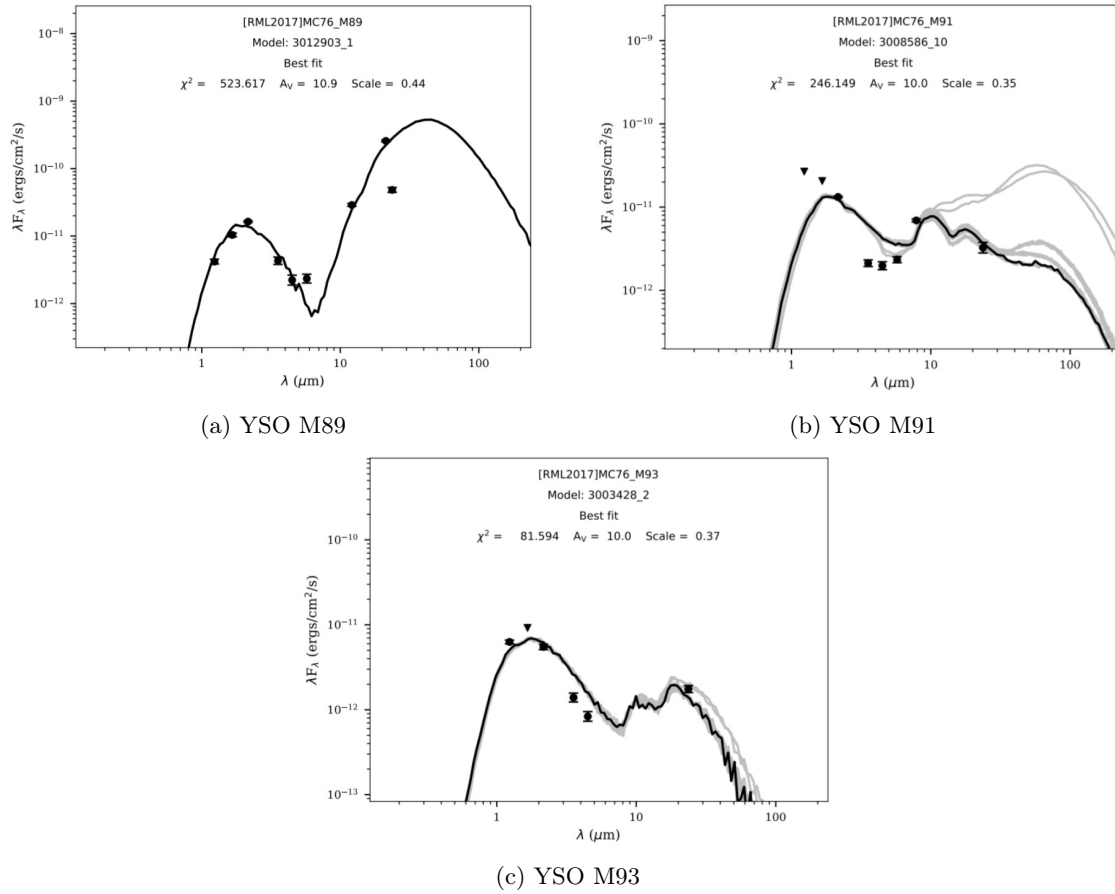


Figura C.7: Distribución espectral de energía de YSOs clase 1 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

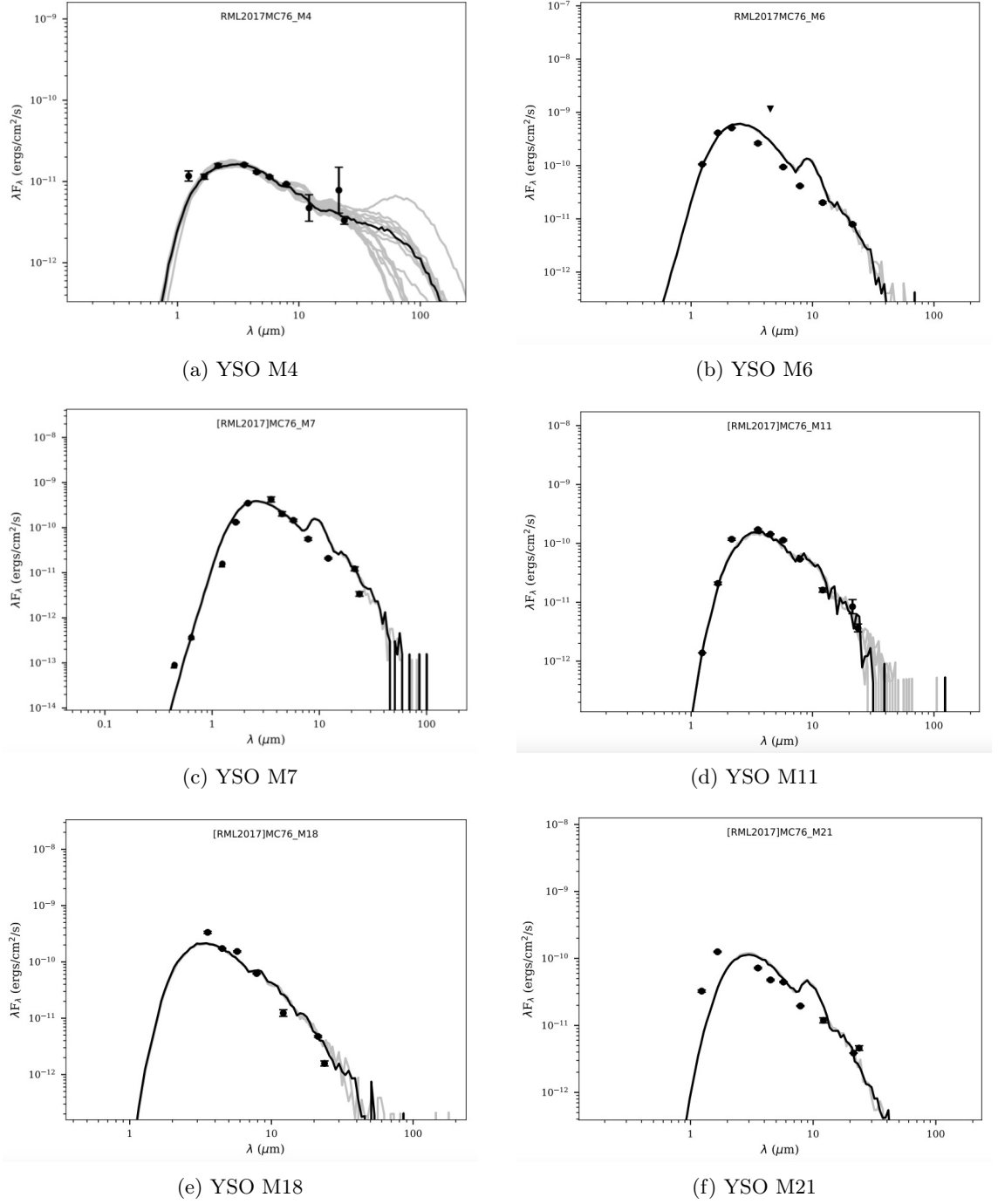


Figura C.8: Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

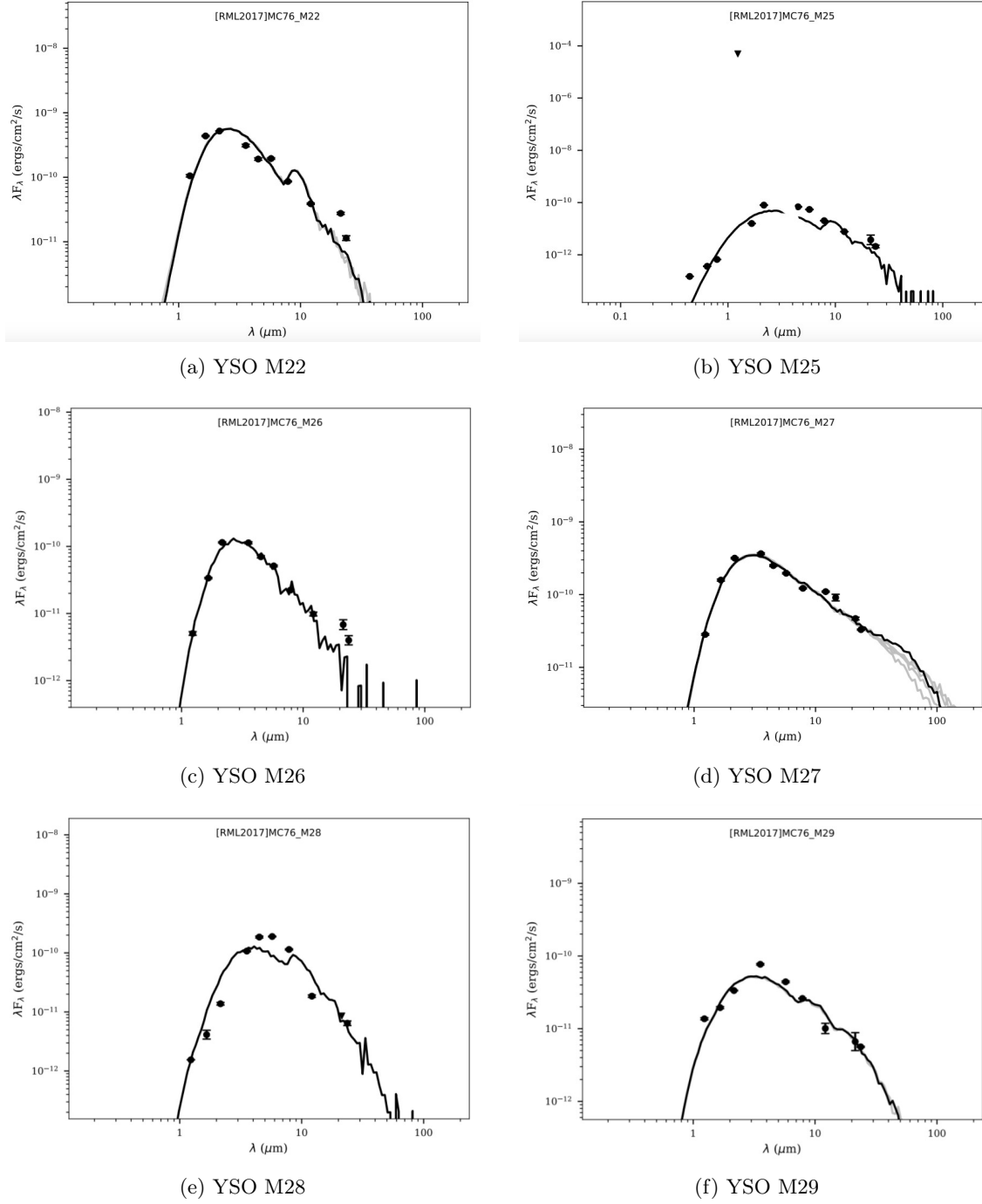


Figura C.9: Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

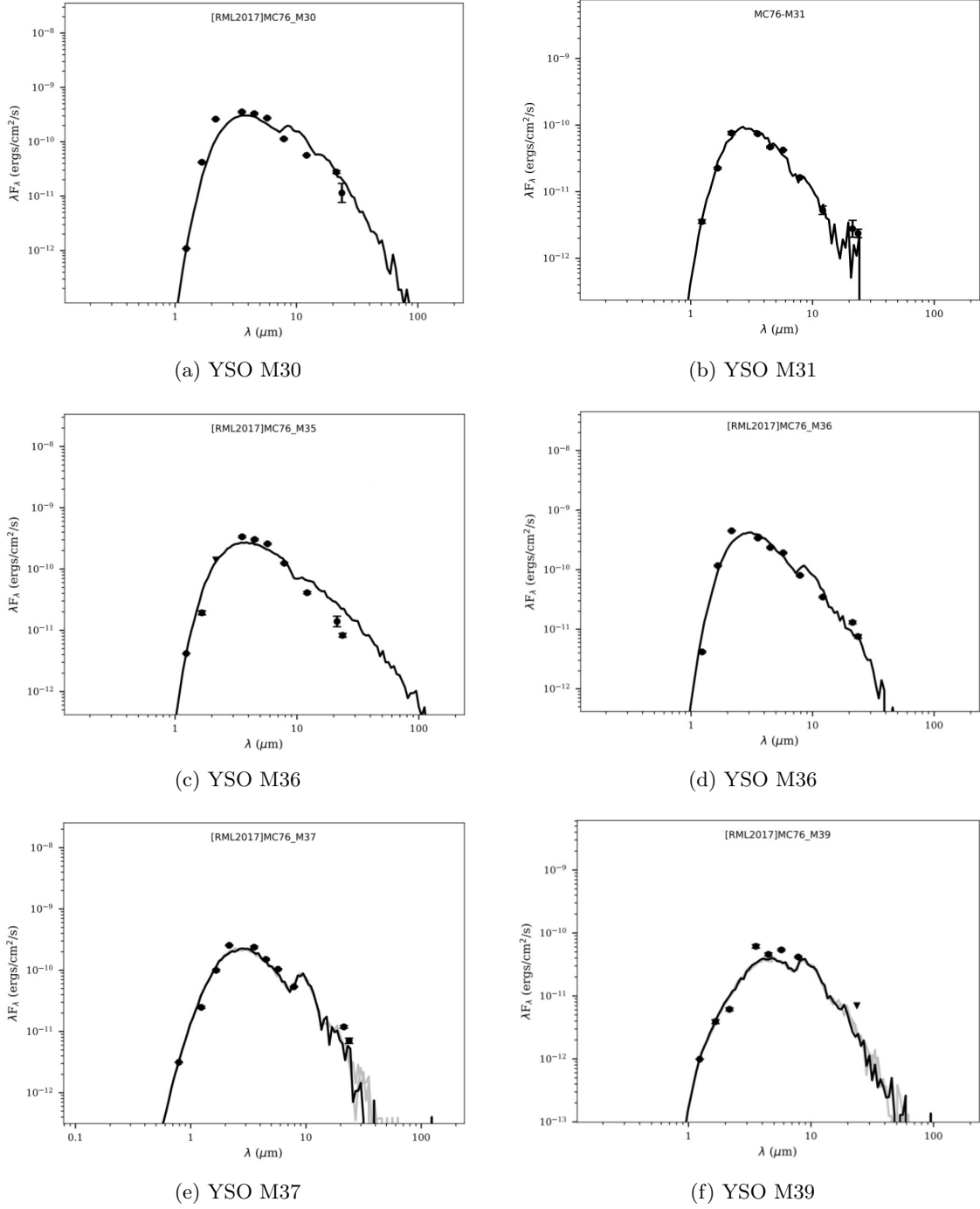


Figura C.10: Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

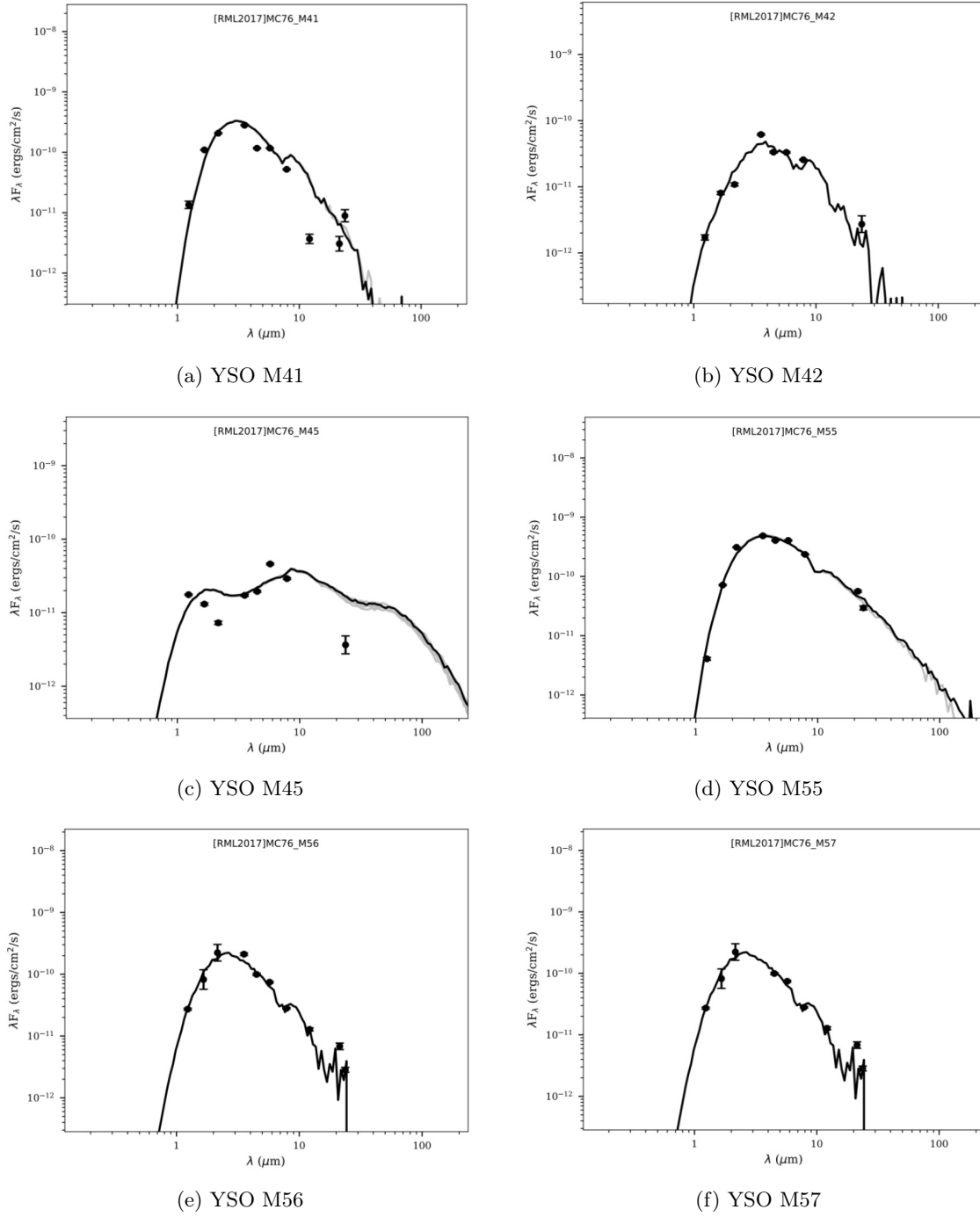


Figura C.11: Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

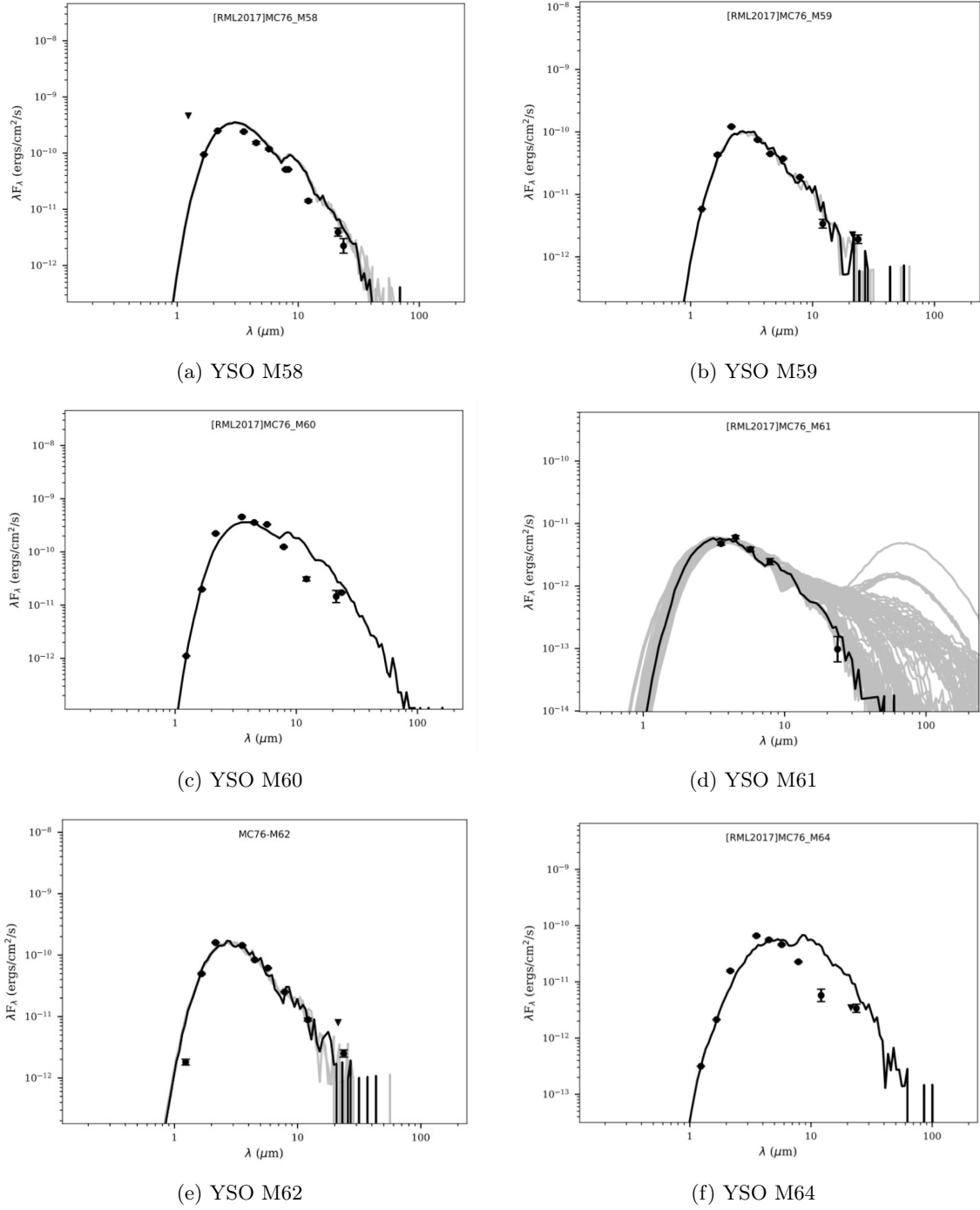


Figura C.12: Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

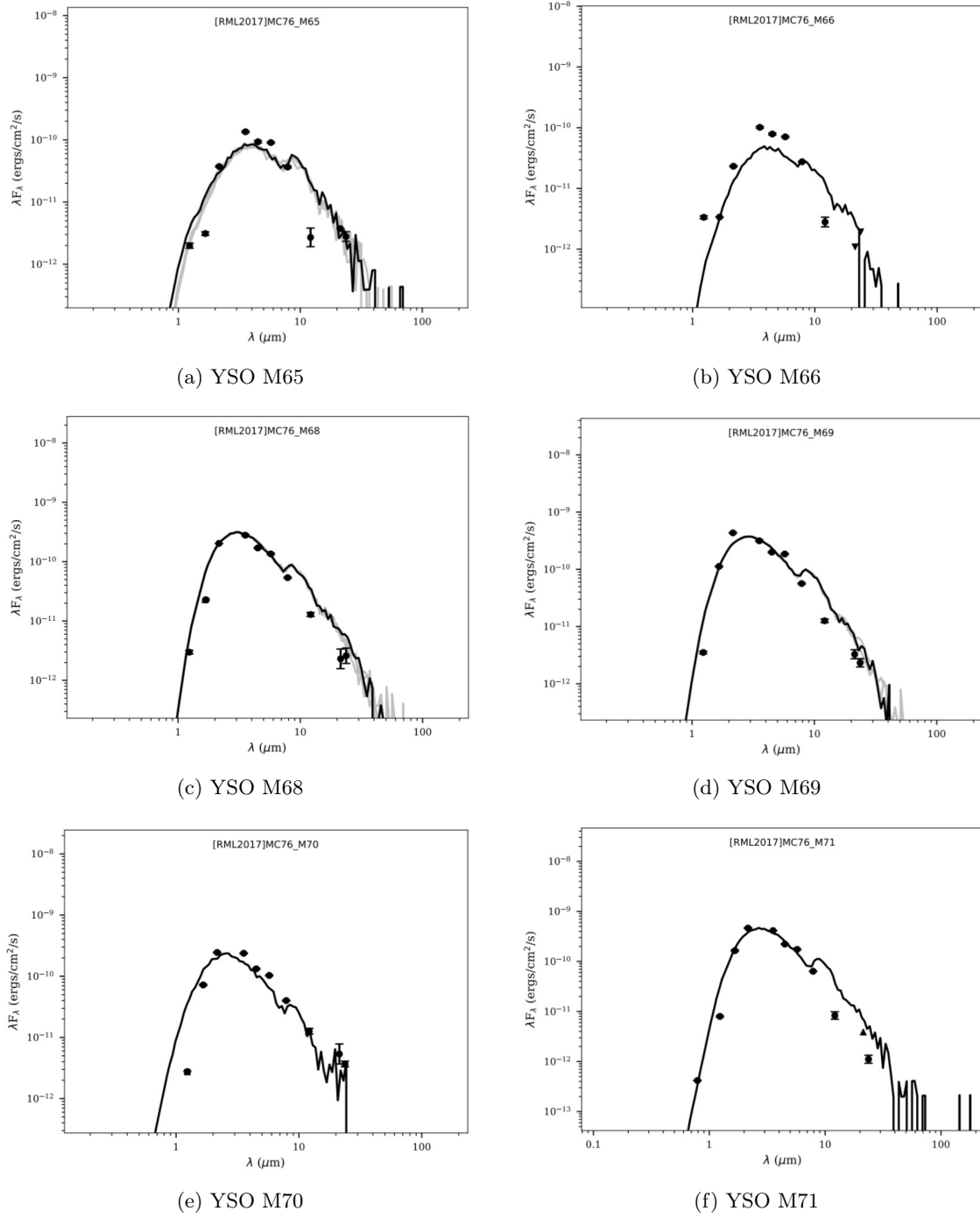


Figura C.13: Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

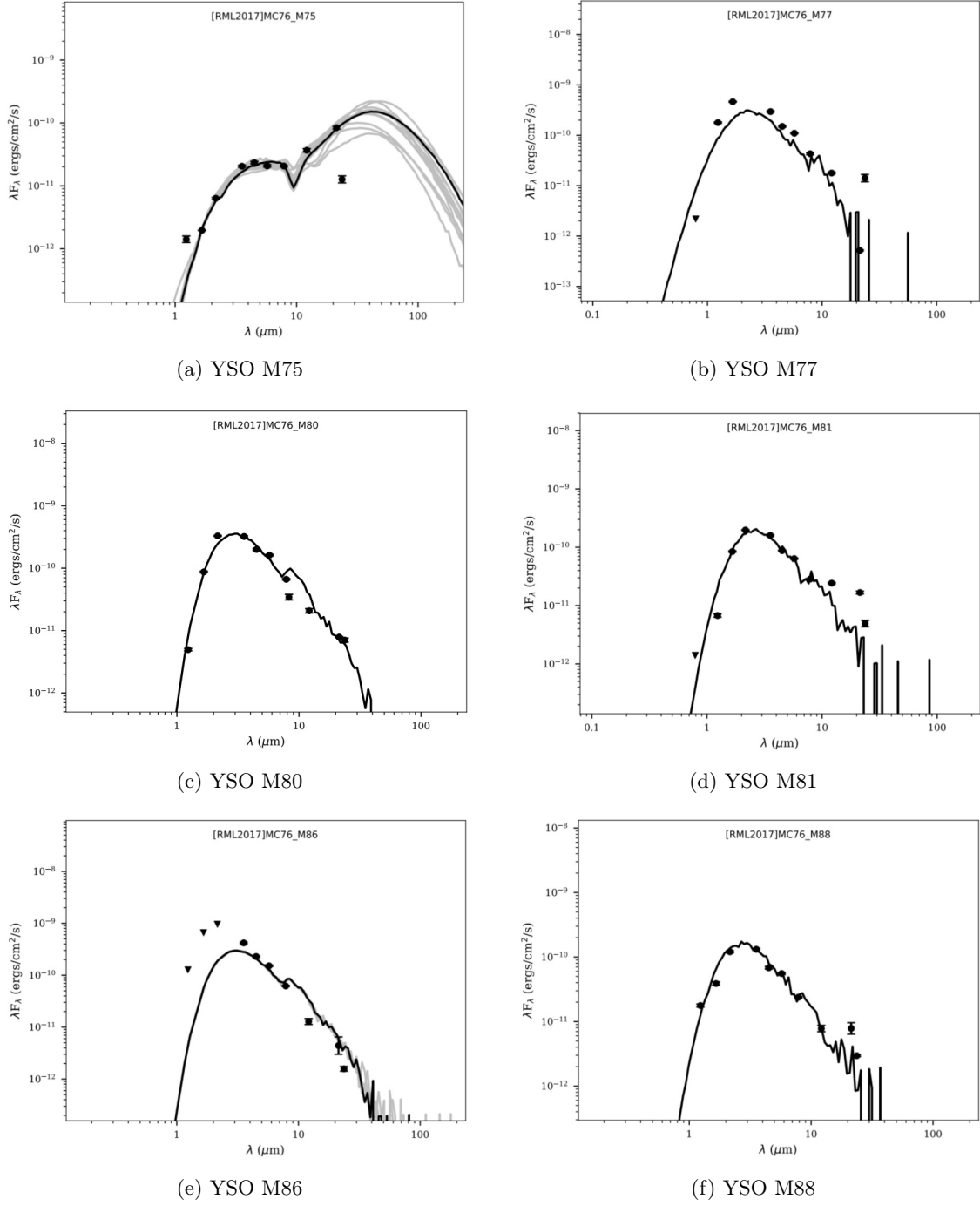
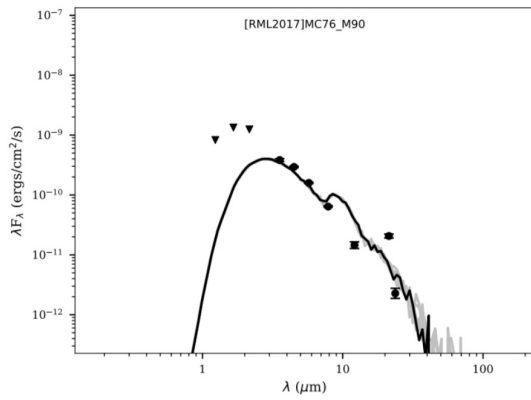
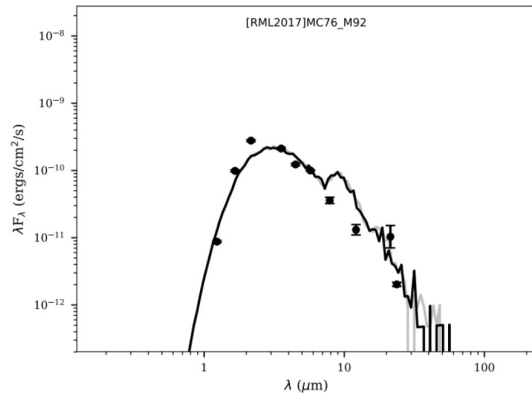


Figura C.14: Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1



(a) YSO M90



(b) YSO M92

Figura C.15: Distribución espectral de energía de YSOs clase 2 en MC76. Los detalles son los mismos que en la figura 3.1

Distribución espectral de energía de los YSOs de la nube molecular MC76

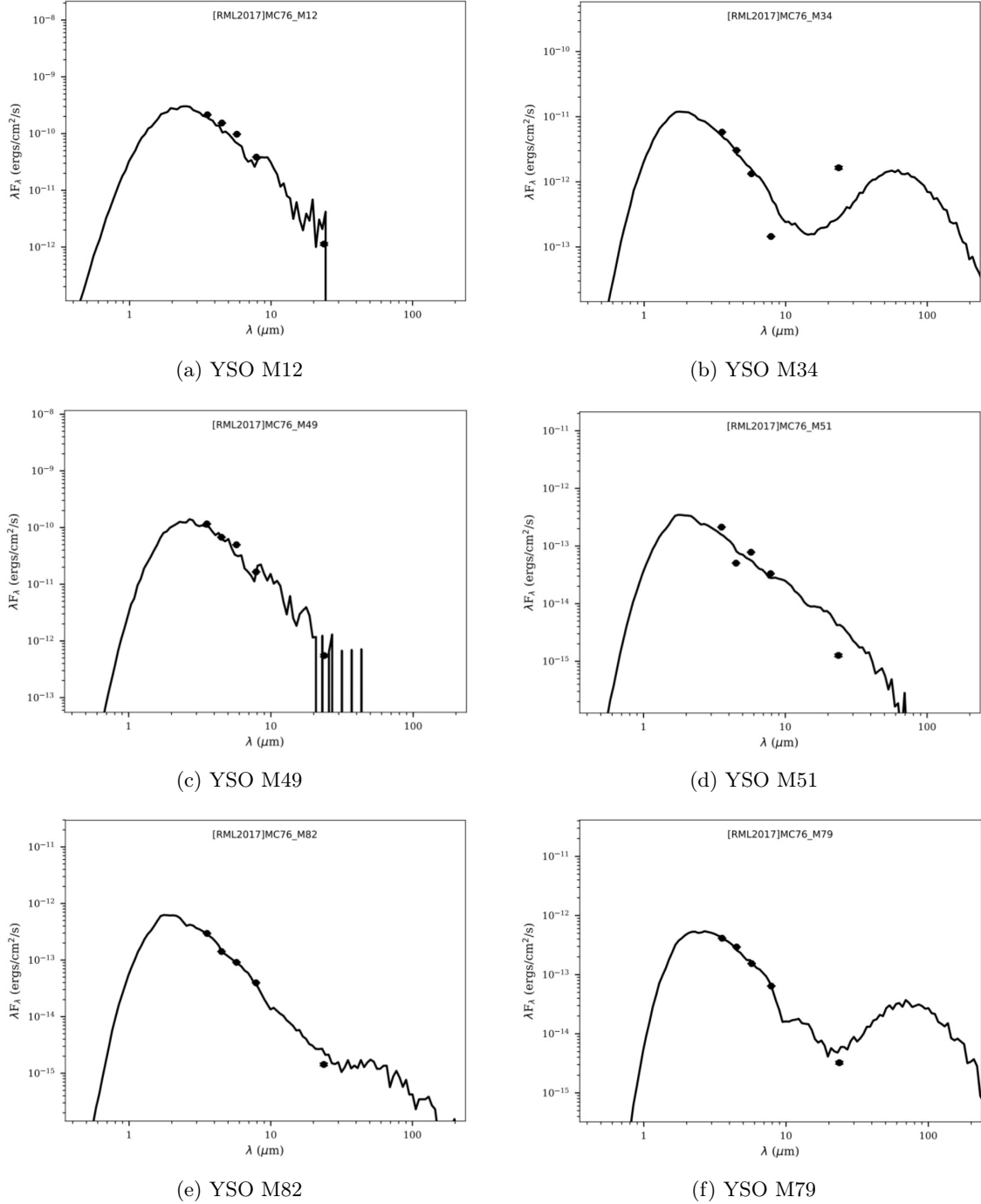


Figura C.16: Distribución espectral de energía de YSOs clase 3 en MC76. Los símbolos muestran los flujos medidos en el rango espectral del cercano infrarrojo hasta el submilimétrico y milimétrico. La línea negra muestra el mejor ajuste del modelo de SED, mientras que las líneas grises muestran potenciales ajustes de modelo de SED.

Bibliografía

- [1] ADAMS, F. C., LADA, C. J., & SHU, F. H. (1981) *Spectral evolution of young stellar objects* *The Astrophysical Journal*, 312, 788. <https://doi.org/10.1086/164924>
- [2] ANDRÉ, P., MENSCHIKOV, A., BONTEMPS, S., KÖNYVES, V., MOTTE, F., SCHNEIDER, N., DIDELON, P., MINIER, V., SARACENO, P., WARD-THOMPSON, D., DI FRANCESCO, J., WHITE, G. J., MOLINARI, S., TESTI, L., ABERGEL, A., GRIFFIN, M. J., HENNING, T., ROYER, P., MERÍN, B., . . . ZAVAGNO, A. (2010) *From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar IMF: Initial highlights from the Herschel Gould Belt Survey*. *Astronomy and Astrophysics*, 518, L102. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014666>
- [3] BERGIN, E. A., & TAFALLA, M. (2007) *Cold Dark Clouds: The Initial Conditions for Star Formation*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 45(1), 339-396. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.45.071206.100404>
- [4] BOADELLA, R. E., ESTALELLA, R., & UNIVERSITAT DE BARCELONA. DEPARTAMENT D'ASTRONOMIA Y METEOROLOGIA. (1996) *Introducción a la física del medio interestelar*. Edicions Universidad de Barcelona.
- [5] BUTLER, M. J., TAN, J. C. (2012) *Mid-infrared extinction mapping of infrared dark clouds. II. The structure of massive starless cores and clumps*. *The Astrophysical Journal*, 754(1), 5. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/754/1/5>.
- [6] BROTT, I., & HAUSCHILDT, P. H. (2015) *The Three-Dimensional Universe with Gaia* ed. C. Turon, K. S. O'Flaherty, M. A. C. Perryman (ESA SP-576; Noordwijk: ESA), 565.
- [7] BJORKMAN, J. E., & WOOD, K. (2001) *Radiative Equilibrium and Temperature Correction in Monte Carlo Radiation Transfer* *The American Astronomical Society*. *ApJ*, 554, 615
- [8] CAPPA, C. (2020) *Objetos estelares Jóvenes*. Instituto Argentino de Radioastronomía. <https://www.iar.unlp.edu.ar/boletin/objetos-estelares-jovenes>
- [9] DAUPHAS, N., CHAUSSIDON, M. (2011) *A perspective from extinct radionuclides on a young stellar object: the Sun and its accretion disk*. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39(1), 351-386. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040610-133428>
- [10] DE BUIZER, J. M., LIU, M., TAN, J. C., ZHANG, Y., BELTRÁN, M. T., SHUPING, R., STAFF, J. E., TANAKA, K. E. I., & WHITNEY, B. (2017) *The SOFIA Massive (SOMA) Star Formation Survey. I. Overview and First Results*. *The Astrophysical Journal*, 843(1), 33. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa74c8>
- [11] FAZIO, G. G., HORA, J. L., ALLEN, L. E., ASHBY, M. L. N., BARMBY, P., DEUTSCH, L. K., HUANG, J.-S., KLEINER, S., MARENGO, M., MEGEATH, S. T., MELNICK, G. J., PAHRE, M. A., PATTEN, B. M., POLIZOTTI, J., SMITH, H. A., TAYLOR, R. S., WANG, Z., WILLNER, S. P., HOFFMANN, W. F., PIPHER, J. L., FORREST, W. J., MCMURTY,

- C. W., MCCREIGHT, C. R., MCKELVEY, M. E., MCMURRAY, R. E., KOCH, D. G., MOSELEY, S. H., ARENDT, R. G., MENTZELL, J. E., MARX, C. T., LOSCH, P., MAYMAN, P., EICHHORN, W., KREBS, D., JHABVALA, M., GEZARI, D. Y., FIXSEN, D. J., FLORES, J., SHAKOORZADEH, K., JUNGO, R., HAKUN, C., WORKMAN, L., KARPATI, G., KICHAK, R., WHITLEY, R., MANN, S., TOLLESTRUP, E. V., EISENHARDT, P., STERN, D., GORJIAN, V., BHATTACHARYA, B., CAREY, S., NELSON, B. O., GLACCUM, W. J., LACY, M., LOWRANCE, P. J., LAINE, S., REACH, W. T., STAUFFER, J. A., SURACE, J. A., WILSON, G., WRIGHT, E. L., HOFFMAN, A., DOMINGO, G., COHEN, M., (2004). *The Infrared Array Camera (IRAC) for the Spitzer Space Telescope*, *ApJS*, 154, 10
- [12] FAÚNDEZ, S., BRONFMAN, L., GARAY, G., CHINI, R., NYMAN, L., & MAY, J. W. (2004) *SIMBA survey of southern high-mass star forming regions*. *Astronomy and Astrophysics*, 426(1), 97-103. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20035755>
- [13] GUTERMUTH, R. A., MYERS, P. C., MEGEATH, S. T., ALLEN, L. E., PIPHER, J. L., MUZEROLLE, J., PORRAS, A., WINSTON, E., & FAZIO, G. (2008) *Spitzer Observations of NGC 1333: A Study of Structure and Evolution in a Nearby Embedded Cluster*, *The American Astronomical Society*.
- [14] GREENE, T. P., WILKING, B. A., ANDRE, P., YOUNG, E. T., & LADA, C. J. (1994). *Further mid-infrared study of the rho Ophiuchi cloud young stellar population: Luminosities and masses of pre-main- sequence stars*. *The Astrophysical Journal*, 434, 614. <https://doi.org/10.1086/174763>
- [15] KIM, J., CHEVANCE, M., KRUIJSSEN, J. M. D., SCHRUBA, A., SANDSTROM, K., BARNES, A. T., BIGIEL, F., BLANC, G. A., CAO, Y., DALE, D. A., FAESI, C., GLOVER, S. C. O., GRASHA, K., GROVES, B., HERRERA, C. N., KLESSSEN, R. S., KRECKEL, K., LEE, J. C., LEROY, A. K., . . . WILLIAMS, T. N. (2021). *On the duration of the embedded phase of star formation*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 504(1), 487-509. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab878>
- [16] KURUCZ, R. (1993) *Kurucz CD-ROM No. 13, ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s Grid* Cambridge: SAO
- [17] KRUMHOLZ, M. K. (2015). *Notes on Star formation*. *Cornell University*. <https://arxiv.org/abs/1511.03457>
- [18] LADA, C. J. (1987). *Star Forming Regions*, ed. M. Peimbert *J. Jugaku*, 1–17
- [19] LEQUEUX, J., FALGARONE, E., & RYTER, C. (2004) *The Interstellar Medium*. *Springer*.
- [20] NEUGEBAUER, G., HABING, H. J., VAN DUINEN, R., AUMANN, H. H., BAUD, B., BEICHMAN, C. A., BEINTEMA, D. A., BOGGESS, N., CLEGG, P. E., DE JONG, T., EMERSON, J. P., GAUTIER, T. N., GILLET, F. C., HARRIS, S., HAUSER, M. G., HOUCK, J. R., JENNINGS, R. E., LOW, F. J., MARSDEN, P. L., . . . YOUNG, E. (1984) *The Infrared Astronomical Satellite (IRAS) mission*. *The Astrophysical Journal*, 278, L1. <https://doi.org/10.1086/184209>.
- [21] RAGAN, S., HENNING, T., KRAUSE, O., PITANN, J., BEUTHER, H., LINZ, H., TACKENBERG, J., BALOG, Z., HENNEMANN, M., LAUNHARDT, R., LIPPOK, N., NIELBOCK, M., SCHMIEDEKE, A., SCHULLER, F. P., STEINACKER, J. M., STUTZ, A. M., & VASYUNINA, T. (2012). *The Earliest Phases of Star Formation (EPoS): aHerschelkey program*. *Astronomy and Astrophysics*, 547, A49. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219232>
- [22] RIEKE, G., AND E. T. YOUNG, C. W. ENGELBRACHT, D. M. KELLY, F. J. LOW, E. E. HALLER, J. W. BEEMAN, K. D. GORDON, J. A. STANSBERRY, K. A. MISSELT, J.

- CADIEN, J. E. MORRISON, W. B. LATTER, A. NORIEGA-CRESPO, D. L. PADGETT, K. R. STAPELFELDT, D. C. HINES, E. EGAMI, J. MUZEROLLE, A. ALONSO-HERRERO, M. BLAYLOCK, H. DOLE, J. L. HINZ, E. LE FLOC'H, C. PAPOVICH, P. G. PEREZ-GONZALEZ, P. S. SMITH, K. Y. L. SU, L. BENNETT, D. T. FRAYER, D. HENDERSON, N. LU, F. MASCI, M. PESENSON, L. REBULL, J. RHO, J. KEENE, S. STOLOVY, S. WACHTER, W. WHEATON, P. L. RICHARDS,(2004). *The Multiband Imaging Photometer for Spitzer*, *ApJS*, 154, 25.
- [23] RETES ROMERO, R.(2017). *Ley de Formación Estelar en Nubes Moleculares Galácticas con Formación Estelar de Alta Masa. [DOCTOR EN CIENCIAS EN LA ESPECIALIDAD DE ASTROFÍSICA]. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.*
- [24] RETES-ROMERO, R., MAYYA, Y. D., LUNA, A., & CARRASCO, L. (2017). *The Star-formation Law in Galactic High-mass Star-forming Molecular Clouds. The Astrophysical Journal*, 839(2), 113. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6afc>
- [25] ROBITAILLE, T. P., WHITNEY, B. A., INDEBETOUW, R., WOOD, K., & DENZMORE, P. (2006). *Interpreting Spectral Energy Distributions from Young Stellar Objects. I. A Grid of 200,000 YSO Model SEDs. Astrophysical Journal Supplement Series*, 167(2), 256-285. <https://doi.org/10.1086/508424>.
- [26] ROBITAILLE, T. P., WHITNEY, B. A., INDEBETOUW, R., & WOOD, K.(2007) *Interpreting Spectral Energy Distributions from Young Stellar Objects. II. Fitting Observed SEDs Using a Large Grid of Precomputed Models. The Astrophysical Journal Supplement Series*, 169(2), 328–352. <https://doi.org/10.1086/512039> .
- [27] SOLE, J., BAUSA, L., & JAQUE, D. (2005) *An Introduction to the Optical Spectroscopy of Inorganic Solids. Wiley.*
- [28] SHU, F. *The Physical Universe: An Introduction to Astronomy (Revised)* textitUniversity Science Books.
- [29] SHU, F. H., ADAMS, F. C., & LIZANO, S. (1987) *Star Formation in Molecular Clouds: Observation and Theory. Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 25(1), 23–81. <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.25.090187.000323>
- [30] STAHLER, S. W. & PALLA, F.(2005). *The Formation of Stars. Wiley.*
- [31] TAN, J. C. (2014, 5 febrero). *Massive Star Formation.arXiv.org.* <https://arxiv.org/abs/1402.0919>
- [32] WHITNEY, B. A., WOOD, K., BJORKMAN, J. E., & COHEN, M.(2003) *Two-dimensional Radiative Transfer in Protostellar Envelopes. II. An Evolutionary Sequence. The Astrophysical Journal*, 598(2),1079-1099.<https://doi.org/10.1086/379068>
- [33] WHITNEY, B. A., WOOD, K., BJORKMAN, J. E., & WOLFF, M. J.(2003) *Two-dimensional Radiative Transfer in Protostellar Envelopes. I. Effects of Geometry on Class I Sources. The Astrophysical Journal*, 591(2), 1049-1063 <https://doi.org/10.1086/375415>
- [34] WOLF, S.(2003) *Efficient Radiative Transfer in Dust Grain Mixtures. The Astrophysical Journal*, 582(2), 859-868. <https://doi.org/10.1086/344710>.
- [35] YUSUKE TSUKAMOTO S.F.*Formation and Evolution of Circumstellar Disks*http://milkyway.sci.kagoshima-u.ac.jp/~tsukamoto/study_e.html
- [36] ZHANG, Y., & TAN, J. C. (2011) *RADIATION TRANSFER OF MODELS OF MASSIVE STAR FORMATION. I. DEPENDENCE ON BASIC CORE PROPERTIES. The Astrophysical Journal*, 733(1), 55. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/733/1/55>.

- [37] ZHANG, Y., TAN, J. C., & HOSOKAWA, T. (2013). *RADIATION TRANSFER OF MODELS OF MASSIVE STAR FORMATION. III. THE EVOLUTIONARY SEQUENCE*. *The Astrophysical Journal*, 788(2), 166. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/788/2/166>