



**I
N
A
O
E**

**Población estelar joven
embebida en la nube
molecular galáctica asociada a
la fuente IRAS 18236-1205**

por

Ricardo Retes Romero

Tesis sometida como requisito parcial para
obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ASTROFÍSICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica**

Junio 2008

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Divakara Y. Mayya

Investigador Titular INAOE

Dr. Abraham Luna Castellanos

Investigador Asociado INAOE

©INAOE 2008

El autor otorga al INAOE el permiso de
reproducir y distribuir copias en su totalidad o en
partes de esta tesis



Resumen

En esta tesis presento una metodología de selección y estudio de la población estelar embebida en la nube molecular galáctica asociada a la fuente IRAS 18236-1205. La fuente IRAS posee colores de región Ultra Compacta HII (UCHII) y tiene detección en monosulfuro de carbono (CS), trazador molecular de alta densidad, lo cual da la posibilidad de definir la nube molecular asociada hacia esta región. Lo anterior muestra que ésta es buena candidata a región de formación estelar masiva. La metodología de selección de la población embebida, está basada por una parte, en la distribución del gas molecular monóxido de carbono (^{13}CO) asociado a la fuente IRAS, nube molecular seleccionada del mapeo *Galactic Ring Survey* (GRS) realizado en ^{13}CO . Otros pasos de la selección, se basan en los diagramas color-color y color-magnitud con datos del cercano infrarrojo de 2MASS.

Para el estudio de la componente estelar se usaron los catálogos de fuentes puntuales en el cercano, medio y lejano infrarrojo de 2MASS, SPITZER e IRAS, respectivamente. De los diagramas color-color y color-magnitud, usando datos de 2MASS, se construyó un criterio fotométrico para identificar los objetos estelares jóvenes embebidos en la región molecular. Aplicando modelos a la distribución espectral de energía (SED) de algunos ellos, se encontraron parámetros estelares de objetos estelares jóvenes embebidos de masa intermedia y alta. Adicionalmente, se encontró un objeto de masa intermedia no identificado por el catálogo de 2MASS y su efecto sobre el medio interestelar, emisión en la banda de $[4.5]\mu\text{m}$ de IRAC-Spitzer asociado a un *outflow*.

Dos de los objetos seleccionados por el criterio fotométrico resultaron ser objetos estelares jóvenes de alta e intermedia masa (B1V/B2V y B8V/A0V respectivamente), los cuales deben estar asociados a la emisión radiativa responsable de los colores de región UC HII. Otro objeto estelar joven de baja masa (F0V/F5V) fue encontrado en la región de estudio. Este parece estar asociado con la presencia de un disco circumestelar y material excitado por choque (IRAC-Spitzer $[4.5]\mu\text{m}$).

Se concluye que el escenario de región de formación estelar masiva factible para ésta región molecular es el de una asociación estelar joven embebida en una densa región molecular ($A_V \lesssim 30$) hacia la fuente IRAS 18236-1205.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente el apoyo y dedicación de mis asesores, Dr. Divakara Mayya y Dr. Abraham Luna Castellanos, quienes tuvieron la paciencia y diligencia en atender mis dudas y avances del presente trabajo. La revisión y aportación durante el desarrollo de esta tesis de parte del Dr. Luis Carrasco ha sido de gran ayuda.

Al grupo de profesores e investigadores que han motivado mi crecimiento académico.

A la generación de amigos y estudiantes con la que he compartido gratos momentos.

Al gran pueblo de México, por su lucha, dedicación y cultura.

Dedicada a la gran generación de
astrónomos que están por venir, de cuyas
manos y mentes vendrán mejoras a este
trabajo.

Índice general

Índice general	I
1. Introducción	1
1.1. Nubes moleculares.	1
1.2. Regiones HII, Regiones HII Compactas y Ultracompactas.	4
1.3. Formación estelar.	7
1.3.1. Procesos físicos presentes en la formación estelar.	7
1.3.2. Escenarios de formación estelar	14
1.3.3. Objetos estelares jóvenes (YSOs) de baja, media y alta masa. . .	16
1.3.4. Efectos de la formación estelar sobre el medio interestelar. . . .	19
1.4. Distribución espectral de energía (<i>Spectral Energy Distribution, SED</i>) de objetos estelares jóvenes (YSOs). El caso de baja masa.	22
1.5. Descripción de la nube molecular asociada con la fuente IRAS 18236- 1205.	25
2. Estudio fotométrico infrarrojo de los objetos estelares embebidos en la nube molecular asociada con la fuente IRAS 18236-1205.	30
2.1. Selección y definición de la región molecular.	30
2.2. Parámetros físicos de la región molecular.	33
2.3. Estudio fotométrico infrarrojo de los objetos estelares de catálogos de 2MASS en la región molecular estudiada.	37
2.3.1. Selección de la población estelar asociada a la región molecular y candidatos a objetos estelares jóvenes (YSOs) embebidos. . . .	37
2.3.2. Diagramas color-magnitud ($H-K_S$) vs (K_S) de los objetos se- leccionados. Otro criterio fotométrico de selección de YSOs embebidos.	41
3. Análisis del cúmulo joven estelar embebido en la región molecular.	45
3.1. Análisis de los objetos protoestelares candidatos seleccionados basado en los diagramas color-color de 2MASS.	45
3.2. Análisis preliminar con datos del telescopio espacial Spitzer.	58
3.2.1. El telescopio espacial Spitzer.	58

3.2.2.	Análisis de los objetos protoestelares candidatos a YSOs embebidos, basado en los diagramas color-color de Spitzer.	59
3.2.3.	Objeto protoestelar joven seleccionado con los diagramas color-color de Spitzer.	67
3.3.	Distribución Espectral de Energía de algunos YSOs seleccionados.	73
3.4.	Discusión de resultados.	75
4.	Conclusiones y trabajo futuro	85
4.1.	Conclusiones	85
4.2.	Trabajo a futuro.	87
	Índice de figuras	88
	Índice de Tablas	92
	Bibliografía	93

Prefacio

La formación y temprana evolución de las estrellas en la Vía Láctea ocurre en regiones moleculares densas. En este ambiente, las protoestrellas jóvenes están asociadas a gas y polvo circunestelar, que absorbe la energía radiada por la protoestrella central y la radía a longitudes de onda mayores de $1\mu\text{m}$. Es por esto que las observaciones a estas longitudes de onda son muy importantes para las investigaciones de formación estelar y del medio en el que esta se desarrolla. El proyecto 2MASS ha realizado un *survey* en el infrarrojo cercano de todo el cielo y liberado sus observaciones, lo cual nos brinda la posibilidad de realizar estudios en este rango espectral. Con el advenimiento de los telescopios espaciales, en particular para longitudes del medio y lejano IR como lo son Spitzer e IRAS, es posible observar con mayor resolución y sin problemas de absorción atmosférica, aquellas fuentes IR asociadas a la formación estelar.

Un trabajo desarrollado por Wood & Churchwell (1989) en fuentes IRAS en el medio y lejano IR, muestra que fuentes candidatas a regiones ultracompactas HII (UCHII) están definidas por colores de las bandas de IRAS. Observaciones posteriores en monosulfuro de carbono (CS) hacia fuentes IRAS candidatas a regiones UCHII de la muestra de Wood & Churchwell (1989) fue realizado por Bronfman et al. (1996), mostrando que la mayoría de estos objetos se encuentran asociados a la emisión del CS, lo cual nos sugiere que fuentes IRAS candidatas a regiones UCHII y que muestran emisión de CS, están asociadas a regiones de formación estelar de alta masa. Debido a la capacidad del CS para delimitar estructuras densas en las nubes moleculares, lo anterior permite definir la distancia a regiones moleculares densas, y posibilita extender los estudios fotométricos de la población estelar embebida.

El estudio de la componente estelar asociado a regiones moleculares con alta extinción debe hacerse en el cercano infrarrojo. Este tipo de estudio está basado en observaciones en el cercano infrarrojo (2MASS) y ha sido poco estudiado. Trabajo reciente ha sido explorado por Roman-Lopes & Abraham (2004, 2006) y Chavarria et al. (2008), sin embargo, estos trabajos se enfocaron hacia regiones donde gran parte del polvo y la componente molecular ha sido evacuada.

La región molecular asociada a la fuente IRAS 18236-1205 es una nube molecular gigante localizada en el primer cuadrante del plano galáctico sobre el brazo de Sagi-

tario en su lado cercano, la cual presenta alta extinción, $A_V \geq 30$ mag. Para esta región hemos desarrollado un criterio de filtrado geométrico (^{13}CO) y fotométrico NIR (2MASS) de objetos estelares jóvenes (YSOs) que presumiblemente pertenecen a la región molecular y que están asociados a una fenomenología propia de las fases tempranas de formación estelar: flujos de radiación altos en el MIR-FIR, regiones con alta densidad molecular, flujos bipolares y multipolares, máseres, etc.

La estructura del trabajo de esta tesis es la siguiente: en el capítulo 1 damos una introducción a los temas fundamentales de la tesis, se abordan los temas de nubes moleculares, regiones de formación estelar y regiones HII, haciendo énfasis en las regiones compactas (C HII) y ultracompactas (UC HII), además de la formación estelar masiva, que serán objeto de estudio en el presente trabajo de tesis. En el mismo capítulo comentamos sobre la distribución espectral de energía (*Spectral Energy distribution, SED*) y su relación con el rango de observaciones con las que trabajamos. En el capítulo 2 se describe como se seleccionó la región molecular de estudio y se da una completa descripción de la misma. En este capítulo también mostramos diagramas color-color ($H-K_S$) vs (J-H), color-magnitud ($H-K_S$) vs K_S , y distribuciones de color ($H-K_S$) de los datos del catálogo de fuentes puntuales (PSC por sus siglas en Inglés) de 2MASS, con los cuales separamos la población estelar de la nube, de las poblaciones del fondo (background) y del frente (foreground). Con ayuda de estos diagramas, desarrollamos un criterio fotométrico para identificar los objetos protoestelares jóvenes embebidos en la región molecular. Un análisis de los diagramas color-color con los datos de 2MASS y color-color de datos en IRAC-Spitzer de los objetos seleccionados es dado en el capítulo 3. También se muestra la distribución espectral de energía (SED) de algunos objetos jóvenes embebidos en la región molecular usando un modelo sencillo, basado en la emisión de cuerpo gris más una envolvente fría. Para este modelo usamos una ley de extinción para regiones de alta densidad. Finalmente, en el capítulo 4 se muestran las conclusiones de este trabajo.

Capítulo 1

Introducción

“Llaman a estas estrellas *mamalhuaztli* (mastelejos) y por este mismo nombre llaman a los palos con que sacan lumbre, porque les parece que tienen alguna semejanza con ellas, y que de allí les vino esta manera de sacar fuego...”

Sahagún, 1985. Historia general de las cosas de la Nueva España.

1.1. Nubes moleculares.

La formación de moléculas en el medio interestelar es posible cuando la densidad de la región es elevada, lo que hace que las colisiones entre los átomos sean más frecuentes. Sin embargo, aunque se pueda formar una molécula por colisión, ésta se puede fácilmente disociar por radiación ultravioleta (UV), es aquí cuando una componente del medio interestelar (MIE) entra en escena, estamos hablando del *polvo interestelar*, el cual consiste principalmente de carbono (C), silicio (Si), además de H, O, Mg, Fe y otros elementos, en forma de hielos, silicatos, grafitos, metales y otros compuestos orgánicos. La formación del hidrógeno molecular se debe principalmente al polvo, ya que la colisión entre átomos de hidrógeno no puede radiar la energía excedente (esto obedece a las reglas de la mecánica cuántica de la emisión de radiación), por lo que la presencia del polvo favorece que se pueda formar. El proceso es el siguiente, un átomo de hidrógeno colisiona con un grano de polvo y se adhiere a él, luego otro átomo colisiona con esta formación y se forma la molécula del hidrógeno molecular, la energía excedente se disipa calentando al grano de polvo.

La Vía Láctea contiene importantes trazas de polvo (de hecho su proporción es similar a la típica del universo local, alrededor del 1 % en masa del medio interestelar), llegando incluso a oscurecer el fondo estelar sobre el plano galáctico. La presencia del polvo es de gran importancia, ya que se cree que actúa como catalizador en los procesos de formación de moléculas volátiles como el H₂O y el metanol. Además actúa como sitios de protección a la radiación UV (Mac Low & Klessen (2004); Smith (2004)). Estos dos

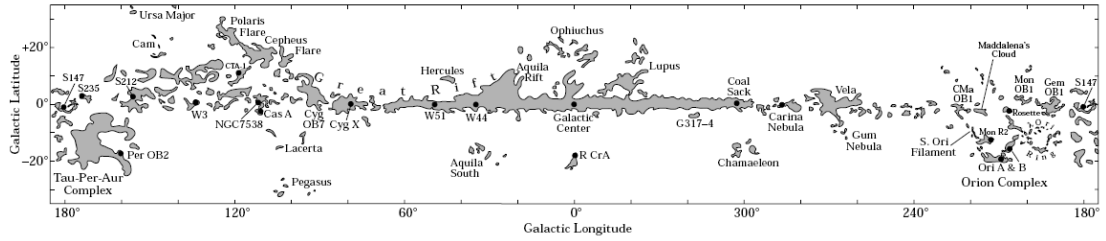


Figura 1.1: Esquema de la Vía Láctea en gas molecular (^{12}CO). Las regiones moleculares son marcadas en esta. Tomado de Dame, Hartmann, & Thaddeus 2001.

factores favorecen la producción y preservación de las moléculas y son encontrados en las regiones más densas y frías del medio interestelar: las regiones o nubes moleculares. En las nubes moleculares, el gas mayoritariamente es hidrógeno molecular (H_2) (a diferencia de otras regiones del medio interestelar donde el hidrógeno se encuentra en forma atómica; Estalella & Anglada 1996). Adicionalmente, otras moléculas cuya proporción al H_2 es importante, son el monóxido de carbono (CO), amoníaco (NH_3), monosulfuro de carbono (CS), entre muchos otros (para ver una lista completa ver ref. electrónica 1).

Cantidad física	gigantes	pequeñas/glóbulos	cores
Masa [M_\odot]	$6 \times 10^4 - 2 \times 10^6$	10^2	1-10
Tamaño [pc]	20-100	1.0-4.0	0.1-0.4
Densidad [cm^{-3}]	100-300	$10^3 - 10^4$	$10^4 - 10^5$
Temperatura [K]	15-40	7-15	10
Campos magn. [μG]	1-10	3-30	10-50
A_V [mag] (SP)	2	10	$\gtrsim 10$

Tabla 1.1: Características físicas de las nubes moleculares. Datos de Smith (2004). (SP) datos de Stahler & Palla (2004).

Aunque el hidrógeno molecular es el elemento más abundante, su detección es difícil, básicamente por dos razones: (a) la molécula es simétrica, lo que implica que en su estado base electrónico la posición del centro de carga es la misma que la del centro de masa, de aquí que no tenga un momento dipolar eléctrico, y (b) Las energías de los niveles rotacionales más próximos al estado base de H_2 son mucho más altas que los correspondientes niveles del monóxido de carbono (CO). Para el H_2 la temperatura de desexcitación del nivel rotacional $J=2$ al nivel $J=0$ es $T(J = 2 \rightarrow 0) = 510\text{K}$, mientras que para el CO tenemos $T(J = 1 \rightarrow 0) = 5.5\text{K}$, la cual es similar a los 10 K típicos en una nube molecular. Es por esto que la molécula de CO es usualmente usada como trazador del H_2 y por tanto de las nubes moleculares (Stahler & Palla (2005)).

Las nubes moleculares son encontradas en el disco de nuestra galaxia hacia el centro galáctico y preferencialmente asociadas a los brazos espirales (Smith 2004; ver figura 1.1). Las observaciones en CO muestran las estructuras típicas de las nubes moleculares: inhomogéneas, elongadas, y conteniendo densas regiones tipo núcleos y filamentos (ver figura 1.2). Las nubes son clasificadas de acuerdo a su opacidad como, difusas, translúcidas y oscuras. Por su tamaño, hay nubes moleculares gigantes (MCG, por sus siglas en inglés), pequeñas y *cores* (ver tabla 1.1; Smith (2004)).

Las leyes empíricas de Schmidt (1959) y Kennicutt (1989) relacionan la tasa de formación estelar a gran escala (galáctica) con la densidad superficial o volumétrica de masa. Las inestabilidades gravitacionales se dan en las nubes moleculares de los brazos espirales, lo que resulta en formación estelar. En éstas regiones las estrellas formadas liberan la energía suficiente para producir turbulencia por medio de presión de radiación, viento estelar y al final de sus vidas, flujos de material y en el caso de estrellas masivas, choques por medio de supernovas. Las inestabilidades también guían a la formación estelar por colapso, particularmente cuando la región posee alta densidad y baja turbulencia (Elmegreen (2002)). La compresión turbulenta también puede guiar a la formación estelar también. Éste puede ser un mecanismo importante de formación estelar para los *cores* individuales en las nubes moleculares. Sin embargo, las condiciones iniciales para la formación estelar en los *cores*, parece estar más relacionado con la presencia de presiones externas de otras estrellas. Esto es inferido de las morfologías cometarias o aplanadas de las estructuras del gas que mantiene embebidas a cúmulos estelares jóvenes.

La dinámica del disco de nuestra galaxia a través del *shear* adicionalmente modula la formación estelar global en el disco galáctico, destruyendo las nubes moleculares en las regiones inter-brazos, y permitiendo la condensación del gas en los brazos espirales, lo que permite que la gravedad u otros agentes, tales como la compresión o la turbulencia, hagan colapsar las nubes produciendo la formación de estrellas (Luna et al. (2006)). Hay una relación cercana entre la estructura espiral galáctica y la formación de las GMC (Combes 1991), y por tanto también sobre las tasas de formación estelar de estrellas OB. De lo anterior, podemos decir que las GMC y las regiones de formación estelar masivas son buenos trazadores del patrón espiral de una galaxia.

Nubes moleculares galácticas con formación estelar: El caso de Orión.

Una de las regiones de formación estelar más estudiada por su cercanía, es la nube de Orión, en la constelación del mismo nombre. Esta se extiende en el cielo alrededor de 15° , que a una distancia de 450 parsecs se traduce en 120 parsecs (Stahler & Palla 2004). Su masa total es alrededor de $10^5 M_\odot$, la cual según la tabla 1.1, está dentro del rango de masa de las nubes gigantes.

La región llamada Orión A (NGC 1976, M42) muestra un cúmulo estelar joven. Este es denominado Ori Id OB, el cual posee estrellas masivas de tipo espectral O que ionizan con su intensa radiación al gas circundante, creando grandes regiones HII. Estas son las regiones HII mejor estudiadas (Nebulosa de Orión).

Sin embargo, su tamaño hace que la nebulosa de Orión tenga que ser estudiada por partes perdiendo una visión general de la fenomenología asociada al medio ambiente de la nebulosa central, y su cercanía hace que las observaciones tengan mucho detalle, de forma que los modelos físicos de estas regiones son cada vez más elaborados.

Regiones extragalácticas con formación estelar.

El estudio de regiones de formación estelar extragalácticas requiere de la observación de objetos muy intensos. Tal es el caso de NGC 604 (800 kpc) en M33 o NGC 5471 (6Mpc) en M101. Estas regiones tienen diámetros del orden de 400 y 800 pc respectivamente (Shields (1990)). Esto produce que observemos el efecto combinado de sus componentes estelares jóvenes (del orden de decenas y centenas de estrellas tipo O5V) produciendo las regiones HII gigantes que se observan hacia estos objetos, perdiendo detalle de los efectos sobre el medio interestelar próximo a ellos.

Otras regiones con formación estelar galácticas y extragalácticas son la Nebulosa de Tauro-Auriga en la constelación de Tauro (140 pc; Stahler & Palla 2005), Eta Carina en la constelación de Carina (2.45 kpc), la nebulosa del águila (M16, NGC 6611) en la constelación de Serpens (2.0 kpc; Hillenbrand et al. 1993), nebulosa de la Tarántula (NGC 2070) en la Gran Nube de Magallanes (50 kpc; Shields 1990).

1.2. Regiones HII, Regiones HII Compactas y Ultra-compactas.

Las estrellas masivas tempranas, producen grandes cantidades de radiación energética que ioniza el medio interestelar circundante. Si la estrella temprana es lo suficientemente caliente, con $T \gtrsim 3 \times 10^4$ K, sus fotones UV ($h\nu > 13.6$ eV) pueden ionizar el medio circundante, formando una región HII. Los electrones libres y los núcleos creados de esta manera se pueden recombinar y emitir nuevos fotones menos energéticos o bien calentar el gas por colisión con otros átomos. De esta forma, la radiación emitida por la estrella es transmitida al medio circundante y hace que éste también emita radiación (Osterbrock (1989)). Cuando se recombinan los electrones y los iones, los nuevos fotones emitidos pueden hacerlo en cualquier dirección, produciendo dispersión isotrópica y diluyendo el campo de radiación original de la estrella. Estos procesos hacen disminuir la capacidad ionizadora del campo de radiación y provocan que la extensión de la región ionizada sea limitada. La región así producida es llamada *esfera*

de Strömgren y su radio, el radio de Strömgren (R_S), nos da el tamaño típico de las regiones HII. El volumen de la esfera de Strömgren es tal, que el número de recombinaciones de los iones contenidos sea igual al número de fotones ionizantes producidos por la estrella, es decir,

$$N_i(H^0) = \frac{4}{3}\pi R_S^3 n_e^2 \alpha_B \quad (1.1)$$

donde $N_i(H^0)$ es el número total de fotones ionizantes por unidad de tiempo emitidos por la estrella, n_e es la densidad electrónica y α_B es el coeficiente de recombinación al nivel 2 o superior, con excepción del nivel base, que corresponde a fotones ionizantes (Osterbrock 1989).

Las regiones HII son observables a diferentes longitudes de onda, desde el UV hasta el radio. En estas, los átomos están siendo ionizados continuamente por la radiación de la estrella embebida en la región HII y a su vez, los electrones libres y los iones se recombinan en forma de cascada hacia los estados energéticos de menor energía, emitiendo líneas de recombinación. Por otra parte, como hay una población importante de iones y electrones libres, se produce radiación tipo libre-libre (continuo) o *Bremsstrahlung* por interacción coulombiana.

Las regiones HII son encontradas generalmente en los brazos de las galaxias tipo espiral (figura 1.3; Paladini et al. (2004)) y en galaxias irregulares a lo largo de éstas (Roye & Hunter (2000); Hunter (2002)). Una galaxia espiral grande puede contener hasta cientos de regiones HII. Las galaxias elípticas no muestran rastros de regiones HII, ya que tienen muy bajo contenido de gas, de forma que es poco probable observar regiones HII. Para el caso de galaxias en interacción con formación estelar como M82, el producto final resulta ser del tipo espiral con gas que ha sido arrancado de la galaxia compañera (Mayya et al. (2006)).

Entre las regiones HII existen tipos de regiones con altas densidades y pequeños tamaños (tabla 2). Éstas son llamadas *regiones compactas* HII (CHII), cuyos rangos de tamaño van desde 0.05 a 0.5 pc, densidades electrónicas (n_e , en cm^{-3}) de 10^3 a 10^5 y medida de emisión por encima de 10^7 cm^{-6} . Las regiones denominadas Ultra Compactas, son aquellas regiones por abajo de 0.01 pc en tamaño y densidades electrónicas por arriba de 10^5 cm^{-3} y medida de emisión por encima de 10^7 cm^{-6} . Sus morfologías son variadas, yendo desde las formas cometarias (20 %), núcleo-halo (16 %), tipo cascarón (4 %), esferoidales (43 %) e irregulares (17 %) (Smith, 2004).

Estos objetos se encuentran entre los más luminosos en la Galaxia a $100 \mu m$, debido a que poseen calientes envolventes de polvo que convierten la luminosidad estelar (L_{Lyman}) en radiación que se observa en el infrarrojo. Típicamente el pico de la emisión se encuentra a $100 \mu m$ (Ley De Wien, $\lambda_{max} = 0.29 \text{ cm}K/T$) y es 3 ó 4 órdenes de magnitud mayor por encima de la emisión libre-libre a esta longitud de

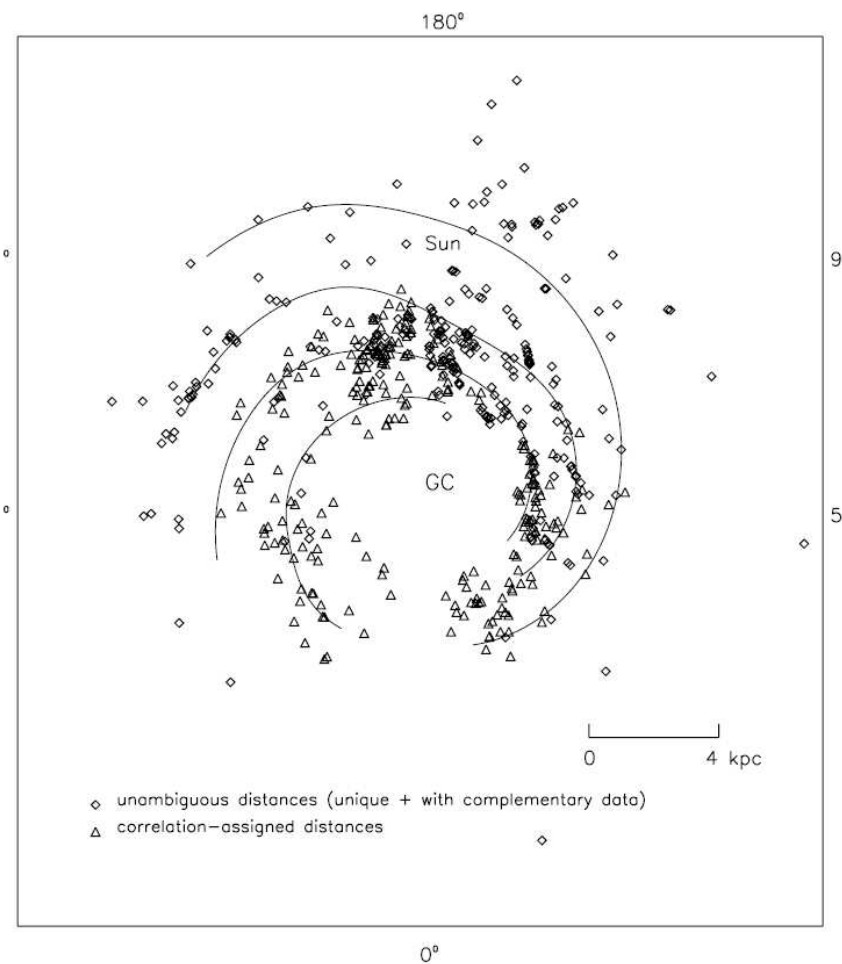


Figura 1.2: Distribución de 550 regiones HII en la Vía Láctea. Los símbolos de diamantes corresponden a fuentes con distancia no ambigua, más 177 fuentes con distancia resuelta. Los triángulos corresponden a 256 fuentes en las cuales se aplicó la correlación luminosidad-diámetro para determinar su distancia. El modelo para los brazos espirales usado es el de Taylor & Cordes (1993). Tomado de Paladini et al. (2004).

Cantidad física	clásica	CHII	UCHII	HCHII(A)
R_S (pc)	1-30 (S)	0.01-0.5(S)	≈ 0.01 (CH)	≈ 0.001 (CH,H)
n_e (cm^{-3})	$\approx 10^2$ (S)	10^3 - 10^5 (S)	$> 10^5$ (S,CH)	$> 10^7$ (CH,H)
ME (pc cm^{-6})	$\approx 10^2$ (K&F)	$\geq 10^7$ (K&F)	$\geq 10^7$ (K&F)	$\geq 10^{10}$ (K&F)

Tabla 1.2: Características de regiones HII. (A) Regiones HiperCompactas HII; (S) Datos de Smith, M.D. (2004); (CH) Datos de Churchwell, E. (2002); (H) Datos de Hoare et al. (2007); (K&F) Datos de Kurtz & Franco (2000) ME: Medida de la emisión, brillo.

onda (Churchwell, 2002). Para ser detectables en longitudes de onda de radio (sin considerar la posible alta extinción), la luminosidad de estas regiones debe ser equivalente a la de una estrella de la secuencia principal tipo B3 o más caliente. Las regiones UC HII representan una fase importante en el desarrollo de estrellas masivas. Es en este período, entre la fase de rápida acreción de la formación estelar, cuando la estrella central está siendo formada, y el período cuando la fase UC da lugar a una región grande, más difusa y menos oscurecida, debido a la destrucción del núcleo molecular que lo alberga (Churchwell (2002)).

Con tamaños menores y con mayores densidades electrónicas que las regiones UC HII, se encuentran las regiones HiperCompactas HII (HC HII). Sus tamaños son menores a 0.05 pc (10 000 UA), la densidad electrónica (n_e) es mayor a 10^7 cm^{-3} y la medida de emisión es de $10^{10} \text{ cm}^{-6} \text{ pc}$. Además de las anteriores características típicas de las regiones HII, se tiene que las HC HII poseen perfiles de líneas de recombinación anchos, con ΔV típicamente de 40-50 km s^{-1} e incluso hasta en algunos casos de 100 km s^{-1} , mientras que en regiones UC HII se encuentra que ΔV es 30-40 km s^{-1} (Churchwell, 2000; Hoare et al. (2007)). Los mecanismos que pueden estar contribuyendo al ensanchamiento de la líneas de recombinación son el ensanchamiento por presión debido a la alta densidad y el movimiento del gas que experimenta acreción (Hoare et al. 2007). La rotación también juega un rol importante en estos procesos. Una combinación de los procesos anteriores puede ser un mecanismo más real a las observaciones. Las morfologías de la regiones HC HII no está bien determinada (sobre todo por la alta resolución espacial que se requiere), pero parecen ser tipo bipolares, cometarias y tipo cascarón (Hoare et al. 2007).

1.3. Formación estelar.

1.3.1. Procesos físicos presentes en la formación estelar.

Autogravedad.

En la teoría clásica de formación estelar, el equilibrio entre gravedad y presión térmica del gas es la idea principal de partida. Suponiendo que el material que constituye

el medio interestelar, es un gas perfecto uniformemente distribuido en el espacio, y si omitimos la turbulencia, se requiere de una inestabilidad para propiciar la formación estelar. Ésta es causada por el rompimiento del delicado balance entre el calentamiento y enfriamiento del gas, asociado al movimiento térmico del mismo. La teoría de Jeans (Jeans 1902) nos acerca a esta idea: las perturbaciones en regiones localizadas del gas, condensan masa de tal forma que se separan del resto del gas uniforme y se contraen.

En este punto es requerido un “análisis de estabilidad”. Este involucra las relaciones de continuidad de masa, ecuación de estado del gas, conservación de la energía y distribución de masa (Sin embargo, estas no son desarrolladas en el presente trabajo). A este sistema de ecuaciones se le introduce una ligera perturbación (sinusoidal estacionaria) propagándose a través de un gas isotérmico e isotrópico (en una geometría esférica) con densidad uniforme (ρ), que da origen a una relación de dispersión entre la frecuencia de oscilación (ω) y una longitud de onda (λ).

$$\omega^2 = c_s^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 - 4\pi G \rho \quad (1.2)$$

Donde c_s es la velocidad del sonido en el medio. Esta relación gobierna la propagación de las perturbaciones en el medio. La longitud crítica (λ_C) es asociada al valor de la longitud en la que las perturbaciones en el medio que exceden esta, provocan que las perturbaciones crezcan de forma exponencial, aumentando la amplitud de las perturbaciones e incrementando las inestabilidades. Esta longitud también es llamada “longitud de Jeans” y es definida a partir de la expresión (1.2), considerando el lado izquierdo igual a cero, lo que resulta en

$$\lambda_J = \left(\frac{\pi c_s^2}{G \rho} \right)^{1/2} \quad (1.3)$$

Considerando una perturbación en una geometría esférica, podemos trasladar esta última expresión a una masa crítica: la masa de Jeans (M_J)

$$M_J = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{\lambda_J}{2} \right)^3 \rho \quad (1.4)$$

$$M_J = \frac{\pi}{6} \left(\frac{\pi}{G} \right)^{3/2} \frac{c_s^3}{\rho^{1/2}} \quad (1.5)$$

La última expresión puede ser transformada en cantidades más usuales, como la temperatura y densidad columnar del hidrógeno molecular (n_{H_2}), $P = c_s^2 \rho = \frac{\rho}{m_{H_2}} R T$, siendo P la presión del gas molecular, m la masa molar del gas, R es la constante de los gases y T la temperatura. Usando estas relaciones obtenemos una expresión para la masa de Jeans,

$$M_J = 1.0 M_\odot \left[\frac{T}{10K} \right]^{3/2} \left[\frac{n_{H_2}}{10^4 cm^{-3}} \right]^{-1/2} \quad (1.6)$$

Siendo T la temperatura en K, n_{H_2} la densidad numérica del hidrógeno molecular. De acuerdo a la teoría clásica, una nube (molecular) o parte de la nube con una masa mayor que M_J colapsa bajo gravedad. La masa de Jeans cae conforme la densidad se incrementa, mientras ocurre un colapso isotérmico. En estas condiciones, hay fragmentación de la nube original. Cuando cesa el colapso isotérmico, finaliza la fragmentación de la nube.

Turbulencia.

Hemos comentado anteriormente sobre las condiciones iniciales para la formación estelar en un escenario estático. Sin embargo, los sitios de formación estelar, las nubes moleculares, son dinámicamente activas. Turbulencia es el nombre genérico que se le ha dado a los movimientos aleatorios del medio interestelar sobre un rango de diferentes escalas de longitud. La turbulencia supersónica es capaz de soportar la estructura de las nubes. Los movimientos del material en las nubes moleculares es tan rápido, que no da lugar para que exista un balance en la presión. Los movimientos producen compresión (*ram pressure*), impactos de alta presión y gradientes de presión con efectos de retroalimentación sobre el medio ambiente, generando sistemas turbulentos (Mac Low & Klessen 2004).

La turbulencia interestelar es definida por el número de Mach, $M=v/c_s$, donde c_s , v son la velocidad del sonido en el medio y del material que se mueve y puede ser subsónica ($M<1$), sónica ($M=1$) o supersónica ($M>1$). Las fases atómicas del gas y los *cores* moleculares densos muestran frecuentemente movimientos subsónicos. En las nubes moleculares los movimientos son supersónicos, de forma que en lugar de la imagen clásica con remolinos y vórtices, estructuras tipo laminar son desarrolladas en los lugares donde el flujo supersónico impacta.

¿qué mecanismo produce y conduce la turbulencia?. La energía puede ser inyectada desde movimientos a gran escala, como se encuentra en observaciones sobre nubes moleculares. Entonces esta energía puede ser liberada a escalas más pequeñas. Algunos candidatos que podemos mencionar son: (a) *shear* galáctico, (b) Inestabilidades gravitacionales en los brazos espirales, (c) flujos de protoestrellas dentro de las nubes, (d) vientos estelares y presión de radiación intensa y (e) explosiones de supernova.

La rotación del disco galáctico no es la de un cuerpo rígido, si no una rotación diferencial. Ésta provee suficiente energía a la turbulencia galáctica, pero es requerido un mecanismo que transfiera movimiento de gran escala a la escala de las nubes moleculares.

Las inestabilidades gravitacionales convierten el potencial gravitacional en energía liberada a la turbulencia. Sin embargo, la turbulencia decae en un tiempo menor al de

caída libre, con lo que el efecto sobre la nube molecular es inhibida por la contracción.

Las protoestrellas generan *jets* colimados, flujos y vientos intensos que proveen energía a la nube en donde son formadas, pero la energía depositada es limitada por el radio de influencia, alrededor de algunos parsecs, excepto tal vez, en el caso de asociaciones OB grandes. Alrededor de estrellas masivas se desarrollan regiones HII y se crean frentes de choques de intensa radiación, que ioniza y empuja el material de la envoltura circumestelar. La energía de este mecanismo afecta localmente estas regiones y dispersa el medio circumestelar, pero no contribuye significativamente a la turbulencia de la nube molecular.

De forma que todo apunta a las supernovas como responsables de la mayor contribución de la turbulencia existente en las nubes moleculares. La tasa de explosiones de supernova en la Galaxia es de una cada 50 años (Smith 2004). La energía que inyecta un evento de supernova es de $\approx 10^{50}$ erg, por lo que podemos decir que $\approx 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ (suponiendo una velocidad turbulenta $V_{turb} = 6 \text{ km s}^{-1}$) están disponibles y la energía disipada es del orden de $\approx 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$. De lo anterior podemos decir que la energía liberada es tan grande, que aún considerando solo una fracción de ésta, es capaz de suplir de energía a la turbulencia en nuestra Galaxia (Smith 2004). Ahora, si la masa acumulada en los frentes de choque de la turbulencia supersónica supera la masa de Jeans, el material colapsará bajo los efectos de la gravedad. Este escenario está condicionado a que el núcleo denso colapse rápido, antes de que sea alcanzado por un nuevo frente de choque.

Campos magnéticos.

Hasta este punto, no hemos considerado los campos magnéticos en nuestra exposición para determinar las condiciones iniciales de la formación estelar en las nubes moleculares, la inclusión de estos es de gran importancia, ya que los campos magnéticos permean el medio interestelar y deben jugar algún rol en los procesos que se llevan a cabo en el medio interestelar. Sin embargo, su inclusión en las teorías de formación estelar son complicadas, en parte se debe a que las intensidades medidas son débiles. Otra complicación es que la teoría magnetohidrodinámica (MHD) es extremadamente compleja, así como la interpretación de resultados. De forma que la confrontación de los resultados de la teoría con los escasos datos observacionales, es todavía tema de discusión.

Es muy importante determinar si las nubes son magnéticamente **subcríticas**, es decir con campos magnéticos débiles, con lenta evolución o **supercríticas**, con rápida evolución, dominadas por el colapso y fragmentación. Al momento evidencias observacionales dadas por Crutcher (1999) y Bourke et al. (2001) apuntan a que los *cores* moleculares son supercríticos.

El efecto *Zeeman* es el método más viable para medir la intensidad del campo magnético en las nubes moleculares. La energía de las moléculas en presencia de un campo magnético depende de la orientación de su momento magnético con respecto al campo. La intensidad del campo magnético es proporcional a la diferencia de energía entre niveles de energía correspondientes a diferentes orientaciones del momento magnético. Únicamente la componente en la línea de visión del campo magnético es medible y se ha logrado para algunos casos de nubes moleculares: en la línea de 21 cm y la molécula OH (Bourke et al. 2001). En las nubes difusas la intensidad del campo magnético está bien medida, esta es típicamente entre 5-10 μG (Smith 2004).

Si hay campo magnético en las nubes difusas, ¿qué le sucede a éste durante la contracción de la nube?. De acuerdo a la teoría magnetohidrodinámica (MHD), un nube fría tenderá a contraerse a lo largo de las líneas de flujo magnético dado que la presión magnética provee resistencia a comprimirse. Entonces una nube magnetizada tomará una forma oblata con el eje menor paralelo al las líneas de campo. Con esto el campo tiene una morfología tipo “reloj de arena” a gran escala. Ésta es deducida de la dirección de polarización de la emisión de los granos de polvo. Esta morfología ha sido observada en las nubes moleculares, en Orión, por ejemplo, OMC-1 tiene dicha forma (Schleuning (1998)).

¿Puede un campo magnético interno contribuir al soporte de la nube molecular?. Previendo un acoplamiento del campo al gas, se comparan las energías magnética y gravitacional, los resultados de este análisis dan una masa crítica máxima, que puede ser soportada por el campo asumiendo que éste, por si mismo, se opone a la gravedad. Ésta es análoga a la idea de la masa de Jeans y es llamada, “masa magnética de Jeans”. Si la masa de la nube excede la masa magnética, ésta se vuelve inestable y colapsará bajo gravedad. De esto, un parámetro importante en la discusión del soporte en nubes moleculares es el cociente entre la masa y el flujo magnético.

La forma en que la contracción procede es modificada por la intensidad del campo. Si éste es débil (nube supercrítica), la nube entrará en un régimen inestable y colapsará. La longitud de escala a la cual esto ocurre, es llamada “longitud modificada de Jeans” (λ_{JM}) y es obviamente menor a la masa de Jeans (λ_J). Por el contrario, si el campo es intenso (nube subcrítica), la nube entrará en régimen estable y no hay forma de inducir el colapso. A grandes escalas las nubes moleculares son altamente supercríticas y la presión magnética no es suficiente para dominar sobre la dinámica de la nube.

Teóricamente, un *clump* subcrítico parece difícil de sostener. Esto requiere de soporte externo a fin de resistir la alta presión magnética desde el interior del *clump*. Si consideramos un intenso campo magnético externo, es necesario un cambio notable en la densidad a través de la frontera de regiones, sin un cambio significativo en el cam-

po magnético, lo que implica que la velocidad de Alfvén ¹ en la nube excede a la del *clump*. Especulativamente, se tiene que los *clumps* son marginalmente críticos. Los *clumps* supercríticos colapsan en un largo tiempo. Por otro lado, los *clumps* subcríticos deben permanecer como nubes difusas, esto suponiendo que son soportadas por presión externa.

En el contexto de escenario de formación de baja masa, la barrera para la formación estelar es superada, es decir si la masa crítica supera el campo magnético y puede ser separada del gas. Esto es realizado por el fenómeno de difusión ambipolar. Este se da cuando los núcleos y átomos neutros son arrastrados con respecto a los iones y electrones. El campo magnético interactúa directamente con las partículas cargadas y arrastra a los elementos neutros. En el MIE, el número de partículas cargadas, es suficiente para mantener los átomos neutros, de forma que la difusión ambipolar se puede despreciar. Sin embargo, en las nubes moleculares, la difusión ambipolar es importante dado que hay una cantidad pequeña de iones. De lo anterior es notorio que la fracción de ionización juega un rol importante en la determinación de las condiciones iniciales que preceden al colapso de los *clumps* moleculares.

Una nube subcrítica, en donde el campo magnético está inmerso en el gas denso, es suficientemente intenso para prevenir inmediatamente el colapso, las moléculas neutras son arrastradas al *core* sin un aumento significativo en el flujo magnético. El incremento en la densidad del *core*, implica que la masa crítica cae. Eventualmente el cociente entre la masa y el flujo magnético en el *core* se eleva, dando lugar a un nivel supercrítico: el colapso dinámico y la formación estelar toma lugar. La envolvente permanece esencialmente mientras que el *core* supercrítico colapsa. Los valores típicos de los campos magnéticos en nubes moleculares van de unos pocos μG en las nubes moleculares gigantes hasta $50 \mu\text{G}$ en los *cores* (Ver tabla 1.1).

Rotación.

Un indicador de la rotación de las nubes moleculares nos lo puede dar la variación espacial de la componente radial de la velocidad a través de la nube. Se usan comúnmente como trazadoras, las líneas moleculares del CO. Un gradiente de velocidad es interpretado en función de la rotación. Un desplazamiento lineal en la velocidad de una línea espectral con una coordenada espacial es predicha para la rotación uniforme de una nube molecular.

Un primer acercamiento al tratamiento de la rotación de las nubes moleculares, debe considerar la rotación galáctica y la transferencia de momento angular a las nubes

¹ La velocidad de Alfvén está asociada a la velocidad de las ondas Alfvén. Éstas son ondas transversales de tensión magnética que se propagan a lo largo de las líneas de campo, en un medio ionizado permeado por un campo magnético.

moleculares inmersas en esta. Si las nubes en nuestra galaxia derivan su rotación directamente del *shear* a escalas galácticas, entonces debemos esperar que los ejes de rotación se encuentren alineados con el eje de rotación de la galaxia. Sin embargo, a nivel nube molecular los *cores* y las pequeñas nubes no siguen esto, sus orientaciones de eje de giro están distribuidos aleatoriamente. Lo que significa que estos objetos no derivan su momento angular de escala grandes en forma importante (Smith 2004). Un mecanismo de transferencia local debe estar actuando.

Conforme un cuerpo rotante se comprime, su momento angular aumenta sobre un punto fijo, a fin de mantener la conservación de momento angular. Esto no se da en los *cores* moleculares, siendo indicativo de procesos de pérdida de momento angular actuando durante la contracción.

En la teoría estándar de rotación y campos magnéticos, ocurre una fase de contracción cuasi estática, durante la cual los *cores* evidentemente pierden momento angular por medio de frenado magnético. El frenado ocurre vía la transferencia angular al medio ambiente a través de torques aplicadas por ondas Alfvén. El movimiento diferencial de la nube en la interface del movimiento de las líneas de campo con el medio interestelar, genera ondas Alfvén las cuales se propagan eficientemente en este medio dado que son no dispersivas.

Considerando el caso de un campo con líneas que yacen con direcciones transversales al eje de rotación de la nube, es decir un rotador perpendicular, las líneas de campo se extienden a través de la nube hacia los alrededores. Esto hace que los alrededores comienzan a girar conforme el campo trata de torcer el gas en movimiento de rotación de cuerpo rígido. Sin embargo, el momento de inercia del gas se opone a este movimiento, transmitiendo las ondas Alfvén de regreso a la nube, frenándola. El frenado es altamente efectivo si el material circundante se encuentra distante del eje de rotación.

Por otro lado, un rotador paralelo no es fácilmente frenado. Las líneas de campo se extienden a lo largo del eje de rotación a través de la nube y en el medio ambiente. Las líneas del campo toman una configuración helicoidal a través de la rotación, afectado por las ondas Alfvén torsionales. Entonces, el material circundante se pone en movimiento por la rotación, con un momento de inercia bajo. Para frenar la nube, mucho material externo debe ser perturbado, requiriendo que las ondas Alfvén viajen más lejos. Como resultado, podemos esperar que los campos magnéticos evolucionen a alinearse con los ejes de rotación de la nube. Esta configuración es llamada Rotador Oblicuo.

1.3.2. Escenarios de formación estelar

Escenarios de formación estelar de baja masa: Shu et al. (1987).

El primer estado de la formación estelar es la fase entre *clumps* en lenta contracción a *clumps* rotantes: (a) *clumps* subcríticos, soportados por campos magnéticos y turbulencia, disipados por difusión ambipolar. (b) *clumps* supercríticos, experimentan fragmentación de *cores* conforme ocurre la contracción de la nube molecular.

La segunda fase comienza cuando la condensación del *core* tiene episodios de inestabilidad y colapsa dinámicamente. Esta fase es caracterizada por un disco grueso y una estrella central, embebidos en una envoltura en contracción, constituida de polvo y gas. El proceso de acreción hacia el disco produce la principal contribución a la luminosidad de las protoestrellas de baja masa. La distribución espectral de energía (SED) emergente de los modelos teóricos en esta fase están en acuerdo con aquellas fuentes infrarrojas encontradas recientemente, tal es el caso de IRAS 04016+2610 en L1489 (Brinch et al. (2007)) de espectros con una pendiente negativa en el NIR, MIR.

Si la convección y la rotación diferencial de la estrella central se combinan para producir un dínamo, la estrella puede evolucionar naturalmente hacia un estado de viento estelar. Sin embargo sigue la competencia entre el material que cae y la presión térmica del *core* en contracción. El viento estelar sale por la región que ofrece menor resistencia (los polos), con lo que guía a la formación de *jets* colimados y flujos bipolares. La protoestrella entra en la fase de flujos bipolares con disco. La protoestrella acretará material cada vez en mayor proporción hacia el disco, y entrará en la siguiente fase, estrella T Tauri.

La radiación emitida por el disco agrega un exceso IR a la SED esperada de la estrella. El aumento de material (por acreción) hacia el disco, puede estar relacionado con los orígenes de los sistemas binarios y sistemas planetarios. Finalmente desaparece el disco nebuloso grueso y la envoltura circumestelar opaca, el objeto resultante es del tipo estrella T Tauri clásico.

Escenarios de formación estelar de alta masa. Zinnecker & Yorke (2007)

Los lugares de formación de estrellas jóvenes masivas ocurren dentro de los densos y compactos glóbulos en las nubes moleculares (con densidades columnares de 10^{23} - 10^{24} cm^{-2} ; Zinnecker & Yorke (2007)). Esto es soportado por numerosas observaciones de estrellas masivas formadas en regiones compactas de gas ionizado asociadas a núcleos calientes y densos de gas molecular (Wood & Churchwell (1989); Garay & Lizano (1999); Churchwell, 2002). Indicadores de formación estelar masiva relacionados con regiones HII, pueden ser listados: emisión de CS, cuya presencia evidencia alta densidad molecular; emisión de maseres de OH, H₂O y metanol, emisión del continuo a λ 1.2 mm de polvo frío (Faúndez et al. (2004), Zinnecker & Yorke 2007).

Sin embargo, en la actualidad aún no es claro que mecanismo de formación estelar actúa en estos objetos masivos. Dos mecanismos son los que tienen mayor aceptación: (a) modelo de acreción, en el cual las estrellas nacen con poca masa y crecen por acreción de gas residual y por colisiones, y (b) modelo hidrodinámico turbulento de radiación, el cual sugiere que las estrellas masivas se forman a partir de núcleos masivos turbulentos y que ni la presión de radiación ni la ionización previene la acreción hacia el núcleo masivo (Krumholz et al. (2005)).

Observacionalmente se tiene un límite a la masa de las estrellas masivas de alrededor de $150 M_{\odot}$ (Zinnecker & Yorke 2007), el cual parece no variar con la metalicidad de la nube molecular progenitora u otras propiedades de ésta. El por qué éste límite en la masa de las estrellas es tan alto, y cual es la física involucrada es uno de los problemas sin resolver en la astrofísica observacional. Por otro lado, en la teoría de la formación estelar masiva, las estrellas con masa mayor a $20M_{\odot}$ tienen un tiempo de Kelvin-Helmholtz ² muy corto, de tal forma que estas alcanzan la secuencia principal mientras siguen acreciendo material de su nube progenitora. La energía nuclear iniciada así, produce una gran luminosidad y una enorme presión de radiación, la misma que es capaz de detener la acreción una vez que la estrella alcanza masas del orden de 20 a $40 M_{\odot}$ (Krumholz et al. 2005).

Se ha especulado acerca de la existencia de discos alrededor de los objetos estelares jóvenes masivos (MYSOs), pero su fase de estrella de secuencia principal comienza cuando aún está acreciendo material, lo que la hace muy difícil de observar (Zinnecker & Yorke 2007). Las protoestrellas de alta masa muestran indicios de asociación de máseres de agua (H_2O), OH y metanol (Zinnecker & Yorke 2007).

En los sitios de formación estelar masiva generalmente existe una alta extinción a longitudes de onda del óptico, principalmente debido a grandes cantidades de gas y polvo. Sin embargo, la observación en longitudes de onda del infrarrojo cercano y medio, las cuales experimentan menor extinción y muestran procesos asociados con la formación estelar (emisión de polvo calentado, líneas de transiciones de recombinación) son de gran utilidad en los estudios relacionados con la formación estelar masiva (Beuther et al. (2007)).

La observación en bandas angostas ($Br\gamma$, $Pa\beta$) nos dan mayores detalles de los procesos físicos que son llevados a cabo en la región ionizada y en la nube molecular. La emisión de $Br\gamma$ que proviene de una región pequeña comúnmente asociada con una región HII, evidencia una región HII compacta, a su vez la emisión extendida se encuentra relacionada espacialmente con la emisión del polvo en la región espectral del

² $t_{KH} = GM^2/RL$, es el tiempo que durante el cual una estrella puede colapsar en ausencia de energía nuclear

orden de micras. La emisión de $\text{Br}\gamma$ observada en objetos enrojecidos en el diagrama color-color también es encontrada asociada a regiones HII compactas (Roman-Lopes & Abraham (2006)).

1.3.3. Objetos estelares jóvenes (YSOs) de baja, media y alta masa.

Estrellas T Tauri.

El nombre de estos objetos proviene de sus prototipo T Tauri en la constelación del Toro (Joy (1945)). Este tipo de estrellas variables muestran variabilidad errática en el óptico, intensas líneas fotosféricas y nebulosidades con intensas líneas de emisión en $\text{H}\alpha$. Sus masas son menores a $3M_{\odot}$ y comúnmente muy similares a la del Sol. Un subgrupo de éste tipo de estrellas es llamado T Tauri Clásicas (CTTs por sus siglas en inglés), las cuales muestran temperaturas y masas similares a las del Sol, además de características muy peculiares: (a) poseen una alta rotación, típica de 1 a 8 días, y por tanto líneas de emisión muy anchas, de 5 a 100 km/s (Bertout (1989)). (b) Grandes superficies de la estrella son cubiertas por *hot spots*, típicamente alrededor del 3 al 20 % de la superficie. También (c) muestran una emisión en rayos X variable, así como en ondas de radio. (d) Vientos estelares intensos, (10^6 veces mayores que en el Sol) y flujos colimados son usualmente encontrados en estas estrellas. (e) Este tipo de estrellas poseen discos circumestelares, y por tanto muestran exceso de emisión en el IR y Radio. (f) Sistemas binarios han sido detectados con presencia de estrellas T Tauri.

Las líneas de la serie de Balmer, del Calcio (H,K) y varias líneas prohibidas en emisión, han sido usadas comúnmente para encontrar este tipo de estrellas. Además de estas características espectrales, un exceso de emisión en el ultravioleta (UV) es encontrado en estas estrellas. Su origen está relacionado con la fluorescencia debida a emisión de moléculas (H_2 ?) en el disco y/o material de la envoltente circumestelar.

Otro tipo de estrellas son las *Weak-line* T Tauri (WTTs) con líneas de emisión en $\text{H}\alpha$, pero con un ancho equivalente en emisión menor a 10\AA . Estas estrellas carecen de excesos de emisión en el IR y UV, por ende se consideran carentes de disco. Por esto, se les ha denominado también “*Naked* T Tauri” (NTTs). Sin embargo, la denominación es dudosa, primero porque estrellas de tipo espectral G tienen altos flujos en el continuo, que pueden apantallar la emisión del hidrógeno, y segundo, porque estrellas con discos gruesos, no necesariamente muestran intensa emisión $\text{H}\alpha$, clasificándolos como WTTs, pero no son considerados NTTs.

Estrellas Herbig Ae/Be.

Los objetos de Herbig Ae/Be (Herbig (1960)) son las únicas protoestrellas de masa superior a $3 M_{\odot}$ que son visibles en el óptico e infrarrojo. Son usualmente asociadas

con nebulosidades, siendo estrellas de presecuencia principal de masa intermedia (2-6 M_{\odot}). Las características que éstas presentan son: (1) tipo espectral A o más tempranas, (2) el espectro muestra líneas de emisión, (3) están localizadas en regiones oscurecidas (observadas en el óptico), (4) iluminan nebulosas de reflexión en su vecindad. El segundo y tercer criterio aseguran que estos objetos son jóvenes. El tercer y cuarto criterio excluyen aquellos objetos que separan su envoltente por eyecciones violentas, p.ej. nebulosas planetarias y estrellas Wolf-Rayet. Todas las estrellas Ae/Be poseen excesos de emisión debido a radiación reemitida indicando la presencia de polvo en forma de envoltente circumestelar o disco. Aún no está bien establecido si estos objetos se encuentran embebidos en discos de acreción. En las estrellas de tipo Ae, hay fuerte evidencia de presencia de discos circumestelares a partir de interferometría milimétrica e imagen directa en el óptico. Este no es el caso con las estrellas de tipo Be. El exceso de emisión de las estrellas Ae es un problema sin resolver. Una gran fracción de la luminosidad estelar es radiada entre $1.25\mu\text{m}$ y $7\mu\text{m}$, con un pico en $3\mu\text{m}$. La solución a esta situación involucra la naturaleza de la estructura interna de un disco.

Objetos estelares jóvenes masivos (MYSOs).

Una estrella masiva es el término usado para cualquier estrella con una masa superior a $10 M_{\odot}$ (Smith 2004). Estas se encuentran distribuidas en el plano galáctico, siguiendo la distribución de nubes moleculares (capítulo 1). Su luminosidad es tan alta, $10^4 - 10^6 L_{\odot}$, que producen regiones gigantes, normales, compactas e hipercompactas HII (Churchwell 2002), según sea el medio ambiente circundante. Entre estos objetos tenemos las estrellas tipo O, B y las Wolf-Rayet.

Como ya mencionamos en el capítulo 1, el estatus sobre la formación de estrellas masivas en la actualidad está en discusión. Esto se debe primordialmente a dos razones, estas permanecen embebidas en la nube molecular progenitora, cuando ha comenzado su etapa de secuencia principal. Es decir, la acreción es continua cuando la contracción estelar ha sido completada. El límite de la masa estelar está en el rango 8-15 M_{\odot} . Su tiempo de vida (10^4 años) en la presecuencia principal es por mucho, menor que el tiempo de una estrella de tipo Solar (3×10^7 años). La segunda razón obedece a que este tipo de objetos se forma en grupos. Por lo que seguir un objeto es muy difícil, ya que los vecinos se encuentran tan cerca unos de otros que influyen en la evolución de cada uno de los miembros.

Las estrellas masivas nacen en asociaciones y cúmulos. Los *surveys* en el infarrojo han mostrado que hay una gran variedad de objetos en cúmulos estelares jóvenes. Estos cuentan con estrellas de todas las masas. Dado que la masa de Jeans típica es alrededor de $1 M_{\odot}$, el punto es cómo se acumula suficiente material para formar una estrella de 10 a $100 M_{\odot}$.

Una forma que es potencialmente importante, es que la formación de estrellas masivas sea retardada, hasta después de la producción de estrellas de baja masa. Lo que guiará al calentamiento del gas residual, incrementando la masa de Jeans. Sin embargo, no hay evidencia observacional de que esto ocurra (Las estrellas de baja masa **no son** más viejas que las de alta masa en los cúmulos estelares jóvenes).

Otra teoría que puede ayudar en la explicación de la formación de estrellas masivas, es la presencia de turbulencia supersónica en los *cores* moleculares. La segregación es un punto que se puede explicar en este contexto: Las estrellas masivas yacen preferentemente en el centro de los cúmulos estelares, ya que estas no han evolucionado dinámicamente al centro, ya que su tiempo de relajación colisional es mayor al de otras estrellas. Es decir, las estrellas masivas no migran al centro del cúmulo, nacen en los *cores* de éstos.

El *merging* de estrellas puede producir estrellas de alta masa y la alta probabilidad de colisión en el centro altamente poblado, conduce a la forma segregada. La frecuencia de colisiones depende en gran forma del área efectiva de las estrellas. Dado que las estrellas de baja masa poseen discos, esto hace que sus áreas efectivas aumenten la probabilidad de colisionar. Este modelo puede ayudar a entender la formación estelar de alta masa. Sin embargo, hace falta observaciones en esta dirección, a fin de cotejar dicho modelo.

Se ha encontrado que las estrellas masivas también se encuentran aisladas o en grupos pequeños de objetos. (Lamers et al. (2002)). Lo cual nos hace ver que es necesaria una variedad de modelos a fin de explicar la gama de escenarios de formación estelar.

Asociaciones OB.

Las estrellas de las asociaciones OB observadas se encuentran dispuestas sobre toda la nube molecular en donde se han formado, y su configuración no es la de un cúmulo cerrado (denso), con distancias típicas de 1 a 10 pc. Esto parece ser un modo diferente de formación estelar masiva, a pesar de que se ha encontrado cúmulos densos relacionados a asociaciones OB (Complejo de Carina; Zinnecker & Yorke 2007). La cuestión que prevalece es si las asociaciones OB son cúmulos jóvenes en expansión.

Cúmulos estelares.

Los cúmulos pueden contener de pocas a centenas de estrellas masivas tipo O, con masas que van desde los 10^3 a $10^5 M_{\odot}$ (Massey & Hunter (1998)). Tales cantidades de objetos masivos suelen encontrarse en regiones de pocos parsecs de diámetro, lo que sigue siendo un problema abierto de formación estelar masiva en pequeñas regiones.

Esta situación está asociada con la idea de la creación de cúmulos globulares (Zinnecker & Yorke 2007).

1.3.4. Efectos de la formación estelar sobre el medio interestelar.

Jets y flujos moleculares.

La existencia de flujos en regiones de formación estelar es un fenómeno común. En los objetos de baja masa el proceso más aceptado que los genera está asociado a procesos de acreción y la existencia de discos circunestelares. Sin embargo, en los objetos masivos sus orígenes no están establecidos aún. Se cree que estos procesos remueven el exceso de momento angular en la contracción en el proceso de formación estelar, regulando la rotación del *core* molecular.

Flujos bipolares.

Alrededor de los 80s, fueron encontrados flujos de gas molecular en las inmediaciones de las regiones de formación estelar. Los flujos encontrados presentan dos lóbulos simétricos, uno a cada lado del objeto estelar joven asociado. En general, los tamaños de los flujos van desde décimas a varios parsecs. El rango de velocidad es de pocos a cientos de km/s. La masa total en los flujos va desde 10^{-2} a $10^3 M_{\odot}$.

Se les ha detectado emisión molecular en los extremos de los lóbulos, asociados a delgados cascarones de material, lo que indica que el material ha sido “barrido” y comprimido a lo largo de la trayectoria del flujo. Esta estructura implica que existe una cavidad en el material molecular que ha sido fuertemente evacuada.

En otro tipo de estructuras se presentan varias subestructuras comprimidas a lo largo del flujo, asociadas con la fragmentación del flujo o episodios de *jets* a lo largo del flujo. Los flujos bipolares altamente colimados, con características de alta velocidad, mayores de 50 km/s, son principalmente manejados por YSOs de clase 0 (ver siguiente sección para la clasificación de YSOs), mientras que los flujos clásicos son producidos y manejados por objetos de clase I. Esto quiere decir que la potencia del flujo es dependiente de la tasa de acreción, estando esto de acuerdo con un escenario evolutivo.

Los *jets* de YSOs clase 0 se observan ser muy poderosos, densos y moleculares. Las estructuras son usualmente observadas en el cercano infrarrojo (NIR) a través de su emisión en las líneas del hidrógeno molecular (H_2) y del monóxido de carbono CO. De esto que los *surveys* para *jets* en el NIR son ahora un importante medio para detectar *jets* moleculares. Otro trazador de la actividad de *jets* en la vecindad de YSOs es la emisión a 22.235 GHz de máser de agua. Estos parecen ser excitados por la capa de

material chocado entre el ambiente del *core* protoestelar y el *jet*. Los *jets* asociados a los YSOs de clase I son generalmente débiles. A gran escala, estos *jets* son detectados por las líneas de emisión en el óptico. Los principales trazadores son $H\alpha$ y $[S II]$, y sus velocidades son del orden de 20-140 km/s.

Objetos Herbig-Haro.

Más allá de los *jets*, una serie de estructuras tipo arco ocurren a grandes escalas, las cuales se extienden hasta varios parsecs. La publicación del descubrimiento de estos objetos fue hecha independientemente por Herbig (1950) y por Haro (1952), en $H\alpha$ sobre placas fotográficas en la nube molecular de Orion A, en una región que contiene una cantidad importante de objetos T Tauri (Stahler & Palla 2005; Capítulo 1). A éstos objetos se les denominó objetos Herbig-Haro (objetos HH). En adición a la línea de $H\alpha$, otras transiciones son encontradas en estos objetos, $[SII]$, $[FeII]$, $[NII]$, $[OI]$, $[OII]$ y $[OIII]$, entre otras.

Los modelos para reproducir los objetos HH muestran ondas de choque curvadas, los cuales reproducen exitosamente las características observadas en estos objetos. Una característica espectroscópica frecuentemente encontrada es el doble pico en el perfil de línea, lo que significa que los flancos del arco de choque deflecta material hacia, y en contra de la línea de visión.

Flujos moleculares en estrellas masivas.

Los flujos moleculares también son un fenómeno usual en las regiones de formación estelar masiva. Sin embargo, estos muestran una estructura compleja, en la mayoría de los casos, presentan geometrías complejas, flujos multipolares y pobre colimación, siendo esto asociado, con el escenario de agrupación de estrellas masivas en regiones pequeñas (escala de los *cores* moleculares). En estas, se ha encontrado que su principal característica, es que estos flujos son a gran escala (varios pársecs), lo que los hace más fáciles de resolver (Zinnecker & Yorke 2007).

Las causas de no encontrar discos asociados a objetos jóvenes estelares masivos, son que su viento estelar y presión de radiación son tan poderosos, que evaporan el disco y dispersan el campo magnético y en consecuencia, los flujos eyectados son pobremente colimados (Zinnecker & Yorke 2007).

Choques tipo J/C en objetos Herbig-Haro.

Los choques son transiciones repentinas en las propiedades del medio interestelar (temperatura, densidad), generadas cuando este se encuentra sujeto a un gradiente de pre-

sión. Las propiedades de la transición del choque depende en gran medida de la densidad y velocidad prechoque (ρ_S, v_S ; Stahler & Palla 2004). El tipo de transición puede ser gradual, por lo que se llamará choque tipo C (*continuous*) o rápido, y se le designa choque tipo J (*jump*) (Stahler & Palla 2004). Si un elemento del medio (gas) en el que se da el gradiente de presión “no tiene tiempo” a llegar a termalizarse por el paso de las ondas sónicas de la región de alta presión que se acerca, entonces hay un cambio repentino creado por el contacto directo con el gas postchoque más caliente. Éste es el proceso que genera un choque tipo J. En el choque tipo C, se considera un proceso en el cual las variables del medio no experimentan un salto discontinuo, sino que es suave y continuo, de forma que el gas tiene el tiempo suficiente para termalizarse e incluso para permitir que moléculas y polvo pueda sobrevivir al choque.

La emisión NIR asociada con este tipo de eventos es producida en la región de enfriamiento del choque molecular que se propaga en el gas denso, con lo cual lo hace dependiente de la densidad local que prevalece en el medio (Smith 1995). La emisión NIR proviene principalmente del hidrógeno molecular desexcitado vibracionalmente. Los choques rápidos producen una débil emisión del H_2 . Esto se debe a que el hidrógeno molecular y en general las moléculas son destruidas a través del impacto con el material de alta velocidad.

Máseres interestelares.

Los máseres aparecen en regiones densas y activas asociadas a regiones de formación estelar, inmediaciones de estrellas viejas y remanentes de supernova. En esta sección nos ocuparemos de las primeras regiones. Su localización en las regiones de formación estelar es puntual mas que extendida. Los máseres de agua aparecen en pequeños cúmulos, con características de discos y flujos. Se piensa que estos aparecen en las fases tempranas de la formación estelar. Los máseres de metanol son indicadores de discos y objetos protoestelares tempranos, siendo su detección usualmente con ondas de radio. Los máseres de hidroxilo (OH) parecen estar asociados a regiones HII, posiblemente localizados en la cáscara de gas adyacente a la esfera de Strömgren.

Fotoionización, Viento estelar y supernovas.

La presencia de estrellas de intermedia y baja masa en las inmediaciones de estrellas masivas, sugiere la influencia de estas últimas sobre la formación de las primeras. Las estrellas luminosas masivas pueden promover la formación estelar por el incremento de la densidad del material interestelar próximo a ellas. En los *globules* individuales, mucho del material apilado es comprimido por la presión de radiación de las estrellas masivas. Además de erosionar el material que se encuentra a su paso e ionizarlo, la presión de radiación ejerce una presión mecánica sobre el material interestelar y modifica

su estructura (Stahler & Palla 2004).

Otra forma en que las estrellas masivas ejercen una influencia dinámica sobre el medio interestelar es la presión asociada a remanentes de supernovas. Hay indicios observacionales de que tales remanentes interactúan con las nubes moleculares (de Geus 1992; Zinnecker & Yorke 2007). El gas eyectado crea grandes cascarones y burbujas, cuyos bordes en expansión, eventualmente pueden escapar de la galaxia que las hospeda (Stahler & Palla 2004).

1.4. Distribución espectral de energía (*Spectral Energy Distribution, SED*) de objetos estelares jóvenes (YSOs). El caso de baja masa.

¿Cómo podemos determinar el estado evolutivo de una estrella embebida en una nube molecular oscura? El estado evolutivo de una estrella es determinada por su localización en el diagrama HR. Esto requiere del conocimiento de su luminosidad y colores intrínsecos. La luminosidad es determinada de su flujo medido y su distancia. El color está relacionado con la temperatura efectiva superficial.

El problema es que las protoestrellas y estrellas jóvenes no son estrellas clásicas, en el sentido de que aún se encuentran embebidas en la nube molecular progenitora, por lo que en el rango espectral del óptico son invisibles o muy altamente enrojecidas (Haro (1952)). Estos objetos tempranos no pueden ser aproximados como cuerpos negros y normalmente, su tipo espectral no se puede determinar o es ambiguo. Para los objetos tempranos, solo podemos obtener la radiación que ha sido absorbida (o dispersada) y reemitida a longitudes de onda mayores por el gas y polvo circumestelar de la región molecular progenitora. Las longitudes de onda del IR y de radio son las que muestran la radiación reemitida. Además, debemos tomar en cuenta que esta radiación en IR y radio proceden de regiones muy diferentes a la protoestrella central, lo que produce que no se pueda fijar una distribución de energía de cuerpo negro (Smith 2004, Beuther et al. 2007). Para determinar la luminosidad total (bolométrica) que sale de la nebulosa debemos hacer observaciones a lo largo del continuo en un rango espectral lo suficientemente grande para poder fijar una distribución espectral de energía (SED) (Smith 2004).

Ahora necesitamos sustitutos en cuanto a los colores típicos definidos en el rango espectral del óptico. Dos estudios pueden ser seriamente considerados, el primero involucra las propiedades de la distribución espectral de energía (SED) y la distribución de la potencia radiada con la longitud de onda. Entonces se estudia el diagrama λ vs. λF_λ , más precisamente, calculamos una propiedad de la SED medida sobre un rango angosto en longitudes de onda: la SED infrarroja. Mientras que λ vs. F_λ nos da la luminosidad en

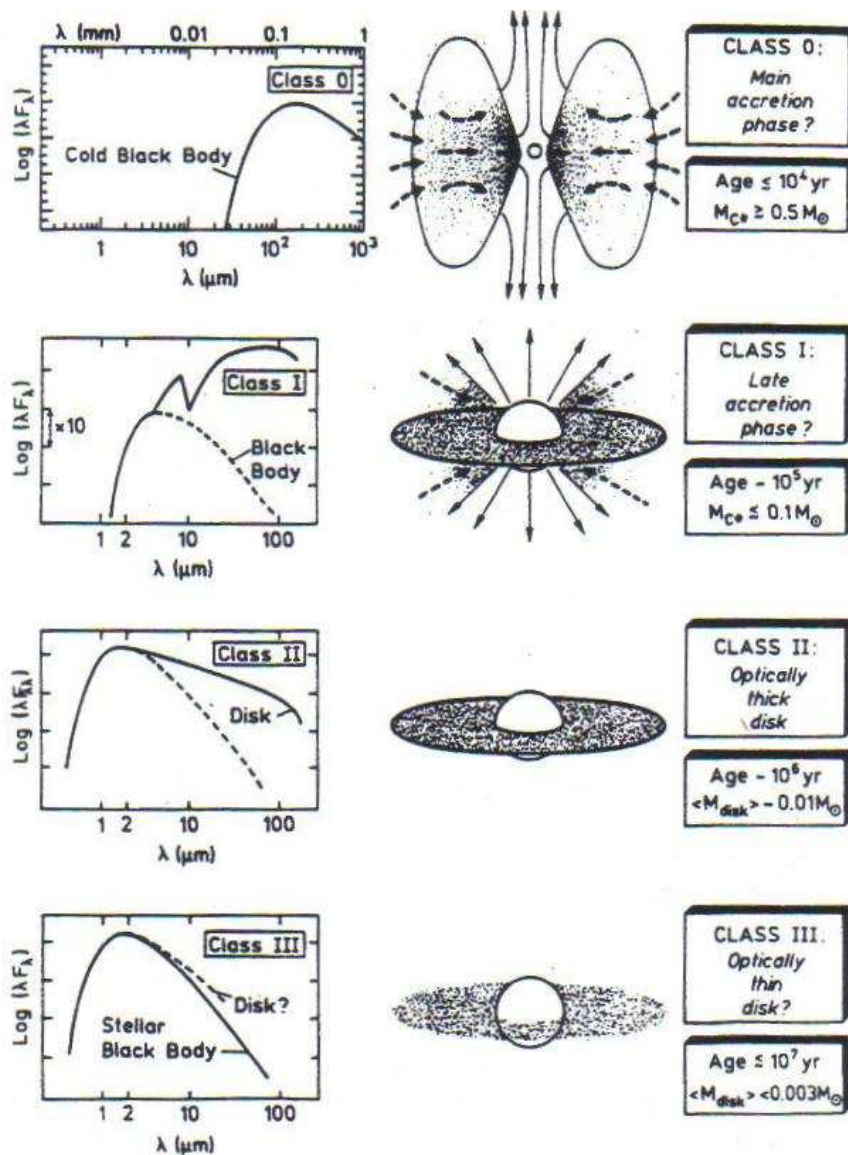


Figura 1.3: Secuencia evolutiva de objetos jóvenes estelares (YSOs) y su distribución espectral de energía. Adaptado de Lada & Wilking (1984) y André (1994).

un intervalo de longitud de onda, λ vs. λF_λ , nos resulta en una cantidad que enfatiza la región espectral que domina la distribución de energía. Las protoestrellas tempranas están rodeadas por una envoltura masiva que se encuentra en contracción, la cual radía copiosamente en el lejano IR (observaciones de IRAS). Entonces, la pendiente de la SED en el IR deberá proveer una secuencia empírica evolutiva.

Los objetos jóvenes de baja masa (YSOs) son definidos en cuatro amplias clases. Estas son designadas clase 0, I, II y III (ver figura 1.3)(Smith 2004). En éste trabajo de tesis centramos nuestra atención sobre las clases 0 y I. Para éstas, el pico máximo de emisión (SED) se encuentra en el rango milimétrico e infrarrojo, respectivamente. El índice espectral (usado comunmente en el estudio de los objetos tempranos) descrito en forma de ley de potencia, es definido tomando el logaritmo del producto λF_λ vs. el logaritmo de la longitud de onda (λ) y fijando una línea recta (Smith 2004). La pendiente de esta línea, α_λ , en el rango espectral $2\mu m$ - $20\mu m$ define el índice espectral,

$$\alpha_\lambda = \frac{d(\log \lambda F_\lambda)}{d(\log \lambda)},$$

o bien,

$$\alpha_\nu = \frac{d(\log \nu F_\nu)}{d(\log \nu)},$$

en cualquier caso, se debe cumplir que $\alpha_\lambda = -\alpha_\nu$. Los objetos clase 0 y I poseen SED's que se incrementan con la longitud de onda ($\alpha_\lambda > 0$). Estas son fuentes identificadas con objetos protoestelares embebidas en envolturas masivas, derivando mucha de su luminosidad de la acreción. Más precisamente, usamos los términos clase 0 y clase I, para describir los tipos de los *cores* interiores que contienen a las protoestrellas de clase 0 y I, respectivamente.

Los objetos protoestelares de clase II y III, son caracterizados por SEDs cuya máxima emisión está en el NIR y región del visible. La emisión de estos objetos es dominada por fotosferas, en muchos de los casos con exceso de emisión infrarroja. Los objetos de clase II se encuentran menos embebidos que los de clase I. Su SED es mas ancha que la de un cuerpo negro. El exceso de emisión se extiende hasta el MIR y sigue una ley de potencia, con un índice espectral de $-1.5 > \alpha_\lambda > 0$. Esta emisión es producida por material circumestelar cuyo rango de temperaturas es de 100 K a 1500 K, y normalmente está asociado a un disco. En el rango espectral del visible, las fuentes de clase II poseen características de objetos CCTs.

Las SEDs de los objetos de clase III corresponden a cuerpos negros enrojecidos. Sin un exceso de emisión infrarrojo, la energía radiada se decrecienta para longitudes de onda mayores a $2\mu m$, lo que da un índice espectral de $\alpha_\lambda < -1.5$. El polvo del frente del objeto provee una extinción considerable, el cual enrojece la fuente de clase III. Los objetos clase III producen muy poca emisión $H\alpha$, lo que las define como *Weak-line T*

Tauri, WTTs.

1.5. Descripción de la nube molecular asociada con la fuente IRAS 18236-1205.

La región de estudio se encuentra asociada con la fuente IRAS 18236-1205 (coordenadas galácticas, $b = 19^{\circ}.364$, $l = -0^{\circ}.024$; coordenadas ecuatoriales $\alpha = 18\ 26\ 24.3$, $\delta = -12\ 03\ 47$). Ésta ha sido seleccionada de un grupo de regiones moleculares asociadas a objetos IRAS que muestran colores típicos de regiones HII Ultra compactas [$60\mu\text{m}/12\mu\text{m}$] = 19.3, [$25\mu\text{m}/12\mu\text{m}$]=3.7 (Wood & Churchwell 1989b). La región central hacia la fuente IRAS fue observada por Bronfman et al. (1996) en la línea de transición rotacional monosulfuro de carbono (CS)($J = 2 \rightarrow 1$) a 97.981GHz, el cual es un usual trazador molecular de alta densidad y por Molinari et al. (1996) en NH_3 a 23.6944 GHz y 23.7226 GHz respectivamente, con un ancho de 12.5 MHz. Los resultados de Bronfman et al. (1996) y de Molinari et al. (1996) derivaron en una distancia para esta nube molecular de 2.5 kpc y 2.51 kpc respectivamente.

Surveys recientes muestran máseres hacia esta región, Xu et al. (2003) y Walsh et al. (2003) observaron metanol (CH_3OH) a 6.7 GHz, confirmando la distancia reportada por Bronfman et al. (1996). Sewilo et al. (2004) reportan para ésta región observaciones en el continuo a $\lambda\ 100\mu\text{m}$, asociado con la localización del máser de metanol. La presencia de máseres, aunado a los colores típicos de regiones UC HII obtenidos por IRAS nos permiten proponer que esta región muestra un proceso de formación estelar masiva.

Faúndez et al. (2004) han reportado resultados de emisión en el continuo a $\lambda\ 1.2\ \text{mm}$, derivando su correspondiente flujo y usando la distancia encontrada por Bronfman et al. (1996) calcularon la temperatura del polvo, $T_{\text{polvo}} = 26\text{K}$, la masa de la nebulosa $M_c = 7.8 \times 10^2 M_{\odot}$ y la densidad volumétrica del hidrógeno molecular $n(\text{H}_2) = 1.5 \times 10^5\ \text{cm}^{-3}$.

Las observaciones realizadas hacia esta región molecular provienen fundamentalmente de *surveys*. Éstas se encuentran resumidas en la tabla 1.3 y graficados en las figuras 1.5. En éstas, mostramos la región molecular definida por el ^{13}CO y superpuestas las posiciones de las observaciones ya comentadas.

A pesar de la evidencia que apunta sobre la existencia de objetos estelares jóvenes masivos (MYSOs) en la región molecular asociada a la fuente IRAS 18236-1205, no existe en la actualidad un estudio en detalle sobre la población estelar joven embebida en esta región molecular. El presente trabajo persigue el objetivo de revisar el trabajo hecho sobre este objeto y dar un estudio con detalle de su población estelar joven, que nos lleve a una mayor comprensión del escenario de formación estelar presente en esta región molecular.

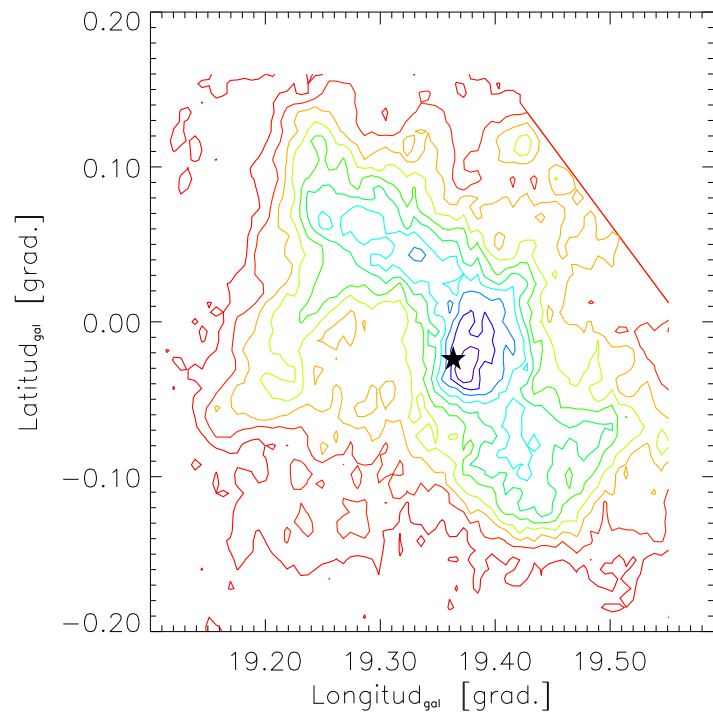


Figura 1.4: Emisión del ^{13}CO en contornos de colores, que muestra la región molecular de estudio así como la posición de la fuente IRAS 18236-1205 con el símbolo de estrella negra, asociada a la región más densa.

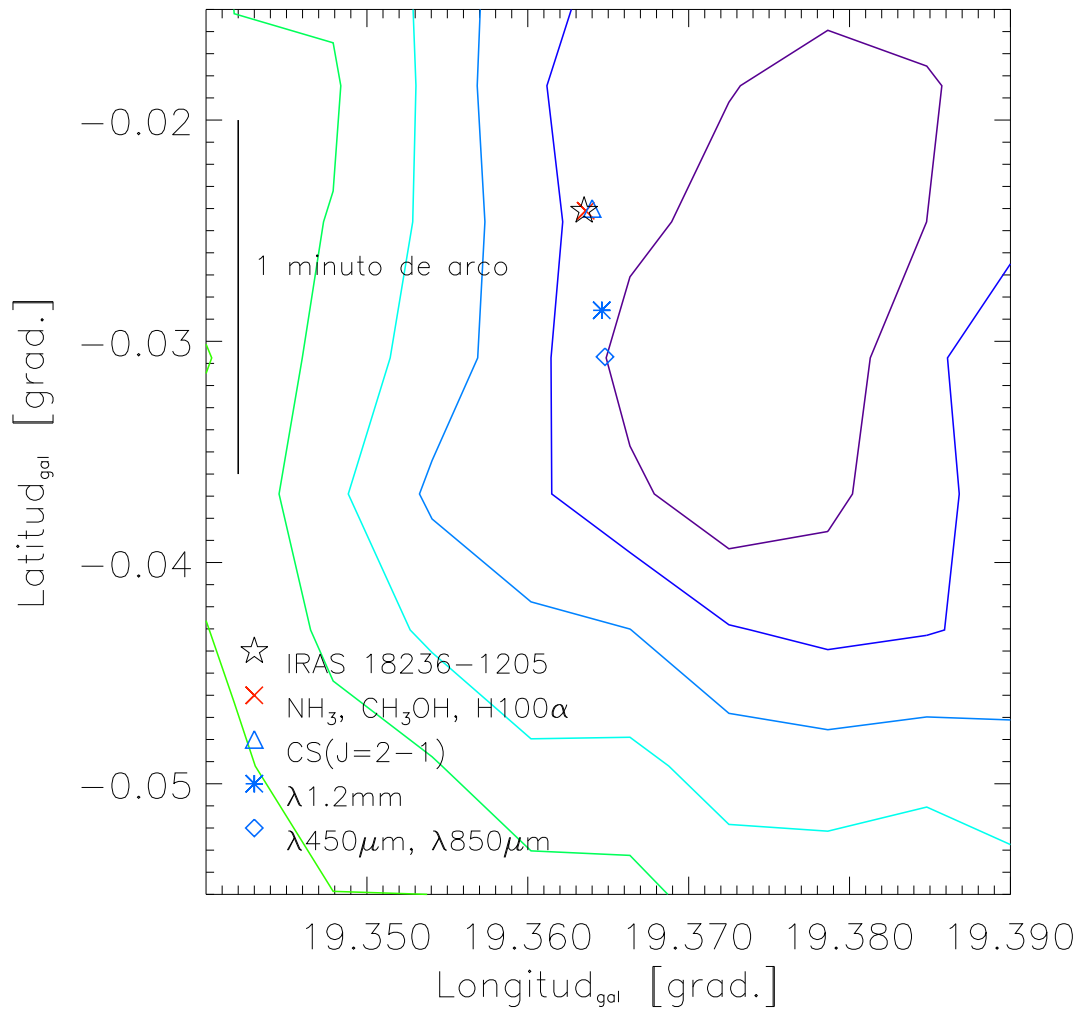


Figura 1.5: La figura muestra la región central molecular en contornos de ^{13}CO . Superpuestas están las posiciones de las observaciones hechas hacia esta región molecular.

Observaciones	(Δ AR, Δ DEC) [$^{\circ}$]	V (km/s)	T_{MB} (K)	D (Kpc)	beam($''$)/resolución(km s $^{-1}$)
CS($J=2 \rightarrow 1$) (97.981 GHz) (A)	0.0000, 0.0000	25.9	1.05	2.50	SEST: 50/0.52; OSO:39/0.76
NH $_3$ (1,1) (23.6944 GHz) (B)	0.0056, 0.0017	26.2	1.52	2.51	40/0.3
NH $_3$ (2,2) (23.7226GHz) (B)	0.0056, 0.0017	26.2	1.89	2.51	40/0.3
CH $_3$ OH (6.7 GHz) (C)	0.0056, 0.0017	26.3	- - - -	2.50	- - - -
CH $_3$ OH (6.7 GHz) (D)	0.0064, 0.0024	24.7-28.7(C)	- - - -	2.51 (B)	JCMT: 8 (450 $\lambda\mu$ m); 15 (850 $\lambda\mu$ m)
continuo λ 450 μ m, λ 850 μ m (D)	0.0064, 0.0024	24.7-28.7(C)	- - - -	2.51 (B)	JCMT: 8 (450 $\lambda\mu$ m); 15 (850 $\lambda\mu$ m)
continuo λ 1.2 mm (E)	0.0010, 0.0030	- - - -	- - - -	2.51 (A)	24/X
H110 α (4874.1570 MHz) (F)	0.0056, 0.0017	$V_{LSR} = 26.81_{-0.01}^{+0.01}$	- - - -	2.6	2.56'/0.188
H $_2$ CO (4829.6594 MHz) (G)	0.0056, 0.0017	- - - -	- - - -	2.6	2.56'/0.188

Tabla 1.3: Datos compilados de la literatura para la nube molecular hacia la fuente IRAS 18236-1205, [ar,dec]=[276.6015,-12.062593](J2000). (Id) Sewilo et al. 2004, ApJS 154 553. (A) Bronfman et al. 1996, (B) Molinari et al. 1996, (C) Xu et al. (2003), (D) Walsh et al. 1998, (E) Faúndez et al. (2004), (F) Sewilo et al. (2004), (G) Sewilo et al. (2004)

Nuestra región de interés es una región molecular pequeña. Ésta se extiende sobre una área de 6 minutos de arco \times 6 minutos de arco (5×5 pc) a una distancia de 2.5 kpc. A esta distancia, las observaciones del proyecto 2MASS y el telescopio espacial Spitzer son idóneas para realizar estudios fotométricos infrarrojos con buena resolución sobre las poblaciones estelares, enfocándonos en los objetos jóvenes embebidos en la región molecular. Esto la hace buena candidata para ser observada con la Cámara Infrarroja (CANICA) del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH) en las bandas anchas, J, H y K_S . Además, observaciones en las bandas angostas $Br\gamma$, H_2 y FeII, son útiles en la descripción física del medio interestelar de la región molecular.

Capítulo 2

Estudio fotométrico infrarrojo de los objetos estelares embebidos en la nube molecular asociada con la fuente IRAS 18236-1205.

“Comentaban los guaycuras que el Sol, la Luna y las estrellas eran hombres y mujeres, los cuales todos los días al ocultarse, caían en el mar y salían al día siguiente a nado. Otros decían que las estrellas eran fogones encendidos en el cielo por el espíritu del cielo y vueltas a encender todos los días después que se apagaban en el mar.”

Cosmogonía Guaycura, Baja California, México.

2.1. Selección y definición de la región molecular.

La selección de la región molecular hacia la fuente IRAS 18236-1205 se realizó a partir de los datos del Galactic Ring Survey (GRS). Este mapeo fué realizado en la emisión del monóxido de carbono en su isótopo $^{13}\text{CO}(J=1\rightarrow 0)$, usando el radiotelescopio de 14 m. del Five College Radio Astronomy Observatory (FCRAO) con SEQUOIA, la antena tiene una eficiencia del haz principal de antena $\eta_B=0.48$, para la frecuencia $=110.2\text{GHz}$, en la transición rotacional $J=1\rightarrow 0$. Con una resolución en velocidad de 0.21 km/s (por canal) se tiene una sensibilidad típica rms $\sigma(T_A^*)$ de $\approx 0.13\text{ K}$ (Jackson et al. (2006)). Hemos obtenido los mapas de canales (figura 2.1) para la región molecular centrado en las coordenadas galácticas de la fuente IRAS ($l=19.36, b=-0.02$). El cubo de datos que se usó para la región de interés tiene como rango de coordenadas galácticas, en longitud de 19.10 a 19.60 grados, en latitud de -0.12 a 0.15 grados y en velocidad, de 18.0 a 32.0 km s^{-1} .

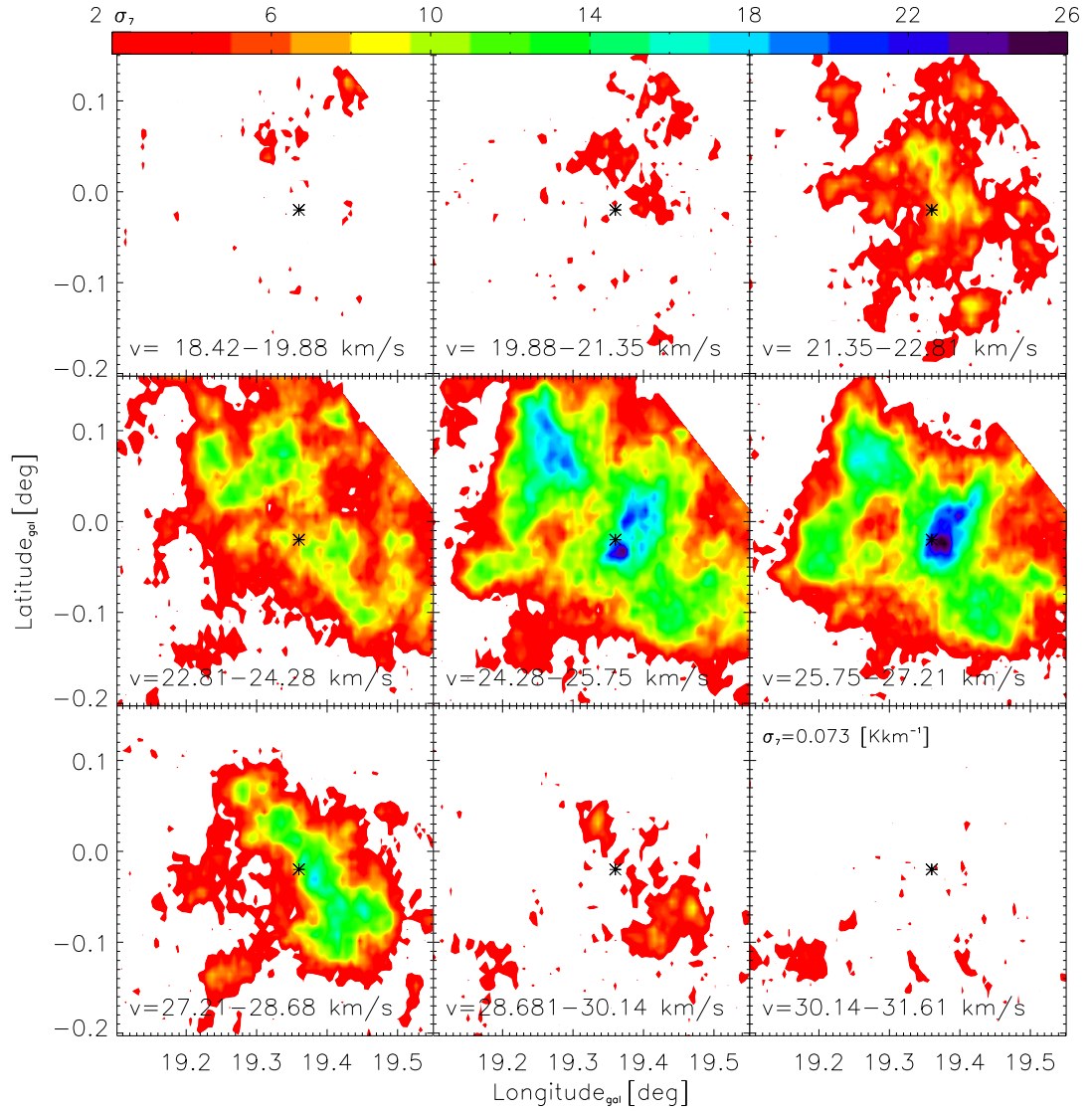


Figura 2.1: Mapa de canales de la emisión de ^{13}CO (en contornos llenos de color) de la región molecular en intervalos de 7 canales. Los rangos en velocidad están marcados en cada panel. Los valores para los contornos de color están indicados en la barra de colores en la parte superior de la figura.

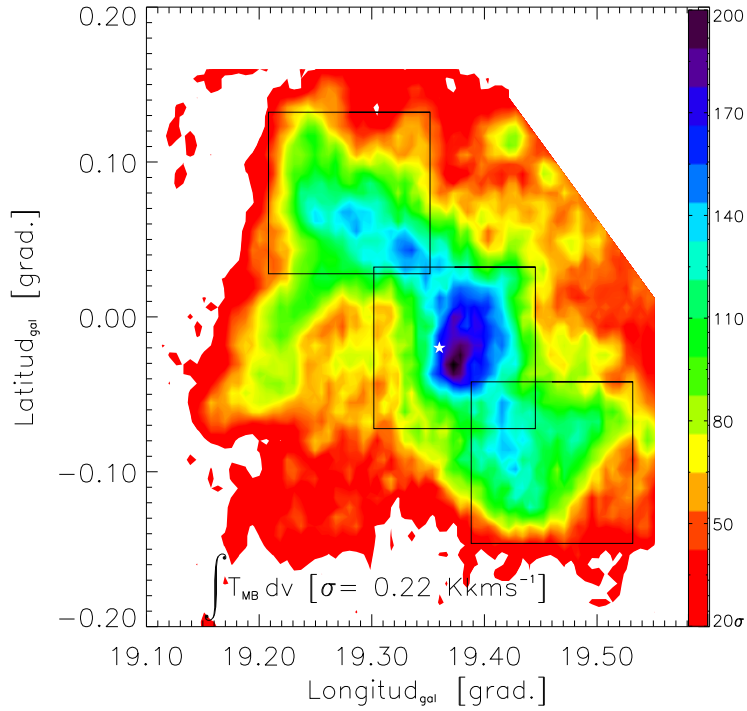


Figura 2.2: Mapa integrado de la emisión del ^{13}CO en todo el rango de velocidad ($V=18.42\text{-}31.61$ km/s). Los valores para los contornos de color está a la derecha de la figura. En la parte central esta representada la posición de la fuente IRAS con una estrella blanca y los cuadros negros muestran la posición de las estructuras principales de mayor emisión.

Los mapas de canal de la emisión del ^{13}CO (figura 2.1) se obtuvieron integrando en intervalos iguales de velocidad de 7 canales, el rango de velocidad se encuentra indicado en cada panel. La escala de temperatura integrada (en la barra de colores) está en múltiplos de σ_7 comenzando en $4\sigma_7$, donde $1\sigma_7=0.073$ K km s $^{-1}$. Podemos observar en esta imagen que el gas molecular se encuentra mayoritariamente en la parte central de los canales (rango de velocidad de 24.28-27.21 km/s). Descartamos la emisión del ^{13}CO en la región superior derecha de todos los canales (triángulo cortado en el vértice superior de cada panel de la figura 2.1), región que muestra una distribución en velocidad diferente a la que presenta la región de interés en ^{13}CO (canales centrales del panel), por lo cual probablemente pertenece a una región molecular adyacente.

De esta manera, definimos la geometría de la región molecular de interés (figura 2.2) a partir del valor de 40σ , donde $1\sigma=0.22$ K km s $^{-1}$. La distribución de intensidades de la región molecular muestra en su estructura principal, una inclinación con respecto al plano galáctico, con tres subestructuras principales (marcadas con cuadros negros en la fig. 2.2) y con la fuente IRAS asociada a la subestructura central (marcada con una estrella). La definición de la nube por medio del ^{13}CO es el primer criterio (geométrico)

de selección que usaremos para filtrar los objetos estelares que serán estudiados en la siguiente sección.

2.2. Parámetros físicos de la región molecular.

La derivación de los parámetros físicos de la región molecular: temperatura, densidad columnar, extinción visual promedio, masa y distancia cinemática se puede obtener a partir de las transiciones moleculares rotacionales $J=1 \rightarrow 0$ o $J=2 \rightarrow 1$, para la molécula del ^{12}CO (Sanders et al. (1986)), y para uno de sus isótopos, generalmente ^{13}CO .

Si suponemos de entrada, que tenemos condiciones de equilibrio termodinámico local (ETL) en el gas molecular, es decir la densidad numérica de partículas crece y la energética del gas es dominada por colisiones. Aquí tenemos que la distribución de las velocidades de las partículas están descritas por la ley de Maxwell para una temperatura T_{cin} . Si las transiciones colisionales dominan sobre las radiativas, los niveles energéticos también se termalizan y las poblaciones de los niveles energéticos pueden ser descritas por la ley de Boltzmann con T_{exc} . Lo anterior nos lleva a la condición que en ETL, las temperaturas $T_{cin}=T_{exc}$. Para nuestro caso, $T_{cin}=T_{exc}(^{12}\text{CO})=T_{exc}(^{13}\text{CO})$.

Si además suponemos que la línea del ^{12}CO es ópticamente gruesa, $\tau_0(^{12}\text{CO}) \gg 1$, y la del ^{13}CO es ópticamente delgada, $\tau_0(^{13}\text{CO}) \lesssim 1$, podemos calcular algunos parámetros físicos de la región molecular (Dickman (1978)). De la solución para la ecuación de transferencia radiativa, la temperatura de la línea (T_L) está dada por,

$$T_L = \left[J(T_{exc}) - J(T_{bg}) \right] (1 - \exp(-\tau_0)) \quad (2.1)$$

en donde

$$J_\nu(T) = \frac{h\nu/k}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad (2.2)$$

y T_{bg} es la temperatura de la emisión del fondo de microondas, $T_{bg}=2.7\text{K}$. Como la línea del ^{13}CO es ópticamente delgada, éste término correspondiente a la emisión del fondo de microondas, debe agregarse de acuerdo con la solución a la ecuación de transferencia radiativa (Stahler & Palla 2004).

La temperatura de excitación la obtenemos de mediciones del ^{12}CO . Las observaciones de la emisión del $^{12}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$ fueron hechas en el telescopio de 14 metros del FCRAO en la frecuencia $\nu=115.271 \text{ GHz}$ con una resolución en velocidad de 0.65 km s^{-1} , con una eficiencia de antena de haz principal (η_B) de 0.7 (Sanders et al. 1985). Puesto que esta línea es ópticamente gruesa, la temperatura de antena es una fracción de la temperatura de radiación observada, es decir $T_A = \eta_B T_L^{obs}$. De la solución a la

ecuación de transporte radiativo (ec. 2.1) y considerando que la línea del ^{12}CO es ópticamente gruesa, tenemos que

$$T_L^{12} = J^{12}(T_{exc}) - J^{12}(T_{bg}) \quad (2.3)$$

Para la transición $^{12}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$, de la ecuación (2.2) podemos despejar para la temperatura de excitación del ^{12}CO (T_{exc}^{12}),

$$T_{exc}^{12} = \frac{h\nu/k}{\ln\left(1 + \frac{h\nu/k}{T_L^{12} + J^{12}(T_{bg})}\right)} \quad (2.4)$$

o bien,

$$T_{exc}^{12} = \frac{5.53}{\ln\left(1 + \frac{5.53}{T_L^{12} + 0.82}\right)} \quad (2.5)$$

De observaciones en el isótopo ^{12}CO ($J=1 \rightarrow 0$) (Sanders et al. 1985) calculamos una temperatura cinética del gas molecular ($T_{exc}^{12} = T_K$; caso de línea termalizada) en la región central de 22.5K.

De la solución para la ecuación de transferencia radiativa (ec. 2.1) y considerando que la línea del ^{13}CO es ópticamente delgada tenemos,

$$T_L^{13} = \left[J^{13}(T_{exc}) - J^{13}(T_{bg}) \right] (1 - \exp(-\tau_0^{13})) \quad (2.6)$$

A partir de la temperatura de radiación para la línea del ^{13}CO y suponiendo que estamos en una situación de equilibrio termodinámico local ($T_{exc}^{13} = T_{exc}^{12}$), podemos calcular la profundidad óptica del ^{13}CO , τ_0^{13} . Para la transición $^{13}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$ y de la ecuación (2.6) tenemos,

$$\tau_0^{13} = -\ln \left[1 - \frac{T_L^{13}}{J^{13}(T_{exc}) - J^{13}(T_{bg})} \right] \quad (2.7)$$

$$\tau_0^{13} = -\ln \left[1 - \frac{T_L^{13}}{\frac{5.29}{\exp(5.29/T_{exc}^{12}) - 1} - 0.87} \right] \quad (2.8)$$

Suponiendo la termalización del gas molecular a esta temperatura cinética ($T_{cin} = T_{exc}$), calculamos la profundidad óptica (τ) del ^{13}CO , la cual resultó de 0.74, para la región central. Adoptando una proporción entre las abundancias del ^{13}CO y ^{12}CO de 57 (valor para el medio interestelar del vecindario del sistema solar, considerando la distancia galactocéntrica al Sol de 8.5 kpc; Goto et al. (2003)), tenemos que la profundidad óptica del ^{12}CO es $\tau^{12}\text{CO}=42.2$, por lo que nuestra suposición que $\tau_0(^{12}\text{CO}) \gg 1$ y $\tau_0(^{13}\text{CO}) \lesssim 1$ está de acuerdo con nuestro cálculo.

Conocida la profundidad óptica y la temperatura de excitación de la transición para el $^{13}\text{CO}(J=1\rightarrow 0)$, podemos obtener la densidad columnar por medio de la expresión (Chavarría et al. (2008))

$$\left[\frac{N(^{13}\text{CO})}{\text{cm}^{-2}} \right] = 2.42 \times 10^{14} \left[\frac{\Delta v}{\text{km s}^{-1}} \right] \left[\frac{T_{exc}}{\text{K}} \right] \left[\frac{\tau_0^{13}}{1 - \exp(-5.29/T_{exc})} \right] \quad (2.9)$$

y usando una proporción entre abundancias de H_2 y ^{13}CO , de $N(\text{H}_2) = 5.0 \times 10^5 N(^{13}\text{CO})$ (Dickman 1978), calculamos una extinción visual promedio, por medio de la expresión (Frerking et al. (1982)),

$$\left[\frac{N(\text{H}_2)}{\text{cm}^{-2}} \right] = 9.40 \times 10^{20} \left[\frac{A_V}{\text{mag}} \right] \quad (2.10)$$

con lo anterior calculamos la densidad columnar del hidrógeno molecular, $N(\text{H}_2) = 4.8 \times 10^{22}$ partículas por cm^{-2} y estimamos la extinción visual promedio $A_V \gtrsim 30$ mag. en la línea de visión, hacia la región central molecular.

Cálculo de la masa para la región molecular.

Ajustando una distribución gaussiana al espectro de temperatura integrada para toda la región molecular (figura 2.3), obtenemos la velocidad para el máximo (v_{max}), igual a 26.35 km/s (línea vertical negra discontinua) y el ancho a altura media (FWHM) igual a 4.9 km/s (FWHM está relacionado con la dispersión de velocidades (σ), de acuerdo a la relación $FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln 2}$). La distancia cinemática (D) fue calculada usando la velocidad $V_{\odot} = 220$ km/s y $R_{\odot} = 8.5$ kpc para el Sol y suponiendo una densidad en función del radio de la forma $\rho = r^{-2}$ (May et al. 1997), lo que nos da un valor de la distancia (cinemática) de 2.42 kpc para la región molecular. Con este resultado, la masa virial definida por (May et al. (1997)),

$$\left[\frac{M_{vir}}{M_{\odot}} \right] = 126.0 \left[\frac{\Delta v_{1/2}}{\text{km s}^{-1}} \right]^{2.0} \left[\frac{D}{\text{pc}} \right] \quad (2.11)$$

resultó en una masa virial (M_{VIR}) de $1.5 \times 10^4 M_{\odot}$, en donde $\Delta v_{1/2} = \text{FWHM}$.

Por otro lado, suponiendo un radio efectivo (simetría esférica) dado por $r_{ef} = (\text{Area}/\pi)^{1/2}$, donde *Area* es el área proyectada en (l,b) de la región molecular a la distancia cinemática. Con la densidad columnar del $N(\text{H}_2)$ igual en cada cada posición observada ($\Delta l, \Delta b, \Delta v$) igual a la del centro, calculamos por medio de $M_{LTE} = \pi/4 D^{2.0} N(\text{H}_2) m(\text{H}_2)$ (Dickman 1978), un valor de la masa LTE (M_{LTE}) igual a $5 \times 10^4 M_{\odot}$ para toda la región molecular. En nuestro cálculo hemos supuesto que se cumple la relación entre abundancias del $N(\text{H}_2)$ y $N(^{13}\text{CO})$ del trabajo de Dickman (1978).

Los parámetros calculados en esta sección pueden verse resumidos en la tabla 2.1.

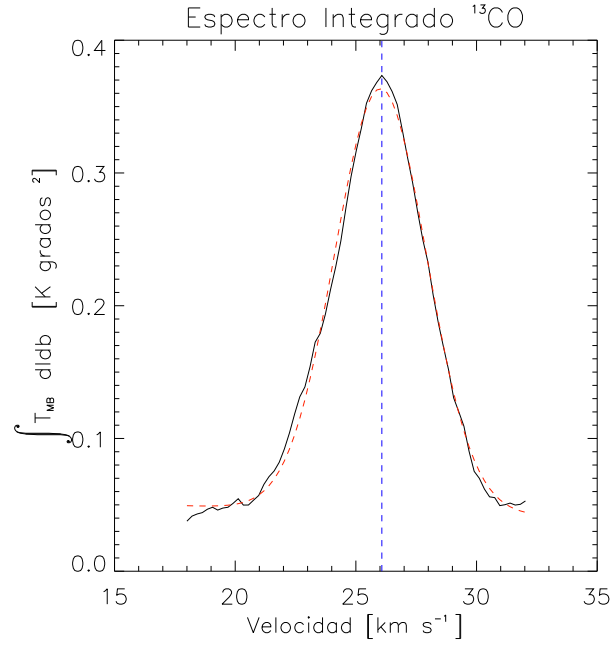


Figura 2.3: Espectro integrado de temperatura en coordenadas espaciales de la región molecular para la emisión del ^{13}CO . El ajuste gaussiano es dado por la línea roja discontinua, mientras que la línea vertical discontinua marca el valor de la velocidad máxima.

Tabla 2.1: Parámetros físicos calculados de la región molecular.

Parámetro	valor [unidad]
T_K	22.5 [K]
τ_0^{13}	0.74
τ_0^{12}	42.2
$N(^{13}\text{CO})$	9.7×10^{16} [cm^{-2}]
$N(\text{H}_2)$	4.8×10^{22} [cm^{-2}]
A_V	$\gtrsim 30$ [mag]
Velocidad (peak)	26.35 [km/s]
FWHM	4.90 [km/s]
Distancia (cinemática)	2.42 [kpc]
M_{VIR}	1.5×10^4 [M_\odot]
M_{LTE}	5.0×10^4 [M_\odot]

2.3. Estudio fotométrico infrarrojo de los objetos estelares de catálogos de 2MASS en la región molecular estudiada.

2.3.1. Selección de la población estelar asociada a la región molecular y candidatos a objetos estelares jóvenes (YSOs) embebidos.

Para determinar la población estelar en la región molecular definida por el ^{13}CO y en analogía a los trabajos de Roman-Lopes & Abraham (2004) y Roman-Lopes & Abraham (2006), usamos el catálogo de fuentes puntuales del proyecto 2MASS en una caja de 0.4×0.4 grados centrada en la fuente IRAS 18236-1205. También hemos escogido una región llamada de control, centrada en las coordenadas (19.40, -1.85) en una caja de la misma dimensión, que suponemos presenta sólo estrellas de campo con la extinción galáctica promedio (medio interestelar difuso). Esta región de control se encuentra alejada aproximadamente 2 grados en latitud galáctica, hacia el sur de la región de estudio y se seleccionó con el fin de filtrar, mediante una comparación de colores en el infrarrojo, a los objetos que pertenecen a la región molecular de estudio.

A partir del mapa de contornos de la emisión integrada en ^{13}CO (figura 2.2), hemos seleccionado los datos de las fuentes puntuales de 2MASS con buena calidad fotométrica (banderas A y B en los tres filtros: J, H, K_S del PSC 2MASS) que se encuentren, por proyección, dentro del contorno de 40σ de la región molecular (figura 2.2). También hemos incluido aquellos objetos que presentan buena calidad fotométrica en la banda K_S , aunque con un valor límite superior en las bandas J y H. Con estos datos y aquellos de la región de control construimos diagramas color-color ($H-K_S$) vs. (J-H) (figuras 2.4 y 2.5) en un sistema fotométrico homogeneizado de Bessell & Brett (1988). Estos diagramas son útiles para el diagnóstico de regiones con poblaciones estelares jóvenes. La presencia de objetos con exceso de emisión infrarroja, así como la distribución de la extinción hacia diferentes regiones, también pueden inferirse de estos diagramas.

Adicionalmente, se pueden identificar candidatos a objetos protoestelares, así como la presencia de objetos asociados a choques (objetos HH). En estos diagramas se muestran la secuencia principal con una línea sólida cian (Koornneef (1983)), y los vectores de enrojecimiento (líneas blancas/negras discontinuas) para estrellas tempranas y tardías. Además, con símbolos de estrellas se marcan los valores de la extinción a $A_V=10, 20$ y 30 magnitudes. La ley de extinción que usamos es la de Koornneef (1983). La región de los objetos T Tauri clásicos (Meyer (1996)) se muestra con la línea discontinua verde, mientras que los objetos Herbig Ae/Be (Lada & Adams (1992); Finkenzeller & Mundt (1984)) son representados con los símbolos rombos cian y los objetos con choque tipo J y C asociados a objetos Herbig-Haro (Smith 1995) con triángulos rojos y azules, re-

spectivamente. En la figura 2.5 mostramos un diagrama equivalente para la región de control.

Del diagrama color-color para la región de interés (Figura 2.4) podemos notar que hay una gran cantidad de objetos que yacen a lo largo de la banda de enrojecimiento estelar (línea blanca/negra discontinua) y por encima de ésta, se encuentran los objetos de secuencia principal, del frente (*foreground*) en la región molecular y atrás de ella (*background*), por lo que presentan la alta extinción de la región molecular ($A_V \gtrsim 30$ mag) en la línea de visión. Notamos también la presencia de objetos a la derecha y abajo de la banda de enrojecimiento, los cuales presentan clara señal de un exceso de color $H-K_S$. Durante las fases tempranas de la formación estelar los objetos jóvenes se encuentran aún embebidos en el material circumestelar de polvo y gas progenitor (Lada & Adams 1992), lo que produce que los objetos sean brillantes en el infrarrojo (presentando un exceso de color $H-K_S$ o exceso de emisión), mientras que son débiles hacia el rango espectral óptico. Estos objetos son muy interesantes y son el objeto de estudio en nuestro presente trabajo.

Podemos notar que hay una gran diferencia con la población estelar del campo de control (figura 2.5). Los objetos de esta región pueblan mayoritariamente una zona muy marcada del diagrama color-color ($-0.1 < (H-K_S) < 0.6$) y ($0.0 < (J-H) < 1.6$), estando la mayoría situados sobre la banda de extinción visual, pero no más allá de $A_V=10$. Estos objetos están asociados con el enrojecimiento de fotosferas estelares (Lada & Adams 1992). Esto nos corrobora que los objetos de la región de control poseen poca extinción acorde al promedio galáctico. Los objetos de la región molecular en el diagrama color-color que pueblan la región antes descrita, pueden eliminarse de nuestra selección, ya que se trata de objetos de secuencia principal (*foreground*, *background*). También debemos notar que hay una gran cantidad de objetos en la región de choques J/C y la derecha de la banda de enrojecimiento visual. Estos objetos pueden tratarse de objetos estelares jóvenes, que debido a la presencia de grandes excesos de emisión en el infrarrojo, pueden estar muy embebidos aún. Esto los hace muy interesantes para nuestro estudio.

Usando el histograma de la distribución $H-K_S$ (figura 2.6) par la región molecular, notamos que hay dos grupos bien definidos de poblaciones estelares: el primer grupo en el rango $-1.0 < (H-K_S) < 0.6$ (línea azul punteada) y el segundo en $0.6 < (H-K_S) < 4.0$. Comparando estos datos con el histograma de la región de control (línea sólida negra), observamos que el máximo del primer grupo de la región molecular ($H-K_S \sim 0.3$) coincide con el máximo de la distribución de la región de control, por lo que los objetos con $(H-K_S) < 0.6$ son considerados como estrellas del frente (*foreground*) con la extinción promedio en la línea de visión. Los objetos que poseen valores $(H-K_S) > 0.6$ y pertenecientes a la región molecular deben tener mayor extinción debida a su pertenencia a la región molecular y son considerados miembros de la población estelar embebida en ella.

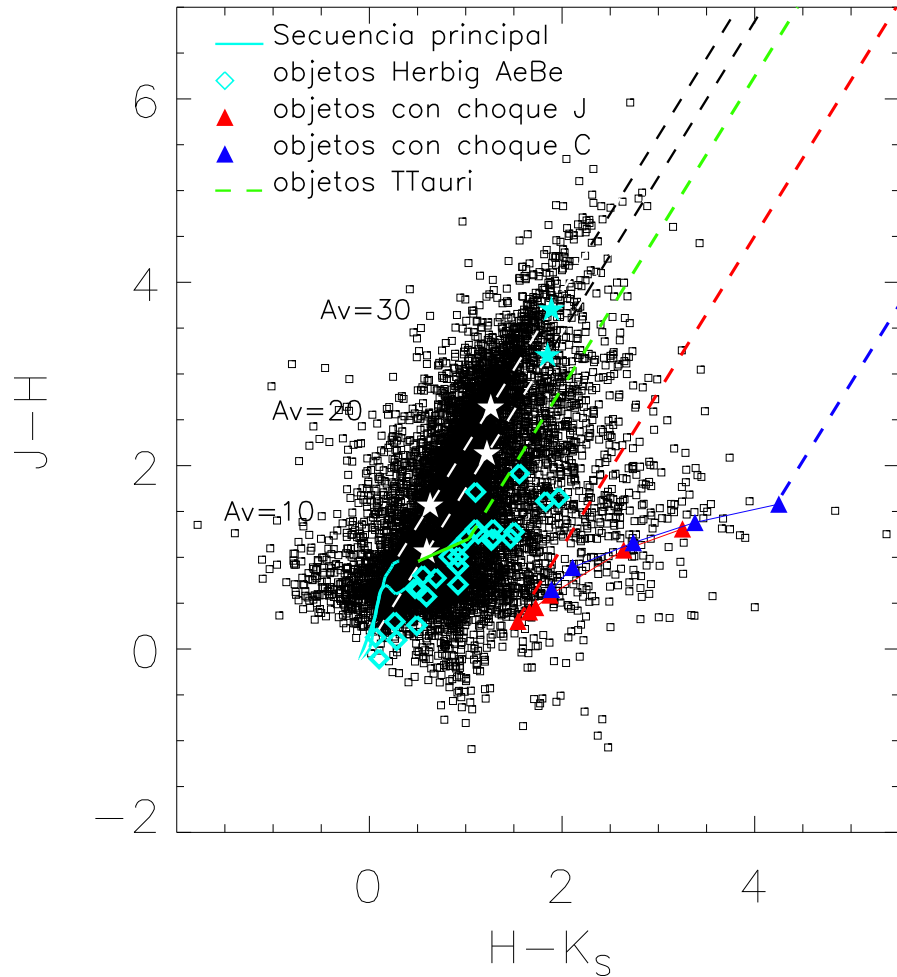


Figura 2.4: Diagrama color-color ($H-K_S$) vs ($J-H$) de las fuentes del PSC 2MASS que caen en la región demarcada geoméricamente por el ^{13}CO . La región entre líneas blancas/negras discontinuas representa la banda de extinción visual. Las posiciones para los valores de la extinción en el visual para estrellas tempranas (línea inferior discontinua) y tardías (línea superior discontinua) son representadas por los símbolos de estrellas para $A_V=10, 20$ y 30 . Los valores sin enrojecer para estrellas en la secuencia principal son representadas por la línea sólida cian (Koorneeff 1983). En el diagrama también se muestran las regiones representativas, para las estrellas T Tauri (línea verde discontinua; Meyer 1996), objetos tipo Herbig Ae/Be (rombos azules; Lada & Adams 1992) y los objetos con choques tipo J y C asociados con objetos tipo Herbig-Haro (triángulos rojos y azules respectivamente; Smith 1995).

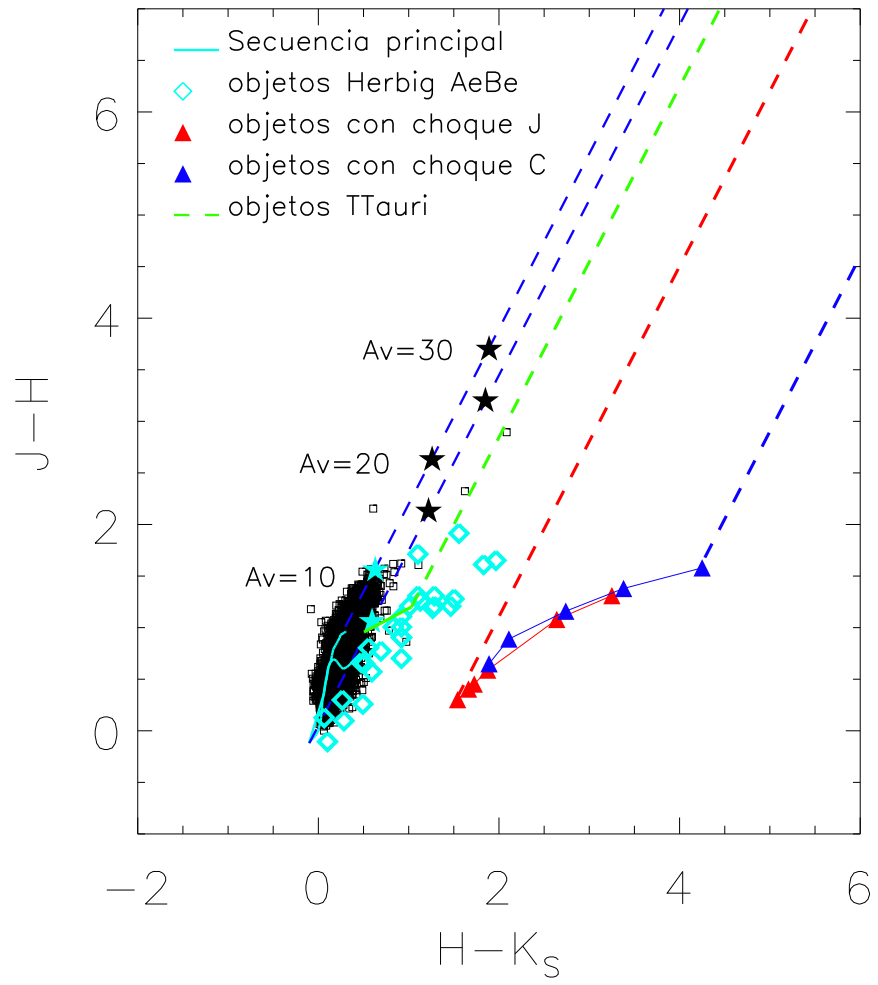


Figura 2.5: Diagrama color-color de la región de control. Los detalles de la figura son los mismos que en la figura anterior.

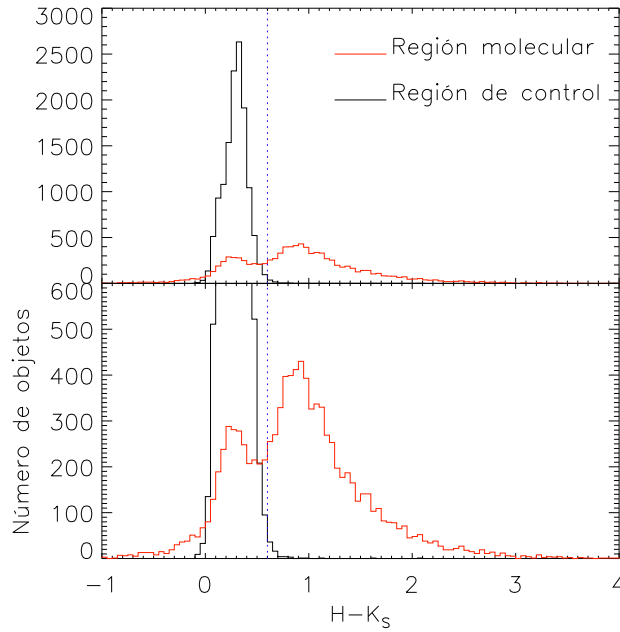


Figura 2.6: Histograma de color $H-K_S$ para la región molecular, comparado con la región de control (arriba). En la parte inferior se muestra un *zoom*, para notar la separación en la dos distribuciones de la población estelar de la región molecular. Las áreas usadas en cada región es de $4' \times 4'$.

2.3.2. Diagramas color-magnitud ($H-K_S$) vs (K_S) de los objetos seleccionados. Otro criterio fotométrico de selección de YSOs embebidos.

Para la población seleccionada bajo los argumentos de la sección anterior se construyó el diagrama color magnitud $H-K_S$ vs. K_S (figura 2.7). En esta figura se muestran en líneas azules discontinua los vectores de enrojecimiento para estrellas de secuencia principal, desde O3V hasta B3V (rombos negros; Koornneef 1983). Las líneas discontinua verdes y rojas indican el valor de enrojecimiento en la línea de visión para la secuencia principal y gigantes rojas, respectivamente (Koornneeff 1983). El límite de detección ($K_{S,lim}=14.3$ mag) es indicado por la línea negra punteada. Podemos notar que hay objetos (región derecha de la línea roja discontinua) cuya posición difícilmente se puede alcanzar siguiendo el vector de enrojecimiento (línea azul discontinua). Este efecto se puede deber a que además de poseer la extinción de la región molecular en la línea de visión, también poseen una extinción intrínseca debido a que aún están embebidos en la envoltante circumestelar progenitora, o presentan discos de acreción que son características particulares de los objetos protoestelares de clase 0, I y II (Beuther et al. 2007).

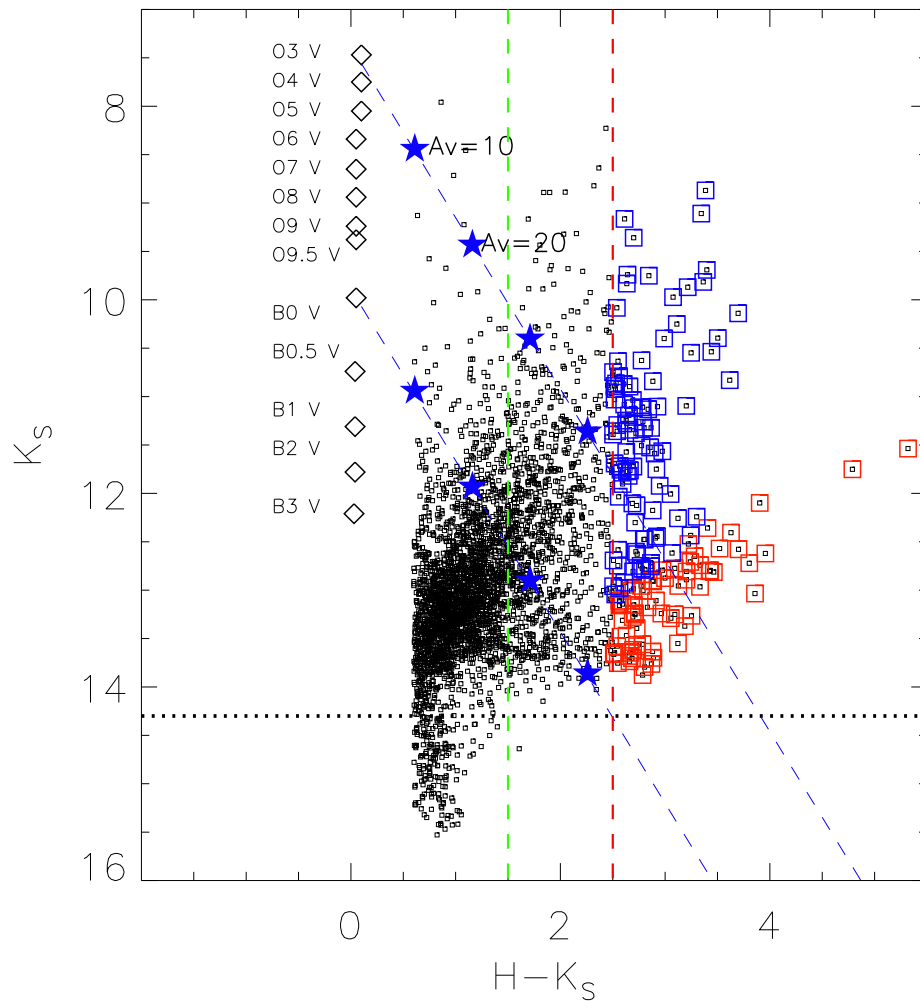


Figura 2.7: Diagrama Color-Magnitud ($H-K_S$) vs K_S de los objetos puntuales de 2MASS que están dentro de la región molecular (cuadros negros pequeños). En este se muestran en líneas azules discontinua, los vectores de enrojecimiento de estrellas tempranas de secuencia principal O3V y B0V (rombos negros), respectivamente. Con símbolos de estrellas azules se muestran las posiciones de los valores de extinción visual de $A_V=10, 20, 30$ y 40 magnitudes. Los objetos en cuadros rojos son designados como de la región 'brazo horizontal' y los que yacen por encima de estos (cuadros azules), 'brazo vertical'. Las líneas discontinua verde y roja indican el valor de enrojecimiento intrínseco en la línea de visión para la secuencia principal (estrellas de secuencia principal afectadas por la extinción de la region molecular) y gigantes rojas (estrellas gigantes brillantes del fondo y frente que presentan enrojecimiento intrínseco), respectivamente (Koorneeff 1983). El límite de detección, $K_{S,lim}=14.3$ mag. es indicado por la línea negra punteada.

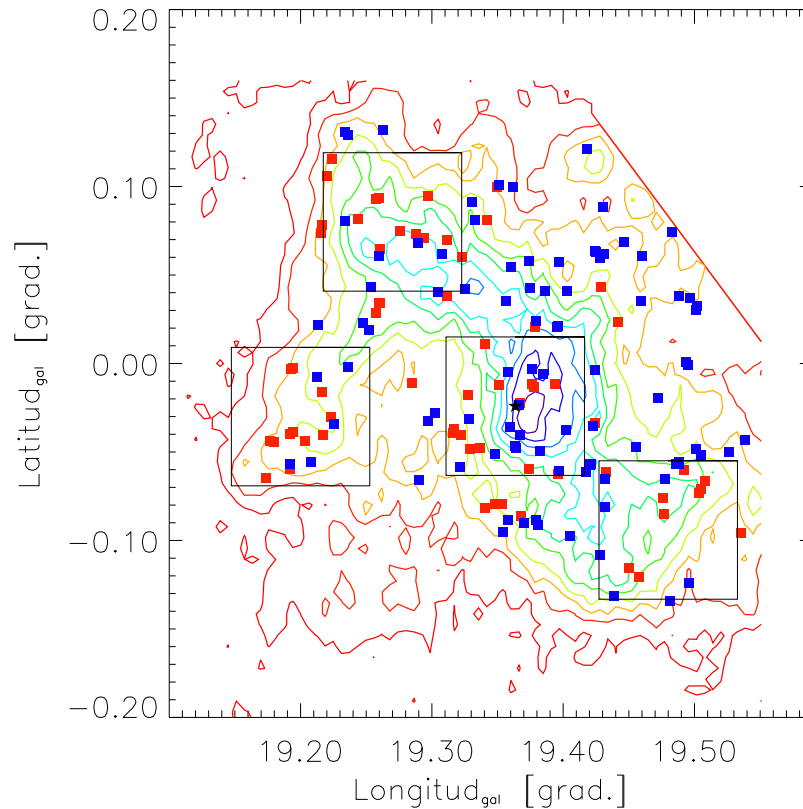


Figura 2.8: Diagrama en contornos sin llenar de la emisión del gas molecular (^{13}CO) Superpuesto a los contornos se encuentran los objetos de los brazos horizontal (cuadros rojo llenos) y brazo vertical (cuadros azules llenos) respectivamente. Los cuadros negros grandes

Para seleccionar los candidatos a objetos jóvenes embebidos, seguimos el siguiente proceso: Calculamos cuánto afecta a las magnitudes J,H y K_S de 2MASS la extinción calculada ($A_V=30$ mag), resultando hasta $(H-K_S)=1.5$ (marcado en la figura 2.7 por la línea verde discontinua). Esto elimina la población de secuencia principal que es afectada por la extinción en la línea de visión.

También consideramos un enrojecimiento intrínseco de las estrellas gigantes rojas luminosas de fondo y frente (Koorneef 1983) de aproximadamente $(H-K_S)=1.0$ (línea roja discontinua). Con esto podemos quedarnos con una selección de objetos con un exceso infrarrojo $(H-K_S) > 2.5$, candidatos a objetos jóvenes estelares embebidos en la región molecular.

De lo anterior, proponemos el siguiente criterio para seleccionar candidatos a miembros de la población embebida: fuentes puntuales que se encuentran en la región de interés,

geométricamente definida por el ^{13}CO y que además muestran exceso infrarrojo ($H-K_S) > 2.5$. Estos objetos son marcados en la figura 2.7 con cuadros rojos y azules. Los objetos en cuadros rojos son designados como de la región “brazo horizontal” (BH) y los que yacen por encima de estos (cuadros azules), “brazo vertical” (BV).

La posición espacial en longitud y latitud galáctica, de los objetos que muestran este exceso infrarrojo, son graficados en el mapa de contornos de la intensidad integrada del ^{13}CO (figura 2.8), con cuadros rojos y azules. La posición de la fuente IRAS es marcada con una estrella negra. En esta figura notamos que estos objetos se encuentran distribuidos en grupos a lo largo de la región molecular. Los objetos del brazo horizontal (BH) están mayormente agrupados en regiones coincidentes con las estructuras de mayor intensidad del gas molecular (figura 2.8), mientras que los objetos del brazo vertical (BV) se encuentran distribuidos de forma más homogénea en toda la región molecular. Uno de estos grupos es coincidente con la región central de la nube, asociada a la fuente IRAS, región de mayor intensidad.

La ubicación de los objetos de brazo horizontal y brazo vertical en el diagrama color-magnitud y su distribución espacial con respecto al gas molecular (fig. 2.8), parece sugerir que los objetos de brazo horizontal están en una fase evolutiva más temprana, asociada a las regiones de mayor emisión del ^{13}CO , que traza las regiones de mayor densidad, mientras que los objetos de brazo vertical parecen ser objetos más evolucionados y por tanto su ambiente circundante se ve más libre de gas y polvo, siendo más brillantes en el diagrama color-magnitud. Un análisis de este diagrama nos dará mayor certeza en nuestra suposición. En el siguiente capítulo se hace éste.

Capítulo 3

Análisis del cúmulo joven estelar embebido en la región molecular.

"Del interior del cielo vienen las bellas flores, los bellos cantos. Los afea nuestro anhelo, nuestra inventiva los hecha a perder..."
Diálogo de flor y canto. Cantares Mexicanos.

3.1. Análisis de los objetos protoestelares candidatos seleccionados basado en los diagramas color-color de 2MASS.

Los objetos seleccionados por el filtro geométrico (^{13}CO) y fotométrico (NIR 2MASS) son mostrados en la figura 3.1. En ésta podemos notar que los objetos denominados en el diagrama color-magnitud, como brazo horizontal (BH; cuadros rojos) están dispuestos en la región de los objetos con choques J y C asociados con objetos HH (Smith 1995) con un rango de extinción hasta 10 magnitudes en el visual. El grupo de los objetos del brazo vertical (BV; cuadros azules) se encuentran en una región alargada en el eje vertical ($J-H=0.0 - 5.0$), por lo que se puede tratar de objetos asociados a la región de choques J y C, con alta extinción, del orden de 30 magnitudes. Los objetos más altos del diagrama, pueden tratarse de objetos T Tauri o bien de objetos Herbig AeBe, con una extinción $A_V \gg 30$ magnitudes.

Las coordenadas de los objetos BH y BV son dados en las tablas 3.1 y 3.2 respectivamente. Ambos grupos presentan alto enrojecimiento ($H-K_S > 2.5$), buena calidad fotométrica en la banda K_S de 2MASS (banderas A y B del PSC) y están débilmente detectadas en la banda J y H, es decir, sus magnitudes en esta banda en la mayor parte de los objetos, están por encima del límite de detección ($J_{lim}=15.8$, $H_{lim}=15.1$). Las columnas de las tablas 3.1 y 3.2 contienen la asignación del PSC 2MASS, longitud galáctica (l) y latitud galáctica (b), ascensión recta (α), declinación (δ). En las tablas

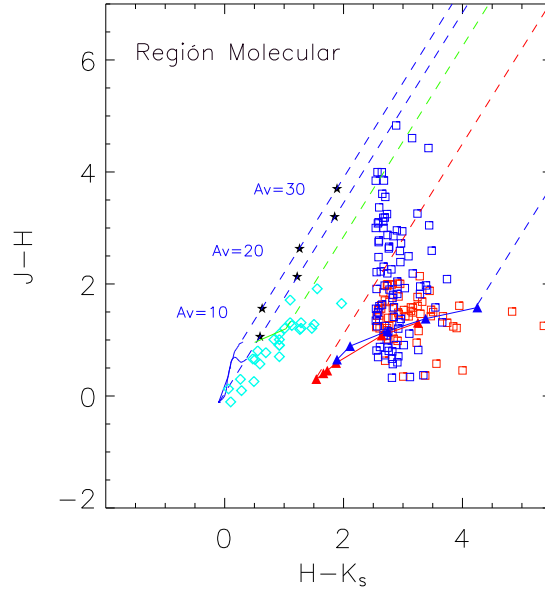


Figura 3.1: Diagrama Color-color $H-K_S$ vs. K_S de los objetos definidos como de brazo horizontal (cuadros rojos) y brazo vertical (cuadros azules) seleccionados por fotometría. La explicación de la figura es análoga a la figura 2.4.

3.3 y 3.4 tenemos las magnitudes de los objetos BV y BH, en las bandas J, H y K_S de 2MASS respectivamente, así como sus errores en cada magnitud. Las líneas discontinua en algunas columnas, significa que no hay dato en el PSC 2MASS.

Tabla 3.1: **Coordenadas 2MASS de los objetos del brazo horizontal (BH).**

Designacion 2MASS.	Longitud[°]	Latitud[°]	α [°]	δ [°]
18254522-1208424	19.2166	0.0784	276.4384	-12.1451
18260014-1212159	19.1925	-0.0030	276.5006	-12.2044
18260018-1212096	19.1942	-0.0023	276.5008	-12.2026
18260959-1211229	19.2235	-0.0301	276.5400	-12.1897
18260570-1211217	19.2164	-0.0160	276.5238	-12.1894
18254610-1208543	19.2154	0.0736	276.4421	-12.1484
18265044-1159283	19.4767	-0.0849	276.7102	-11.9912
18264835-1159278	19.4750	-0.0747	276.7002	-11.9880
18264021-1201101	19.4323	-0.0612	276.6676	-12.0194
18263321-1204148	19.3735	-0.0598	276.6384	-12.0708

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.1 – Continuación de tabla.

Designacion 2MASS.	Longitud[°]	Latitud[°]	α[°]	δ[°]
18264682-1157576	19.4921	-0.0601	276.6951	-11.9660
18262562-1206164	19.3292	-0.0482	276.6067	-12.1045
18262437-1203325	19.3671	-0.0225	276.6015	-12.0591
18265094-1157448	19.5031	-0.0733	276.7123	-11.9624
18265957-1156397	19.5355	-0.0960	276.7482	-11.9443
18262500-1201507	19.3934	-0.0116	276.6042	-12.0307
18263640-1203073	19.3962	-0.0626	276.6517	-12.0521
18263323-1200499	19.4240	-0.0334	276.6385	-12.0138
18262636-1205524	19.3366	-0.0478	276.6098	-12.0979
18265003-1157190	19.5077	-0.0667	276.7085	-11.9553
18254689-1205598	19.2597	0.0934	276.4454	-12.0999
18255984-1207370	19.2605	0.0342	276.4993	-12.1269
18253801-1207184	19.2236	0.1152	276.4084	-12.1218
18262022-1204069	19.3508	-0.0120	276.5843	-12.0686
18262308-1206265	19.3220	-0.0403	276.5962	-12.1073
18262213-1206437	19.3159	-0.0392	276.5922	-12.1121
18255450-1205057	19.2875	0.0730	276.4771	-12.0849
18260489-1204486	19.3114	0.0377	276.5204	-12.0802
18262351-1202441	19.3774	-0.0131	276.5980	-12.0456
18260077-1207554	19.2577	0.0285	276.5032	-12.1320
18255567-1204488	19.2939	0.0709	276.4820	-12.0803
18260131-1203358	19.3225	0.0602	276.5054	-12.0599
18254676-1206072	19.2576	0.0929	276.4449	-12.1021
18261633-1201455	19.3782	0.0202	276.5681	-12.0293
18253967-1207444	19.2203	0.1059	276.4153	-12.1290
18255792-1203554	19.3113	0.0698	276.4914	-12.0654
18254769-1207107	19.2438	0.0813	276.4487	-12.1196
18255901-1201581	19.3422	0.0811	276.4959	-12.0328
18255317-1206462	19.2603	0.0648	276.4716	-12.1128
18255972-1207407	19.2594	0.0341	276.4989	-12.1279
18262310-1202452	19.3764	-0.0118	276.5963	-12.0459
18262182-1206369	19.3170	-0.0371	276.5909	-12.1102
18261401-1204025	19.3402	0.0108	276.5585	-12.0673
18255279-1205410	19.2755	0.0745	276.4700	-12.0948
18255585-1201035	19.3496	0.0995	276.4827	-12.0177
18255090-1203577	19.2974	0.0947	276.4621	-12.0660
18262298-1158174	19.4420	0.0232	276.5958	-11.9715
18261236-1207361	19.2845	-0.0108	276.5515	-12.1267
18261717-1158248	19.4291	0.0432	276.5716	-11.9735

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.1 – Continuación de tabla.

Designacion 2MASS.	Longitud[°]	Latitud[°]	α[°]	δ[°]
18261882-1205305	19.3276	-0.0178	276.5785	-12.0919
18265413-1201445	19.4502	-0.1158	276.7256	-12.0291
18263451-1206097	19.3478	-0.0794	276.6438	-12.1027
18263421-1206375	19.3404	-0.0819	276.6425	-12.1104
18265607-1201289	19.4577	-0.1208	276.7337	-12.0247
18263823-1205168	19.3679	-0.0859	276.6593	-12.0880
18263512-1205529	19.3531	-0.0794	276.6463	-12.0980
18260817-1213194	19.1922	-0.0401	276.5341	-12.2220
18261237-1213517	19.1921	-0.0594	276.5515	-12.2311
18260766-1214056	19.1799	-0.0442	276.5319	-12.2349
18261135-1214593	19.1737	-0.0645	276.5473	-12.2498
18260805-1213116	19.1939	-0.0387	276.5335	-12.2199
18261027-1212493	19.2036	-0.0438	276.5428	-12.2137
18261107-1212021	19.2167	-0.0405	276.5461	-12.2006
18260720-1214156	19.1765	-0.0440	276.5301	-12.2377

Tabla 3.2: Coordenadas 2MASS de los objetos del brazo vertical (BV).

Designacion 2MASS.	Longitud[°]	Latitud[°]	α[°]	δ[°]
18260500-1209553	19.2363	-0.0023	276.5208	-12.1654
18255712-1210219	19.2148	0.0226	276.4880	-12.1728
18260220-1208310	19.2517	00.0187	276.5092	-12.1419
18260337-1211160	19.2128	-0.0075	276.5143	-12.1886
18260081-1208379	19.2473	0.0228	276.5034	-12.1439
18261074-1211237	19.2255	-0.0344	276.5448	-12.1899
18262950-1204245	19.3641	-0.0477	276.6229	-12.0735
18262748-1154460	19.5015	0.0332	276.6152	-11.9142
18262629-1155005	19.4966	0.0368	276.6095	-11.9168
18263603-1203015	19.3969	-0.0605	276.6501	-12.0505
18264843-1155020	19.5383	-0.0431	276.7018	-11.9172
18264564-1158056	19.4879	-0.0569	276.6902	-11.9682
18263511-1156127	19.4946	-0.0011	276.6430	-11.9363
18263563-1157563	19.4724	-0.0194	276.6489	-11.9645
18262733-1203572	19.3668	-0.0403	276.6175	-12.0677
18264629-1158544	19.4772	-0.0655	276.6929	-11.9818
18263157-1202068	19.4019	-0.0373	276.6315	-12.0352

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.2 – Continuación de tabla.

Designacion 2MASS.	Longitud[°]	Latitud[°]	α[°]	δ[°]
18264530-1157089	19.5012	-0.0483	276.6888	-11.9524
18263794-1201398	19.4206	-0.0568	276.6581	-12.0277
18262639-1204197	19.3593	-0.0358	276.6099	-12.0722
18262837-1155056	19.5013	0.0301	276.6178	-11.9158
18262950-1204245	19.3641	-0.0477	276.6229	-12.0735
18264536-1158127	19.4856	-0.0568	276.6891	-11.9702
18264834-1155437	19.5264	-0.0494	276.7017	-11.9307
18262904-1205220	19.3484	-0.0509	276.6184	-12.0889
18264455-1201453	19.4318	-0.0814	276.6857	-12.0293
18264564-1158056	19.4879	-0.0569	276.6902	-11.9682
18262451-1203382	19.3660	-0.0237	276.6021	-12.0606
18263794-1201398	19.4206	-0.0568	276.6581	-12.0277
18263360-1200569	19.4229	-0.0356	276.6400	-12.0158
18263794-1201398	19.4206	-0.0568	276.6581	-12.0277
18263873-1201399	19.4177	-0.0615	276.6609	-12.0325
18262511-1155249	19.4884	0.0379	276.6046	-11.9236
18264102-1201174	19.4320	-0.0650	276.6710	-12.0215
18263194-1203296	19.3822	-0.0494	276.6331	-12.0582
18262694-1206579	19.3216	-0.0584	276.6123	-12.1161
18263341-1156198	19.4930	0.0009	276.6403	-11.9367
18263986-1159328	19.4555	-0.0473	276.6661	-11.9924
18264636-1157035	19.5046	-0.0514	276.6932	-11.9509
18262735-1159548	19.4241	-0.0037	276.6117	-11.9999
18255399-1206548	19.2597	0.0607	276.4750	-12.1152
18261466-1159509	19.4032	0.0411	276.5611	-11.9975
18261807-1207085	19.3021	-0.0278	276.5754	-12.1190
18253635-1206109	19.2363	0.1291	276.4019	-12.1040
18262282-1202102	19.3845	-0.0062	276.5951	-12.0361
18261228-1158022	19.4247	0.0627	276.5519	-11.9684
18261694-1156173	19.4600	0.0606	276.5706	-11.9381
18262128-1202308	19.3765	-0.0033	276.5887	-12.0419
18262238-1157033	19.4590	0.0350	276.5933	-11.9509
18253542-1206118	19.2348	0.1320	276.3986	-12.1040
18261085-1159468	19.3969	0.0554	276.5452	-11.9963
18261228-1158022	19.4239	0.0634	276.5508	-11.9688
18260551-1203569	19.3253	0.0423	276.5229	-12.0658
18255545-1202182	19.3305	0.0913	276.4811	-12.0384
18255778-1202310	19.3328	0.0808	276.4916	-12.0412
18255901-1156487	19.4182	0.1211	276.4959	-11.9468

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.2 – Continuación de tabla.

Designacion 2MASS.	Longitud[°]	Latitud[°]	α[°]	δ[°]
18261798-1200586	19.3954	0.0205	276.5761	-12.0139
18255704-1200217	19.3618	0.0995	276.4886	-12.0068
18261570-1201366	19.3791	0.0237	276.5654	-12.0269
18260351-1205069	19.2895	0.0677	276.4828	-12.0856
18261325-1157528	19.3043	0.0404	276.5147	-12.0853
18261325-1157528	19.4308	0.0614	276.5559	-11.9636
18261798-1200586	19.3954	0.0205	276.5761	-12.0139
18255926-1204200	19.3078	0.0618	276.4969	-12.0722
18261061-1202290	19.3566	0.0352	276.5442	-12.0414
18261856-1207316	19.2974	-0.0325	276.5774	-12.1254
18261662-1154419	19.4829	0.0741	276.5693	-11.9116
18260685-1201440	19.3606	0.0546	276.5286	-12.0289
18254672-1207449	19.2336	0.0804	276.4447	-12.1291
18255569-1200563	19.3510	0.1010	276.4821	-12.0157
18255711-1207446	19.2534	0.0430	276.4880	-12.1291
18261331-1156465	19.4458	0.0698	276.5555	-11.9463
18261271-1200465	19.3858	0.0410	276.5530	-12.0129
18261119-1201140	19.3747	0.0423	276.5465	-12.0221
18260761-1200567	19.3736	0.0580	276.5317	-12.0157
18261942-1203321	19.3579	-0.0046	276.5810	-12.0589
18260777-1157164	19.4305	0.0872	276.5324	-11.9518
18253908-1204421	19.2625	0.1321	276.4117	-12.0794
18262185-1205512	19.3283	-0.0314	276.5911	-12.0975
18265620-1202473	19.4387	-0.1314	276.7342	-12.0465
18264014-1204444	19.3795	-0.0886	276.6673	-12.0790
18264995-1202429	19.4279	-0.1083	276.7082	-12.0453
18264094-1204443	19.3810	-0.0915	276.6706	-12.0789
18263767-1205527	19.3580	-0.0886	276.6570	-12.0980
18270188-1200391	19.4810	-0.1353	276.7579	-12.0109
18263864-1206152	19.3543	-0.0950	276.6610	-12.1042
18263934-1205170	19.3700	-0.0900	276.6639	-12.0880
18270110-1159336	19.4956	-0.1240	276.7546	-11.9927
18264493-1203376	19.4050	-0.0973	276.6873	-12.0605
18261183-1213481	19.1920	-0.0570	276.5492	-12.2301
18261341-1212556	19.2080	-0.0559	276.5559	-12.2154
18262475-1208578	19.2899	-0.0660	276.6041	-12.1476

Tabla 3.3: **Magnitudes 2MASS de los objetos del brazo horizontal (BH).**

Designacion 2MASS.	J_{2MASS}	eJ_{2MASS}	H_{2MASS}	eH_{2MASS}	K_{S,2MASS}	eK_{S,2MASS}
18254522-1208424	17.72	-----	16.01	-----	13.18	0.03
18260014-1212159	17.72	-----	16.30	-----	12.97	0.05
18260018-1212096	17.74	-----	16.31	-----	13.65	0.05
18260959-1211229	17.78	-----	16.09	-----	12.89	0.02
18260570-1211217	17.70	-----	16.28	-----	12.81	0.02
18254610-1208543	17.58	-----	16.23	-----	12.80	0.04
18265044-1159283	17.23	-----	15.77	-----	12.79	0.03
18264835-1159278	17.41	-----	16.34	-----	13.56	0.06
18264021-1201101	17.30	-----	16.12	-----	13.39	0.05
18263321-1204148	17.96	-----	16.34	-----	13.68	0.06
18264682-1157576	16.84	-----	15.74	-----	12.52	0.03
18262562-1206164	16.50	-----	16.21	-----	13.24	0.06
18262437-1203325	17.45	-----	16.56	-----	13.37	0.06
18265094-1157448	17.33	-----	16.17	-----	13.66	0.06
18265957-1156397	17.54	-----	15.93	-----	12.65	0.02
18262500-1201507	16.98	-----	16.58	-----	12.62	0.03
18263640-1203073	16.69	-----	15.68	-----	13.01	0.05
18263323-1200499	17.22	-----	15.74	-----	13.14	0.04
18262636-1205524	17.56	-----	15.68	-----	12.99	0.06
18265003-1157190	17.54	-----	16.00	-----	12.10	0.02
18254689-1205598	17.78	-----	16.34	-----	13.25	0.04
18255984-1207370	17.91	-----	16.52	-----	13.26	0.03
18253801-1207184	17.70	-----	15.78	-----	12.90	0.02
18262022-1204069	17.38	-----	16.03	-----	12.41	0.04
18262308-1206265	17.37	-----	15.87	-----	12.77	0.03
18262213-1206437	17.53	-----	16.17	-----	13.65	0.06
18255450-1205057	18.04	-----	16.89	-----	13.03	0.03
18260489-1204486	17.63	-----	15.73	-----	12.96	0.03
18262351-1202441	17.55	-----	16.63	-----	13.76	0.05
18260077-1207554	17.87	-----	15.97	-----	13.28	0.05
18255567-1204488	18.04	-----	16.85	-----	11.54	0.03
18260131-1203358	17.77	-----	16.30	-----	13.75	0.05
18254676-1206072	17.49	-----	16.39	-----	13.70	0.08
18261633-1201455	17.45	-----	15.90	-----	13.31	0.03
18253967-1207444	16.39	-----	16.07	-----	12.74	0.02
18255792-1203554	17.69	-----	16.22	-----	12.80	0.03
18254769-1207107	17.93	-----	16.51	-----	13.63	0.06

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.3 – Continuación de tabla.

Designacion 2MASS.	J_{2MASS}	eJ_{2MASS}	H_{2MASS}	eH_{2MASS}	K_{S,2MASS}	eK_{S,2MASS}
18255901-1201581	17.28	-----	15.79	-----	13.00	0.04
18255317-1206462	17.94	-----	16.02	-----	13.11	0.03
18255972-1207407	17.69	-----	16.52	-----	12.72	0.04
18262310-1202452	17.55	-----	16.60	-----	13.79	0.05
18262182-1206369	17.56	-----	15.76	-----	12.36	0.03
18261401-1204025	16.90	-----	15.95	-----	13.24	0.06
18255279-1205410	17.87	-----	16.10	-----	13.47	0.05
18255585-1201035	17.23	-----	15.87	-----	12.87	0.04
18255090-1203577	17.45	-----	16.31	-----	13.62	0.05
18262298-1158174	16.82	-----	15.69	-----	13.12	0.05
18261236-1207361	17.29	-----	15.96	-----	13.25	0.04
18261717-1158248	17.08	-----	15.72	-----	13.16	0.06
18261882-1205305	16.95	-----	15.67	-----	13.11	0.05
18265413-1201445	17.69	-----	16.34	-----	13.29	0.05
18263451-1206097	17.58	-----	16.08	-----	12.96	0.04
18263421-1206375	17.77	-----	15.85	-----	13.15	0.06
18265607-1201289	17.54	-----	16.02	-----	12.81	0.04
18263823-1205168	17.49	-----	15.79	-----	12.91	0.04
18263512-1205529	17.58	-----	16.12	-----	13.58	0.07
18260817-1213194	18.00	-----	16.59	-----	13.70	0.06
18261237-1213517	17.51	-----	16.28	-----	12.58	0.03
18260766-1214056	16.97	-----	16.39	-----	13.73	0.05
18261135-1214593	17.91	-----	16.31	-----	13.58	0.06
18260805-1213116	18.00	-----	15.95	-----	12.71	0.03
18261027-1212493	17.98	-----	16.66	-----	13.88	0.08
18261107-1212021	17.97	-----	16.54	-----	11.75	0.02
18260720-1214156	18.09	-----	16.67	-----	13.55	0.06

Tabla 3.4: Magnitudes 2MASS de los objetos del brazo vertical (BV).

Designacion 2MASS.	J_{2MASS}	eJ_{2MASS}	H_{2MASS}	eH_{2MASS}	K_{S,2MASS}	eK_{S,2MASS}
18260500-1209553	16.72	-----	13.69	0.09	11.08	0.05
18255712-1210219	16.28	0.14	14.50	0.12	10.70	-----
18260220-1208310	17.62	-----	14.29	0.06	11.72	0.02
18260337-1211160	14.62	0.053	13.82	0.06	11.12	-----
18260081-1208379	17.83	-----	13.36	0.03	10.25	0.02

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.4 – Continuación de tabla.

Designacion 2MASS.	J_{2MASS}	eJ_{2MASS}	H_{2MASS}	eH_{2MASS}	K_{S,2MASS}	eK_{S,2MASS}
18261074-1211237	17.86	-----	14.43	0.07	11.76	0.02
18262950-1204245	16.03	0.09	13.09	-----	9.69	-----
18262748-1154460	14.56	0.05	14.05	0.07	11.26	-----
18262629-1155005	17.07	-----	15.54	-----	12.98	0.04
18263603-1203015	15.73	-----	14.79	-----	12.10	0.03
18264843-1155020	16.52	-----	14.42	0.09	11.72	0.03
18264564-1158056	15.69	-----	14.45	0.07	10.83	0.02
18263511-1156127	15.67	0.09	13.80	0.06	10.55	-----
18263563-1157563	14.47	-----	13.84	0.08	11.29	-----
18262733-1203572	17.28	-----	12.59	0.04	9.75	0.03
18264629-1158544	17.42	-----	14.85	-----	12.12	0.02
18263157-1202068	17.46	-----	15.06	-----	12.01	0.02
18264530-1157089	17.18	-----	15.36	-----	12.63	0.03
18263794-1201398	14.73	-----	14.19	-----	11.32	0.02
18262639-1204197	16.74	-----	15.46	-----	12.96	0.04
18262837-1155056	15.23	0.06	13.39	0.06	10.40	-----
18262950-1204245	16.55	-----	12.26	0.03	8.87	0.02
18264536-1158127	16.87	-----	14.12	0.07	11.32	0.02
18264834-1155437	13.34	-----	13.05	0.04	9.97	-----
18262904-1205220	14.01	0.03	13.40	0.06	10.63	-----
18264455-1201453	17.26	-----	14.59	-----	12.03	0.02
18264564-1158056	15.73	0.11	14.49	-----	11.59	-----
18262451-1203382	17.44	-----	14.30	0.06	11.10	0.02
18263794-1201398	15.14	0.06	14.33	-----	11.76	-----
18263360-1200569	17.27	-----	13.40	0.04	10.86	0.02
18263794-1201398	15.38	0.06	14.54	-----	11.56	-----
18263873-1201399	15.27	0.06	11.77	-----	9.16	-----
18262511-1155249	17.10	-----	15.60	-----	12.79	0.06
18264102-1201174	16.29	-----	15.56	-----	12.77	0.02
18263194-1203296	17.68	-----	15.51	-----	12.75	0.03
18262694-1206579	17.09	-----	15.53	-----	12.92	0.04
18263341-1156198	15.37	0.07	13.55	0.06	11.03	-----
18263986-1159328	17.21	-----	14.20	0.05	11.57	0.02
18264636-1157035	16.10	-----	15.02	-----	12.30	0.04
18262735-1159548	14.22	-----	13.56	0.09	10.90	-----
18255399-1206548	17.86	-----	15.37	-----	12.46	0.03
18261466-1159509	16.87	-----	13.73	0.04	11.04	0.02
18261807-1207085	17.36	-----	15.62	-----	12.75	0.04
18253635-1206109	17.78	-----	15.13	-----	12.58	0.05

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.4 – Continuación de tabla.

Designacion 2MASS.	J_{2MASS}	eJ_{2MASS}	H_{2MASS}	eH_{2MASS}	K_{S,2MASS}	eK_{S,2MASS}
18262282-1202102	13.84	0.07	13.09	0.1	9.87	-----
18261228-1158022	16.18	-----	13.18	0.04	10.63	0.02
18261694-1156173	14.56	-----	14.28	0.14	11.51	-----
18262128-1202308	16.94	-----	15.57	-----	13.04	0.05
18262238-1157033	16.19	-----	15.06	-----	12.17	0.02
18253542-1206118	16.63	-----	14.41	-----	11.77	0.04
18261085-1159468	14.92	0.10	13.91	0.18	11.28	-----
18261228-1158022	15.84	0.11	13.84	0.07	10.14	-----
18260551-1203569	14.84	-----	14.10	0.17	11.38	-----
18255545-1202182	17.68	-----	15.29	-----	12.74	0.04
18255778-1202310	16.73	-----	15.68	-----	12.62	0.04
18255901-1156487	15.40	-----	13.90	0.05	10.40	-----
18261798-1200586	16.67	-----	15.37	-----	12.44	0.04
18255704-1200217	14.83	-----	12.06	0.05	9.36	-----
18261570-1201366	16.47	-----	13.98	0.07	10.54	-----
18260351-1205069	16.51	-----	14.37	0.07	11.79	0.03
18261325-1157528	17.86	-----	15.32	-----	12.60	0.03
18261325-1157528	15.60	-----	12.62	0.03	10.08	0.02
18261798-1200586	15.18	-----	14.00	0.07	11.34	-----
18255926-1204200	14.99	-----	13.18	0.04	9.81	-----
18261061-1202290	17.54	-----	15.58	-----	12.72	0.02
18261856-1207316	16.33	-----	14.21	0.06	11.69	0.03
18261662-1154419	16.62	-----	15.28	-----	12.48	0.04
18260685-1201440	16.68	-----	15.20	-----	12.69	0.04
18254672-1207449	16.61	-----	13.35	0.05	10.79	0.02
18255569-1200563	16.12	-----	12.38	0.06	9.74	0.04
18255711-1207446	17.24	-----	14.38	0.07	11.53	0.03
18261331-1156465	17.35	-----	13.48	0.03	10.87	0.02
18261271-1200465	14.37	0.07	13.72	0.11	10.84	-----
18261119-1201140	17.00	-----	15.27	-----	12.48	0.04
18260761-1200567	14.82	0.07	13.97	0.07	11.13	-----
18261942-1203321	17.62	-----	13.89	0.04	11.39	0.02
18260777-1157164	15.32	-----	13.90	0.08	11.36	0.02
18253908-1204421	14.34	0.09	12.45	0.12	9.11	-----
18262185-1205512	14.62	0.08	13.45	0.11	10.92	-----
18265620-1202473	15.86	-----	15.54	-----	12.24	0.02
18264014-1204444	16.66	-----	14.03	0.07	11.10	0.01
18264995-1202429	15.56	-----	13.89	0.06	11.11	0.02
18264094-1204443	16.52	-----	15.50	-----	12.81	0.06

Continúa en la siguiente página.

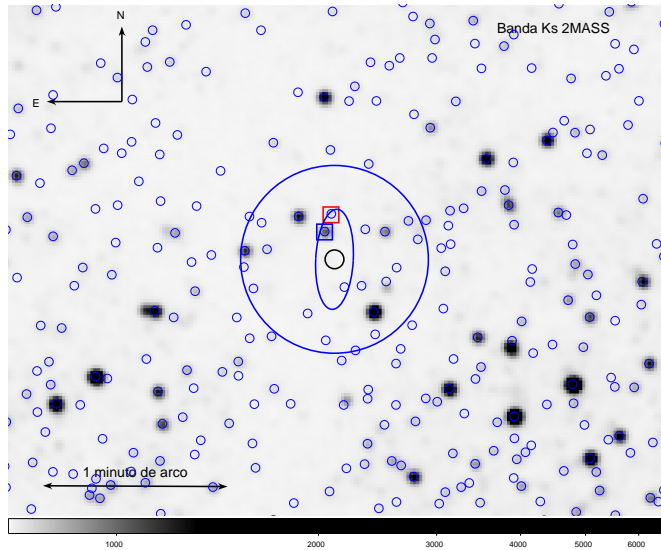


Figura 3.2: Imagen en banda K_S de 2MASS (en escala logarítmica), en pequeños círculos azules se marcan las fuentes puntuales del PSC 2MASS, en círculo azul grande el *beam* de IRAS, y los objetos seleccionados por criterio fotométrico y dentro del *beam*, son marcados por el cuadrado rojo para el objeto BH y cuadrado azul el objeto BV. La elipse de error en posición (en azul) corresponde a la posición de la fuente IRAS (pequeño círculo negro).

Tabla 3.4 – Continuación de tabla.

Designación 2MASS.	J_{2MASS}	eJ_{2MASS}	H_{2MASS}	eH_{2MASS}	$K_{S,2MASS}$	$eK_{S,2MASS}$
18263767-1205527	16.93	-----	13.85	0.04	11.19	0.02
18270188-1200391	16.14	-----	13.25	0.05	10.75	0.02
18263864-1206152	15.36	0.07	12.47	-----	9.83	-----
18263934-1205170	16.95	-----	13.87	0.06	11.25	0.02
18270110-1159336	17.48	-----	15.38	-----	12.26	0.03
18264493-1203376	16.36	-----	14.47	-----	11.82	0.03
18261183-1213481	16.96	-----	14.67	-----	11.75	0.03
18261341-1212556	17.42	-----	15.68	-----	12.43	0.03
18262475-1208578	17.71	-----	14.87	-----	11.92	0.03

De los objetos seleccionados, tomamos aquellos objetos que se encuentren en la región de la fuente IRAS 18236-1205, asociado con la región UC HII, cuya posición considerada es la dada por Bronfman et al. (1996). Para ello, seleccionamos los objetos que se encuentren en una área de 1 minuto de arco (la cual es el *beam* de IRAS) centrada en la posición de la fuente IRAS. De ambos grupos se encuentra que los únicos dos objetos dentro del *beam* son un objeto del brazo horizontal (BH) y uno del vertical (BV; figura 3.2). El objeto BH es marcado con cuadrado rojo en la imagen de banda K_S , mientras que el objeto BV es marcado en cuadrado azul. Estos objetos son marcados en el

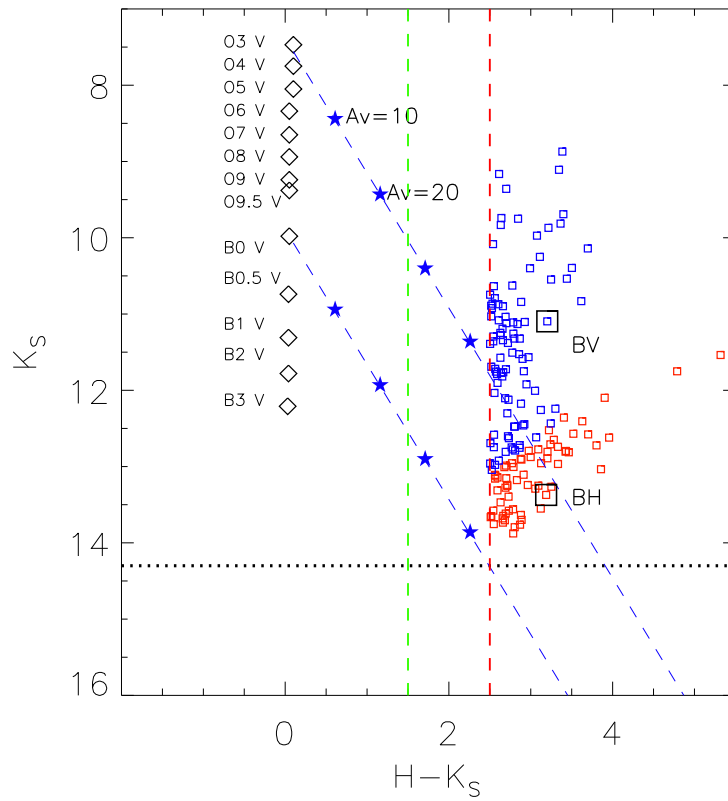


Figura 3.3: Diagrama Color-magnitud (misma descripción que la figura 2.7) de los objetos del brazo horizontal (BH, definidos en el texto) están encerrados en cuadros rojos y en cuadros azules los objetos del brazo vertical (BV). Los objetos OBV y OBH son marcados en cuadros negros y con una etiqueta respectivamente.

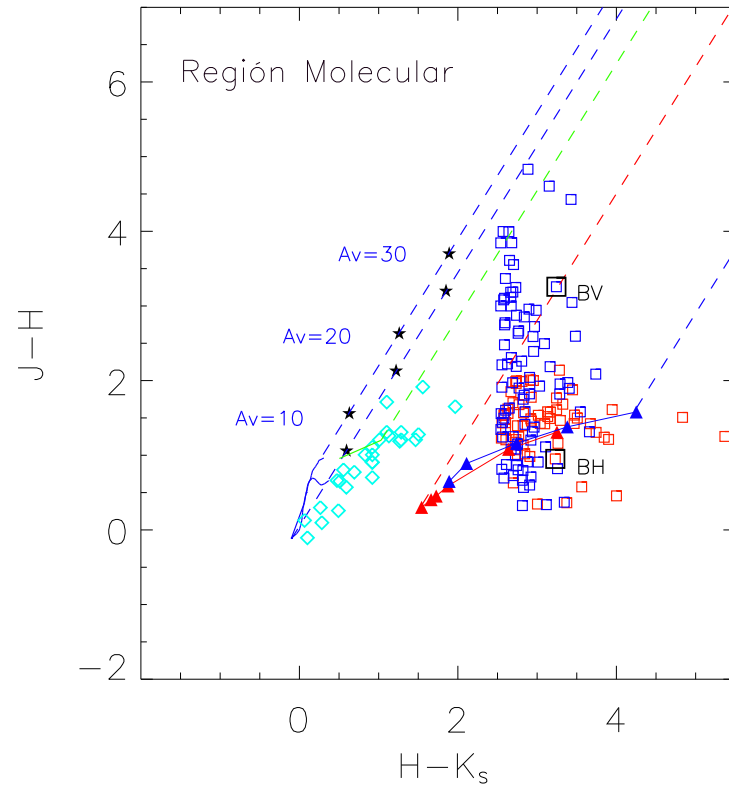


Figura 3.4: Diagrama color-color de los objetos seleccionados como posibles YSOs embebidos en la región molecular. En el diagrama también se muestran las regiones definidas teóricamente para objetos tipo T Tauri (línea verde discontinua), estrellas tipo Herbig Ae/Be (rombos azules) y objetos con choques J/C asociados a objetos tipo HH (triángulos rojos y azules).

diagrama color-magnitud (figura 3.3) y color-color de 2MASS con cuadrados negros (figura 3.4) y con una etiqueta según sean del brazo horizontal (BH) o vertical (BV) respectivamente. En el diagrama color-color notamos que el objeto BH se encuentra en la región de los objetos con presencia de choques tipo J/C asociados a objetos HH (Smith 1995). La posición del objeto BV es más complicada, ya que se encuentra en una región que puede ser considerada como un objeto de la región de choques J/C, afectado por la extinción de la región molecular ($\gg 30$ mag), o bien dado que las magnitudes en la banda J y H están por encima del límite de detección, también puede tratarse de un objeto de Herbig Ae/Be (Lada & Adams 1992) o un objeto T Tauri (Meyer et al. 1996) con alta extinción (región delimitada por la línea verde discontinua aledaña a la banda de extinción para la secuencia principal). Es notable que el objeto BV se encuentra dentro de la elipse de error de la astrometría de la fuente IRAS, lo que nos indica que a este objeto se le puede asociar con la posición de la fuente IRAS. Un análisis de la distribución espectral de energía de estos objetos nos revelará señales más evidentes acerca de su naturaleza.

3.2. Análisis preliminar con datos del telescopio espacial Spitzer.

3.2.1. El telescopio espacial Spitzer.

El telescopio espacial Spitzer consiste en un observatorio espacial infrarrojo, capaz de estudiar objetos que van desde nuestro Sistema Solar hasta las regiones más distantes del Universo. Es un telescopio de 0.85 metros con tres instrumentos científicos enfriados criogénicamente ($T < 5.5$ K), capaces de tomar imágenes (imagen / fotometría), en el rango espectral de 3-180 μm , espectros (5-40 μm) y espectrofotometría (50-100 μm). El observatorio fué lanzado en Agosto del 2003 y las estimaciones actuales sugieren una vida útil de unos 5 años.

Sus instrumentos altamente sensibles, nos ofrecen una visión diferente del universo visible que conocemos. Existen regiones del universo con densas nubes de polvo y gas denso que bloquea la luz visible, lo que produce que la radiación visible no puede penetrar estas nubes y permitirnós por ejemplo, ver de cerca la formación estelar, el centro de galaxias “polvosas” y sistemas planetarios en formación. La radiación infrarroja nos ofrece información acerca de los objetos fríos del universo, como pequeñas estrellas, planetas extrasolares y nubes moleculares. Muchas moléculas orgánicas son solo vistas por medio de su emisión en el infrarrojo.

Las observaciones en el infrarrojo medio (MIR) principalmente dan información acerca de las características del polvo tibio ($T \approx 100\text{K}$). El telescopio espacial Spitzer trabaja con los instrumentos IRAC (*Infrared Array Camera*) en las bandas a [3.6], [4.5], [5.8]

y [8.0] μm , IRS (*Infrared Spectrograph*) de 25 μm a 38 μm y MIPS (*Multiband Imaging Photometer*) a 25, 60 y 160 μm . En las bandas IRAC se obtienen resoluciones de $\approx 2''$, en MIPS de 6'', 17'' y 38'', para 24 μm , 70 μm y 160 μm , respectivamente. La banda [3.6] μm ofrece observaciones similares a los de la banda K_S de 2MASS, pero con mayor resolución.

Las imágenes IRAC están dominadas principalmente por emisión de polvo y de hidrocarburos policíclico aromáticos (PAHs por sus siglas en inglés). La emisión de PAHs a 3.3 μm , 6.2 μm y 7.7 μm se observan en las bandas, [3.6], [5.8] y [8.0] μm respectivamente. La emisión PAHs a 7.7 μm es la más intensa de todas y domina en la banda [8.0] μm , mientras que la más débil es la de 3.3 μm y su contribución a la banda [3.6] μm es pequeña. Esta banda está dominada por la componente estelar, así como nebulosidades de gas ionizado. La banda [4.5] μm está libre de emisiones PAHs y dominada por emisión de gas ionizado, por ejemplo fluorescencias de H_2 y FeII, lo que la hace excelente trazadora de gas excitado por choques y nos indica la presencia de *jets* y flujos.

3.2.2. Análisis de los objetos protoestelares candidatos a YSOs embebidos, basado en los diagramas color-color de Spitzer.

Con el propósito de verificar la naturaleza de los objetos jóvenes seleccionados por criterio geométrico (^{13}CO) y fotométrico (NIR 2MASS), hemos asociado los objetos del PSC 2MASS con objetos del PSC IRAC-Spitzer con una diferencia en posición no mayor de 0.3 segundos de arco, para que los objetos de ambos catálogos sean considerados el mismo objeto (la precisión astrométrica de PSC 2MASS y de PSC IRAC-Spitzer es de 0.2 y 0.3 segundos de arco, respectivamente; Skrutskie et al. (2006)). A los objetos con una diferencia en posición mayor a 0.3 segundos de arco, se rechaza su asociación. Los objetos que cumplen tal condición son mostrados en las tablas 3.5 y 3.6. Las primeras dos columnas contienen la designación del PSC 2MASS y la designación del PSC IRAC-Spitzer, en las columnas 3 a 10 son mostrados los flujos de IRAC-Spitzer con flujos medidos (en mJy) en las cuatro bandas ([3.6],[4.5],[5.8] y [8.0]) μm , así como sus errores en cada banda respectivamente.

Tabla 3.5: Flujos IRAC-Spitzer de los objetos del brazo horizontal (BH).

Designacion 2MASS.	Designacion Spitzer	[3.6][mJy]	e[3.6]	[4.5]	e[4.5]	[5.8]	e[5.8]	[8.0]	e[8.0]
18254522-1208424	SSTGLMCG019.2166+00.0784	5.63	0.24	4.86	0.33	3.81	0.29	2.61	0.31
18260014-1212159	SSTGLMCG019.1925-00.0030	15.26	0.60	12.76	0.65	13.27	0.70	5.37	0.32
18260018-1212096	SSTGLMCG019.1942-00.0023	2.68	0.15	1.88	0.19	1.55	0.32	-----	-----
18260959-1211229	SSTGLMCG019.2235-00.0301	9.43	0.46	7.04	0.42	6.55	0.44	3.49	0.27
18260570-1211217	SSTGLMCG019.2164-00.0160	17.55	0.57	13.73	0.85	15.00	0.64	6.76	0.47
18254610-1208543	SSTGLMCG019.2154+00.0736	13.14	0.85	13.13	1.21	11.04	0.70	4.70	0.28
18265044-1159283	SSTGLMCG019.4767-00.0849	8.83	0.32	6.84	0.48	6.11	0.41	3.06	0.27
18264835-1159278	SSTGLMCG019.4750-00.0747	0.65	0.05	0.35	0.07	-----	-----	-----	-----
18264021-1201101	SSTGLMCG019.4323-00.0612	5.71	0.47	3.08	0.49	3.67	0.33	2.63	0.30
18263321-1204148	SSTGLMCG019.3735-00.0598	4.95	0.47	4.46	0.33	3.90	0.33	2.35	0.21
18264682-1157576	SSTGLMCG019.4921-00.0601	19.43	0.81	16.97	0.79	18.59	0.90	8.38	0.61
18262562-1206164	SSTGLMCG019.3293-00.0482	7.15	0.45	6.55	0.43	4.86	0.33	1.73	0.18
18262437-1203325	SSTGLMCG019.3671-00.0225	10.63	0.65	10.37	0.60	12.01	1.15	7.56	1.46
18265094-1157448	SSTGLMCG019.5031-00.0733	2.88	0.22	-----	-----	2.08	0.44	-----	-----
18265957-1156397	SSTGLMCG019.5355-00.0960	17.11	0.77	14.65	0.87	14.31	0.69	6.70	0.32
18262500-1201507	SSTGLMCG019.3934-00.0116	26.17	0.80	28.01	1.40	31.70	1.26	14.39	0.65
18263640-1203073	SSTGLMCG019.3962-00.0626	7.13	0.31	5.63	0.35	4.81	0.40	2.46	0.45
18263323-1200499	SSTGLMCG019.4240-00.0334	6.58	0.25	5.58	0.31	4.14	0.40	2.06	0.21
18262636-1205524	SSTGLMCG019.3366-00.0478	6.48	0.35	5.06	0.36	4.44	0.36	2.60	0.31
18265003-1157190	SSTGLMCG019.5077-00.0667	33.66	1.24	29.06	1.41	29.72	1.21	14.22	0.58
18254689-1205598	SSTGLMCG019.2598+00.0934	8.55	0.49	6.82	0.41	5.13	0.54	2.20	0.32
18255984-1207370	SSTGLMCG019.2605+00.0342	8.86	0.34	6.80	0.42	7.26	0.56	2.58	0.38
18253801-1207184	SSTGLMCG019.2236+00.1152	9.49	0.56	6.37	0.40	6.61	0.46	3.36	0.21

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.5 – Continuación de tabla.

Designacion 2MASS.	Designacion Spitzer	[3.6][mJy]	e[3.6]	[4.5]	e[4.5]	[5.8]	e[5.8]	[8.0]	e[8.0]
18262022-1204069	SSTGLMCG019.3508-00.0120	54.47	1.99	52.74	2.21	61.74	2.15	29.20	1.32
18262308-1206265	SSTGLMCG019.3220-00.0403	13.26	0.88	10.80	0.65	10.90	0.63	4.50	0.54
18262213-1206437	SSTGLMCG019.3160-00.0392	3.23	0.21	2.37	0.23	2.14	0.32	-----	-----
18255450-1205057	SSTGLMCG019.2875+00.0730	7.97	0.43	8.53	0.47	8.66	0.35	3.72	0.42
18260489-1204486	SSTGLMCG019.3114+00.0377	5.47	0.33	4.24	0.29	3.03	0.36	1.39	0.35
18262351-1202441	SSTGLMCG019.3774-00.0131	45.64	1.82	68.04	3.07	89.09	2.30	43.60	2.03
18260077-1207554	SSTGLMCG019.2577+00.0285	6.58	0.52	4.85	0.35	4.74	0.44	2.42	0.39
18255567-1204488	SSTGLMCG019.2939+00.0709	76.63	3.76	90.40	4.12	94.94	3.28	50.15	1.89
18260131-1203358	SSTGLMCG019.3225+00.0602	2.83	0.18	2.74	0.25	1.90	0.42	-----	-----
18254676-1206072	SSTGLMCG019.2576+00.0929	2.89	0.19	2.12	0.20	1.99	0.46	-----	-----
18261633-1201455	SSTGLMCG019.3782+00.0202	8.23	0.35	7.25	0.43	5.98	0.43	2.59	0.25
18253967-1207444	SSTGLMCG019.2203+00.1059	14.81	0.66	11.41	0.66	12.36	0.56	5.27	0.35
18255792-1203554	SSTGLMCG019.3113+00.0698	15.97	0.71	16.73	0.97	19.10	0.81	9.33	0.59
18254769-1207107	SSTGLMCG019.2438+00.0813	3.44	0.22	2.59	0.24	2.48	0.31	-----	-----
18255901-1201581	SSTGLMCG019.3422+00.0811	9.75	0.59	-----	-----	7.37	0.57	4.30	0.55
18255317-1206462	SSTGLMCG019.2603+00.0648	6.25	0.33	4.57	0.33	4.53	0.40	2.41	0.23
18255972-1207407	SSTGLMCG019.2594+00.0341	16.91	0.78	13.92	0.86	16.15	0.98	6.18	0.69
18262310-1202452	SSTGLMCG019.3764-00.0118	5.30	0.32	5.08	0.39	4.54	0.39	-----	-----
18262182-1206369	SSTGLMCG019.3170-00.0372	13.63	0.58	10.03	0.58	10.18	0.51	4.98	0.32
18261401-1204025	SSTGLMCG019.3402+00.0108	9.23	0.65	7.43	0.61	7.09	0.33	3.21	0.28
18255279-1205410	SSTGLMCG019.2755+00.0745	9.12	0.66	8.52	0.82	7.50	0.65	3.21	0.50
18255585-1201035	SSTGLMCG019.3496+00.0995	9.73	0.69	6.32	0.41	6.18	0.48	-----	-----
18255090-1203577	SSTGLMCG019.2974+00.0948	3.24	0.18	2.54	0.22	1.80	0.25	-----	-----
18262298-1158174	SSTGLMCG019.4420+00.0232	6.13	0.39	4.97	0.34	4.34	0.36	2.21	0.23
18261236-1207361	SSTGLMCG019.2845-00.0108	5.65	0.26	4.44	0.37	3.25	0.34	1.31	0.30

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.5 – Continuación de tabla.

Designacion 2MASS.	Designacion Spitzer	[3.6][mJy]	e[3.6]	[4.5]	e[4.5]	[5.8]	e[5.8]	[8.0]	e[8.0]
18261717-1158248	SSTGLMCG019.4291+00.0432	7.40	0.35	6.08	0.38	6.15	0.51	2.47	0.34
18261882-1205305	SSTGLMCG019.3276-00.0178	10.48	0.51	7.66	0.50	7.86	0.50	3.25	0.22
18265413-1201445	SSTGLMCG019.4502-00.1158	7.02	0.29	6.19	0.42	6.27	0.40	2.66	0.23
18263451-1206097	SSTGLMCG019.3478-00.0794	8.83	0.37	6.59	0.50	6.78	0.39	2.92	0.31
18263421-1206375	SSTGLMCG019.3404-00.0819	7.16	0.26	5.46	0.37	5.25	0.29	-----	-----
18265607-1201289	SSTGLMCG019.4577-00.1208	17.39	0.80	16.89	0.92	17.25	0.79	9.48	0.45
18263823-1205168	SSTGLMCG019.3679-00.0859	8.48	0.41	6.38	0.62	6.02	0.70	-----	-----
18263512-1205529	SSTGLMCG019.3531-00.0794	3.44	0.18	3.05	0.26	2.12	0.39	-----	-----
18260817-1213194	SSTGLMCG019.1922-00.0401	8.38	0.43	6.94	0.32	7.00	0.55	2.88	0.35
18261237-1213517	SSTGLMCG019.1921-00.0594	16.34	0.71	12.84	0.80	13.73	1.03	8.27	2.04
18260766-1214056	SSTGLMCG019.1799-00.0442	5.62	0.26	5.57	0.42	5.71	0.33	2.33	0.41
18261135-1214593	SSTGLMCG019.1737-00.0645	6.34	0.31	5.24	0.35	4.90	0.40	-----	-----
18260805-1213116	SSTGLMCG019.1939-00.0387	15.65	0.64	12.62	0.61	11.77	0.75	5.09	0.27
18261027-1212493	SSTGLMCG019.2036-00.0438	5.81	0.30	5.00	0.26	5.04	0.43	1.77	0.34
18261107-1212021	SSTGLMCG019.2167-00.0405	113.80	3.62	116.30	5.07	144.80	4.61	75.00	2.26
18260720-1214156	SSTGLMCG019.1765-00.0440	7.10	0.60	6.39	0.38	5.84	0.50	3.05	0.21

Tabla 3.6: Flujos IRAC-Spitzer de los objetos del brazo vertical (BV).

Designacion 2MASS.	Designacion Spitzer	[3.6][mJy]	e[3.6]	[4.5]	e[4.5]	[5.8]	e[5.8]	[8.0]	e[8.0]
18260500-1209553	SSTGLMCG0192363-000023	67.76	2.63	73.73	3.76	71.19	1.72	39.42	1.18
18255712-1210219	SSTGLMCG0192148+000226	170.90	9.89	97.52	4.85	92.50	2.97	48.27	1.23
18260220-1208310	SSTGLMCG0192517+00.0187	20.88	0.99	17.10	0.88	14.94	0.88	6.69	0.61
18260337-1211160	SSTGLMCG0192128-00.0075	9.74	1.75	13.29	1.17	12.37	1.32	4.72	0.56
18260081-1208379	SSTGLMCG0192473+00.0228	127.50	5.60	107.20	5.26	106.10	3.75	52.51	1.78
18261074-1211237	SSTGLMCG0192255-00.0344	30.68	1.80	27.02	1.80	22.88	1.08	12.01	0.44
18262950-1204245	SSTGLMCG0193641-00.0477	-	-	-	-	621.10	19.99	326.40	11.38
18262748-1154460	SSTGLMCG0195015+00.0332	0.90	0.07	0.63	0.09	-	-	-	-
18262629-1155005	SSTGLMCG0194966+00.0368	10.53	0.46	8.49	0.59	7.51	0.49	3.25	0.33
18263603-1203015	SSTGLMCG0193969-00.0605	38.48	1.69	34.23	1.99	37.77	1.52	16.08	0.83
18264843-1155020	SSTGLMCG0195383-00.0431	31.19	1.31	23.93	1.15	22.35	0.87	12.26	0.47
18264564-1158056	SSTGLMCG0194879-00.0569	160.00	5.49	140.10	5.56	172.50	4.60	96.12	3.50
18263511-1156127	SSTGLMCG0194946-00.0011	3.16	0.29	1.86	0.18	-	-	-	-
18263563-1157563	SSTGLMCG0194724-00.0194	2.45	0.17	1.78	0.15	-	-	-	-
18262733-1203572	SSTGLMCG0193668-00.0403	133.30	4.81	95.35	4.28	95.09	3.44	47.32	1.86
18264629-1158544	SSTGLMCG0194772-00.0655	18.18	0.66	14.74	0.82	15.13	0.71	7.02	0.42
18263157-1202068	SSTGLMCG0194019-00.0373	26.14	1.00	19.78	0.89	18.06	0.89	8.48	0.37
18264530-1157089	SSTGLMCG0195012-00.0483	8.91	0.46	6.84	0.45	5.41	0.42	2.78	0.35
18263794-1201398	SSTGLMCG0194207-00.0568	120.20	4.56	118.30	5.66	137.60	4.71	75.77	2.33
18262639-1204197	SSTGLMCG0193593-00.0358	66.58	2.92	93.21	4.08	126.90	5.30	78.83	113.68
18262837-1155056	SSTGLMCG0195013+00.0301	4.53	0.37	3.00	0.48	-	-	-	-
18262950-1204245	SSTGLMCG0193641-00.0477	-	-	-	-	621.10	19.99	326.40	11.38
18264536-1158127	SSTGLMCG0194856-00.0568	40.80	2.08	31.28	1.30	35.24	1.87	16.06	1.10

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.6 – Continuación de tabla.

Designación 2MASS.	Designación Spitzer	[3.6][mJy]	e[3.6]	[4.5]	e[4.5]	[5.8]	e[5.8]	[8.0]	e[8.0]
18264834-1155437	SSTGLMCG0195264-00.0494	3.81	0.54	2.64	0.55	-----	-----	-----	-----
18262904-1205220	SSTGLMCG0193484-00.0509	1.99	0.26	1.63	0.21	-----	-----	-----	-----
18264455-1201453	SSTGLMCG0194318-00.0814	30.61	1.32	24.17	1.13	25.47	0.99	11.35	0.60
18264564-1158056	SSTGLMCG0194879-00.0569	160.00	5.49	140.10	5.56	172.50	4.60	96.12	3.50
18262451-1203382	SSTGLMCG0193660-00.0237	78.00	3.63	60.39	3.23	71.33	2.89	33.53	3.61
18263794-1201398	SSTGLMCG0194207-00.0568	120.20	4.56	118.30	5.66	137.60	4.71	75.77	2.33
18263360-1200569	SSTGLMCG0194229-00.0356	79.43	3.00	61.46	2.63	65.00	2.25	36.81	1.08
18263794-1201398	SSTGLMCG0194207-00.0568	120.20	4.56	118.30	5.66	137.60	4.71	75.77	2.32
18263873-1201399	SSTGLMCG0194177-00.0615	330.20	12.47	252.20	9.65	264.30	8.47	145.80	4.07
18262511-1155249	SSTGLMCG0194884+00.0379	10.70	0.35	7.86	0.49	8.15	0.44	3.24	0.24
18264102-1201174	SSTGLMCG0194320-00.0650	13.45	0.61	10.89	0.59	11.33	0.81	4.72	0.44
18263194-1203296	SSTGLMCG0193823-00.0494	10.28	0.51	7.86	0.54	6.66	0.47	3.74	0.64
18262694-1206579	SSTGLMCG0193216-00.0584	9.63	0.55	6.75	0.47	7.47	0.48	3.57	0.24
18263341-1156198	SSTGLMCG0194930+00.0009	3.37	0.33	2.17	0.22	-----	-----	-----	-----
18263986-1159328	SSTGLMCG0194555-00.0473	28.35	1.20	21.64	0.90	21.22	0.58	10.25	0.53
18264636-1157035	SSTGLMCG0195046-00.0514	23.34	1.00	17.78	1.27	18.47	0.93	8.48	0.49
18262735-1159548	SSTGLMCG0194241-00.0037	3.59	0.26	3.03	0.27	-----	-----	-----	-----
18255399-1206548	SSTGLMCG0192597+00.0607	11.96	0.49	9.42	0.44	8.89	0.55	3.58	0.23
18261466-1159509	SSTGLMCG0194032+00.0411	61.73	2.57	45.38	1.96	48.77	1.27	23.93	0.90
18261807-1207085	SSTGLMCG0193022-00.0278	11.15	0.45	8.41	0.45	8.33	0.60	3.36	0.24
18253635-1206109	SSTGLMCG0192363+00.1291	3.10	0.47	2.07	0.53	-----	-----	-----	-----
18262282-1202102	SSTGLMCG0193845-00.0062	74.65	3.33	56.23	3.86	52.77	1.88	25.22	0.82
18261228-1158022	SSTGLMCG0194247+00.0627	2.36	0.17	1.80	0.13	-----	-----	-----	-----
18261694-1156173	SSTGLMCG0194600+00.0606	33.42	1.71	52.35	2.15	67.19	2.61	59.52	1.62
18262128-1202308	SSTGLMCG0193765-00.0033	40.68	1.48	37.83	1.47	41.52	1.47	19.19	0.93

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.6 – Continuación de tabla.

Designación 2MASS.	Designación Spitzer	[3.6][mJy]	e[3.6]	[4.5]	e[4.5]	[5.8]	e[5.8]	[8.0]	e[8.0]
18262238-1157033	SSTGLMCG0194590+00.0350	165.60	5.88	274.90	11.63	429.20	10.38	303.10	7.47
18253542-1206118	SSTGLMCG0192348+00.1320	1.08	0.13	0.63	0.19	-----	-----	-----	-----
18261085-1159468	SSTGLMCG0193969+00.0554	-----	-----	-----	-----	1702.00	47.59	1193.00	30.91
18261228-1158022	SSTGLMCG0194239+00.0634	3.75	0.29	3.83	0.23	3.64	0.40	-----	-----
18260551-1203569	SSTGLMCG0193253+00.0423	11.22	0.57	9.20	0.42	8.18	0.53	5.66	0.78
18255545-1202182	SSTGLMCG0193305+00.0913	21.35	1.34	19.25	1.11	19.73	0.94	8.24	0.46
18255778-1202310	SSTGLMCG0193328+00.0808	132.50	4.13	104.80	4.74	90.88	3.16	70.13	2.03
18255901-1156487	SSTGLMCG0194182+00.1211	20.92	1.07	-----	-----	27.93	1.35	24.66	1.62
18261798-1200586	SSTGLMCG0193954+00.0205	406.00	20.59	-----	-----	502.40	16.60	328.80	10.29
18255704-1200217	SSTGLMCG0193618+00.0995	4.76	0.35	3.23	0.36	-----	-----	-----	-----
18261570-1201366	SSTGLMCG0193791+00.0237	28.25	1.55	22.23	1.54	21.39	1.05	10.56	0.39
18260351-1205069	SSTGLMCG0192895+00.0677	11.82	0.67	8.35	0.65	10.08	0.47	3.96	0.47
18261325-1157528	SSTGLMCG0193043+00.0404	135.10	5.81	105.70	3.77	108.00	3.26	57.42	1.33
18261325-1157528	SSTGLMCG0194308+00.0614	3.24	0.30	2.35	0.25	-----	-----	-----	-----
18261798-1200586	SSTGLMCG0193954+00.0205	406.00	20.59	-----	-----	502.40	16.60	328.80	10.29
18255926-1204200	SSTGLMCG0193078+00.0618	8.54	0.37	6.52	0.36	6.73	0.44	3.68	0.30
18261061-1202290	SSTGLMCG0193566+00.0352	27.26	1.10	-----	-----	20.11	0.81	9.46	0.42
18261856-1207316	SSTGLMCG0192974-00.0325	16.85	0.80	13.82	0.73	13.98	0.67	6.70	0.29
18261662-1154419	SSTGLMCG0194829+00.0741	13.91	0.62	10.85	0.58	10.50	0.59	4.12	0.32
18260685-1201440	SSTGLMCG0193606+00.0546	58.80	2.50	44.47	2.45	45.74	1.71	23.17	0.75
18254672-1207449	SSTGLMCG0192336+00.0804	234.60	12.13	260.00	9.40	251.90	6.87	142.60	4.07
18255569-1200563	SSTGLMCG0193510+00.1010	49.79	2.10	42.31	1.78	43.06	1.60	23.24	1.25
18255711-1207446	SSTGLMCG0192534+00.0430	66.72	1.94	47.33	2.00	49.39	1.75	22.23	0.90
18261331-1156465	SSTGLMCG0194459+00.0698	31.62	2.07	-----	-----	12.74	0.99	7.23	0.65
18261271-1200465	SSTGLMCG0193858+00.0410	14.80	0.50	11.43	0.53	10.66	0.51	5.30	0.28

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.6 – Continuación de tabla.

Designación 2MASS.	Designación Spitzer	[3.6][mJy]	e[3.6]	[4.5]	e[4.5]	[5.8]	e[5.8]	[8.0]	e[8.0]
18261119-1201140	SSTGLMCG0193747+00.0423	2.09	0.26	1.51	0.27	-----	-----	-----	-----
18260761-1200567	SSTGLMCG0193736+00.0580	34.79	1.22	25.14	1.11	24.74	1.04	12.26	0.42
18261942-1203321	SSTGLMCG0193579-00.0046	39.70	1.90	27.60	1.65	27.99	1.14	12.88	1.36
18260777-1157164	SSTGLMCG0194305+00.0872	-----	-----	303.40	34.07	280.10	19.08	145.00	14.51
18253908-1204421	SSTGLMCG0192625+00.1321	2.32	0.24	1.82	0.28	-----	-----	-----	-----
18262185-1205512	SSTGLMCG0193283-00.0314	24.28	0.99	18.77	0.88	22.19	0.86	9.43	0.42
18265620-1202473	SSTGLMCG0194387-00.1314	70.74	3.26	62.02	2.97	61.04	2.04	31.85	1.00
18264014-1204444	SSTGLMCG0193795-00.0886	54.28	2.56	41.75	2.15	42.35	1.51	20.97	1.46
18264995-1202429	SSTGLMCG0194279-00.1083	18.98	0.81	15.80	0.82	17.44	0.75	8.27	0.41
18264094-1204443	SSTGLMCG0193810-00.0915	46.12	2.59	35.52	1.61	31.20	1.44	15.36	1.04
18263767-1205527	SSTGLMCG0193580-00.0886	71.10	3.60	61.06	3.93	56.12	2.95	28.15	2.87
18270188-1200391	SSTGLMCG0194810-00.1353	2.24	0.26	1.94	0.29	-----	-----	-----	-----
18263864-1206152	SSTGLMCG0193543-00.0950	57.80	2.23	44.27	2.34	42.27	2.00	19.52	3.10
18263934-1205170	SSTGLMCG0193700-00.0900	8.33	0.22	25.07	1.08	18.69	1.17	19.18	2.06
18270110-1159336	SSTGLMCG0194956-00.1240	30.89	1.23	30.00	1.30	29.62	1.57	15.92	0.59
18264493-1203376	SSTGLMCG0194050-00.0973	47.86	2.69	46.31	2.64	49.97	1.72	23.46	0.91
18261183-1213481	SSTGLMCG0191920-00.0570	16.62	0.75	11.52	0.73	11.36	0.69	6.80	0.70
18261341-1212556	SSTGLMCG0192080-00.0559	76.85	2.63	80.49	3.48	87.49	2.92	52.95	1.75
18262475-1208578	SSTGLMCG0192899-00.0660	1.98	0.23	1.07	0.35	-----	-----	-----	-----

Los objetos que encontramos asociados en ambos catálogos, los graficamos en un diagrama color-color [3.6]-[4.5] vs [5.8]-[8.0] de IRAC-Spitzer. Éste se muestra en la figura 3.5, en donde notamos que los objetos del *brazo horizontal* se encuentran distribuidos en su mayor parte, por encima de la región de las fotosferas (Allen et al. (2004)) así como en la región de los YSOs de clase 0,I (Robitaille et al. 2006). Los objetos del *brazo vertical* parecen estar más asociados a la región de fotosferas enrojecidas, según el vector de extinción (en color azul) dado por Indebetouw et al. (2005). Podemos notar de la figura 3.5, que la mayor parte de nuestros objetos se encuentra en la región definida por los trabajos de Robitaille et al. (2006) y Kumar & Grave (2007) como clase 0, I.

Siguiendo a los objetos asociados a la estructura central de la región molecular y asociados con la posición de la fuente IRAS (objetos BH y BV, sección 3.1), detectamos 2 fuentes del PSC 2MASS bien asociados con objetos del PSC IRAC-Spitzer, con una distancia de asociación no mayor a 0.2 segundos de arco. Estos objetos son marcados en las figuras 3.4 y 3.5 con cuadrados negros y con una etiqueta. La posición del objeto BH en el diagrama color-color de IRAC-Spitzer es en la región demarcada para los YSOs de clase 0,I de Robitaille et al. (2006), mientras que el objeto BV se encuentra apenas por encima de la región de las fotosferas (Allen et al. 2004). A pesar del indicativo basado en los diagramas color-color de 2MASS y color-color de IRAC-Spitzer de que los objetos BH y BV son objetos YSOs en fase temprana de la formación estelar, un análisis de la distribución espectral de energía (sección 3.4) nos dará mayores argumentos para describir la naturaleza de estos objetos.

3.2.3. Objeto protoestelar joven seleccionado con los diagramas color-color de Spitzer.

Haciendo una inspección visual en la imagen de Spitzer en la banda [3.6] μm , notamos que existen una gran cantidad de objetos que el PSC 2MASS no cataloga como fuente puntual. Hemos seleccionado una muestra de objetos, en una área de 1 minuto de arco de diámetro, centrada en la posición de la fuente IRAS (Tabla 3.7). De esta selección, graficamos los objetos en el diagrama color-color de IRAC-Spitzer (figura 3.8) y hemos encontrado que existe un objeto que se encuentra ubicado en la región de los objetos jóvenes de clase II con disco (marcado con una estrella roja; Allen et al. 2004). Este objeto denotado por objeto clase II (OCII), se encuentra asociado en la imagen de [4.5] μm , con emisión intensa en forma de arco (*bow shape*; figura 3.7), sugiriendo la emisión de un frente de choque de un *jet*, asociado con un objeto HH (Connelley et al. (2007)). La banda [4.5] μm se encuentra principalmente afectada por la presencia de fluorescencias debidas a la existencia de material que es excitado por choque, típico en regiones de objetos HH. Tradicionalmente, los objetos HH se han definido en el rango espectral del óptico ($\text{H}\alpha$, [S II], [N II], [FeII], [O I], [O II], entre otros), sin embargo trabajos recientes muestran que estos eventos también se presentan y se pueden definir

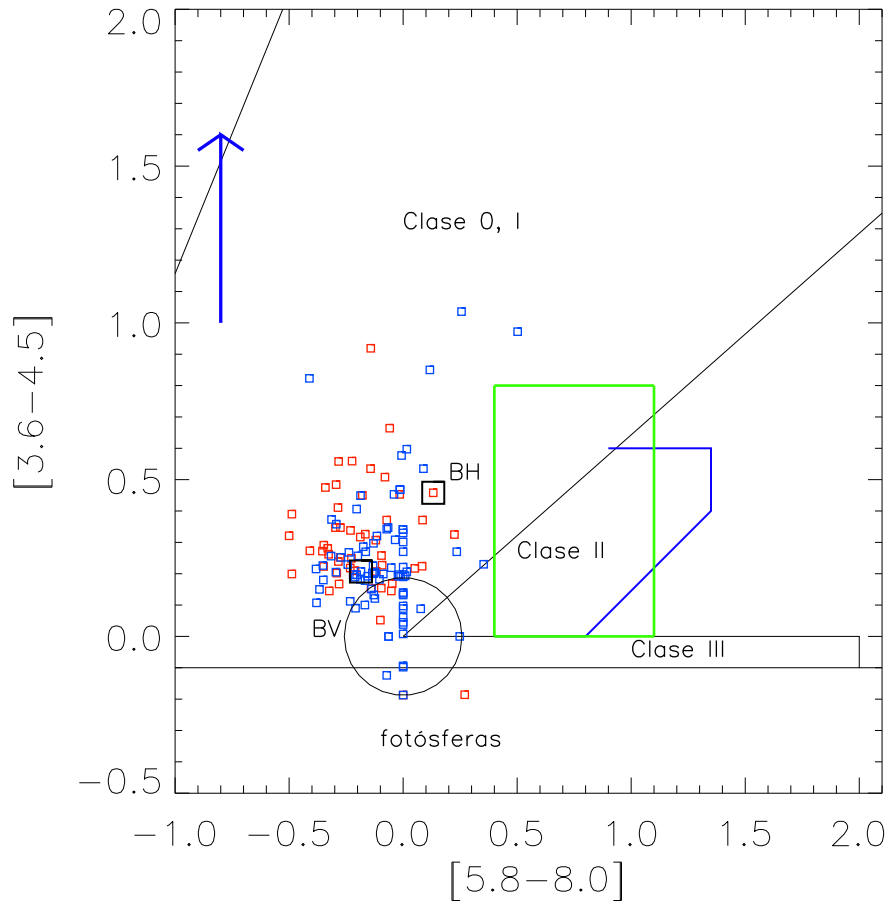


Figura 3.5: Diagrama color-color de los datos del PSC Spitzer con los objetos asociados. La zona de las fotosferas es indicada por el círculo, mientras que la caja verde demarca la región de los objetos de clase II (Allen et al. 2004). El diagrama también muestra las regiones definidas por los trabajos de Robitaille et al. (2006) para las clases 0, I (en líneas negras), II (en líneas azules) y III (en líneas negras). Los símbolos para los objetos seleccionados a candidatos a YSOs son los mismos que los usados en las figuras 3.1 y 3.3. El vector de extinción en la parte superior izquierda es obtenido de Indebetouw et al. (2005) y su magnitud es $A_K=5$ mag.

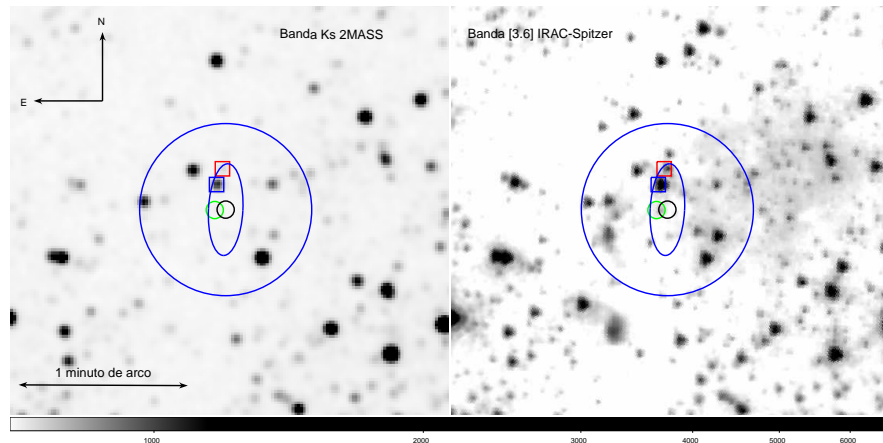


Figura 3.6: Imagen en banda $[3.6] \mu\text{m}$ (en escala logarítmica) de IRAC-Spitzer (derecha) con la posición en un círculo verde del objeto de clase II, en cuadrado rojo el objeto BH, en cuadrado azul cian el objeto BV. La posición de la fuente IRAS es graficada con un pequeño círculo negro. La imagen de la izquierda es en banda K_S de 2MASS con los objetos anteriormente descritos.

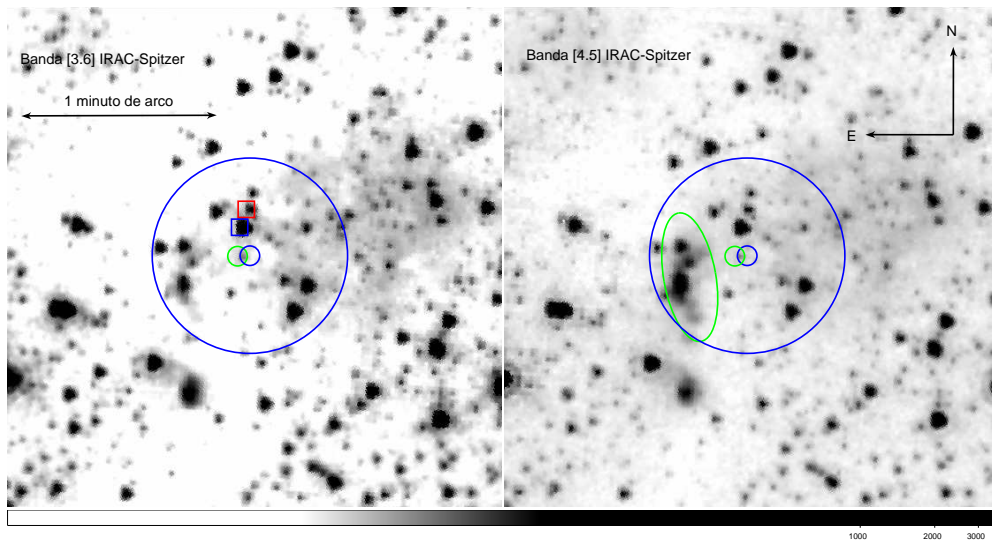


Figura 3.7: Imagen de banda $[3.6] \mu\text{m}$ (izquierda, en escala logarítmica) y $[4.5] \mu\text{m}$ (derecha, en escala logarítmica) hacia la fuente IRAS, cuyo *beam* es marcado con el círculo grande azul. La posición del objeto de clase II es marcado con el círculo pequeño verde, mientras que la posición de la fuente IRAS es marcada con el círculo pequeño azul. La elipse verde demarca la región con una emisión importante en banda $[4.5] \mu\text{m}$, la cual está asociada con el objeto OCII.

Tabla 3.7: Flujos (mJy) IRAC-Spitzer de los objetos dentro del beam IRAS.

Número	Designación Spitzer	longitud	latitud	AR(J2000)	DEC(J2000)	f[3.6]	ef[3.6]	f[4.5]	ef[4.5]	[5.8]	ef[5.8]	f[8.0]	ef[8.0]	dist[arc sec]
1	SSTGLMC G019.3660-00.0237	19.366058	-0.023747	276.602161	-12.060663	78.00	3.63	60.39	3.22	71.33	2.88	33.53	3.61	9.12
2	SSTGLMC G019.3671-00.0225	19.367144	-0.022533	276.601580	-12.059136	10.63	0.65	10.37	0.60	12.01	1.15	7.56	1.46	14.21
3	SSTGLMC G019.3639-00.0250	19.363960	-0.025056	276.602345	-12.063129	2.18	0.16	2.05	0.24	3.85	0.67	5.61	1.27	3.40
4	SSTGLMC G019.3683-00.0216	19.368333	-0.021689	276.601384	-12.057691	6.17	0.36	6.67	0.42	7.17	0.55	4.64	0.80	19.40
5	SSTGLMC G019.3640-00.0320	19.364035	-0.032067	276.608723	-12.066331	1.77	0.35	9.01	1.59	7.92	0.89	5.56	0.77	28.37
6	SSTGLMC G019.3591-00.0212	19.359124	-0.021289	276.596632	-12.065652	44.60	2.53	47.20	1.97	50.20	2.93	24.46	7.02	19.11
7	SSTGLMC G019.3670-00.0290	19.367019	-0.029014	276.607384	-12.062268	14.76	1.57	24.66	3.03	54.71	2.59	98.67	6.89	21.34
8	SSTGLMC G019.3678-00.0308	19.367855	-0.030878	276.609469	-12.062398	16.82	0.92	11.25	0.79	6.96	0.61	5.00	0.61	28.58
9	SSTGLMC G019.3577-00.0232	19.357727	-0.023267	276.597755	-12.067810	59.32	3.08	38.45	3.09	28.20	1.37	17.63	2.21	21.28

Tabla 3.8: Fotometría de objetos 2MASS (Banda K_S) similares a OCII en el beam IRAS.

ID	Designación 2MASS	AR (J2000)	DEC (J2000)	J	eJ	H	eH	K_S	e K_S	Flujo en cuentas
O1	OCII	276.60234	-12.063129	---	---	---	---	14.46	---	710
O2	18262261-1204081	276.59422	-12.068973	15.34	0.057	15.43	---	15.44	---	712 (N)
O3	18262741-1203479	276.61432	-12.063242	15.80	0.107	15.48	---	15.78	---	706 (N)
O4	18262643-1204056	276.61012	-12.068217	15.68	0.081	15.44	---	15.37	---	707 (S)
O5	18262588-1203354	276.60785	-12.059907	15.39	0.077	14.72	---	14.46	---	708 (S)
O6	18262615-1203334	276.60898	-12.059310	15.31	0.081	14.24	---	14.16	---	712 (Bin)

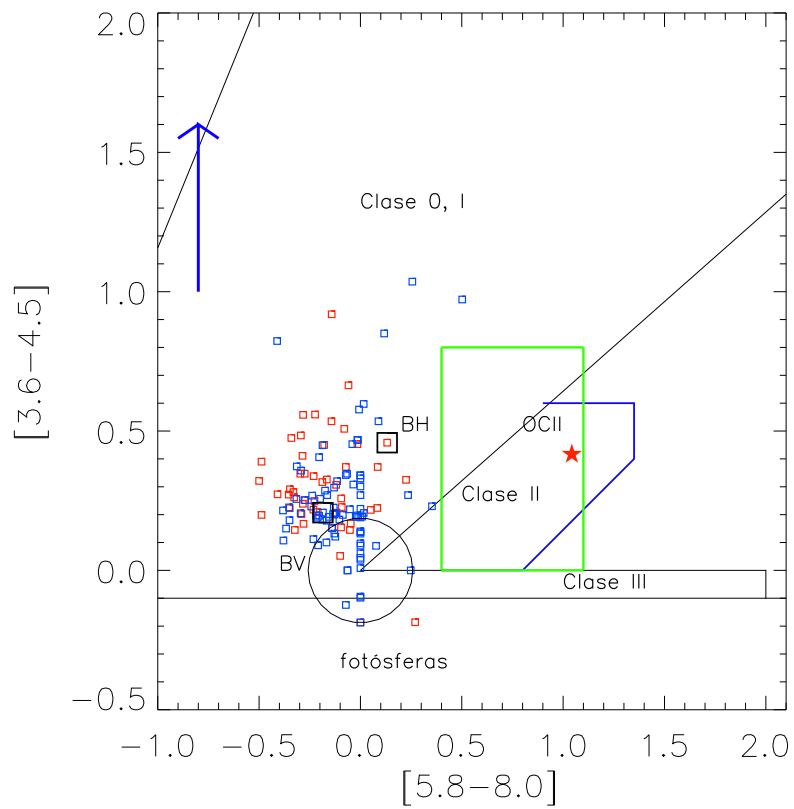


Figura 3.8: Diagrama color-color de los datos del PSC Spitzer con los objetos seleccionados (BV, BH) y con la inclusión del objeto detectado en banda $[3.6]\mu\text{m}$ de IRAC-Spitzer. El objeto de clase II es marcado con una estrella roja. La descripción de este es la misma que en la figura 3.5.

en el infrarrojo (Reipurth & Bally 2001).

El PSC 2MASS no seleccionó como fuente puntual al objeto clase II y por lo tanto, sus magnitudes no son dadas por este catálogo. Esto se debe presumiblemente a que sus magnitudes están por encima del límite de detectabilidad en cada banda, lo cual puede ser observado en la imagen de banda K_S , en la cual es detectada marginalmente. Sin embargo, haciendo una comparación de objetos que poseen flujos (en conteos) similares al objeto de clase II (**ver tabla X**) en la imagen de banda K_S , buscamos la magnitud de algún objeto que tenga un flujo aproximado a este y lo asignamos como valor límite superior al objeto OCII.

3.3. Distribución Espectral de Energía de algunos YSOs seleccionados.

La distribución espectral de energía representa una medida de la potencia radiada por longitud de onda (λ vs λF_λ). También nos da una forma para identificar la etapa evolutiva de los objetos estelares jóvenes (YSOs) de baja masa (figura 3.8). Los YSOs son clasificados usando la SED en el rango espectral del infrarrojo (Lada & Wilking (1984); Lada (1987)). Mientras F_λ nos dice acerca de la luminosidad por intervalo de longitud de onda, λF_λ es una cantidad que resalta la región de dominio espectral, lo cual nos da información acerca de la naturaleza de la fuente emisora.

El modelo de distribución espectral de energía.

Para ajustar un modelo de distribución espectral de energía (SED) a los datos de los objetos que hemos seleccionado, hemos usado la función de Planck afectada por extinción, para ello usamos la expresión de emisión de radiación de cuerpo gris para el óptico y NIR, ($\tau_\lambda > 1$),

$$I_\lambda = B_\lambda(T_{ef})e^{-\tau_\lambda} \quad (3.1)$$

y para el FIR ($\tau_\lambda < 1$),

$$I_\lambda = B_\lambda(T_d)(1 - e^{-\tau_\lambda}) \quad (3.2)$$

donde $B_\lambda(T_{ef})$ es la distribución de Planck en función de la longitud de onda, T_d es la temperatura de polvo y τ_λ es la profundidad óptica en función de la longitud de onda, la cual generalmente tiene una forma compleja. Aquí consideramos la ley de extinción dada por Cardelli et al. (1989) la cual tiene la forma,

$$\frac{A_\lambda}{A_V} = a(x) + \frac{b(x)}{R_V} \quad (3.3)$$

donde $x = 1/\lambda$ y $a(x)$, $b(x)$ son polinomios. Esta ley de extinción tiene una forma similar a la usada para regiones de alta densidad de los trabajos de Moore et al. (2005). Para nuestros cálculos hemos considerado una extinción en el visual de $A_V = 4.0$ mag ($A_K \sim 4$ mag) y $R_V = 4.0$, más adecuado a las regiones de alta densidad. Con esto la expresión que usamos para considerar la extinción es,

$$A_\lambda \propto \tau_\lambda^{-\beta} \quad (3.4)$$

siendo A_λ , la ley de extinción de Cardelli et al. (1989). La constante de proporcionalidad, llamada τ_0 , es calculada a partir de los valores de la ecuación (3.4) con $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$, y la constante β con valor 1.5.

Con lo anterior, las expresiones que usamos para ajustar el flujo observado en el óptico y NIR,

$$F_\lambda = 4\pi \left(\frac{R_\star}{D} \right)^2 c_1 \pi B_\lambda(T_{ef}) e^{-\tau_\lambda} \quad (3.5)$$

para el FIR,

$$F_\lambda = \frac{A}{4\pi D^2} c_1 B_\lambda(T_d) (1 - e^{-\tau_\lambda}) \quad (3.6)$$

donde $4\pi \left(\frac{R_\star}{D} \right)^2$ es el ángulo sólido subtendido por la fuente, cuyos valores de radio estelar (R_\star) y temperatura efectiva (T_{ef}) usados, son obtenidos de las tablas de Cox (2000). La distancia adoptada es $D = 2.5$ kpc (Bronfman et al. 1996) y la constante $c_1 = 1 \times 10^{23} (\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1})^{-1}$ Jy es usada para convertir de $[\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}]$ a [Jy].

El parámetro de ajuste A , está relacionado con el área proyectada de la envoltura circumestelar de polvo y es calculada de acuerdo a la expresión,

$$A = L_{bolometrica} / \sigma T_d^4$$

siendo σ la constante de Stefan-Boltzmann. La luminosidad bolométrica es calculada con la expresión $L_{bol} = 4\pi R_\star^2 \sigma T_{ef}^4$.

Los valores que hemos escogido para las fotosferas (T_{ef} , R_\star) provienen del catálogo de Cox (2000; Allen's Astrophysical Quantities) y son escogidos de tal forma que por inspección visual ajusten a los datos de 2MASS, en particular con la banda K_S , la cual tiene buena calidad fotométrica, lo que no aplica siempre en las bandas J y H. Con el mismo criterio fueron ajustado los datos de IRAC-Spitzer en las dos primeras bandas ($3.6 \mu\text{m}$, $4.5 \mu\text{m}$), mientras que en las dos últimas no se requirió un ajuste más estricto. Esto se debe a que la emisión en estas bandas se encuentra afectado principalmente por la emisión de hidrocarburos policíclico aromáticos (PAHs), lo cual no se encuentra contemplado en el modelo de ajuste. Se consideró tres modelos para ver el ajuste del

mejor modelo a los flujos en banda K_S de 2MASS, $[3.6]\mu\text{m}$ y $[4.5]\mu\text{m}$ de IRAC-Spitzer.

Para ajustar los datos de la emisión en el lejano infrarrojo (FIR; IRAS) suponemos que esta emisión proviene de una envoltura de polvo calentada por la radiación ionizante de la estrella. La temperatura de polvo (T_d) que usamos, es la que reportan Faúndez et al. (2004) para esta región molecular, $T_d=26\text{K}$. Además, hemos supuesto que la emisión FIR proviene de varias fuentes, las cuales deben yacer dentro del *beam* de IRAS a $\lambda 100\mu\text{m}$ que es de 1 minuto de arco, por lo que el flujo de cada fuente dentro del *beam* de IRAS, debe ser menor al detectado.

Las magnitudes de 2MASS fueron convertidas a flujos de acuerdo con la relación

$$F = F_0 10^{-0.4(m_{2MASS} - m_0)} [Jy]$$

donde, F_0 es flujo calibrado en cada banda (J, H y K_S) para una estrella estándar (e.g. Vega:A0V), m_0 es la magnitud del flujo calibrado ($m_0=0.0$) y m_{2MASS} es la magnitud determinada en cada banda 2MASS. El flujo así obtenido está dado en *Janskys*.

3.4. Discusión de resultados.

La distribución espectral de energía (SED) fué construida para cada objeto. Se puso como límite superior de tipo espectral para la componente estelar, el valor del tipo espectral relacionado con la luminosidad en el lejano infrarrojo (L_{FIR}), la cual es supuesta del orden de la luminosidad bolométrica. Ésta relación es dada por los flujos $F(60\mu\text{m})$ y $F(100\mu\text{m})$ de la fuente IRAS, calculada con la expresión

$$L_{bol} \sim L_{FIR} = 6 \times 10^5 \left[2.58F(60) + F(100) \right] \left[\frac{D}{Mpc} \right] L_{\odot}$$

La luminosidad bolométrica así calculada es $6.9 \times 10^3 L_{\odot}$, lo cual está relacionado con estrella de secuencia principal de edad cero (ZAMS) del tipo espectral B0.5V (Hanson et al. 1997). De forma que los tipos espectrales de los objetos OBV, OBH y OCII deben ser de un tipo espectral más tardío que B0.5V.

En la región del lejano infrarrojo (FIR) son usados los flujos de la fuente IRAS en el PSC IRAS. Estos flujos son usados como límites superiores (marcados con triángulos invertidos), por lo que el ajuste se encuentra por abajo de los datos. Sobregrafiada se encuentra la suma de las dos componentes en línea negra sólida.

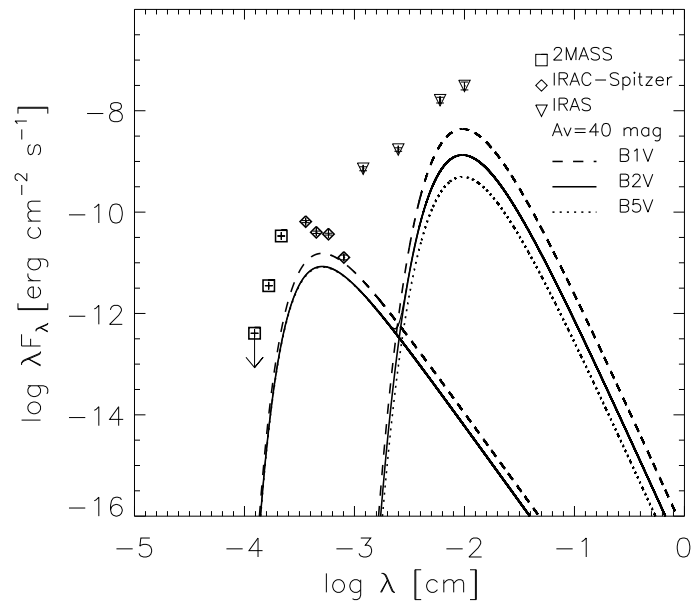


Figura 3.9: Distribución espectral de energía para el objeto del brazo vertical (BV), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral B1V, B2V y B5V para una extinción de 40 magnitudes. El mejor ajuste los el modelo de tipo espectral B1V/B2V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26\text{K}$ (línea negra discontinua). Los valores de los flujos en J de 2MASS son límites superiores, así mismo los flujos IRAS.

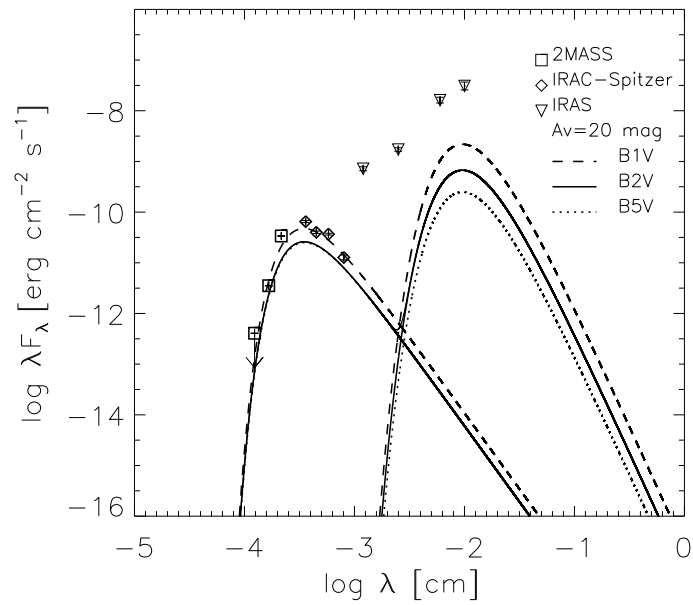


Figura 3.10: Distribución espectral de energía para el objeto del brazo vertical (BV), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral B1V, B2V y B5V para una extinción de 20 magnitudes. El mejor ajuste los el modelo de tipo espectral B1V/B2V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26\text{K}$ (línea negra discontinua). Los valores de los flujos en J de 2MASS son límites superiores, así mismo los flujos IRAS.

Objeto BV.

La SED calculada para cada uno de nuestros objetos (Objeto BV y BH) es mostrada en las figuras 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12. Estas son expresadas por las dos curvas descritas por las ecuaciones (3.5) y (3.6). En las figuras 3.9 y 3.10 se muestran para el caso del modelo del objeto OBV con un modelo de extinción de $A_V=20$ y 40 mag. y las tres curvas corresponden a los tipos espectrales B1V, B2V y B5V. Es notable que el caso de la extinción $A_V=40$ mag puede ser descartado por el pobre ajuste que muestran los tipos espectrales, mientras que en el caso de $A_V=20$ magnitudes se puede ver mejor ajuste. Comparando el modelo de ajuste de cada curva a los datos representativos de la componente fotosférica en banda K_S de 2MASS y banda $[3.6]\mu\text{m}$ y $[4.5]\mu\text{m}$ de IRAC-Spitzer, notamos que el mejor ajuste lo da la curva correspondiente a un tipo espectral B1V a B2V. El tipo espectral B5V pasa por abajo de las bandas K_S y $[3.6]$. La segunda curva (envolvente circumestelar) es descrita por la emisión de cuerpo negro con una temperatura de polvo, $T_d=26$ K, acorde al valor calculado por Faúndez et al. (2004). Los valores del flujo en banda J de 2MASS y los flujos de IRAS son tomados como valores límite superior.

Objeto BH.

En la figura 3.11 y 3.12 mostramos el ajuste a los datos observacionales para el objeto denotado BH. Se muestran las curvas correspondientes a los tipos espectrales B5V, B8V y A0V, con una extinción mayor a la del modelo anterior, ya que se trata de un objeto más enrojecido. Los parámetros del mejor ajuste (nuevamente aludiendo al ajuste a la banda K_S , $[3.6]$ y $[4.5]$ de IRAC-Spitzer) son de una fotosfera de tipo espectral B8V a A0V, mientras que el tipo espectral B5V está por encima de los flujos de banda K_S , $[3.6]$ y $[4.5]$. El tipo espectral A5V ajusta por abajo de las bandas mencionadas. La segunda curva (envolvente circumestelar) es descrita por la emisión de cuerpo negro con una temperatura de polvo, $T_d=26$ K.

Objeto de Clase II.

Para el objeto identificado en los diagramas color-color de IRAC-Spitzer, como un objeto de clase II con disco (Allen et al. 2004), mostramos su SED en la figura 3.13 y 3.14. Las curvas del modelo de ajuste para este objeto están representadas para los tipos espectrales F0V, F5V y G0V. En esta usamos como límite superior el valor de flujo en banda K_S de 2MASS, ya que el PSC no lo identificó como fuente puntual y su fotometría no fué reportada (sección). Su magnitud en esta banda fue calculada basándose en objetos con flujos similares, en un campo de 1 minuto de arco, próximo a su localización en la imagen de banda K_S . El objeto está bien medido en las cuatro bandas de IRAC-Spitzer y los flujos de la fuente IRAS se usan como valores límite superior. El modelo de ajuste en mayor acuerdo con los datos es considerando una ex-

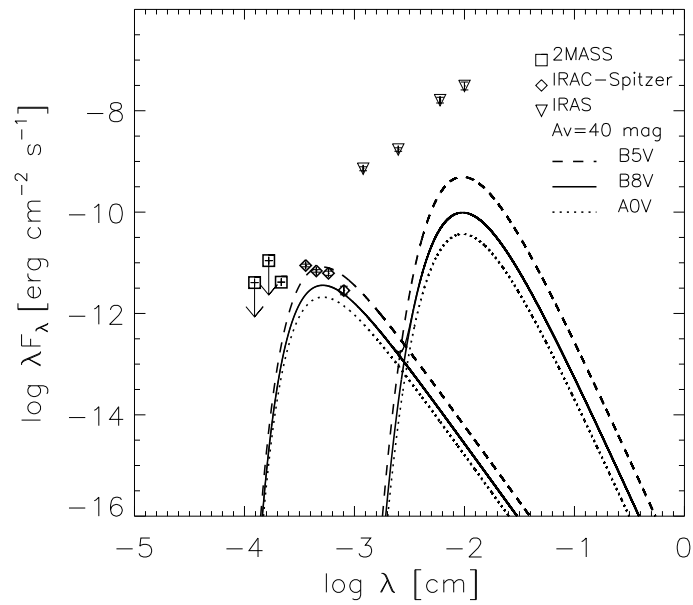


Figura 3.11: Distribución espectral de energía para el objeto del brazo horizontal (OBH), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral B5V, B8V y A0V para una extinción de 40 magnitudes. El mejor ajuste lo da el modelo de tipo espectral B8V a A0V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26\text{K}$ (línea negra discontinua). Los valores de los flujos en J, H de 2MASS son límites superiores, así mismo los flujos IRAS.

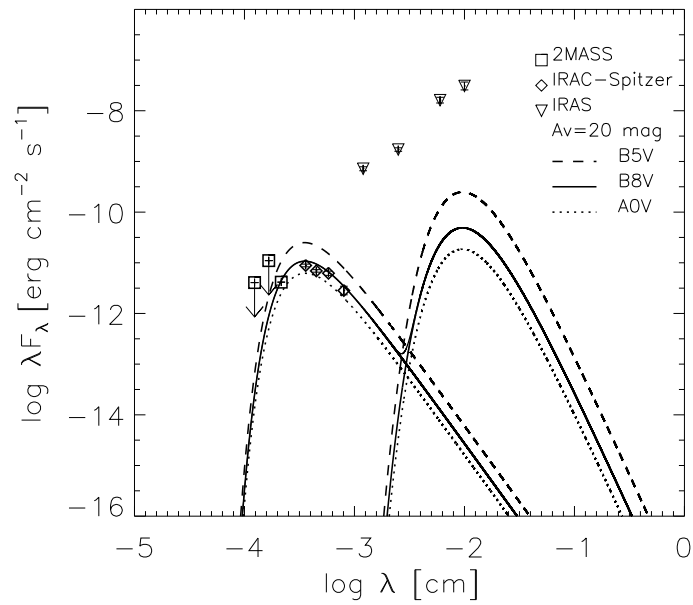


Figura 3.12: Distribución espectral de energía para el objeto del brazo horizontal (OBH), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral B5V, B8V y A0V para una extinción de 20 magnitudes. El mejor ajuste lo da el modelo de tipo espectral B8V a A0V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26\text{K}$ (línea negra discontinua). Los valores de los flujos en J, H de 2MASS son límites superiores, así mismo los flujos IRAS.

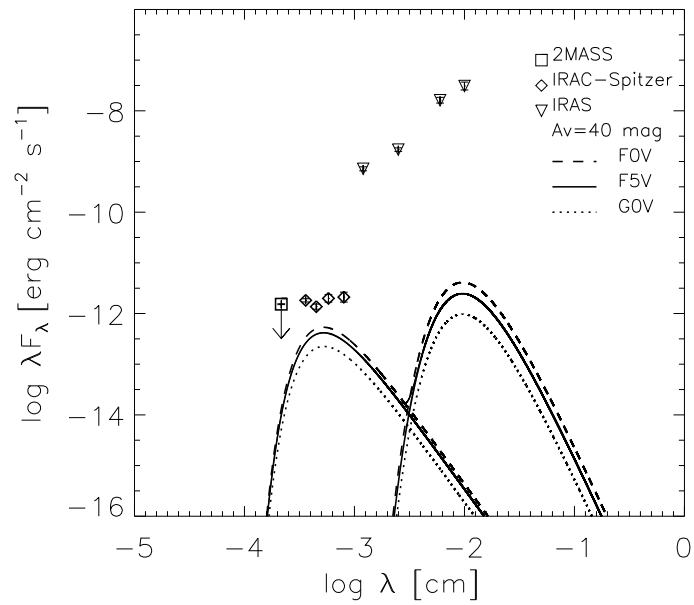


Figura 3.13: Distribución espectral de energía para el objeto denotado Clase II (OCII), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral F0V, F5V y G0V para una extinción de 40 magnitudes. El mejor ajuste los el modelo de tipo espectral F0V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26\text{K}$ (línea negra discontinua). La magnitud de K_S de 2MASS es un límite superior, así como los flujos de IRAS.

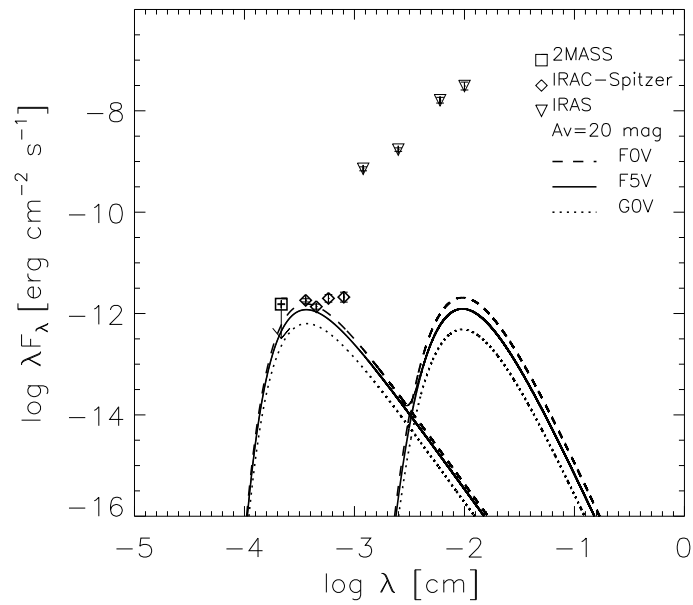


Figura 3.14: Distribución espectral de energía para el objeto denotado Clase II (OCII), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral F0V, F5V y G0V para una extinción de 20 magnitudes. El mejor ajuste los el modelo de tipo espectral F0V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26\text{K}$ (línea negra discontinua). La magnitud de K_S de 2MASS es un límite superior, así como los flujos de IRAS.

tinción de 20 magnitudes, un tipo espectral F0V, ya que el flujo en la banda K_S es límite superior. La segunda curva (envolvente circumestelar) es descrita por la emisión de cuerpo negro con una temperatura de polvo, $T_d=26$ K.

Se puede notar que los dos primeros modelos que hemos ajustado al objeto BV y al objeto BH, tienen un buen ajuste a los datos observacionales, 2MASS e IRAC-Spitzer en el NIR e IRAS en el FIR. Las curvas de emisión de cuerpo gris en cada caso están de acuerdo con los modelos. Sin embargo, la existencia de una fenomenología más abundante en los objetos, se ve notablemente reflejada en el tercer modelo, pues carece de la emisión de una componente de disco, que claramente se nota en el forma plana de la distribución espectral de la región de $3.6\mu\text{m}$ a $8.0\mu\text{m}$ (IRAC-Spitzer).

Por otro lado, notamos que el ajuste a los datos en el rango del NIR, concuerdan con un objeto de masa menor a $2 M_\odot$ con disco. Los tipos espectrales F0V y F5V ajustan para esta extinción, mientras que el tipo espectral G0V ajusta por abajo de los datos. De la sección 1.3.3 notamos que todos los tipos espectrales que hemos puesto para el ajuste están apenas por encima de $1 M_\odot$, pero dentro del rango de masa de los objetos T Tauri (Stahler & Palla 2004), por lo que se puede sugerir que el objeto OCII pueda tratarse de un objeto de este tipo.

En la imagen de la banda $[4.5]\mu\text{m}$ (figura 3.7, en escala logarítmica) es notoria la forma de un frente de choque (elipse verde), la cual se encuentra relacionada geoméricamente con la fuente de clase II, encontrada por medio de inspección visual en la imagen de la banda $[3.6] \mu\text{m}$. Este tipo de objeto está asociado a un disco. De lo anterior y de los parámetros de ajuste encontrado para este objeto, sugerimos que esta fuente puede ser un objeto candidato a tipo T Tauri, con un *outflow* asociado a la emisión de la banda $[4.5] \mu\text{m}$ de IRAC-Spitzer (la cual puede deberse a un choque del flujo saliente). Un estudio fotométrico en banda angosta (H_2 , FeII) y sobretodo espectroscópico de este objeto y su *outflow* asociado (sección 4.3) nos podría dar certeza sobre nuestra sugerencia.

Banda	OBV	OBH	OCII
F_J [mJy]	0.17 (U)	1.67 (U)	---
F_H [mJy]	1.95	6.12 (U)	---
F_{Ks} [mJy]	24.3	2.98	1.1(U)
F[3.6] [mJy]	78.0	10.63	2.18
F[4.5] [mJy]	60.0	10.37	2.05
F[5.8] [mJy]	71.0	12.5	3.85
F[8.0] [mJy]	34.0	7.56	5.61
F(12) [Jy]	< 2.87	< 2.87	< 2.87
F(25) [Jy]	< 14.3	< 14.3	< 14.3
F(60) [Jy]	< 323.5	< 323.5	< 323.5
F(100) [Jy]	< 1028.0	< 1028.0	< 1028.0

Tabla 3.9: Distribución espectral de energía (NIR, MIR, FIR) de los objetos BV, BH y Objeto Clase II. Los valores marcados con (U) son valores límite superior.

Tabla 3.10: Coordenadas de los objetos seleccionados: BV, BH y Objeto Clase II.

Designación	Designación Spitzer	AR[°]	DEC[°]	l_S [°]	b_S [°]
OBV	SSTGLMC G019.3660-00.0237	276.602161	-12.060663	19.366058	-0.023747
OBH	SSTGLMC G019.3671-00.0225	276.601580	-12.059136	19.367144	-0.022533
OCII	SSTGLMC G019.3639-00.0250	276.602345	-12.063129	19.363960	-0.025056

Tabla 3.11: Parámetros físicos de los objetos seleccionados: BV, BH y Objeto Clase II.

Designación	T_{ef} [K]	M_\star [M_\odot]	T_d [K]	A [cm^2]	tipo espectral	fenomenología asociada
OBV	42 000	60.0	26.0	$\sim 5.96 \times 10^{37}$	B1V/B2V	región UCHII
OBH	11 400	3.8	26.0	$\sim 2.02 \times 10^{34}$	B8V/A0V	región UCHII
OCII	9 760	2.9	26.0	$\sim 7.55 \times 10^{33}$	F0V/F5V	<i>outflow</i>

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo futuro

4.1. Conclusiones

1. La región molecular asociada a la fuente IRAS 18236-1205 muestra fenómenos relacionados con regiones de formación estelar masiva: (a) flujos de IRAS que denotan los colores de regiones UCHII (Wood & Churchwell 1989). (b) Observaciones del trazador de alta densidad molecular columnar, CS(J=2→1) (Bronfman et al. 1996) hacia la fuente IRAS, (c) fluorescencias en banda [4.5] μ m (IRAC-Spitzer) relacionadas con choques (sección 3.2.3) y (d) observaciones de máseres (Molinari et al. 1996; Walsh et al. 2003; Xu et al. 2003; Sewilo et al. 2004). Tal fenomenología muestran un escenario característico de una región de formación estelar masiva en una fase evolutiva temprana.
2. Un criterio geométrico basado en el estudio del gas molecular ^{13}CO y otro fotométrico basado en datos del cercano infrarrojo de 2MASS, nos ha permitido seleccionar una muestra de objetos candidatos a objetos jóvenes estelares (YSOs) embebidos en la región molecular asociada a la fuente IRAS 18236-1205 (sección 2.3.1 y 2.3.2). Tales objetos muestran excesos de emisión en el infrarrojo, propios de YSOs embebidos, $(H - K_S) > 2.5$ ($D=2.5$ kpc, $A_V \gtrsim 40$ mag). El método ha corroborado su utilidad en tal selección, que de manera análoga se había probado sobre asociaciones estelares jóvenes embebidas en regiones de baja densidad molecular columnar (Roman-Lopes & Abraham 2004, 2006).
3. El análisis del diagrama color-magnitud (fig. 2.7) sugiere que de la selección de candidatos, una muestra de objetos pueden estar asociados con fases de evolución protoestelar. Se han determinado dos regiones del diagrama color-magnitud, la primera con un rango $12.0 < K_S < 14.0$, que muestra los objetos más enrojecidos (hasta $H-K_S \sim 5.0$) denominada región de brazo horizontal (fig 2.7). La segunda región denominada región de brazo vertical, son objetos en el intervalo $8.5 < K_S < 13.5$ y con ancho de $2.5 < H-K_S < 4.0$. Esta región contiene objetos muy brillantes y menos enrojecidos que los de brazo horizontal, sugiriendo ser objetos más

evolucionados en el proceso de formación estelar. La distribución espacial de estos objetos con respecto al gas molecular es más uniforme, mientras que la distribución de los objetos de brazo horizontal sigue a las estructuras de mayor densidad columnar (mayor emisión; figura 2.8), lo cual está de acuerdo con una fase temprana de la formación estelar.

4. De esta selección, se ha considerado por asociación espacial a la fuente IRAS dos objetos del PSC 2MASS y PSC IRAC-Spitzer (Objetos denominados OBV y OBH). Sus modelos de distribución espectral de energía muestra evidencia que se trata de objetos de tipo espectral B1V/B2V y B8V/A0V, respectivamente. Estos pueden producir la radiación ionizante suficiente para producir los colores de región UCHII. Del diagrama color-color de IRAC-Spitzer (fig. 3.5) resulta que estos objetos están asociados a objetos de Clase 0 y I, siendo de este tipo de clase los objetos más tempranos de la formación estelar (Lada 1987; Robitaille et al. 2007)

5. Por medio del análisis fotométrico con datos de IRAC-Spitzer de los objetos asociados a la fuente IRAS, se identificó un objeto de masa intermedia (fig. 3.6). Su posición en el diagrama color-color lo ubica en la región de los objetos de clase II (fig. 3.8; Robitaille et al. 2006), compartiendo características con la región identificada por Allen et al. (2004) de objetos con disco circunestelar. Este objeto ha sido denotado como OCII. Su distribución espectral de energía, muestra un tipo espectral F0V/F5V, por lo que puede tratarse de un objeto candidato a tipo T Tauri (sección 1.3.3). Éste objeto está asociado a emisión en la banda $[4.5]\mu\text{m}$ (fig. 3.7), la cual está dominada por fluorescencias de H_2 (sección 3.2.1), propias de material molecular excitado por choques, lo que refuerza la idea de que los objetos de masa intermedia comparten una fenomenología con los objetos de baja masa.

6. Por lo anterior expuesto, se refuerza la idea de la existencia de una asociación estelar joven embebida en la región molecular hacia la fuente IRAS 18236-1205, en donde por lo menos dos objetos, OBV y OBH, pueden contribuir con radiación ionizante y producir los colores de región UCHII. Objetos de baja, intermedia y alta masa, están coexistiendo en la región central molecular. Su coexistencia es denotada por la presencia de los objetos OBV (alta masa), OBH (masa intermedia) y OCII (de baja masa) de clase II, asociado geoméricamente con la emisión en la banda $[4.5]\mu\text{m}$ de IRAC-Spitzer.

4.2. Trabajo a futuro.

Como resultado del trabajo de esta tesis, hemos propuesto un método fotométrico NIR para seleccionar YSOs embebidos en su nube molecular progenitora, cuyo caso particular de estudio es la región asociada a la fuente IRAS 18236-1205 (Capítulo 2). Hemos seleccionado algunos objetos próximos a la fuente IRAS y les hemos construido su SED, los parámetros de ajuste nos indica, que se trata de YSOs de clase 0,I, lo cual es confirmado por los diagramas color-color de IRAC-Spitzer (Capítulo 3). Observaciones con mayor resolución espacial, nos deben ayudar a verificar la naturaleza de estos objetos, los cuales incluyen

1. Observaciones en varias longitudes de onda: fotometría en el infrarrojo cercano en bandas anchas J, H y K_S y angostas en FeII, $Br\gamma$, H_2 de mejor calidad y resolución espacial sobre los objetos seleccionados (objetos BH, BV y de clase II). Una mejor determinación en las magnitudes de los objetos de brazo horizontal y vertical nos pueden ayudar a esclarecer la asociación con las regiones en el diagrama color-magnitud y color-color.
2. Estudio de los otros objetos seleccionados como YSOs embebidos en la región molecular, sobretodo aquellos que se presentan asociados a las principales estructuras de mayor densidad en el gas molecular (^{13}CO).
3. Observación de la fenomenología asociada a los YSOs embebidos en la región de formación estelar: emisión de regiones con choques en FeII y H_2 , *Infrared Dark Clouds* (IRDCs), emisión en radio continuo de la región UCHII.
4. La espectroscopía infrarroja es muy útil para discernir sobre los tipos espectrales asociados a los objetos y por ende, a la naturaleza de los objetos.

Índice de figuras

1.1.	Esquema de la Vía Láctea en gas molecular (^{12}CO). Las regiones moleculares son marcadas en esta. Tomado de Dame, Hartmann, & Thaddeus 2001.	2
1.2.	Distribución de 550 regiones HII en la Vía Láctea. Los símbolos de diamantes corresponden a fuentes con distancia no ambigua, más 177 fuentes con distancia resuelta. Los triángulos corresponden a 256 fuentes en las cuales se aplicó la correlación luminosidad-diámetro para determinar su distancia. El modelo para los brazos espirales usado es el de Taylor & Cordes (1993). Tomado de Paladini et al. (2004).	6
1.3.	Secuencia evolutiva de objetos jóvenes estelares (YSOs) y su distribución espectral de energía. Adaptado de Lada & Wilking (1984) y André (1994).	23
1.4.	Emisión del ^{13}CO en contornos de colores, que muestra la región molecular de estudio así como la posición de la fuente IRAS 18236-1205 con el símbolo de estrella negra, asociada a la región más densa.	26
1.5.	La figura muestra la región central molecular en contornos de ^{13}CO . Superpuestas están las posiciones de las observaciones hechas hacia esta región molecular.	27
2.1.	Mapa de canales de la emisión de ^{13}CO (en contornos llenos de color) de la región molecular en intervalos de 7 canales. Los rangos en velocidad están marcados en cada panel. Los valores para los contornos de color están indicados en la barra de colores en la parte superior de la figura.	31
2.2.	Mapa integrado de la emisión del ^{13}CO en todo el rango de velocidad ($V=18.42\text{-}31.61$ km/s). Los valores para los contornos de color está a la derecha de la figura. En la parte central esta representada la posición de la fuente IRAS con una estrella blanca y los cuadros negros muestran la posición de las estructuras principales de mayor emisión.	32
2.3.	Espectro integrado de temperatura en coordenadas espaciales de la región molecular para la emisión del ^{13}CO . El ajuste gaussiano es dado por la línea roja discontinua, mientras que la línea vertical discontinua marca el valor de la velocidad máxima.	36

2.4.	Diagrama color-color ($H-K_S$) vs ($J-H$) de las fuentes del PSC 2MASS que caen en la región demarcada geoméricamente por el ^{13}CO . La región entre líneas blancas/negras discontinuas representa la banda de extinción visual. Las posiciones para los valores de la extinción en el visual para estrellas tempranas (línea inferior discontinua) y tardías (línea superior discontinua) son representadas por los símbolos de estrellas para $A_V=10, 20$ y 30 . Los valores sin enrojecer para estrellas en la secuencia principal son representadas por la línea sólida cian (Koorneeff 1983). En el diagrama también se muestran las regiones representativas, para las estrellas T Tauri (línea verde discontinua; Meyer 1996), objetos tipo Herbig Ae/Be (rombos azules; Lada & Adams 1992) y los objetos con choques tipo J y C asociados con objetos tipo Herbig-Haro (triángulos rojos y azules respectivamente; Smith 1995).	39
2.5.	Diagrama color-color de la región de control. Los detalles de la figura son los mismos que en la figura anterior.	40
2.6.	Histograma de color $H-K_S$ para la región molecular, comparado con la región de control (arriba). En la parte inferior se muestra un <i>zoom</i> , para notar la separación en la dos distribuciones de la población estelar de la región molecular. Las áreas usadas en cada región es de $4' \times 4'$	41
2.7.	Diagrama Color-Magnitud ($H-K_S$) vs K_S de los objetos puntuales de 2MASS que están dentro de la región molecular (cuadros negros pequeños). En este se muestran en líneas azules discontinua, los vectores de enrojecimiento de estrellas tempranas de secuencia principal O3V y B0V (rombos negros), respectivamente. Con símbolos de estrellas azules se muestran las posiciones de los valores de extinción visual de $A_V=10, 20, 30$ y 40 magnitudes. Los objetos en cuadros rojos son designados como de la región 'brazo horizontal' y los que yacen por encima de estos (cuadros azules), 'brazo vertical'. Las líneas discontinua verde y roja indican el valor de enrojecimiento intrínseco en la línea de visión para la secuencia principal (estrellas de secuencia principal afectadas por la extinción de la region molecular) y gigantes rojas (estrellas gigantes brillantes del fondo y frente que presentan enrojecimiento intrínseco), respectivamente (Koorneeff 1983). El límite de detección, $K_{S,lim}=14.3$ mag. es indicado por la línea negra punteada.	42
2.8.	Diagrama en contornos sin llenar de la emisión del gas molecular (^{13}CO) Superpuesto a los contornos se encuentran los objetos de los brazos horizontal (cuadros rojo llenos) y brazo vertical (cuadros azules llenos) respectivamente. Los cuadros negros grandes	43
3.1.	Diagrama Color-color $H-K_S$ vs. K_S de los objetos definidos como de brazo horizontal (cuadros rojos) y brazo vertical (cuadros azules) seleccionados por fotometría. La explicación de la figura es análoga a la figura 2.4.	46

3.2.	Imagen en banda K_S de 2MASS (en escala logarítmica), en pequeños círculos azules se marcan las fuentes puntuales del PSC 2MASS, en círculo azul grande el <i>beam</i> de IRAS, y los objetos seleccionados por criterio fotométrico y dentro del <i>beam</i> , son marcados por el cuadrado rojo para el objeto BH y cuadrado azul el objeto BV. La elipse de error en posición (en azul) corresponde a la posición de la fuente IRAS (pequeño círculo negro).	55
3.3.	Diagrama Color-magnitud (misma descripción que la figura 2.7) de los objetos del brazo horizontal (BH, definidos en el texto) están encerrados en cuadros rojos y en cuadros azules los objetos del brazo vertical (BV). Los objetos OBV y OBH son marcados en cuadros negros y con una etiqueta respectivamente.	56
3.4.	Diagrama color-color de los objetos seleccionados como posibles YSOs embebidos en la región molecular. En el diagrama también se muestran las regiones definidas teóricamente para objetos tipo T Tauri (línea verde discontinua), estrellas tipo Herbig Ae/Be (rombos azules) y objetos con choques J/C asociados a objetos tipo HH (triángulos rojos y azules).	57
3.5.	Diagrama color-color de los datos del PSC Spitzer con los objetos asociados. La zona de las fotosferas es indicada por el círculo, mientras que la caja verde demarca la región de los objetos de clase II (Allen et al. 2004). El diagrama también muestra las regiones definidas por los trabajos de Robitaille et al. (2006) para las clases 0, I (en líneas negras), II (en líneas azules) y III (en líneas negras). Los símbolos para los objetos seleccionados a candidatos a YSOs son los mismos que los usados en las figuras 3.1 y 3.3. El vector de extinción en la parte superior izquierda es obtenido de Indebetouw et al. (2005) y su magnitud es $A_K=5$ mag.	68
3.6.	Imagen en banda $[3.6] \mu\text{m}$ (en escala logarítmica) de IRAC-Spitzer (derecha) con la posición en un círculo verde del objeto de clase II, en cuadrado rojo el objeto BH, en cuadrado azul cian el objeto BV. La posición de la fuente IRAS es graficada con un pequeño círculo negro. La imagen de la izquierda es en banda K_S de 2MASS con los objetos anteriormente descritos.	69
3.7.	Imagen de banda $[3.6] \mu\text{m}$ (izquierda, en escala logarítmica) y $[4.5] \mu\text{m}$ (derecha, en escala logarítmica) hacia la fuente IRAS, cuyo <i>beam</i> es marcado con el círculo grande azul. La posición del objeto de clase II es marcado con el círculo pequeño verde, mientras que la posición de la fuente IRAS es marcada con el círculo pequeño azul. La elipse verde demarca la región con una emisión importante en banda $[4.5] \mu\text{m}$, la cual está asociada con el objeto OCII.	69
3.8.	Diagrama color-color de los datos del PSC Spitzer con los objetos seleccionados (BV, BH) y con la inclusión del objeto detectado en banda $[3.6] \mu\text{m}$ de IRAC-Spitzer. El objeto de clase II es marcado con una estrella roja. La descripción de este es la misma que en la figura 3.5.	72

3.9. Distribución espectral de energía para el objeto del brazo vertical (BV), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral B1V, B2V y B5V para una extinción de 40 magnitudes. El mejor ajuste los el modelo de tipo espectral B1V/B2V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26K$ (línea negra discontinua). Los valores de los flujos en J de 2MASS son límites superiores, así mismo los flujos IRAS.	76
3.10. Distribución espectral de energía para el objeto del brazo vertical (BV), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral B1V, B2V y B5V para una extinción de 20 magnitudes. El mejor ajuste los el modelo de tipo espectral B1V/B2V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26K$ (línea negra discontinua). Los valores de los flujos en J de 2MASS son límites superiores, así mismo los flujos IRAS.	77
3.11. Distribución espectral de energía para el objeto del brazo horizontal (OBH), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral B5V, B8V y A0V para una extinción de 40 magnitudes. El mejor ajuste lo da el modelo de tipo espectral B8V a A0V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26K$ (línea negra discontinua). Los valores de los flujos en J, H de 2MASS son límites superiores, así mismo los flujos IRAS.	79
3.12. Distribución espectral de energía para el objeto del brazo horizontal (OBH), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral B5V, B8V y A0V para una extinción de 20 magnitudes. El mejor ajuste lo da el modelo de tipo espectral B8V a A0V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26K$ (línea negra discontinua). Los valores de los flujos en J, H de 2MASS son límites superiores, así mismo los flujos IRAS.	80
3.13. Distribución espectral de energía para el objeto denotado Clase II (OCII), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral F0V, F5V y G0V para una extinción de 40 magnitudes. El mejor ajuste los el modelo de tipo espectral F0V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26K$ (línea negra discontinua). La magnitud de K_S de 2MASS es un límite superior, así como los flujos de IRAS.	81
3.14. Distribución espectral de energía para el objeto denotado Clase II (OCII), con una componente de emisión de cuerpo gris relacionado con una fotosfera de tipo espectral F0V, F5V y G0V para una extinción de 20 magnitudes. El mejor ajuste los el modelo de tipo espectral F0V. Una componente de emisión de cuerpo negro de temperatura de polvo $T_d=26K$ (línea negra discontinua). La magnitud de K_S de 2MASS es un límite superior, así como los flujos de IRAS.	82

Índice de Tablas

1.1. Características físicas de las nubes moleculares. Datos de Smith (2004). (SP) datos de Stahler & Palla (2004).	2
1.2. Características de regiones HII. (A) Regiones HiperCompactas HII; (S) Datos de Smith, M.D. (2004); (CH) Datos de Churchwell, E. (2002); (H) Datos de Hoare et al. (2007); (K&F) Datos de Kurtz & Franco (2000) ME: Medida de la emisión, brillo.	7
1.3. Datos compilados de la literatura para la nube molecular hacia la fuente IRAS 18236-1205, [ar,dec]=[276.6015,-12.062593](J2000). (Id) Sewilo et al. 2004, ApJS 154 553. (A)Bronfman et al. 1996, (B)Molinari et al. 1996, (C) Xu et al.(2003), (D) Walsh et al. 1998, (E) Faúndez et al. (2004) ,(F) Sewilo et al. (2004) , (G) Sewilo et al. (2004)	28
2.1. Parámetros físicos calculados de la región molecular.	36
3.1. Coordenadas 2MASS de los objetos del brazo horizontal (BH)	46
3.2. Coordenadas 2MASS de los objetos del brazo vertical (BV)	48
3.3. Magnitudes 2MASS de los objetos del brazo horizontal (BH)	51
3.4. Magnitudes 2MASS de los objetos del brazo vertical (BV)	52
3.5. Flujos IRAC-Spitzer de los objetos del brazo horizontal (BH)	60
3.6. Flujos IRAC-Spitzer de los objetos del brazo vertical (BV)	63
3.7. Flujos (mJy) IRAC-Spitzer de los objetos dentro del beam IRAS.	70
3.8. Fotometría de objetos 2MASS (Banda K_S) similares a OCII en el beam IRAS.	71
3.9. Distribución espectral de energía (NIR, MIR, FIR) de los objetos BV, BH y Objeto Clase II. Los valores marcados con (U) son valores límite superior.	84
3.10. Coordenadas de los objetos seleccionados: BV, BH y Objeto Clase II.	84
3.11. Parámetros físicos de los objetos seleccionados: BV, BH y Objeto Clase II.	84

Bibliografía

- Allen, L. E., Calvet, N., D'Álessio, P., Merin, B., Hartmann, L., Megeath, S. T., Gutermuth, R. A., Muzerolle, J., Pipher, J. L., Myers, P. C., & Fazio, G. G. 2004, *ApJS*, 154, 363
- Bertout, C. 1989, *ARA&A*, 27, 351
- Bessell, M. S., & Brett, J. M. 1988, *PASP*, 100, 1134
- Beuther, H., Churchwell, E. B., McKee, C. F., & Tan, J. C. 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 165–180
- Bourke, T. L., Myers, P. C., Robinson, G., & Hyland, A. R. 2001, *ApJ*, 554, 916
- Brinch, C., Crapsi, A., Jørgensen, J. K., Hogerheijde, M. R., & Hill, T. 2007, *A&A*, 475, 915
- Bronfman, L., Nyman, L.-A., & May, J. 1996, *A&AS*, 115, 81
- Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. 1989, *ApJ*, 345, 245
- Chavarría, L., Allen, L., Hora, J. L., Brunt, C., & Fazio, G. G. 2008, *ArXiv e-prints*, 803
- Churchwell, E. 2002, *ARA&A*, 40, 27
- Connelley, M. S., Reipurth, B., & Tokunaga, A. T. 2007, *AJ*, 133, 1528
- Cox, A.Ñ. 2000, *Allen's astrophysical quantities* (*Allen's astrophysical quantities*, 4th ed. Publisher: New York: AIP Press; Springer, 2000. Edited by Arthur N. Cox. ISBN: 0387987460)
- Crutcher, R. M. 1999, *ApJ*, 520, 706
- Dickman, R. L. 1978, *ApJS*, 37, 407
- Elmegreen, B. G. 2002, *ApJ*, 577, 206
- Faúndez, S., Bronfman, L., Garay, G., Chini, R., Nyman, L.-A., & May, J. 2004, *A&A*, 426, 97

- Finkenzeller, U., & Mundt, R. 1984, *A&AS*, 55, 109
- Frerking, M. A., Langer, W. D., & Wilson, R. W. 1982, *ApJ*, 262, 590
- Garay, G., & Lizano, S. 1999, *PASP*, 111, 1049
- Goto, M., Usuda, T., Takato, N., Hayashi, M., Sakamoto, S., Gaessler, W., Hayano, Y., Iye, M., Kamata, Y., Kanzawa, T., Kobayashi, N., Minowa, Y., Nedachi, K., Oya, S., Pyo, T.-S., Saint-Jacques, D., Suto, H., Takami, H., Terada, H., & Mitchell, G. F. 2003, *ApJ*, 598, 1038
- Haro, G. 1952, *ApJ*, 115, 572
- Herbig, G. H. 1950, *ApJ*, 111, 11
- . 1960, *ApJS*, 4, 337
- Hoare, M. G., Kurtz, S. E., Lizano, S., Keto, E., & Hofner, P. 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 181–196
- Hunter, D. A. 2002, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 285, *Modes of Star Formation and the Origin of Field Populations*, ed. E. K. Grebel & W. Brandner, 323–+
- Indebetouw, R., Mathis, J. S., Babler, B. L., Meade, M. R., Watson, C., Whitney, B. A., Wolff, M. J., Wolfire, M. G., Cohen, M., Bania, T. M., Benjamin, R. A., Clemens, D. P., Dickey, J. M., Jackson, J. M., Kobulnicky, H. A., Marston, A. P., Mercer, E. P., Stauffer, J. R., Stolovy, S. R., & Churchwell, E. 2005, *ApJ*, 619, 931
- Jackson, J. M., Rathborne, J. M., Shah, R. Y., Simon, R., Bania, T. M., Clemens, D. P., Chambers, E. T., Johnson, A. M., Dormody, M., Lavoie, R., & Heyer, M. H. 2006, *ApJS*, 163, 145
- Joy, A. H. 1945, *ApJ*, 102, 168
- Kennicutt, Jr., R. C. 1989, *ApJ*, 344, 685
- Koornneef, J. 1983, *A&A*, 128, 84
- Krumholz, M. R., Klein, R. I., & McKee, C. F. 2005, in *IAU Symposium*, Vol. 227, *Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics*, ed. R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, & M. Walmsley, 231–236
- Kumar, M. S.Ñ., & Grave, J. M. C. 2007, *A&A*, 472, 155
- Lada, C. J. 1987, in *IAU Symposium*, Vol. 115, *Star Forming Regions*, ed. M. Peimbert & J. Jugaku, 1–17
- Lada, C. J., & Adams, F. C. 1992, *ApJ*, 393, 278

- Lada, C. J., & Wilking, B. A. 1984, *ApJ*, 287, 610
- Lamers, H. J. G. L. M., Panagia, N., Scuderi, S., Romaniello, M., Spaans, M., de Wit, W. J., & Kirshner, R. 2002, *ApJ*, 566, 818
- Luna, A., Bronfman, L., Carrasco, L., & May, J. 2006, *ApJ*, 641, 938
- Mac Low, M.-M., & Klessen, R. S. 2004, *Reviews of Modern Physics*, 76, 125
- Massey, P., & Hunter, D. A. 1998, *ApJ*, 493, 180
- May, J., Alvarez, H., & Bronfman, L. 1997, *A&A*, 327, 325
- Mayya, Y. D., Bressan, A., Carrasco, L., & Hernandez-Martinez, L. 2006, *ApJ*, 649, 172
- Meyer, M. R. 1996, *PASP*, 108, 380
- Molinari, S., Brand, J., Cesaroni, R., & Palla, F. 1996, *A&A*, 308, 573
- Moore, T. J. T., Lumsden, S. L., Ridge, N. A., & Puxley, P. J. 2005, *MNRAS*, 359, 589
- Osterbrock, D. E. 1989, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (Research supported by the University of California, John Simon Guggenheim Memorial Foundation, University of Minnesota, et al. Mill Valley, CA, University Science Books, 1989, 422 p.)
- Paladini, R., Davies, R. D., & DeZotti, G. 2004, *MNRAS*, 347, 237
- Robitaille, T. P., Whitney, B. A., Indebetouw, R., Wood, K., & Denzmore, P. 2006, *ApJS*, 167, 256
- Roman-Lopes, A., & Abraham, Z. 2004, *AJ*, 127, 2817
- . 2006, *AJ*, 131, 951
- Roye, E. W., & Hunter, D. A. 2000, *AJ*, 119, 1145
- Sanders, D. B., Clemens, D. P., Scoville, N. Z., & Solomon, P. M. 1986, *ApJS*, 60, 1
- Schleuning, D. A. 1998, *ApJ*, 493, 811
- Schmidt, M. 1959, *ApJ*, 129, 243
- Sewilo, M., Watson, C., Araya, E., Churchwell, E., Hofner, P., & Kurtz, S. 2004, *ApJS*, 154, 553
- Shields, G. A. 1990, *ARA&A*, 28, 525

- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., Weinberg, M. D., Schneider, S., Carpenter, J. M., Beichman, C., Capps, R., Chester, T., Elias, J., Huchra, J., Liebert, J., Lonsdale, C., Monet, D. G., Price, S., Seitzer, P., Jarrett, T., Kirkpatrick, J. D., Gizis, J. E., Howard, E., Evans, T., Fowler, J., Fullmer, L., Hurt, R., Light, R., Kopan, E. L., Marsh, K. A., McCallon, H. L., Tam, R., Van Dyk, S., & Wheelock, S. 2006, *AJ*, 131, 1163
- Smith, M. D. 2004, *The origin of stars* (The origin of stars / Michael D. Smith. London (UK): Imperial College Press, ISBN 1-86094-501-5, 2004, XIII + 248 pp.)
- Stahler, S. W., & Palla, F. 2005, *The Formation of Stars* (The Formation of Stars, by Steven W. Stahler, Francesco Palla, pp. 865. ISBN 3-527-40559-3. Wiley-VCH , January 2005.)
- Walsh, A. J., Macdonald, G. H., Alvey, N. D. S., Burton, M. G., & Lee, J.-K. 2003, *A&A*, 410, 597
- Wood, D. O. S., & Churchwell, E. 1989, *ApJ*, 340, 265
- Xu, Y., Zheng, X.-W., & Jiang, D.-R. 2003, *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 3, 49
- Zinnecker, H., & Yorke, H. W. 2007, *ARA&A*, 45, 481