



***Estudio observacional de la emisión  
másica y de las fuentes de continuo en  
objetos estelares jóvenes.***

TESIS

para obtener el grado de Doctor en Ciencias (Astrofísica)

Isabel Tatiana Rodríguez Esnard

Director de tesis  
Dr. Miguel Trinidad.

Co-director de tesis  
Dr. Victor Migenes.

Departamento de Astronomía  
Universidad de Guanajuato

19 de agosto de

# Agradecimientos

Agradezco a mis asesores de tesis, Dr.Miguel Trinidad y Dr.Victor Migenes, por su apoyo, por todo el tiempo dedicado a la revisión y realización de la tesis.

A los sinodales, Dr.Carlos Arania, Dr.Solay Jeyakumar, Dr.Stanley Kurtz y la Dra.Yolanda Gomez, por haber destinado de su tiempo para la revisión de la tesis y por sus valiosos comentarios.

A la Univesridad de Guanajuato, CONACyT(Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología), CONCYTEG (Concejo de Ciencia y Tecnología de Guanajuato) quienes me apoyaron económicamente para poder llevar a cabo dicha tarea.

Al Departamento de Astronomía de la División de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad de Guanajuato (DA-DCNyUG), en especial a aquellos que han llevado la ardua tarea de mantener y desarrollar el posgrado: Dr.Victor Migenes, Dr.Roger Coziol, Dr.Klaus Peter Schóeder y Dr.Hector Bravo. A los profesores Dr.Heinz Andernach y Dr.César Caretta. Al personal académico y administrativo del DA, por el apoyo y recursos brindados, en especial a Laura Salas e Iran montes. A quienes compartieron conmigo desde un comienzo este largo camino, a Ilse Plauchu y Juan M Islas por su amistad.

Al Instituto de Geofisica y Astronomía (IGA) de la Agencia de Medio Ambiente (AMA) del CITMA en Cuba, por haberme apoyado durante todo el tiempo de realización de este trabajo de doctorado. Especialmente agradezco a aquellos que, a pesar de los escasos recursos han mantenido y fomentado la investigación: Dra.Lourdes Palacio, MSc.Lina Rey, Lic.Raul Martín, Dr.Ramon Enrique Taboada, Dr José Alcaide, Prof. Jorge Perez Doval y a Martha Zamora. A todos mis compañeros del IGA, a aquellos del DA, por su amistad, cariño y respeto.

A quienes me apoyaron en Cuba durante mis estancias en el extranjero, sin lo cual no hubiese sido posible realizar este trabajo, a Amaury Pupo Mir (y por sus sugerencias y comentarios a la tesis), y a mis familiares, particularmente Mirtha Esnard Cruz y Mirtha Arrechea Esnard. A Nelson Lopez por toda su ayuda. A Alejandro Cabo por su gran optimismo.

A Oscar Dalmau, por sus sugerencias a la tesis y por su amistad. A Rogelio Salinas y Roberto Cruz, quienes amablemente me recibieron en su casa y me brindaron su valiosa amistad.

A mi madre Erena Cesarina Esnard Cruz, por su constante preocupación y A mi padre José Rodríguez Zamora, quien siempre que pudo me alentó y aconsejó.

Isabel T. Rodriguez Esnard

# Resumen

En esta tesis estudiamos seis regiones de formación estelar de alta masa (IRAS 18264-1152, IRAS 18566+0408, IRAS 19217+1651, IRAS 23033+5951, IRAS 23151+5912 y IRAS 06061+2151) y una región de masa intermedia (IRAS 05445+0020). Para ello, se obtuvieron nuevas observaciones realizadas con el VLA en su configuración más extendida "A" .

El estudio de las protoestrellas masivas se dificulta debido a que se encuentran profundamente embebidas dentro de núcleos densos de nubes moleculares, las cuales están compuestas de grandes cantidades de polvo, por esta razón no es posible observarlas en longitudes de onda del óptico. Además dichas estrellas son gregarias, lo cual hace complejo su estudio individual. Por otro lado, estas estrellas se encuentran a mayor distancia del Sol y evolucionan mucho más rápido que aquellas de baja masa. Por las razones anteriores, ellas no pueden ser estudiadas de forma directa, no obstante, podemos obtener información del medio en que evolucionan a través de: las regiones ionizadas (HII) por la radiación UV proveniente de dichas protoestrellas, la radiación intensa máser, las transiciones moleculares observadas en el medio, así como de la emisión milimétrica, submilimétrica e IR de los alrededores. Incluso es posible inferir algunas características de las protoestrellas embebidas, como por ejemplo, el tipo espectral.

Con el objetivo de realizar una caracterización de las regiones de formación estelar y comprender mejor cómo se forman las estrellas masivas, hemos estudiado la emisión máser de H<sub>2</sub>O y de continuo a 1.3 cm y 3.6 cm en cada una de las siete regiones de formación estelar que son interés para este trabajo. En tal sentido, determinamos los parámetros físicos de las regiones HII detectadas y examinamos las posibilidades de que los máseres de H<sub>2</sub>O estén asociados a discos circunestelares, jets, ó a regiones HII cometarias. En adición, inspeccionamos el ambiente IR en que están embebidas las fuentes detectadas.

Para una mejor comprensión y claridad de este trabajo, hemos realizado un estudio individual de cada región de formación estelar. En correspondencia con lo anterior, los capítulos son organizados en la siguiente manera. En el Capítulo 1 exponemos la importancia y objetivos de esta tesis, hacemos una breve reseña sobre el medio interestelar, la formación de regiones HII y de las estrellas en general. En el Capítulo 2 damos una introducción sobre las características físico-químicas de los principales tipos de máseres detectados en el medio interestelar, así como su rol en el proceso de formación estelar. En el Capítulo 3 describimos cómo se seleccionaron las regiones de estudio y cómo se realizaron nuestras observaciones y reducción de los datos. En los Capítulos 4, 5, 6, 7, 8 y 9 realizamos un estudio individual de cada región observada, teniendo en cuenta, princi-

palmente, las observaciones máseres de  $H_2O$  y de radio continuo, complementándose con las observaciones IR, esencialmente las obtenidas por Spitzer. Finalmente en el Capítulo 10 presentamos las discusiones y conclusiones generales, donde hacemos una comparación entre todas las fuentes detectadas y damos las conclusiones finales de este trabajo.

En todos los casos detectamos regiones ionizadas (al menos en una frecuencia) y máseres de  $H_2O$  en seis de las siete regiones investigadas. En particular:

En IRAS 19217+1651 detectamos dos regiones HII, dos grupos de máseres y un máser aislado. IRAS 19217+1651-A parece ser consistente con una región HII UC con morfología cometaria, que está asociada a máseres de  $H_2O$  y a una protoestrella tipo B0 de la ZAMS. Además hallamos que IRAS 19217+1651 se encuentra embebida dentro de una gran burbuja abierta observada en el IR.

Por otro lado, en IRAS 23033+5951 hallamos dos regiones HII UC asociadas a estrellas tipo B2 de la ZAMS, mientras que los máseres en esta región parecen estar trazando un disco circunestelar cuya estrella central, muy poco evolucionada, no ha tenido tiempo de desarrollar una región HII detectable en longitudes de onda centimétricas.

Encontramos que la emisión de continuo a 1.3 cm, en IRAS 23151+5912, parece ser consistente con una región HII HC, la cual tiene una protoestrella masiva (ZAMS tipo B1) de  $15 M_{\odot}$  embebida en su centro. Es posible que dicha protoestrella se encuentre asociada a un disco en expansión de 420 UA de radio que es trazado por los máseres de  $H_2O$  asociados a la región HII. Fueron hallados también otros dos grupos de máseres de  $H_2O$ , uno de ellos posiblemente se encuentre trazando un disco circunestelar de 86 UA con una protoestrella embebida de  $X11 M_{\odot}$ . Además, encontramos que la fuente de continuo y los tres grupos de máseres están alineados en la dirección Noreste-Suroeste, probablemente como resultado de la formación inducida.

En IRAS 18264-1152 detectamos una región HII HC (118264b) en las longitudes de onda 3.6 cm y 1.3 cm, con una estrella tipo B0.5 de la ZAMS y tres regiones con emisión máser lejos de la fuente encontrada. Los máseres detectados parecen estar asociados a flujos moleculares. En la región IRAS 18566+0408 detectamos una fuente de emisión a 1.3 cm. La fuente de continuo hallada (118566C) es consistente con una región HII HC cuya estrella embebida puede ser de tipo B0.5.

Encontramos que las cinco fuentes de radio continuo detectadas en IRAS 06061+2151 son regiones HII UC asociadas a estrellas tipo B de la ZAMS. La emisión máser de  $H_2O$  es solamente detectada hacia una de estas fuentes de radio continuo. La distribución espacial y cinemática de los máseres de  $H_2O$  en esta región es estable, o sea, no ha variado significativamente en el tiempo, confirmándose que son consistentes con flujos bipolares, donde VLA 2N es la mejor candidata a ser la fuente impulsora de los flujos en la región.

En IRAS 05445+0020 detectamos emisión de continuo en las fuentes infrarrojas

---

$5 M_{\odot}$  y  $1 M_{\odot}$  respectivamente, es decir, son fuentes de masa intermedia y de baja masa. Las fuentes de radio continuo y la emisión máser de  $H_2O$  en IRS 1 e IRS 3 están trazando un sistema de disco-OEJ-flujo.

De forma general, existe una buena correlación entre densidad de electrones y tamaños de las distintas regiones HII. Por otro lado, tenemos que los discos circunestelares de los objetos estelares de alta masa (IRAS 23151+5912) tienen un tamaño mayor que aquellos asociados a protoestrellas de masa intermedia ó baja masa (NGC 2071). Además hallamos que las regiones HII detectadas que tienen altas densidades de flujo no presentan emisión máser de  $H_2O$  cerca (IRAS 19217+1651-B, IRAS 23033+5951, IRAS 18264+1152) ó se encuentran asociadas a máseres débiles (IRAS 19217+1651-A), mientras que aquellas regiones HII con densidades de flujo débil (IRAS 06061+2151, IRAS 23151+5912 ) son asociadas con máseres más intensos. Por otro lado, en ocasiones la emisión máser intensa no está asociada a fuentes de radio continuo como sucede con IRAS 23033+5951, lo cual implica que la fuente estelar es muy joven. Las fuentes de continuo con emisión máser intensa (ejemplo: AFGL5182, IRAS23151+5912) tienden a ser más pequeñas, algunas veces no resueltas completamente (parcialmente resueltas) e hipercompactas comparadas con aquellas que tienen emisión máser débil o escasa (ejemplo: IRAS 19217+1651, IRAS 23033+5951), las cuales son resueltas y suelen ser regiones HII UC. Estas últimas características posiblemente indiquen que las fuentes estelares en las diferentes regiones HII se encuentran en distintos estados evolutivos.

# Abstract

This thesis presents an observational study of seven star formation regions. Six of them are high-mass star-forming regions (IRAS 18264-1152, IRAS 18566+0408, IRAS 19217+1651, IRAS 23033+5951, IRAS 23151+5912 and IRAS 06061+2151) and the last one is an intermediate-mass region (IRAS 05445+0020). The observations were carried out with the VLA in its "A" configuration.

Since the massive protostars are embedded in a dense core of molecular clouds and dust, they are not observed at optical wavelengths and therefore their study is difficult. Additionally, these stars are gregarious, for this reason their study is also complex. Moreover, these stars are further from the Sun and evolve faster than those of low mass.

For these reasons, they can not be studied directly. However, we can obtain information through ionized regions (HII) by the UV radiation from such protostars, the intense maser emission of several molecular transitions, and the continuum emission at millimeter, sub-millimeter and near IR wavelengths. Thus, it is even possible to infer some characteristics of embedded protostars, such as the spectral type.

In order to make a characterization of the star formation regions and to better understand how massive stars are formed, we studied the radio continuum and water maser emission at 1.3 cm and 3.6 cm wavelengths of seven star formation regions. In this regard, we determined the physical parameters of the detected HII regions. We also examined if the water masers could be associated with circumstellar disks, jets, or cometary HII regions. In addition, we studied the infrared environment of the detected radio sources.

For a better understanding and clarity of this work, we did an individual study of each star-forming region. The chapters of this thesis are organized as follows. In Chapter 1 we expose the importance and objectives of this thesis. We also provide a brief overview of the interstellar medium, the formation of HII regions and the star formation in general. In Chapter 2 we give an introduction of the physical and chemical characteristics of the main types of masers detected in the interstellar medium and, its role in the process of star formation. In Chapter 3 we describe the selection criteria of the studied regions and the observations and data reduction. In Chapters 4, 5, 6, 7, 8 and 9 we do an individual study of each observed region, considering mainly the H<sub>2</sub>O maser and radio continuum observations. In addition, this study was complemented with IR observations obtained mainly by Spitzer. Finally, in Chapter 10 we present the discussions and conclusions, where we compare all detected sources and give the final conclusions of this work.

In all cases, we detect ionized regions (at least in one frequency) and masers H<sub>2</sub>O in six of the seven regions. In particular:

In IRAS 19217+1651 it were detected two HII regions, two groups of masers and one isolated maser. IRAS 19217+1651-A appears to be consistent with a UC HII region with a cometary morphology, which is associated with H<sub>2</sub>O masers and a ZAMS B0-type protostar. In addition, we found that IRAS 19217+1651 is embedded within a large broken bubble observed in the IR.

On the other hand, in IRAS 23033+5951 we found two UC HII regions associated with ZAMS B2-type stars, while the masers in this region seems to be tracing a circumstellar disk whose central star, very little evolved, has developed an HII region detectable at centimeter wavelengths.

Furthermore, we found that the continuum emission at 1.3 cm in IRAS 23151+5912 seems to be consistent with HC HII region, which has a massive protostar (ZAMS B1) 15 M<sub>⊙</sub> embedded at its center. It is also possible that the protostar is associated with an expanding disk of 420 AU radius that is traced by the H<sub>2</sub>O masers associated with the HII region. We also found two other groups of H<sub>2</sub>O masers. One of them is possibly tracing a circumstellar disk of 86 AU with an embedded protostar --11 M<sub>⊙</sub>. In addition, we found that continuum source and the three groups of masers are aligned northeast-southwest direction, probably as a result of an induced formation.

In IRAS 18264-1152 was detected an HII region HC (118264b) at 3.6 cm and 1.3 cm wavelengths, a ZAMS B0.5-type star and three maser spots away from the continuum source found. The detected masers appear to be associated with molecular outflows. In the region IRAS 18566+0408 we only detected a continuum emission source at 1.3 cm. The source (I18566C) is consistent with an HC HII region, whose star can be of B0.5 type.

We detected five continuum sources in IRAS 06061+2151. These sources are UC HII regions associated with B-type ZAMS stars. The H<sub>2</sub>O maser emission is only detected toward the VLA N2 sources. The spatial and kinematical distribution of the H<sub>2</sub>O maser features has remained stable for several years, and we confirmed that tracing a bipolar outflows, where VLA 2N is the best candidate to drive the outflow in this region.

The observation toward IRAS 05445+0020 region shows continuum emission in the infrared sources IRS 1 and IRS 3 at 1.3 cm and 3.6 cm and a new source, VLA 1, was detected between IRS 1 and IRS 3 at both wavelengths. IRS 1 and IRS 3 are radio jets and they seem to be the driving sources of large-scale outflows observed in H<sub>2</sub> and CO, respectively. Additionally, we detected H<sub>2</sub>O maser emission in IRS 1, IRS 2 and VLA 1. The H<sub>2</sub>O masers are tracing part of circumstellar disk in IRS 1 and IRS 3. We estimated that the sources IRS 1C and IRS 3C have central masses of about 5 M<sub>⊙</sub> and 1 M<sub>⊙</sub>, respectively. In this way, we concluded that the radio continuum and the maser emission in IRS 1 and IRS 3 are tracing disk-YOS-outflow systems.

In general, there is a good correlation between the electron density and the size of the HII regions. On the other hand, the circumstellar disks of high-mass stellar objects (IRAS 23151+5912) are larger than those related to intermediate-mass protostars or low-mass (NGC 2071). In addition, we found that the detected HIT regions with high flux densities do not show maser emission of H<sub>2</sub>O by (IRAS 19217+1651-B, IRAS 23033+5951, IRAS 18264+1152) or they are associated with weak masers (IRAS

HIT regions with weak flux densities (IRAS 06061+2151, IRAS 23151+5912) are associated with more intense masers. On the other hand, sometimes the intense maser emission is not associated with radio continuum sources as with IRAS 23033+5951. This implies that the stellar source is very young.

Continuum sources associated to intense maser emission (eg AFGL5182, IRAS 23151+5912) tend to be smaller (partially resolved) compared to those sources (usually resolved) associated to weak maser emission (eg IRAS 19217+1651, IRAS 23033+5951).

These latter features may indicate that the stellar sources in the different HIT regions are at different development stages.