

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

**ESTUDIO DE LA BAJA TASA DE FORMACIÓN ESTELAR EN
SAGITARIO C**

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE FÍSICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

KAREN MARINA MARTÍNEZ ACOSTA

`karen.martinez@epn.edu.ec`

Director: DR. ERICSSON LÓPEZ IZURIETA

`lopezericsson@gmail.com`

QUITO, OCTUBRE 2020

DECLARACIÓN

Yo KAREN MARINA MARTÍNEZ ACOSTA, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Karen Marina Martínez Acosta

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por KAREN MARINA MARTÍNEZ ACOSTA, bajo mi supervisión.

Dr. Ericsson López Izurieta
Director del Proyecto

AGRADECIMIENTO ESPECIAL

En primera instancia quiero agradecer al Ph.D. Jairo Vladimir Armijos Abendaño por su esfuerzo al realizar el presente trabajo de investigación, a pesar que por razones fuera de mi alcance no pudo formar parte mismo de manera oficial, quiero hacerle saber que en cada momento le estuve y le estoy agradecida por toda enseñanza compartida durante la realización este trabajo de titulación y siento que la única manera oficial que me queda para mostrar mi agradecimiento por toda la ayuda dada es hacerlo de esta manera ya que con su profesionalismo y la incalculable e inagotable ayuda recibida a lo largo del desarrollo del presente proyecto de investigación. Así también su demostración de entusiasmo y dedicación al transmitir su conocimiento en cada paso y en todas las áreas permitieron surgir con éxito este trabajo de investigación, por estos motivos le estoy enormemente agradecida ya que con su ayuda la finalización de este proyecto de investigación que ha representado un paso fundamental en mi formación como Física ha sido posible.

AGRADECIMIENTOS

La otra parte fundamental para la culminación de este trabajo de investigación se la debo agradecer al PhD. Ericson Daniel López Izurieta, director del Observatorio Astronómico de Quito, quien mostrando su inagotable y desinteresada ayuda, su infinita paciencia y sobretodo y en todo momento mostrar su interés en mi crecimiento profesional ha sido de gran ayuda en el proceso y culminación de este proyecto de investigación. Ya que es una persona que en todo momento y en cada paso de la realización de este trabajo de investigación demostró poseer un gran sentido de profesionalismo, y fue una guía de como ser un profesional funcional, para la República del Ecuador.

DEDICATORIA

A Wilman y Fernanda por ellos vale la pena intentarlo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Medio Interestelar	2
1.2. Nubes Moleculares	3
1.3. Centro Galáctico	4
1.3.1. Zona Molecular Central	5
1.3.2. Complejo Molecular Sagitario C	7
1.4. Trazadores moleculares	9
1.4.1. HCO^+ : Ion Formilo	10
1.4.2. CH_3CN : Molécula de Acetonitrilo	11
1.4.3. H_2 : Hidrógeno molecular	12
1.4.4. ^{13}CO : Monóxido de Carbono	12
1.5. Transferencia Radiativa	13
2. Emisión en Infrarrojo de Sgr C	17
2.1. Propiedades físicas	17
2.1.1. Emisión térmica de polvo	17
2.1.2. Temperatura de polvo: T_d	18
2.2. Radiación de Cuerpo negro	19
2.2.1. Radiación de Cuerpo Gris	20
2.2.2. Distribución Espectral de Energía (SED)	21
2.3. Análisis y Procesamiento de Datos	21
2.3.1. Descripción de los datos	22
2.3.2. Determinación de la Distribución Espectral de Energía: SED	25
2.3.3. Estimación de la temperatura de polvo	28
2.4. Resultados	31

3. Propiedades Físicas de Sgr C	34
3.1. Condiciones físicas del gas molecular	34
3.2. Propiedades físicas del gas	35
3.3. Modelo Gaussiano	36
3.4. Análisis y Procesamiento de Datos	36
3.4.1. Descripción de los datos	37
3.4.2. Determinación del espectro promedio	39
3.4.3. Obtención de la temperatura cinética	45
3.5. Resultados	48
4. Tasa de Formación Estelar en Sgr C	51
4.1. Formación Estelar de baja y alta masa	51
4.2. Relación Kennicutt-Schmidt	53
4.3. Análisis y Procesamiento de Datos	55
4.3.1. Descripción de los datos	55
4.3.2. Determinación de los parámetros observacionales y derivados	55
4.3.3. Cálculo de la densidad de la tasa de formación estelar: Σ_{SFR}	63
4.4. Resultados	66
5. Estudio morfológico en el Complejo Molecular Sagitario C	69
5.1. Morfología en las nubes moleculares en el Centro Galáctico	69
5.1.1. Movimiento del gas en la Zona Molecular Central	70
5.2. Análisis y procesamiento de datos	72
5.2.1. Descripción de los datos	72
5.2.2. Obtención de mapas de distribución espacial de gas denso	73
5.3. Resultados	81
6. Conclusiones	86
Bibliografía	89

Índice de figuras

1.1. Principales estructuras presentes en la Zona Molecular Central.	6
1.2. Imagen compuesta del complejo molecular Sgr C en diferentes longitudes de onda.	8
2.1. Emisión térmica de polvo en el rango del infrarrojo.	18
2.2. Comparación de la Radiación de cuerpo gris con un cuerpo ideal y un cuerpo real.	20
2.3. Respuesta espectral efectiva del fotómetro PACS.	23
2.4. Observaciones de la parte occidental de la CMZ realizadas por el instrumento PACS de Herschel.	23
2.5. Observaciones de la parte occidental de la CMZ realizadas por el instrumento SPIRE de Herschel.	24
2.6. Centros usados para la fotometría en las regiones de estudio: Centro de Sgr C y Centro de emisión del HCO^+	26
2.7. Distribución espectral de energía de las regiones de estudio: Centro de Sgr C y centro de emisión del HCO^+	28
2.8. Diagrama de flujo del procesamiento de datos para la estimación de la T_d . . .	30
2.9. Resultado del ajuste de cuerpo gris para estimar la T_d en las regiones de estudio: Centro de Sgr C y Centro de emisión del HCO^+	31
3.1. Cubo de datos de emisión para la molécula de CH_3CN en el complejo molecular Sgr C.	38
3.2. Espectro de emisión y líneas de transición de la molécula CH_3CN en el complejo molecular Sgr C	39
3.3. Región de estudio espectroscópico en el complejo molecular Sgr C: Centro de Sgr C.	41
3.4. Región de estudio espectroscópico en el complejo molecular Sgr C: Centro de emisión HCO^+	41

3.5. Espectro promedio obtenido del trazador molecular CH ₃ CN para la región de estudio: Centro de Sgr C.	44
3.6. Espectro promedio obtenido del trazador molecular CH ₃ CN para la región de estudio: Centro de emisión del HCO ⁺	44
3.7. Diagrama de flujo del procesamiento de datos para la estimación de la T _k . . .	47
3.8. Resultado del ajuste gaussiano de espectros sintéticos para estimar la T _k en la región de estudio: Centro de Sgr C.	49
3.9. Resultado del ajuste gaussiano de espectros sintéticos para estimar la T _k en la región de estudio: Centro de emisión del HCO ⁺	49
4.1. Cubo de datos de la emisión molecular del ¹³ CO del complejo molecular Sgr C.	56
4.2. Espectro promedio y transición principal de la emisión del monóxido de carbono ¹³ CO en el complejo molecular Sgr C.	58
4.3. Espectro promedio para estimar el área integrada de la emisión del monóxido de carbono ¹³ CO en el complejo molecular Sgr C.	59
4.4. Mapa integrado de la emisión del ¹³ CO en el complejo molecular Sgr C: Área de la nube y Área del píxel.	61
4.5. Diagrama de flujo del procesamiento de datos para la estimación de la Σ _{SFR} . .	65
4.6. Resultado de la estimación de la Σ _{SFR} : Relación Kennicutt-Schmidt para el complejo molecular Sgr C.	67
5.1. Escenarios descriptivos del movimiento del gas interestelar en la CMZ.	71
5.2. Cubo de datos de emisión del ion formilo HCO ⁺ en el complejo molecular Sgr C.	74
5.3. Mapas integrados de emisión del HCO ⁺ en el complejo molecular Sgr C: En el rango de velocidad (-100,-70) km/s.	75
5.4. Mapas integrados de emisión del HCO ⁺ en el complejo molecular Sgr C: En el rango de velocidad (-70,-40) km/s.	75
5.5. Mapas integrados de emisión del HCO ⁺ en el complejo molecular Sgr C: En el rango de velocidad (-40,-10) km/s.	75
5.6. Composición 1: Composición de tres mapas para el estudio de estructuras morfológicas en el complejo molecular Sgr C en el rango de velocidades (-100, -90) km/s.	77
5.7. Composición 2: Composición de tres mapas para el estudio de estructuras morfológicas en el complejo molecular Sgr C en el rango de velocidades (-90, -80) km/s.	77

5.8. Composición 3: Composición de tres mapas para el estudio de estructuras morfológicas en el complejo molecular Sgr C en el rango de velocidades (-80, -70) km/s.	78
5.9. Composición 4: Composición de tres mapas para el estudio de estructuras morfológicas en el complejo molecular Sgr C en el rango de velocidades (-70, -60) km/s.	78
5.10. Composición 5: Composición de tres mapas para el estudio de estructuras morfológicas en el complejo molecular Sgr C en el rango de velocidades (-60, -50) km/s.	79
5.11. Composición 6: Composición de tres mapas para el estudio de estructuras morfológicas en el complejo molecular Sgr C en el rango de velocidades (-50, -40) km/s.	79
5.12. Composición 7: Composición de tres mapas para el estudio de estructuras morfológicas en el complejo molecular Sgr C en el rango de velocidades (-40, -30) km/s.	80
5.13. Composición 8: Composición de tres mapas integrados para la obtención de estructuras morfológicas en el complejo molecular Sgr C en el rango de velocidades (-30, -20) km/s.	80
5.14. Composición 9: Composición de tres mapas integrados para la obtención de estructuras morfológicas en el complejo molecular Sgr C en el rango de velocidades (-20, -10) km/s.	81
5.15. Resultado del estudio cualitativo morfológico del complejo molecular Sgr C: Composición de tres mapas de emisión en diferentes rangos de velocidades. .	82

Índice de cuadros

1.1. Componentes del Medio Interestelar: Gas	2
1.2. Propiedades del Centro y Disco Galáctico	5
1.3. Líneas de emisión observadas en el CH ₃ CN para el estudio del complejo molecular Sgr C.	11
2.1. Resultados de la fotometría de apertura realizada en los centros de estudio. .	27
2.2. Resultados para la estimación de la T_d en el complejo molecular Sgr C.	31
3.1. Parámetros para la espectroscopía de las dos regiones de estudio en el complejo molecular Sgr C.	43
3.2. Resultados del modelo de ajuste gaussiano para la estimación de la T_k	48
4.1. Resultados obtenidos del estudio de formación estelar en el complejo molecular Sgr C.	66

Notación

$T_d[K]$ = temperatura de polvo

$F[Jy]$ = densidad de flujo

$T_K[K]$ = temperatura cinética

$T_{ex}[K]$ = temperatura de excitación

$T_{L,\nu}[K]$ = temperatura de línea

$l[pc]$ = tamaño lineal

$\alpha[arcsec]$ = tamaño angular

$N_{H_2(^{13}CO)}[cm^{-2}]$ = densidad de columna de hidrógeno molecular

$N_{^{13}CO}[cm^{-2}]$ = densidad de columna de monóxido de carbono

$A_{pixel}[cm^2]$ = área del píxel

$A_{cloud}[pc^2]$ = área de la nube

$\Sigma_{gas}[M_{\odot}pc^{-2}]$ = densidad superficial de gas frío

$\Sigma_{SFR}[M_{\odot}yr^{-1}kpc^{-2}]$ = densidad superficial de tasa de formación estelar

Resumen

La Zona Molecular Central (CMZ, por sus siglas en inglés) es una región química y dinámicamente compleja del Centro Galáctico que contiene del 3 % al 10 % del gas molecular total de la Galaxia, concentrado en nubes moleculares turbulentas y densas. Estas nubes se caracterizan por altas temperaturas cinéticas ~ 100 K y densidades altas de hidrógeno molecular $\sim 10^4 \text{cm}^{-3}$. A pesar de estas características es intrigante que la tasa de formación estelar en la CMZ es un factor de 10-100 veces menor de lo esperado para la gran cantidad de gas denso y polvo contenido en esta región. Sagitario (Sgr) C es la única región de formación estelar conocida situada al oeste de la parte interna de la CMZ y se ubica en un radio < 100 pc que es donde ocurre casi toda la formación estelar de la CMZ. En esta investigación se caracterizó las propiedades físicas dominantes del complejo molecular Sgr C, en diferentes longitudes de onda, cuyos resultados podrían ayudar a aclarar porque existe poca formación estelar en esta región de la CMZ. Para ello se realizó un estudio en diferentes longitudes de onda haciendo uso de datos libres de cuatro telescopios en la banda del radio e infrarrojo. Esto permitió realizar un estudio de la emisión del polvo en el infrarrojo lejano (70, 160, 250, 350, 500 μm) y estimar la temperatura de la nube, también se realizó un estudio espectroscópico en radio (89.19, 91.99 y 110 GHz) que permitió estimar la temperatura cinética, la densidad superficial de la tasa de formación estelar y realizar un estudio cualitativo de las estructuras morfológicas presente en el complejo molecular Sgr C.

Del estudio en infrarrojo en las regiones del complejo molecular Sgr C se obtuvo como resultado una temperatura de polvo de ~ 19 K y ~ 16 K que va acorde con lo conocido en las nubes moleculares que presentan formación estelar activa. Además, del estudio en radio se estimó una temperatura cinética ~ 58 K y ~ 118 K que influyen en la química del gas, ya que una alta temperatura cinética facilita los procesos de formación estelar. Del estudio en radio para la formación estelar se obtuvo el valor de la densidad superficial de la tasa de formación estelar de $0.004 \text{M}_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$ que cuantitativamente mostró que el complejo molecular Sgr C posee una baja tasa de formación estelar. Estas propiedades en conjunto con el estudio cualitativo morfológico del movimiento del gas en este complejo molecular permitieron estimar que existe una correlación entre los estudios de emisión de polvo y la emisión molecular en radio en cuanto a la cinemática de la nube y en las zona donde se presenta formación estelar pudimos observar cavidades en la emisión molecular.

Abstract

The Central Molecular Zone (CMZ) is a chemically and dynamically complex region of the Galactic Center that contains 3% to 10% of the total molecular gas of the galaxy, concentrated in turbulent and dense molecular clouds. These clouds are characterized by high $\sim 100\text{K}$ kinetic temperatures and elevated molecular hydrogen densities $\sim 10^4\text{cm}^{-3}$. Despite these characteristics, it is intriguing that the star formation rate in the CMZ is a factor of 10-100 times less than expected considering the large amount of dense gas and dust contained in this region. Sagittarius (Sgr) C is the only known star formation region located west of the inner part of the CMZ and is located in a radius $< 100\text{ pc}$ where almost all CMZ star formation occurs. This investigation determined the dominant physical conditions of the Sgr C molecular complex, in the regions that characterize it, the results of which could help to clarify why there is a low star formation in this region of the CMZ. To characterize this complex, a study was carried out at different wavelengths using free data from four telescopes in the radio and infrared bands. This to analyze the emission of dust in infrared and estimate the temperature of the cloud, a radio spectroscopic study was also carried out that allowed estimating the kinetic temperature, the surface density of the rate of star formation and a qualitative study of the morphology present in the Sgr C molecular complex.

The results of the investigation showed that in the infrared study of the two regions that characterize the Sgr C molecular complex, a dust temperature of $\sim 19\text{ K}$ and $\sim 16\text{ K}$ was estimated, which is in accordance with what is known in molecular clouds; In addition, in the two regions that characterize, high kinetic temperature of $\sim 58\text{ K}$ and $\sim 118\text{ K}$ was estimated, which is one of the key properties of ZMC clouds, since they influence gas chemistry, showing that a high kinetic temperature facilitates the stellar formation processes. From the study of star formation, the surface density value of the star formation rate of $0.004\text{ M}_{\odot}\text{yr}^{-1}\text{kpc}^{-2}$ was obtained, which quantitatively confirmed that the molecular complex Sgr C has a low star formation rate. These properties together with the qualitative morphological study of gas motion in this molecular complex allowed us to estimate that there is a correlation between dust emission studies and radio molecular emission in terms of cloud kinematics and in the areas where presents star formation we could observe cavities in the molecular emission.

Capítulo 1

Introducción

Sagitario C (Sgr C) es un complejo de nubes moleculares densas y frías que se encuentra en la parte interna de la Zona Molecular Central que alberga formación estelar lenta provocando una baja tasa de formación estelar en su interior, esta misma característica se ha observado en otras regiones de formación estelar de la CMZ [1]. La caracterización de propiedades físicas en diferentes longitudes de onda en estas regiones de formación estelar en ambientes extremos podrían ayudar a entender porque no existe una formación estelar continua en la CMZ [1].

En este proyecto de investigación se caracterizaron propiedades físicas, en diferentes longitudes de onda, presentes en el complejo molecular Sgr C. En el capítulo dos se estimó la temperatura de polvo T_d mediante la emisión en el infrarrojo lejano (FIR) del polvo que es un trazador de propiedades físicas a bajas temperaturas [2]. En el capítulo tres la T_k se estimó usando la propiedad de que el gas molecular es dominante en las nubes moleculares y emite en longitudes de onda milimétricas y sub-milimétricas mediante varias moléculas llamadas trazadores que permiten realizar estudios espectroscópicos [3].

En el capítulo cuatro se estimó la densidad superficial de la tasa de formación estelar Σ_{SFR} que ayuda a comprender cómo se da el proceso de convertir gas en estrellas en el medio interestelar [4]. Esto se realizó mediante el estudio espectroscópico de un trazador asociado a este proceso con el cual se determinó la cantidad de estrellas que se producen en el complejo molecular Sgr C. Finalmente en el capítulo cinco se estudió de manera cualitativa las estructuras morfológicas del complejo molecular Sgr C asociadas al movimiento del gas en esta región de la CMZ [5] mediante un trazador molecular de gas denso.

Para este proyecto de investigación se han usado varios trazadores de propiedades físicas en el ISM como la emisión en infrarrojo del polvo o la emisión molecular en radio frecuencias. Estas moléculas usadas fueron el ión formilo (HCO^+), el acetonitrilo (CH_3CN) y el monóxido de carbono (^{13}CO) y la emisión en radio-continuo del hidrógeno atómico neutro (HI).

1.1. Medio Interestelar

El medio interestelar (ISM, por sus siglas en inglés) es todo el material que existe entre las estrellas, compuesto en un 99 % de gas y 1 % de polvo [6] que se ven excitadas por diferentes fuentes de energía [7]. El polvo en el ISM se encuentra formado por silicatos y grafitos en escala submicrónica ($\sim 0.1\mu\text{m}$), mientras que la fase gaseosa del ISM esta formada principalmente por hidrógeno en un 89 %, seguido de un 9 % de helio (He) y 2 % de elementos más pesados. En este entorno se presentan las condiciones que permiten el nacimiento de nuevas estrellas [8].

COMPONENTES DEL MEDIO INTERESTELAR

Tanto la fase gaseosa como la fase del polvo coexisten en un equilibrio aproximado de presión, que es proporcional a la densidad del número de partículas y a la temperatura [9]. Además, presentan densidades y temperaturas que varían en un gran rango desde el material denso ($>10\text{cm}^{-3}$) y frío ($\sim 10\text{--}100\text{K}$), hasta condiciones de gases tenues (0.1 a 1cm^{-3}) y calientes ($\sim 10^6\text{K}$) [8].

Gas en el Medio Interestelar

En el ISM el gas molecular es el elemento más abundante y forma parte del material primordial para la formación estelar y evolución galáctica. Las fases en las que se puede encontrar el gas interestelar se basa en el estado en el que se encuentre el hidrógeno en una región [6].

Las tres fases principales son: en el medio neutro frío (CNM, por sus siglas en inglés) el hidrógeno atómico frío (HI), el medio interestelar caliente (HIM, por sus siglas en inglés) que se encuentra dividida en el medio neutro caliente (WNM, por sus siglas en inglés) y el medio ionizado caliente (WIM, por sus siglas en inglés), en la siguiente tabla se muestran la temperatura y densidad de las diferentes fases del gas interestelar:

Fase	Componente	Temperatura [K]	Densidad [cm^{-3}]	Fracción de ionización
Neutro Frío	CNM	50-100	20-50	$\sim 10^4$
Neutro Caliente	WNM	6000-10000	0.2-0.5	~ 0.1
Ionizado Caliente	WIM	~ 8000	0.2-0.5	1.0
Caliente	HIM	$\sim 10^6$	$\sim 10^{-2}$	1.0

Cuadro 1.1: Componentes del gas presente en el medio interestelar. Tomado de [8]

La temperatura de cada fase indica la región del espectro electromagnético donde se observa mejor el gas. Por ejemplo la fase más caliente (HIM) se detecta en rayos X y por radiación UV. La fase más fría (CNM y la componente molecular) se observan mejor en radio e infrarrojo [10].

Polvo en el Medio Interestelar

Las nubes de polvo interestelar son ambiente fríos que ayudan a la producción y posterior preservación de las moléculas [11]. Los tamaños de los granos de polvo varían en gran manera desde granos pequeños (VSG, por sus siglas en inglés) que son abundantes con tamaños de 1-10 nm, hasta granos grande (BG, por sus siglas en inglés) con tamaños de varias decenas hasta ~ 100 nm, que son minoría. Otra componente de los granos de polvo son los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH, por sus siglas en inglés) que son moléculas grandes de carbono, es decir son la materia orgánica en el ISM [12]. El polvo es el causante de varios cambios de las propiedades del ISM, como: la extinción óptica y UV causado por las partículas de polvo VSG, el enrojecimiento que se debe a que la luz azul es absorbida por el polvo mientras la luz roja es dispersada y la polarización de la luz estelar causada por la absorción de los fotones por el polvo [10].

FUENTES DE ENERGIA EN EL MEDIO INTERESTELAR

En el medio interestelar existen varias fuentes de energía, la principal es la proveniente de las estrellas conocida como **Campo de Radiación estelar**. Otra fuente son **Campos Magnéticos** que son los responsables de afectar gas ionizado en el ISM y son observables a través de distintas polarizaciones, como la polarización de luz estelar y polarización de la emisión continua en el infrarrojo lejano [6].

Los **Rayos Cósmicos** que pueden ser de alta energía (100 MeV), se producen cuando los protones interactúan con el ISM y contribuyen a la densidad de energía del ISM. Los rayos cósmicos de baja energía influyen en el calentamiento y polarización del gas interestelar; y la **Energía Cinética del ISM** que se genera por los vientos de estrellas tempranas, outflows y explosiones de supernova que barren y comprimen el ISM provocando turbulencias que modifican la morfología del ISM [6].

1.2. Nubes Moleculares

Las nubes moleculares son regiones densas y frías del ISM donde ocurre la formación estelar. Constituyen la mayor parte del gas molecular frío en la Galaxia y poseen estructuras inhomogeneas, alargadas y filamentosas [11]. Consiste en una estructura jerárquica dentro de la fase molecular fría del medio interestelar [9]. En base a las diferentes condiciones físicas y químicas en las cuales se encuentran las nubes interestelares se las puede clasificar en base a su opacidad y tamaño:

EN BASE A SU OPACIDAD

Se puede dividir en tres las fases que muestran el camino que siguen las nubes moleculares hasta colapsar: *Nubes difusas* que son regiones de densidades altas ($n_H \sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$) y temperaturas relativamente bajas ($T \sim 100 \text{ K}$) provocando que los fotones provenientes

de las fuentes de energía del medio interestelar penetren completamente en la nube para disociar e ionizar mas moléculas del interior, se encuentra compuesta principalmente de hidrógeno atómico neutro HI [13]. La siguiente fase son las *Nubes traslúcidas* que se producen cuando la turbulencia y las colisiones nube-nube provocan que las nubes colapsen en densidades mayores ($n_H \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$) y temperaturas más bajas a las anteriores $< 50 - 80 \text{ K}$ compuesta por una interfase de hidrógeno molecular y atómico; y finalmente se tiene las *Nubes Oscuras y Densas* que se forman a mayor contracción y presentan densidades mayores ($n_H \sim 10^{4-6} \text{ cm}^{-3}$) [14] y temperaturas muy bajas ($T 10-20 \text{ K}$), esta fase está compuesta principalmente de hidrógeno molecular H_2 [7].

EN BASE A SU TAMAÑO

La clasificación en base a su tamaño es: **Nubes Moleculares pequeñas** con tamaños $\sim 20 \text{ pc}$ y masas $\sim 10^4 M_\odot$ asociada a formación estelar de baja y media masa [9] y temperaturas bajas $T_k \sim 20 \text{ K}$ [15]. Dentro de esta clasificación también se encuentran los *Núcleos* que pueden ser estelares con tamaños de $\sim 0.1 \text{ pc}$ y masas de $0.5-5 M_\odot$ donde la inestabilidad gravitatoria formaría una sola estrella o sistema planetario o en agrupación donde se tienen tamaños de $\sim 1 \text{ pc}$ y masas de $10-1000 M_\odot$ [9]. Las **Nubes Moleculares Gigantes (GMC)** que son las componentes de mayor masa en el ISM, están asociadas a la formación estelar masiva [15]. Estas nubes presentan tamaños de $\sim 100 \text{ pc}$ y masas $\sim 10^5-10^6 M_\odot$ donde la cinemática, densidades y temperaturas van acorde a las nubes moleculares pequeñas [12].

1.3. Centro Galáctico

El Centro Galáctico (GC, por sus siglas en inglés) se encuentra a una distancia de $\sim 8.5 \text{ kpc}$ [16] y presenta una extinción en el óptico y UV debido a la gran cantidad de polvo que existe desde el observador al Centro Galáctico, dejando libre la observación del mismo en el infrarrojo (IR), el radio, entre otros [17]. En la siguiente tabla se muestran las propiedades del Centro Galáctico, del disco galáctico y las nubes presentes en ambas regiones:

Propiedades	Centro Galáctico (500pc)	Disco Galáctico
Gas atómico [M_{\odot}]	$10^{6,4}$	10^9
Gas molecular [M_{\odot}]	$10^{7,9}$	10^9
Componente estelar [M_{\odot}]	$10^{9,8}$	10^{11}
Densidad promedio del gas $\langle n \rangle (\text{cm}^{-3})$	100	1-2
Densidad superficial [$M_{\odot} \text{pc}^{-2}$]	≥ 100	~ 5
Tasa de formación estelar [$M_{\odot} \text{yr}^{-1}$]	0.3-0.6	~ 5.5
Propiedades	Nubes centrales	Nubes del disco
Tamaño promedio [pc]	20-30	-
Dispersión de velocidades [$km \cdot s^{-1}$]	15-30	< 5
Densidad del gas [cm^{-3}]	$\sim 10^{4,0}$	$\sim 10^{2,5}$
Temperatura del gas [K]	50-70/200	~ 15
Temperatura de polvo [K]	21	15-22
Campo magnético [mG]	2	≥ 0.1

Cuadro 1.2: Propiedades del Centro Galáctico, del disco galáctico y de las nubes moleculares presentes en ellos. Cuadro tomado de [17].

En la tabla 1.2 se muestra que la cantidad de gas presente en el Centro Galáctico es comparable con toda la extensión del disco galáctico, así como la densidad promedio del gas y la dispersión de velocidades son mayores en el Centro Galáctico que en todo el disco de la Galaxia. la región de mayor importancia en el estudio de formación estelar en el Centro Galáctico es la zona molecular central [17].

1.3.1. Zona Molecular Central

La Zona Molecular Central (CMZ, por sus siglas en inglés) contiene 10% del gas molecular denso total de la Galaxia concentrado en forma de nubes moleculares turbulentas y densas. Albergando algunas de las nubes moleculares y cúmulos estelares más masivos y densos, tiene un tamaño de ~ 200 pc en su parte interna. La parte interna de la CMZ se encuentra situada entre $(-2^{\circ}.5 \leq l \leq 3^{\circ}.5, |b| \leq 0^{\circ}.5)$, posee del 5 al 10% de la luminosidad continua del infrarrojo de la Galaxia [18]. En la CMZ puede observarse una distribución del gas asimétrica con respecto al Centro Galáctico tanto en velocidad como en posición ya que las nubes se mueven a velocidades positivas en un 75% y las 3/4 partes del gas se encuentran presentes en longitudes galácticas positivas [17] esto se puede observar en la siguiente gráfica:

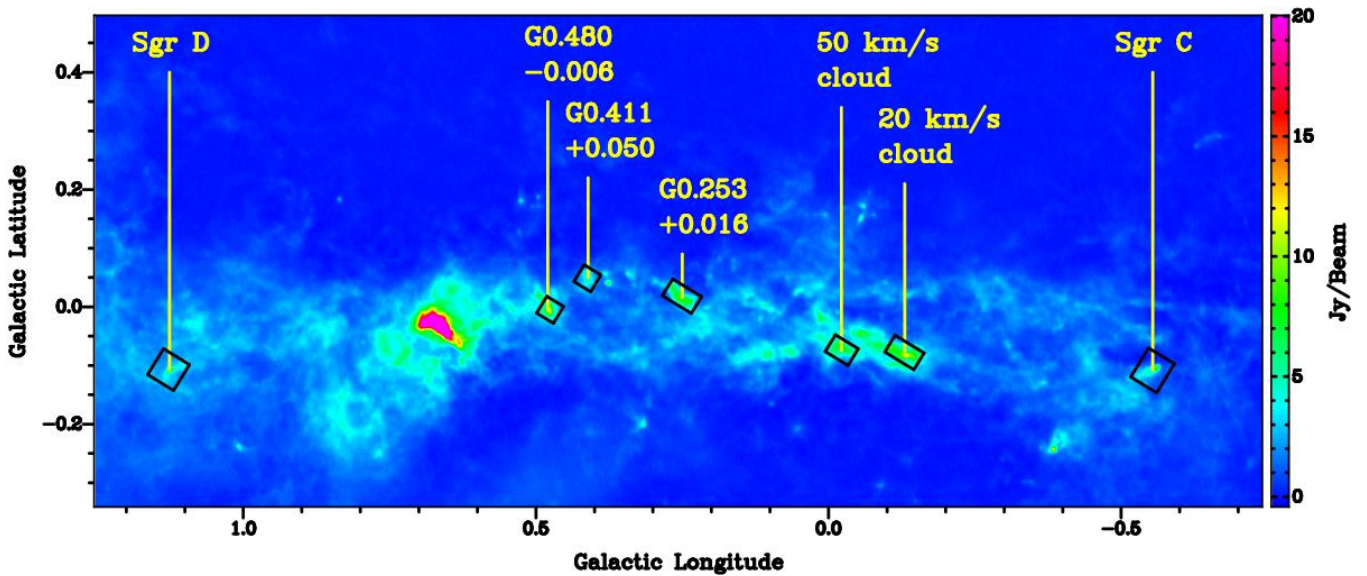


Figura 1.1: Principales estructuras de estudio del proyecto ATLASGAL de la distribución de gas en la Zona Molecular Central en emisión infrarroja a $870\mu\text{m}$. Figura tomada de [18].

La figura 1.1 muestra la distribución del gas al rededor del Centro Galáctico en la Zona Molecular Central interna (~ 200 pc) y los principales complejos de nubes mostrados a una longitud de onda de $870\mu\text{m}$ [18]. En la parte derecha de la figura se marca el único complejo de nubes moleculares de la región occidental de la CMZ donde se presenta formación estelar: Sagitario C. A pesar de tener una gran cantidad de gas molecular y atómico y presentar densidades altas, la tasa de formación de estrellas presente en la CMZ es un factor de 10-100 veces más bajo de lo esperado en esta región del Centro Galáctico [17]. Esto podría deberse a la falta de núcleos densos de alta masa que puedan formar estrellas en cantidades significantes [1].

ESTRUCTURAS MORFOLÓGICAS DE LA ZONA MOLECULAR CENTRAL

Existen varias regiones y estructuras presentes en la parte interna de la CMZ, que varían en su naturaleza y efectos en el medio interestelar como:

Sagitario (Sgr) A: Es el complejo más estudiado del Centro Galáctico ya que presenta varias regiones importantes en su interior como Sgr A^{*} en cuyo interior se halla un agujero negro supermasivo que contiene una masa de $\sim 3.7 \times 10^6 M_{\odot}$ y también presenta nubes de gran dinámica como +20 y +50 km s^{-1} , estas son las principales estructuras que constituyen el complejo molecular de Sgr A [17].

Sgr B: Es de los complejos con mayor formación estelar en la parte este de la CMZ, está situado a ~ 80 pc de Sgr A^{*} y se encuentra formado principalmente por Sgr B1 que presenta fuentes extensas filamentosas y Sgr B2 conocida por ser una de las regiones de formación estelar más activa de la Galaxia [17].

Filamentos no térmicos: (NFT, por sus siglas en inglés) son la consecuencia más clara

de los intensos campos magnéticos presentes en la CMZ, su morfología es larga, recta y estrecha, se hallan únicamente en el Centro Galáctico y son en su gran mayoría perpendiculares al plano de la Galaxia. Se piensa que son "tubos" de flujo magnético que se encuentran iluminados por la emisión de radiación sincrotrón proveniente de una fuente local aún desconocida [17].

En las nubes moleculares presentes en la Zona Molecular Central bajo estas condiciones extremas se muestra que existen más estrellas masivas que en el disco galáctico [17]. Existen tres cúmulos estelares con formación estelar masiva, estos son: Cúmulo Central, Cúmulo de los Arcos y Cúmulo del Quintuple, estos cúmulos albergan desde 30 (cúmulo central) hasta 150 (Cúmulo de Arcos) estrellas y alrededor de 30 estrellas masivas de hasta $120 M_{\odot}$ (Cúmulo quintuple) y una estrella supermasiva (La Pistola) [17].

Otro de los complejos moleculares presentes en la Zona Molecular Central es Sagitario C que presenta las mismas condiciones extremas que los otros complejos moleculares mencionados con anterioridad. Estos complejos de nubes moleculares representan $\sim 40\%$ de la emisión de gas molecular total en la Zona Molecular Central [19].

1.3.2. Complejo Molecular Sagitario C

Es uno de los complejos moleculares más grandes presentes en la CMZ [19], se encuentra centrado en $(l,b)=(-0.53, -0.107)$ en coordenadas galácticas o $(R.A, Dec)= (17:44:43.20; -29:27:53.7)$ en coordenadas ecuatoriales (EQ2000) y se ubica a una distancia de 8.5 kpc del sol [18]. Algunos de los parámetros conocidos en Sgr C son: la masa del material neutro $\sim 5 \times 10^5 M_{\odot}$, la densidad de H_2 de $\sim \times 10^4 \text{cm}^{-3}$ [20], que vuelve a este complejo una región de alta densidad, y la densidad de columna de H_2 que puede llegar a ser $\sim 2 \times 10^{23} \text{cm}^{-2}$ [17].

El complejo de nubes moleculares Sgr C se ubica en el extremo occidental de la parte interna de la Zona Molecular Central que posee un tamaño de $105 \text{pc} \times 75 \text{pc}$ en toda su extensión y una masa de $\sim 3 \times 10^7 M_{\odot}$ [21]. A pesar de que Sgr C y Sgr B son simétricas con respecto al Centro Galáctico, Sgr C se caracteriza por ser el único complejo de nubes en la parte occidental del Centro Galáctico en el que existe formación estelar de estrellas masivas; además es una de las regiones menos caracterizadas de la Zona Molecular Central [21]. Estas características hacen que Sgr C sea una fuente interesante para estudiar la formación estelar en la Zona Molecular Central que presenta condiciones extremas [1].

Existen trabajos previos donde han encontrado diferentes tipos de estructuras que caracterizan este complejo molecular. Entre las que destacan varias fuentes compactas en forma de caparazón, burbujas y filamentos que se presentan alineados perpendicularmente al plano galáctico [22]. Entre las estructuras no térmicas destaca un largo filamento estrecho que se puede observar en la siguiente figura en contornos blancos (radio-continuo) en cuya base se puede encontrar una región HII, otra de las estructuras presentes y más estudiadas

en Sgr C es un EGO (por sus siglas en inglés) [17] que se muestra en la parte derecha de la siguiente gráfica:

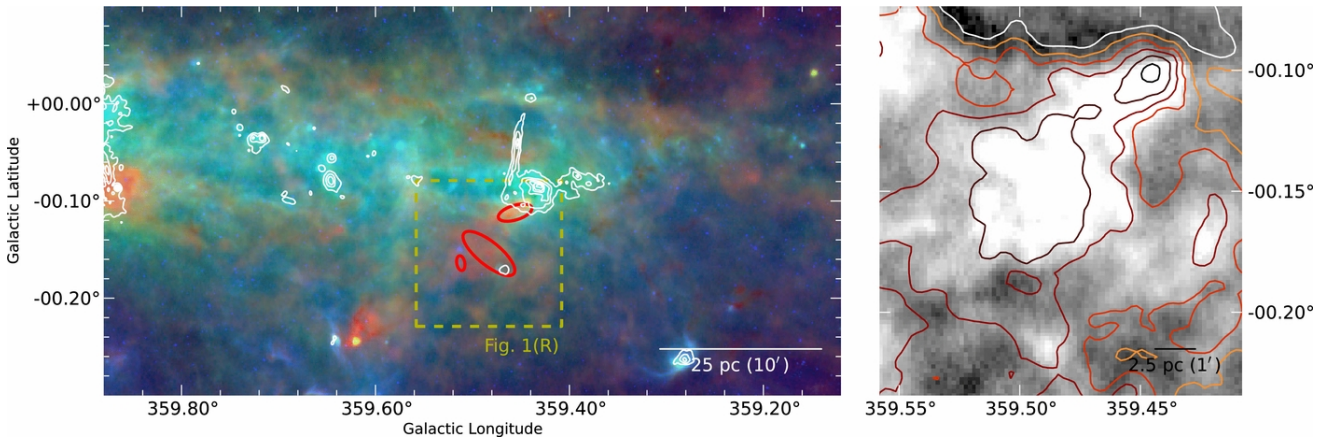


Figura 1.2: En el lado izquierdo se puede observar en campo amplio a Sgr C (105×75 pc) en longitudes de onda de $8/70/870 \mu\text{m}$ en la CMZ. En blanco se puede observar el filamento no térmico característico y en su base una región HII. En el lado derecho se observa en escala de grises a $870 \mu\text{m}$ la región donde se encuentra el EGO G359.44-0.102. Figura tomada de [21].

En la parte izquierda de la figura 1.2 se muestra Sgr C en una superposición de imágenes en diferentes longitudes de onda y contornos en radio-continuo que muestran algunas de las estructuras más características presentes en el complejo de nubes moleculares Sgr C. En la elipse en rojo cuyo extremo se encuentra en $(-359.44, -0.102)$ se tiene la posición del EGO G359.44-0.102. En la parte derecha se puede observar la región del EGO en escala de grises a una longitud de onda de $870 \mu\text{m}$. El EGO se encuentra en la punta norte de la gráfica mostrada [21].

Además en longitudes de onda de radio (1.6GHz) se ha encontrado evidencia de varias estructuras morfológicas en Sgr C y sus cercanías entre las más notable está el filamento no térmico característico de esta región en cuya base se encuentra una región HII, cerca del EGO; también se han encontrado estructuras en forma de burbujas, capas, cavidades y filamentos alineados al plano de la Galaxia de manera paralela o perpendicular dependiendo de su naturaleza, estas estructuras modifican la morfología del complejo de nubes debido al movimiento del gas en la región [23].

EGO: G359.44-0.102

Un objeto verde extendido (EGO, por sus siglas en inglés) es una región del medio interestelar en el que se encuentra una población de candidatos de objetos estelares jóvenes masivos (MYSO, por sus siglas en inglés) que son fundamentales en el estudio de formación estelar de alta masa, que aún no han formado regiones HII, hipercompactas (HC) o ultracompactas (UC) [24].

En el complejo de nubes moleculares Sgr C se tiene la presencia de un EGO (G359.44-

0.102) considerado como la primera evidencia de formación estelar masiva en la región del EGO G359.44-0.102 fue identificado como una región de emisión extendida a $4.5 \mu\text{m}$ [21]. El EGO se encuentra en la parte norte de la nube molecular mostrada en el panel derecho de la gráfica 1.2 y tiene un tamaño de $0.06 \times 0.01 \text{ pc}$. Toda la nube donde que alberga el EGO posee un tamaño aproximado de $\sim 16\text{pc} \times 9\text{pc}$ y en su interior existe la presencia de dos núcleos pre-estelares de alta masa; además de tres fuentes con masas de gas de ~ 4 , ~ 5 , $\sim 0.8 \times 10^4 M_{\odot}$ y cuatro nudos de emisión H_2 que indican la presencia de un flujo de salida. La nube asociada al EGO posee una masa de $\sim 10^5 M_{\odot}$, esta nube posee condiciones físicas favorables para la formación de estrellas masivas [21].

Para intentar entender el porque existe una baja tasa de formación estelar en esta región de la CMZ se realizó un análisis en diferentes longitudes de onda para llevar a cabo un estudio de emisión térmica en infrarrojo, emisión molecular y morfología cualitativa con diferentes trazadores moleculares que permitieron caracterizar las propiedades físicas de la región que abarcó casi por completo el complejo de nubes moleculares Sgr C, ahí se observo la mayor evidencia de actividad en radio frecuencias e infrarrojo; a esta región se le dio el nombre de *complejo molecular Sgr C* y se lo ubico entre las coordenadas galácticas $-0^{\circ}.7 \leq l \leq -0^{\circ}.2$ y $-0^{\circ}.3 \leq b \leq 0^{\circ}.12$ que es equivalente a $\sim 75 \times 78 \text{ pc}$. Dentro de este complejo se eligió las regiones donde se presentaba la mayor emisión de gas denso para estimar las condiciones físicas dominantes de la región. Así los resultados obtenidos en este estudio podrían estar relacionados con la baja formación estelar en la parte interna de la CMZ o podrían ayudar a entenderla. Para estudiar la formación estelar en ambientes extremos es necesario caracterizar la región estimando propiedades físicas que estén relacionadas con la formación estelar.

1.4. Trazadores moleculares

En el medio interestelar se han detectado cerca de 200 especies moleculares a parte de sus isótopos, conocidas como trazadores de gas molecular, son especies químicas de fácil detección que caracterizan distintas propiedades del gas interestelar [6]. Las transiciones espectrales observadas para el gas molecular frío se dan mediante transiciones rotacionales que involucran pequeñas cantidades de energía ($< 10 \text{ K}$) por ello las moléculas son efectivas para enfriar el gas interestelar haciendo evidente su observación en el rango de frecuencias de radio [9]. La condición principal para poder observar las transiciones moleculares en frecuencias de radio es que dicha molécula posea un momento dipolar permanente no nulo [13]. Las transiciones rotacionales permiten que las moléculas permanezcan un tiempo considerable en un nivel excitado, por lo tanto es sencillo excitar los niveles rotacionales tomando en cuenta que los se encuentran muy poco espaciados y sus energías están en el orden de los $1-10^2 \text{ K}$ ($\approx 10^{-3} \text{ eV}$, $\approx 30-3000 \text{ GHz}$) [13]. Se conoce que diferentes moléculas trazan diferentes propiedades físicas fundamentales entre las que se encuentran la densi-

dad de columna del gas, la formación estelar y la temperatura. Para la caracterización de estas propiedades se usan diferentes mecanismos ya que cada especie presenta diferentes maneras de excitar sus líneas de transición [11].

Para este proyecto se usaron varias emisiones moleculares de líneas que permiten estudiar la parte densa de las nubes moleculares como, el ion formilo (HCO^+), el acetonitrilo (CH_3CN) y el monóxido de carbono (^{13}CO). Cabe mencionar que aparte de estos trazadores moleculares en frecuencias de radio se ha usado también la emisión de polvo en longitudes de onda del infrarrojo lejano para estimar la temperatura de polvo, y el radio-continuo del hidrógeno atómico neutro (HI) se usó para el estudio morfológico del complejo molecular Sgr C.

1.4.1. HCO^+ : Ion Formilo

HCO^+ es una molécula poliatómica que se encuentra presente de manera estable y abundante en las nubes moleculares gigantes, regiones de formación estelar masiva, regiones densas en nubes difusas, entre otras [3].

El ion formilo se forma en regiones de recombinación entre los electrones e iones debido a los rayos cósmicos que colisionan con el H_2 presente en las nubes oscuras, obteniendo H_2^+ que rápidamente se combina con el H_2 para formar H_3^+ (ion triatómico de hidrógeno) que al reaccionar con moléculas pesadas como el CO o el H_2O forma el ion formilo como se muestra a continuación [2]:



El ion formilo es uno de los trazador de gas molecular más abundantes de ISM por poseer una densidad de iones de $3 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$, una energía total de 3072.15 eV y un momento dipolar molecular alto de 3.89 D [10]. El HCO^+ juega un papel importante en la cadena de reacciones que conducen a moléculas orgánicas complejas [3].

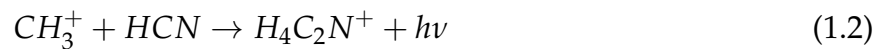
Este trazador de gas molecular es detectado en longitudes de onda sub-milimétricas y de radio [25]. La emisión de HCO^+ (1-0) a 89.19 GHz es observada ampliamente en el ISM difuso y es una de las líneas más fuentes en la banda de 3mm después del ^{12}CO y el ^{13}CO [19]. Una de las principales características del de HCO^+ (1-0) es que puede rastrear gas molecular en regiones donde no es observable a través de la transición de CO (1-0) [10]. este trazador en la transición (1-0) permite detectar gas de alta densidad y núcleos fríos de hidrógeno molecular (H_2) [26].

En este proyecto de investigación se utilizó esta molécula principalmente para el estudio cualitativo de la morfología del complejo molecular Sgr C en el capítulo cinco. En los capítulos dos y tres se uso su centro de máxima emisión para caracterizar propiedades físicas,

con otros trazadores moleculares en el complejo molecular Sgr C, en regiones de gas denso.

1.4.2. CH₃CN: Molécula de Acetonitrilo

El cianuro de metilo, cianometano o acetonitrilo CH₃CN es una moléculas orgánica compleja que se detecta en entornos moleculares densos [27] y núcleos pre-estelares fríos donde se a iniciado la formación de estrellas [28]. En el Centro Galáctico, para caracterizar regiones de gas molecular denso es necesario utilizar moléculas que posean un alto momento dipolar. Se cree que la ruta dominante de formación de fase gaseosa hacia CH₃CN en nubes densas es la asociación radiativa [29]:



seguido de recombinación disociativa del ion molecular intermedio,



El CH₃CN es uno de los trazadores de temperatura cinética más usados en las regiones de formación estelar en el ISM dado que tiene transiciones rotacionales sensibles al gas caliente. El gran momento dipolar 3.92197 D [27] conduce a un espectro rotacional muy fuerte haciendo que el acetonitrilo sea adecuado como sonda de regiones con densidades altas [30], además es un trazador ópticamente delgado [19]. No existen cambios en las transiciones radiativas del número cuántico K (componente del momento angular J a lo largo del eje de simetría) debido a que las reglas de selección de los dipolos lo prohíben. Por lo tanto la distribución de la población para un determinado J está dada únicamente por colisiones entre moléculas que lo vuelven un buen trazador de temperatura cinética. Las transiciones rotacionales puras presentes en el CH₃CN se pueden observar simultáneamente [30].

Para esta investigación se utilizaron las líneas de emisión de la transición rotacional (5_K-4_K), donde se observan 5 líneas espaciadas. A continuación se muestra una tabla con las transiciones empleadas y las frecuencias en las que se encuentran:

Molécula	Transición	Frecuencias de transición (GHz)
	5(3)-4(3) F=6-5	91.971310
	5(3)-4(3) F=4-3	91.971465
CH ₃ CN	5(2)-4(2) F=6-5	91.980089
	5(1)-4(1)	91.985316
	5(0)-4(0)	91.987089

Cuadro 1.3: Transiciones y frecuencias de las líneas de emisión del acetonitrilo (CH₃CN) para este proyecto. Tomado de [30].

En este proyecto se usó la molécula de acetonitrilo como un trazador de la temperatura cinética del complejo molecular Sgr C en las regiones donde se presentó una mayor emisión de este trazador de gas molecular: el centro de Sgr C y en el centro de emisión del ion formilo.

1.4.3. H₂: Hidrógeno molecular

El H₂ es la molécula más abundante del medio interestelar [11]. Principalmente se encuentra en las nubes moleculares oscuras y su densidad de columna posee una correlación lineal con la cantidad de gas que puede transformarse en estrellas. Existe por lo tanto una relación de la densidad de columna con la tasa de formación estelar, así el hidrógeno molecular es el principal trazador de formación de estrellas [31].

La detección del hidrógeno molecular es muy complicado, por no tener líneas de emisión en las condiciones en las que se encuentran las nubes moleculares principalmente por dos razones [11]:

1. No posee un momento dipolar eléctrico permanente, ya que es una molécula simétrica y por ende su centro de carga es el mismo que su centro de masa [11].
2. Además, el hidrógeno molecular es ligero y tiene transiciones rotacionales a energías de excitación altas 510 K, que está por encima de las presentes en las nubes moleculares ($\sim 20\text{K}$) [32].

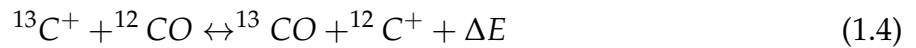
Entonces el H₂ no produce emisión en radio, pero existe otro trazador que se puede usar para estimar la formación estelar, el monóxido de carbono CO. A pesar de tener una abundancia de 10^{-4} [31] con relación al H₂, el monóxido de carbono permite trazar la cantidad total de material de hidrógeno molecular, ya que tiene un momento dipolar permanente y una energía de excitación para la transición rotacional baja ($\sim 5.5\text{ K}$) que va de acuerdo con las condiciones presentes en las nubes moleculares [32]. Esta conexión se la realiza mediante la relación que parece existir entre la densidad de columna del CO y el H₂ que permite obtener la tasa de formación estelar de una región [11].

1.4.4. ¹³CO: Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono (CO) es la segunda molécula más abundante del medio interestelar dependiendo del estado físico puede encontrarse en las partes más profundas de las nubes moleculares [2]. Además la transición de CO (1-0) es la línea de emisión molecular más importante para estudiar el gas molecular en el ISM [10]. Posee múltiples transiciones que van desde $J = 1$ hasta $J = 37$ aunque se lo ha detectado en unas pocas transiciones que se excitan a bajas temperaturas presentes en la parte molecular del ISM [2]. Como el nivel

$J=1$ del ^{12}CO se encuentra poblado por colisiones con el H_2 es usado como un trazador de esta molécula, sin embargo sus líneas rotacionales son en su mayoría óptimamente gruesas limitan la profundidad óptica de observación, por ello se usa los isótopos óptimamente delgados del ^{12}CO que trazan núcleos densos, como el ^{13}CO ($10^3 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$) [33] que tiene una profundidad óptica de ~ 50 [34] veces más pequeña que el ^{12}CO , por lo tanto puede penetrar al interior de la nube [34].

Las regiones frías y comprimidas donde el hidrógeno atómico se ha vuelto en hidrógeno molecular es el escenario propicio para originar la emisión del CO [10]. El proceso fotodisociativo del CO ocurre mediante la absorción de líneas en estados predisociativos y afecta a la distribución de isótopos de carbono. A densidades de columna del CO de $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ las líneas se saturan provocando que la tasa de disociación disminuya rápidamente lo que conducirá al fraccionamiento y estimulará la disminución de la abundancia del ^{13}CO y otros isotopólogos en la capa superficial de la nube en relación al ^{12}CO . Una de las reacciones químicas que se cree conllevan a la obtención del ^{13}CO es la siguiente [28]:



donde ΔE es la diferencia de punto cero entre el ^{12}CO y el ^{13}CO con un valor de 35K, lo que muestra que este isótopo del monóxido de carbono es aunque por poco, más estable que el ^{12}CO [2]. Por esto que el estudio de la masa en las partes más densas de las nubes moleculares se lo realiza mediante el ^{13}CO por tener una emisión ópticamente delgada, además de una transición $J=1-0$ sencilla de detectar, por ser una de las líneas más fuertes presentes en el gas de las nubes moleculares ya que son excitadas por las densidades presentes en ellas [35]. Por lo tanto en el estudio de las nubes moleculares donde el componente principal es el hidrógeno molecular (73 % en masa) e hidrógeno atómico neutro (<1 %) la emisión del ^{13}CO es necesario para determinar las propiedades físicas presentes en ellas como la cantidad de gas que se convierte en estrellas [36].

Para el caso de este proyecto de investigación se ha usado la línea de transición ($J=1-0$) de monóxido de carbono (^{13}CO) a una frecuencia de 110.20 GHz en longitudes de onda del radio, para estimar la densidad de la tasa de formación estelar del complejo molecular Sgr C, haciendo uso de la relación de conversión entre la intensidad integrada del ^{13}CO con la densidad de columna del H_2 [37].

1.5. Transferencia Radiativa

El estudio de las líneas de emisión de los trazadores moleculares dan como resultado valores asociados a la densidad de columna de las especies observadas, la temperatura de los gases y densidades numéricas (estimación del número de moléculas de hidrógeno por

centímetro cúbico) del gas local, que aportan información acerca de las condiciones físicas y dinámica del gas y el polvo que se encuentra en las galaxias, así las moléculas se convierten en indicadores directos de la evolución y distribución del gas presente en el medio interestelar [2].

Para obtener estas cantidades físicas de los espectros de emisión es primordial saber si se está trabajando en un entorno donde el gas se encuentra en **Equilibrio Termodinámico Local** o no y para poder interpretar las líneas observadas es necesario un modelo de transferencia radiativa, para calcular la intensidad de la emisión de la línea respectiva [2].

EQUILIBRIO TERMODINÁMICO LOCAL (LTE)

El Equilibrio Termodinámico Local (LTE, por sus siglas en inglés) es una aproximación para un sistema donde se tiene un estado en que la materia está en equilibrio pero la radiación se encuentra desacoplada de ella. En la aproximación de equilibrio termodinámico local, la población de los niveles de energía para cada estado de una especie viene dado por la Ley de Boltzmann y la distribución de velocidades de las partículas viene dada por la Ley de Maxwell [38]. Las condiciones para tener LTE se da en regiones donde la densidad crece y sus niveles poblacionales se encuentran determinados por colisiones [2]. En esta aproximación las densidades totales de columna así como la temperatura cinética del gas de las especies observadas pueden ser derivadas de la espectroscopia de una sola transición y describen completamente el estado del gas [39].

En LTE a una temperatura cinética dada la densidad de columna de un nivel superior u está relacionada con la densidad de columna total N , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$N_u = \frac{N}{Z} g_u e^{-\frac{E_u}{kT_k}} \quad (1.5)$$

donde Z es la función de partición, g_u es el peso estadístico del nivel u , y E_u es su energía por encima del estado fundamental, así en este escenario es posible conocer la densidad de columna total de una especie únicamente conociendo la temperatura del gas [2]. Cuando se tiene transiciones múltiples es posible construir un diagrama que relacione las densidades de columna por peso estadístico con su energía por encima del estado fundamental mediante la ecuación mostrada anteriormente. A esta relación gráfica se lo llama **Diagrama de rotación** que es técnica frecuentemente adoptada para estimar propiedades físicas en nubes en base a la emisión de líneas moleculares [40]. Este gráfico viene dado por el logaritmo de $\frac{N_u}{g_u}$ versus $\frac{E_u}{k}$ y permite inferir la densidad de columna y la temperatura de excitación [40]. Para la estimación de la densidad de columna se considera que en las transiciones ópticamente delgadas se produce una temperatura proporcional a la densidad de columna del nivel más alto de la transición estudiada y si son transiciones termalizadas esta N se puede convertir en la densidad de columna de la especie [40]. Para la temperatura de excitación se elige la que presente un mejor ajuste en la distribución de la población en LTE, aquí la

temperatura de excitación es comparable con la temperatura cinética de la región [2].

EQUILIBRIO TERMODINÁMICO NO LOCAL (NO-LTE)

Cuando la densidad de hidrógeno no es suficiente para termalizar las transiciones se habla de equilibrio termodinámico no local (Non-LTE, por sus siglas en inglés). Las colisiones y la radiación determinan el nivel de las poblaciones y es posible que cada nivel de población se vea caracterizado por una temperatura diferente [2]. La temperatura de excitación T_{ex} de un subnivel está dada por las poblaciones relativas de cualquiera de los dos niveles i y j , a través de la ecuación de Boltzmann:

$$\frac{N_j}{N_i} = \frac{g_j}{g_i} e^{-(E_j - E_i)/kT_{ex}} \quad (1.6)$$

donde la T_{ex} se calcula para cada nivel energético.

ECUACIÓN DE TRANSPORTE RADIATIVO

La teoría de transferencia radiativa describe cómo un haz de fotones en una dirección determinada de intensidad monocromática cambia a medida que se propaga a través de un medio. En su forma general se expresa de la siguiente manera [10]:

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu \quad (1.7)$$

Donde I_ν es la intensidad de la radiación en función de la frecuencia, τ_ν es la profundidad óptica en función de la frecuencia y S_ν es la función fuente. Una solución general para la ecuación de transporte radiativo 1.7 viene dada por:

$$I_\nu(\tau) = I_\nu(0)e^{-\tau} + S_\nu(\tau) [1 - e^{-\tau}] \quad (1.8)$$

donde S_ν en equilibrio termodinámico local, es igual a la función Planck para la radiación del cuerpo negro, $B_\nu(T)$ [10].

Una de las soluciones de la ecuación de transporte radiativo para un gas uniforme permite relacionar la temperatura medida en la intensidad de la línea molecular T_L con la temperatura de excitación T_{ex} , su opacidad τ y la temperatura de fondo de microondas (CMB, por sus siglas en inglés) $T_{bg}=2.7K$ mediante la siguiente ecuación [11]:

$$T_{L,\nu} = (J_\nu(T_{ex}) - J_\nu(T_{bg}))(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (1.9)$$

donde $J_\nu(T) = \frac{hv/k}{e^{hv/kT} - 1}$ [41] es la intensidad de la función fuente en unidades de temperatura (T) y puede suponerse constante a una frecuencia determinada cuando la línea es ópticamente delgada.

La transferencia radiativa puede expresarse de diferente manera según el medio sea óp-

ticamente grueso o delgado, como se muestra a continuación [11]:

- En un medio ópticamente grueso la información sobre la intensidad de fondo se pierde y la intensidad observada es igual a la función fuente [38] y la información que se obtiene de estas moléculas no son representativas de los parámetros densidad de columna y temperatura de excitación [13]. La expresión para un medio ópticamente grueso es ($\tau \gg 1$) : $T_{L,\nu} = (J(T_{ex}) - J(T_{bg}))$
- Si la luz puede atravesar el medio: el medio es ópticamente delgado, aquí la intensidad de fondo no presenta atenuación y se puede observar la radiación emitida por toda la región [38] y permite obtener información de manera directa acerca de la densidad de columna y temperatura de excitación desde la radiación recibida de la molécula [13]. La expresión para un medio ópticamente delgado es ($\tau < 1$) : $T_{L,\nu} = (J(T_{ex}) - J(T_{bg}))\tau_\nu$

Para este proyecto de investigación donde la región presenta alta densidad ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ [20]) y los niveles poblacionales de los trazadores moleculares se ven determinados por colisiones, el análisis de las diferentes moléculas, fue realizado considerando condiciones de LTE.

Capítulo 2

Emisión en Infrarrojo de Sgr C

En este capítulo, se utilizó la emisión térmica de polvo en longitudes de onda del infrarrojo lejano para estimar la temperatura de polvo T_d presente en las regiones del complejo molecular Sgr C: el centro de Sgr C y en el centro de emisión del ion formilo.

2.1. Propiedades físicas

El polvo interestelar se encuentra catalizando las reacciones químicas que se producen en la formación del hidrógeno molecular y otras moléculas que caracterizan las nubes moleculares. El polvo también protege el interior de las nubes extinguiendo la radiación proveniente de los fotones de alta energía y rayos cósmicos. Además controla los procesos de calentamiento y enfriamiento en las regiones más densas de las nubes moleculares [14]. Cuando el polvo absorbe la radiación de la luz de las estrellas los granos de polvo pueden liberar foto-electrones que al absorber la luz óptica y ultravioleta (UV) calienta los granos de polvo que luego irradian en el infrarrojo lejano (FIR, por sus siglas en inglés) donde puede ser detectado [2].

2.1.1. Emisión térmica de polvo

La emisión del polvo que depende de la temperatura a la que se encuentra la región de estudio se conoce como **radiación térmica de polvo**. Esta radiación está relacionada con la formación de estructuras en regiones frías del medio interestelar ya que las nubes moleculares se encuentran a temperaturas características de ~ 20 K. [42]. La emisión de polvo se da en diferentes rangos de longitudes de onda del infrarrojo (IR), esto debido al tamaño de las partículas de polvo. A longitudes de onda del infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) la emisión del polvo se presenta por partículas de polvo pequeñas, que son las más abundantes, y a longitudes de onda del infrarrojo lejano (FIR, por sus siglas en inglés) se da

por partículas grandes de polvo, a continuación se muestra en la siguiente gráfica [43]:

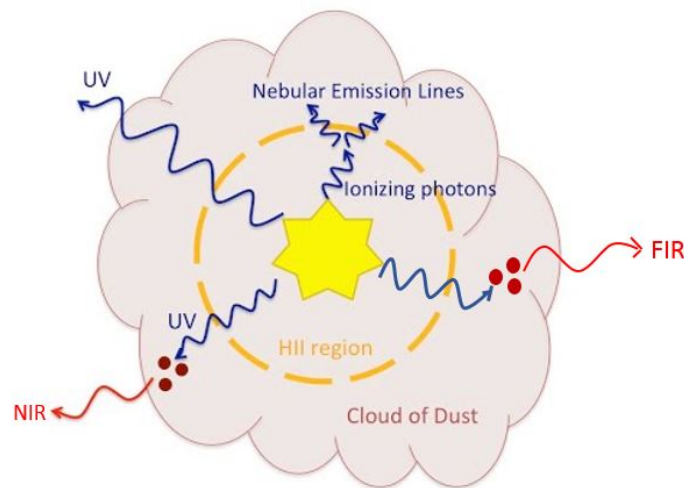


Figura 2.1: Emisión térmica de polvo en el infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo lejano (FIR). Crédito: Berkeley/MOSDEF.

En la figura 2.1 se muestra la emisión térmica del polvo en el rango del NIR y el FIR debido a que parte de la luz UV proveniente de estrellas masivas se absorbe por los granos de polvo presente en las nubes moleculares y se reemite en longitudes de onda más largas (IR). En el FIR la emisión es producida por granos de polvo grandes y traza todas las fases del medio interestelar. El polvo es un trazador estable en la mayoría de estados del ISM ya que no se ve afectados por cambios de fase y condiciones de excitación complejas presentes en los trazadores con moléculas e iones [43].

Los átomos de los granos de polvo se encuentran estrechamente conectados entre ellos. Absorben cada fotón y se calientan por colisiones con moléculas de gas, el exceso de energía se distribuye muy rápidamente entre los niveles de energía de los granos de polvo a la temperatura ambiente de la región circundante y volverán a irradiar esa energía en el infrarrojo lejano [14]. La distribución resultante de los niveles de energía de los granos de polvo vienen dadas por la función de Boltzmann y depende únicamente de la temperatura de polvo T_d en condiciones de LTE [44]. El polvo es el trazador más robusto de la ecología galáctica (que muestra el ciclo que cumple el material interestelar desde las estrellas moribundas hasta las fases ionizadas, atómicas y moleculares del ISM y de regreso a las estrellas) ya que es relativamente estable en el ISM y es ópticamente delgado a longitudes de onda del FIR [43].

2.1.2. Temperatura de polvo: T_d

La Temperatura de polvo T_d es la temperatura de equilibrio a la que se encuentra un grano de polvo en un campo de radiación que absorbe por segundo la energía que emite. En las regiones de polvo frío ($10 \text{ K} \leq T_d \leq 40 \text{ K}$) se puede trazar la mayor parte de la masa

bariónica no estelar del ISM, para esto se analiza la emisión térmica de polvo y se obtiene la T_d [44]. Entre las propiedades que se derivan del estudio de la emisión del polvo están la temperatura del polvo, la emisividad, la masa de polvo y la luminosidad FIR-mm de la que se puede derivar la tasa de formación estelar. El polvo emite efectivamente solo en el infrarrojo lejano [42].

El polvo emite radiación de cuerpo gris que es un cuerpo negro modificado, que está caracterizado no solo por la temperatura sino también por un parámetro β asociado a la emisividad de la nube [42].

2.2. Radiación de Cuerpo negro

Un cuerpo negro es un objeto físico idealizado que absorbe toda la radiación electromagnética incidente, independientemente de la frecuencia o el ángulo de incidencia y reemite toda la energía absorbida. El espectro de radiación de cuerpo negro describe la potencia radiada por unidad de área, frecuencia y por unidad de ángulo sólido de un cuerpo negro en condiciones LTE [44]. El comportamiento de un cuerpo negro viene dada por la Ley de Planck que en función de la frecuencia ν , se expresa como sigue:

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \right] \quad (2.1)$$

donde $B_\nu(T)$ viene dada en $\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}\text{sr}^{-1}$, $h=6.62607004 \times 10^{-34}\text{m}^2\text{kgs}^{-1}$ se conoce como la constante de Planck, $k=1.38064852 \times 10^{-23}\text{m}^2\text{kgs}^{-2}\text{K}^{-1}$ es la constante de Boltzmann $c \sim 3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ es la velocidad de la luz y T es la temperatura del objeto en K conocida como la temperatura de polvo T_d [8].

Al trabajar con datos observacionales en el infrarrojo y el submilimétrico es necesario expresar la relación $B_\nu(T)$ en función de la longitud de onda $B_\lambda(T)$ [8]:

$$B_\nu(T)d\nu = -B_\lambda(T)d\lambda \quad (2.2)$$

Encontrando $B_\lambda(T)$, usando $c = \nu\lambda$ tenemos $B_\lambda(T) = B_\nu(T) \frac{c}{\lambda^2}$, así la ley de Planck en función de la longitud de onda viene dada por:

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right] \quad (2.3)$$

A partir de las ecuaciones 2.1 y 2.3 se puede observar que $B_\nu(T)$ aumenta monótonamente con la temperatura y ocurre lo contrario en $B_\lambda(T)$ donde la temperatura disminuye mientras aumenta la longitud de onda [44].

2.2.1. Radiación de Cuerpo Gris

Un cuerpo gris es un objeto que no cumple con las características de cuerpo negro ya que posee una superficie que se idealiza por tener propiedades uniformes pero emite radiación a una fracción constante y menor a la de cuerpo negro pero a la misma temperatura [45]. Esta radiación viene caracterizada por la **emisividad** que es la relación entre la emisión radiada por un cuerpo real y la que emite un cuerpo negro, como se muestra a continuación [45]:

$$\epsilon = \frac{B_{\lambda}(T)}{B_{\lambda, BB}(T)} \quad (2.4)$$

Por definición un cuerpo negro tiene una emisividad de uno ($\epsilon = 1$), un cuerpo gris posee una emisividad en la superficie menor ($\epsilon < 1$) en todas las frecuencias y temperaturas. En la siguiente gráfica se muestra una comparación entre la emisión de un cuerpo negro, un cuerpo gris y un cuerpo real.

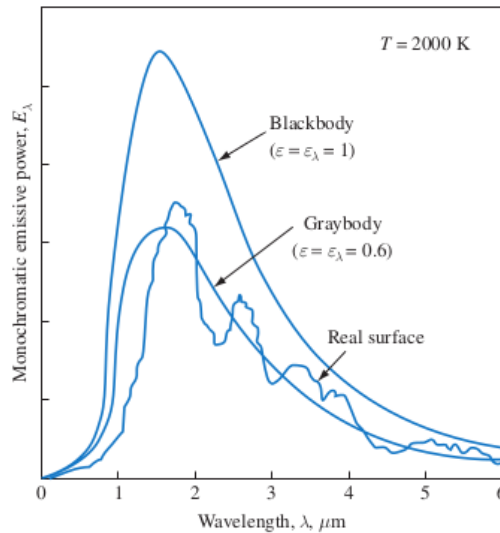


Figura 2.2: Comparación de la radiación emitida de un cuerpo negro (ideal), cuerpo gris y cuerpo real. Imagen tomada de [45].

Como la emisión del polvo radia como un cuerpo gris la temperatura de polvo es estimada usando una expresión modificada de cuerpo negro donde entra en juego el índice espectral de emisividad de polvo β que representa un cambio en la emisividad del cuerpo. Los valores de β varían en $[0, 2]$ [46]. La ecuación que describe este modelo en función de la frecuencia viene dada por [47]:

$$B_{\nu} \propto \frac{\nu^{3+\beta}}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{dust}}\right) - 1} \quad (2.5)$$

y en función de la longitud de onda, un modelo de cuerpo gris para estimar la T_d viene dada

por:

$$B_{\lambda}(T_d) \approx \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{\lambda^{\beta}}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_d}} - 1} \quad (2.6)$$

2.2.2. Distribución Espectral de Energía (SED)

La distribución espectral de energía (SED, por sus siglas en inglés) es un diagrama en escala logarítmica que muestra la distribución de la potencia radiada (densidad de Flujo, F_{λ}) con la longitud de onda (λ) y permite estimar la temperatura de polvo T_d en el IR [11].

La SED ha sido estudiado en toda la región del infrarrojo de la emisión del polvo de 1 a $1000\mu\text{m}$. En el medio interestelar difuso se tiene un máximo de la SED en longitudes de onda de $100\text{-}200\mu\text{m}$ que pertenece al infrarrojo lejano e implica una temperatura T_d de $15\text{-}20\text{K}$. También presenta otro máximo secundario en $10\mu\text{m}$ en longitudes de onda del infrarrojo medio (MIR, por sus siglas en inglés) [11].

2.3. Análisis y Procesamiento de Datos

Para estimar la temperatura de polvo T_d , fue necesario determinar la SED que se ajustó a una ley de Planck para un cuerpo gris. Primero se determinó el valor de la densidad de flujo (Jy) a diferentes longitudes de onda mediante fotometría de apertura que tiene como objetivo estimar la densidad de flujo en un área determinada por un radio de apertura. Este flujo se usó posteriormente para graficar la SED. Luego se realizó el ajuste de los valores obtenidos y sus respectivos errores mediante un modelo de cuerpo negro modificado, obteniendo una estimación de la temperatura del polvo. Los centros de estudio para este proyecto de investigación fueron dos regiones del complejo molecular Sgr C en el rango del infrarrojo lejano por las propiedades que se encuentran en su interior, a continuación se muestran las coordenadas galácticas de estas regiones:

- Centro de Sagitario C (l,b): $-0.57, -0.10$ [18]
- Centro de la emisión de la molécula HCO^+ (l,b): $-0.52, -0.17$ [18]

El ion formilo (HCO^+) en su estado rotacional mas bajo es un excelente trazador de núcleos de gas frío de alta densidad de hidrógeno molecular, traza regiones donde se produce formación estelar [26]. Por lo tanto el centro de mayor emisión del HCO^+ permite estudiar la región donde podría estarse produciendo la formación estelar en las velocidades que caracterizan a Sgr C $[-70, -40]$ km/s. El centro de Sgr C se estudió debido a que en estas coordenada se alberga la formación estelar masiva EGO G359.44-0.102 del complejo molecular.

2.3.1. Descripción de los datos

Para el estudio fotométrico se usaron mapas de emisión de polvo en FIR obtenidos del telescopio espacial Herschel mediante la base de datos Herschel Science Archive. Estos mapas fueron parte de un estudio realizado en todo el plano galáctico para la Zona Molecular Central en el rango de longitud $+68^\circ \geq l \geq -70^\circ$ y latitud $+1^\circ \geq b \geq -1^\circ$ en coordenadas galácticas. Cada uno de los mapas obtenidos en este estudio tuvo un tamaño cuadrado de $\sim 2''.2$ [43].

HERSCHEL SPACE TELESCOPE

El Observatorio Espacial Herschel enfocado en la fotometría y espectroscopía en el rango del infrarrojo lejano y en la parte sub-milimétrica cubriendo la banda de 60-670 μm . Herschel tuvo como objetivo el estudio del universo frío con temperaturas que entre los 5-50 K [48].

El telescopio espacial Herschel está compuesto de tres instrumentos: fotodetector de cámara y espectrómetro (PACS, por sus siglas en inglés); receptor de imágenes espectrales y fotométricas (SPIRE, por sus siglas en inglés) y el instrumento heterodino para el infrarrojo lejano (HIFI, por sus siglas en inglés), sus datos son de acceso libre y pueden obtenerse mediante la base de datos HSA [43].

Base de datos: HSA

En la base de datos Herschel Science Archive (HSA, por sus siglas en inglés) se pudo encontrar los productos obtenidos por el telescopio espacial Herschel, en el estudio del medio interestelar [43]. La base de datos contiene mapas científicos y archivos de diferentes niveles de calibración de los mismos. Los usuarios pueden buscar el objeto de interés en cada instrumento en el que trabaja Herschel: SPIRE, PACS Y HIFI ya que cada uno de ellos caracteriza diferentes longitudes de onda del infrarrojo lejano [49].

En este proyecto se utilizó un conjunto de 5 mapas de emisión de polvo obtenidos con los instrumentos PACS y SPIRE, para ello se ingresó a la base de datos HSA, donde se introdujeron las coordenadas ecuatoriales de Sgr C y se eligieron los 5 mapas más cercanos a la región de estudio ubicada en la Zona Molecular Central, para este estudio las cámaras fotométricas PACS y SPIRE se utilizaron en modo paralelo para maximizar la velocidad de reconocimiento y la cobertura de longitud de onda en el plano del cielo. Los mapas usados tienen como número de identificación *OBSID:1342204366* en el HSA; los niveles de calibración para los mapas de emisión fueron: 2.0 para PACS y 2.5 para SPIRE.

PACS y SPIRE permiten rastrear el pico de la distribución espectral de energía (SED) de polvo frío y, por lo tanto, las temperaturas y luminosidades de los complejos formadores de estrellas del ISM [43].

PACS

Es un fotómetro que opera en el infrarrojo lejano en longitudes de ondas que cubren el

rango de [51-210 μm] usando filtros que definen los tres pasos de banda en el FIR caracterizadas por un color (azul, verde y rojo), obteniendo mapas en tres longitudes de onda referenciales: azul 70 μm , verde 100 μm y rojo en 160 μm . A continuación se muestra una gráfica con la respuesta espectral efectiva para el fotómetro PACS [48]:

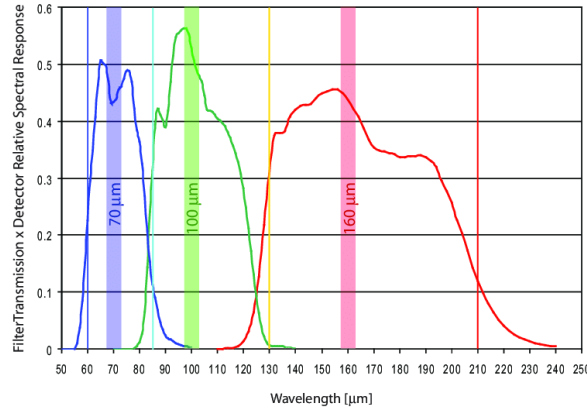


Figura 2.3: Respuesta espectral obtenida mediante el instrumento PACS en las tres longitudes de onda de referencia 70, 100 y 160 μm indicadas en cada paso de banda. Imagen tomada de [48].

Para este proyecto se utilizaron dos mapas de acceso libre: azul (70 μm) y roja (160 μm) que caracterizan el infrarrojo lejano. A continuación se muestra una gráfica con los mapas obtenidos con PACS en modo paralelo de la región oeste de la CMZ:

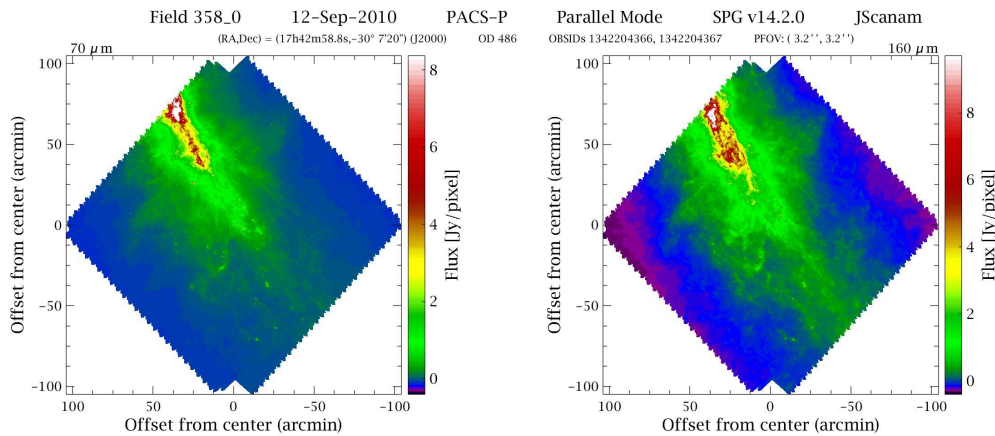


Figura 2.4: Mapas de emisión en infrarrojo del polvo en longitudes de onda de 70 μm y 160 μm de la parte occidental de la Zona Molecular Central obtenidas del instrumento PACS. Imagen tomada de HSA.

En la figura 2.4 se puede observar los dos mapas integrados de la emisión de polvo, en el lado derecho se observa el mapa en filtro azul que caracteriza una longitud de onda referencial de 70 μm y en el lado derecho el mapa en filtro rojo que caracteriza a 160 μm , la escala de colores muestra la intensidad del flujo en Jy/píxel. un Jy (Jansky) equivale a 10^{-26}

$W/m^2 \cdot Hz$ es la unidad para el flujo de energía en radioastronomía.

SPIRE

Consiste en un fotómetro de tres bandas y un espectrómetro que operan en el infrarrojo lejano. La cámara fotométrica realiza observaciones en tres bandas simultáneamente centradas en $250\mu m$ con un fotómetro de corta longitud de onda (PSW), $350\mu m$ a media longitud de onda (PMW) y $500\mu m$ a larga longitud de onda (LSW) [49].

En la siguiente gráfica se muestra los mapas obtenidos del instrumento SPIRE, en modo paralelo con PACS, de la región occidental de la CMZ, con los que se realizó el estudio fotométrico en el complejo molecular Sgr C:

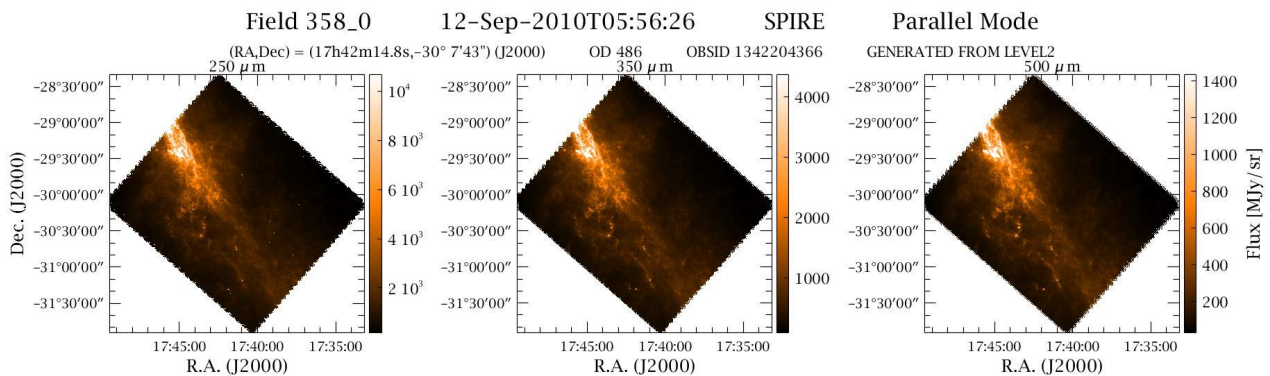


Figura 2.5: Mapas de emisión en infrarrojo del polvo en longitudes de onda de $250\mu m$, $350\mu m$ y $500\mu m$ de la parte occidental de la Zona Molecular Central obtenidas del instrumento SPIRE. Imagen tomada de HSA.

En la figura 2.5 se puede observar los tres mapas integrados obtenidos del instrumento SPIRE para el oeste de la Zona Molecular Central, en el lado izquierdo podemos observar el mapa obtenido a $250\mu m$, en el centro el mapa a $350\mu m$ y en el extremo derecho se encuentra el mapa a $500\mu m$, en la escala de colores se puede ver la intensidad del flujo en MJy/sr que representa a la densidad de flujo por unidad de ángulo sólido.

HIFI

Es un instrumento heterodino para el infrarrojo lejano que trabaja a frecuencias similares al instrumento SPIRE ($625\text{--}240$ y $208\text{--}157 \mu m$) que proporciona líneas espectrales de alta resolución a una muy alta frecuencia en un rango aproximado de $480\text{--}1272$ y $1430\text{--}1906$ GHz [50].

Los mapas obtenidos mediante los instrumentos PACS y SPIRE permitieron determinar las densidades de flujos asociadas a longitudes de onda de 70 , 160 , 250 , 350 y $500 \mu m$, que posteriormente se usaron para realizar la SED y el ajuste de cuerpo gris con el cual se estimó la temperatura de polvo.

2.3.2. Determinación de la Distribución Espectral de Energía: SED

Para determinar la SED, primero se obtuvo la densidad de flujo en cada una de las longitudes de onda mediante un estudio fotométrico sobre los mapas integrados de la emisión de polvo en el infrarrojo lejano y posteriormente se realizó la gráfica de la densidad de flujo F (Jy) obtenida y sus respectivos errores vs. λ (μm) en escala logarítmica.

FOTOMETRÍA DE APERTURA

La fotometría es una herramienta que permite calcular el valor de flujo asociado a una longitud de onda dada, para el caso de este proyecto de investigación se determinó la densidad de flujo en las siguientes longitudes de onda: $70\mu\text{m}$, $160\mu\text{m}$, $250\mu\text{m}$, $350\mu\text{m}$ y $500\mu\text{m}$. El error asociado a las densidades de flujo representa el 5% [49] del valor calculado de flujo.

Para la determinación de los flujos, errores asociados y la visualización de los resultados se elaboró el algoritmo "Photometry.py" escrito en lenguaje python que se compiló mediante el procesador de datos HIPE.

HIPE: Es un sistema de procesamiento de mapas en longitudes de onda del infrarrojo diseñado específicamente para mapas obtenidas desde el telescopio espacial Herschel que permite manipular los mapas directamente desde HSA, sin la necesidad de descargarlos previamente [48].

En el entorno de Hipe existen varias herramientas como scripts y pipelines que ayudan a que el análisis de los datos sea lo más amigable e intuitivo posible. Varios de los scripts permiten manipular los datos obtenidos por Herschel para procesarlos y corregirlos en los diferentes niveles de calibración de los productos [48].

En el caso de este proyecto de investigación se usaron las herramientas *observations* y *other data* para visualizar los mapas en el nivel de calibración requerido y almacenarlos en HIPE para su posterior manipulación.

Los datos de PACS y SPIRE se tuvieron que procesar por separado antes de realizar la fotometría puesto que los datos de SPIRE se encontraban calibrados en un nivel 2 y presentaban unidades de (MJy/sr) que no eran apropiadas para el proceso de fotometría pues requería que los mapas se encontraran en unidades de superficie de brillo (Jy/pixel). Para realizar esta conversión se usó la herramienta *ConvertUnit*. En el caso de los mapas obtenidos en PACS esta conversión no fue necesaria pues son calibrados en el nivel 2.5 con unidades de (Jy/pixel) como se puede observar en la figura 2.4. Con los mapas integrados almacenados en el entorno de HIPE se procedió a determinar el radio de apertura para la fotometría en las dos regiones de estudio, el centro de Sgr C y el centro de emisión del HCO^+ , dado que cada mapa tiene un tamaño cuadrado de $\sim 2^\circ$. La apertura se eligió de 130 arcsec en cada región y se la estimó mediante la función *Quick Analysis* de la herramienta *Display()*.

La fuente en la cual se realizó el análisis es extensa y posee información alrededor del

radio de apertura que se usó para la fotometría. Por este motivo se decidió realizar el proceso fotométrico para estimar el valor del flujo midiendo el valor del cielo (background) en una región en la cual no hubiera información del flujo, esto para evitar errores en las mediciones realizadas, para ello se usó la herramienta *RectangularSkyPhotometry*. En esta herramienta se introdujo las coordenadas (ecuatoriales) del centro de fotometría que para la región del centro de Sgr C fueron: (17:44:43.20; -29:27:53.7); y para el centro de emisión del HCO^+ fueron: (17:45:02.018; -29:28:15.92), las coordenadas de los vértices de rectángulo usado para determinar el valor del cielo se lo obtuvo mediante cursor en la función *Quick Analysis* de *Display()*. Esto se muestra en la siguiente gráfica:

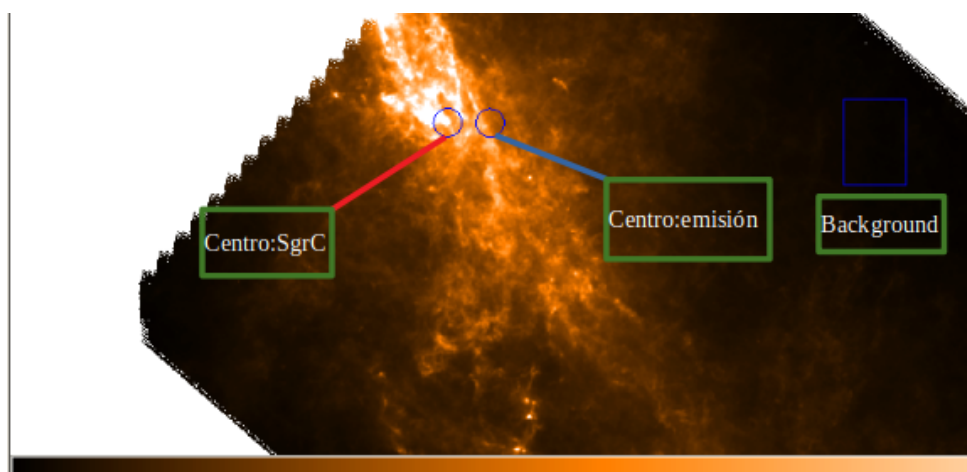


Figura 2.6: El estudio fotométrico se lo realizó en el centro de Sgr C y el centro de emisión del HCO^+ en círculos azules se muestra la apertura usada. En el rectángulo azul se muestra la región de donde se calculó el background.

En la figura 2.6 los círculos azules muestran los dos centros usados y el tamaño de la apertura, mientras que el rectángulo azul en el lado superior derecho muestra el tamaño de background usado para estimar el valor del brillo del cielo de todos los mapas usados. Esta gráfica se muestra en un solo mapa a $350\mu\text{m}$, pero este procesamiento se lo realizó en cada una de las cinco longitudes de onda utilizadas.

Los resultados de la fotometría de apertura fueron los flujos de energía que se calcularon como la suma de los píxeles en la apertura de la fuente menos el valor del background sustraído de cada píxel, en cada una de las longitudes de onda usadas y los errores asociados a estos flujos que se almacenaron mediante la herramienta `result[Results table]["Total flux"].data[2]`. En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos para el valor de flujo y su respectivo error en cada centro y longitud de onda:

Longitud de onda (μm)	Densidad de Flujo Centro Sgr C (Jy)	Error asociado Centro Sgr C (Jy)	Densidad de Flujo Emisión de HCO ⁺ (Jy)	Error asociado Emisión de HCO ⁺ (Jy)
70	25247.1723	1262.3586	9500.7951	475.0398
160	27634.5119	1381.7256	24241.8149	1212.0908
250	11356.5703	567.8285	11958.8119	597.9406
350	4507.5795	225.3790	5031.9267	251.5963
500	1495.6767	74.7838	1701.2571	85.0629

Cuadro 2.1: Valores de la densidad de flujo y errores asociados a este, obtenidos del análisis fotométrico del centro de Sgr C y el centro de emisión del HCO⁺.

OBTENCIÓN DE LA SED

La obtención de la gráfica que caracteriza la distribución espectral de energía (SED) se la realizó usando los valores de flujo y sus errores asociados en cada una de las longitudes de onda en las cuales se determinó dichas densidades de flujo que almacenados dentro de HIPE. Primero se procedió a elaborar una gráfica introduciendo los valores para cada eje de la figura, para el eje x se introdujeron los valores de las longitudes de onda usadas (70, 160, 250, 350, 500 μm), y para el caso del eje y se introdujeron los valores de las densidades de flujos y el error asociado a cada uno, relacionados mediante la función `setErrorY()` que mostró una barra de error en cada valor de flujo. Posteriormente se creó dos funciones `LayerXY()` en la cual se introdujeron los valores para x y y para las dos regiones de estudio. Finalmente con la herramienta `PlotXY()` se procedió a graficar lo obtenido en las funciones `LayerXY()`. Para cambiar los ejes a escala logarítmica se usó la herramienta `plt.xaxis.setType(Axis.LOG)` en cada uno de los ejes coordenados obteniendo así la SED de las dos regiones de estudio que se caracterizaron en este proyecto de investigación.

En la siguiente gráfica se observa la SED obtenida para el centro de Sgr C en círculos azules y para el centro de emisión del HCO⁺ se muestra la SED en cuadrados verdes. Los errores asociados a las densidades de flujo determinadas, se muestran como barras de errores en cada uno de los flujos.

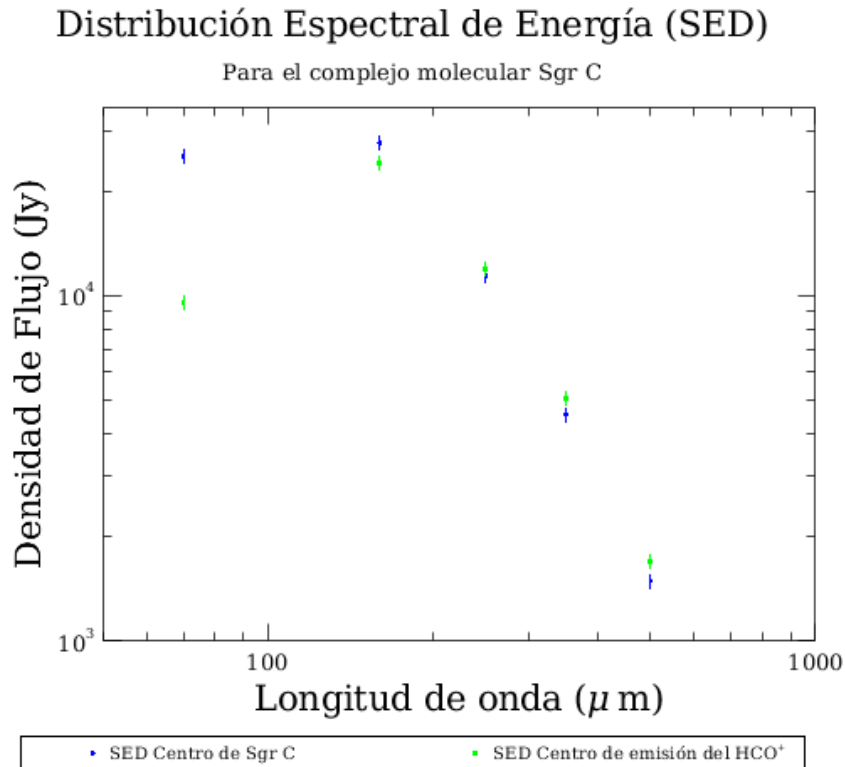


Figura 2.7: Distribución espectral de energía en el centro de Sgr C y centro de emisión del HCO^+ . Los valores de los flujos calculados en las cinco diferentes longitudes de onda se muestran en azul para Sgr C y verde para el HCO^+ .

En la figura 2.7 se observa la densidad de flujo (Jy) Vs. longitud de onda (μm) en escala logarítmica, para la región del centro de Sgr C (azul) y para el centro de emisión del HCO^+ . En esta gráfica se encuentran representados los errores asociados a los valores de densidad de flujo, estos valores son pequeños en comparación con los valores estimados para los flujos, como se muestran en la tabla 2.1, por lo que no tiene un efecto notorio en la representación de la SED. Aquí se puede observar que los valores obtenidos de densidad de flujo para la región del centro de Sgr C para valores de longitud de onda de $70 \mu\text{m}$ es mucho mayor que para el ion formilo y a $160 \mu\text{m}$ es mayor por poco a los del centro de emisión del HCO^+ . Mientras que a longitudes de onda de $250, 350$ y $500 \mu\text{m}$ son ligeramente mayores las densidades de flujo obtenidas para el ion formilo. En ambos casos se puede observar la presencia de un máximo de emisión térmica de polvo a una longitud de onda de $160 \mu\text{m}$, este pico corresponde a máxima emisión para el polvo en el rango del infrarrojo.

2.3.3. Estimación de la temperatura de polvo

Para estimar la temperatura de polvo se hizo uso de los valores de flujo, sus respectivos errores y longitud de onda mostrados en la tabla 2.1. Luego estos valores fueron representados en la SED en la figura 2.7 para cada región de estudio. Estos valores fueron ajustados

mediante un modelo de cuerpo gris para estimar la temperatura de polvo.

MODELO DE AJUSTE

Como la temperatura de polvo T_d emite como un cuerpo gris, para estimarla fue necesario ajustar los valores de densidad de flujo con un modelo de cuerpo negro modificado, en el cual se toma en cuenta la disminución en la emisividad mediante el parámetro β asociado al valor típico de 1.5 [46]. Para la modelización se usó un algoritmo de ajuste no lineal de cuerpo negro modificado llamado "BlackBody.py" realizado en python y compilado en HIPE en el cual se ajusto los valores de densidad de flujo para las dos regiones de estudio.

El algoritmo "BlackBody.py" permite realizar un ajuste de cuerpo gris mediante la ecuación 2.6, definida dentro de la función *modBBModel(NonLinearPyModel)*, esta función depende de los parámetros amplitud fija en 1.0, temperatura (K) y β fija en 1.5. Los valores constantes como la velocidad de la luz, la constante de Boltzmann y la constante de Planck fueron tomados desde la base de unidades constantes del procesador HIPE mediante el comando *herschel.share.unit.Constant.prm.value* en cada uno de los parámetros. Posteriormente para ajustar los datos a esta función fue necesario tomar como valores de partida las densidades de flujo, obtenidas mediante el script "Photometry.py", que fueron almacenadas en el vector *flux* que se fijó como valor para el flujo en la función *modBBModel*, también se usó los errores asociados a las densidades de flujos con los que se calculó el error estimado de la temperatura de polvo, estos valores fueron almacenados en el vector *fluxerr*. Luego mediante la función *LayerXY()* se almacenaron los vectores que posteriormente fueron ilustrados. La temperatura que mejor se ajusto a los datos ingresados, en cada una de las regiones de estudio, para el modelo de cuerpo gris fue la correspondiente a la temperatura de polvo obtenida mediante la herramienta *fit1.fit(flux,weight)* y su error relacionado con la desviación estándar del ajuste se lo obtuvo con la herramienta *fit1.getStandardDeviation()*. Finalmente mediante la herramienta *PlotXY()* se graficó un cuadro con los dos ajustes de cuerpo gris (para el Centro de Sgr C y para el Centro de emisión del HCO⁺) y sus respectivos valores de la SED con los errores asociados.

A continuación se muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada para la obtención de la temperatura de polvo en cada región de estudio del complejo molecular Sgr C:

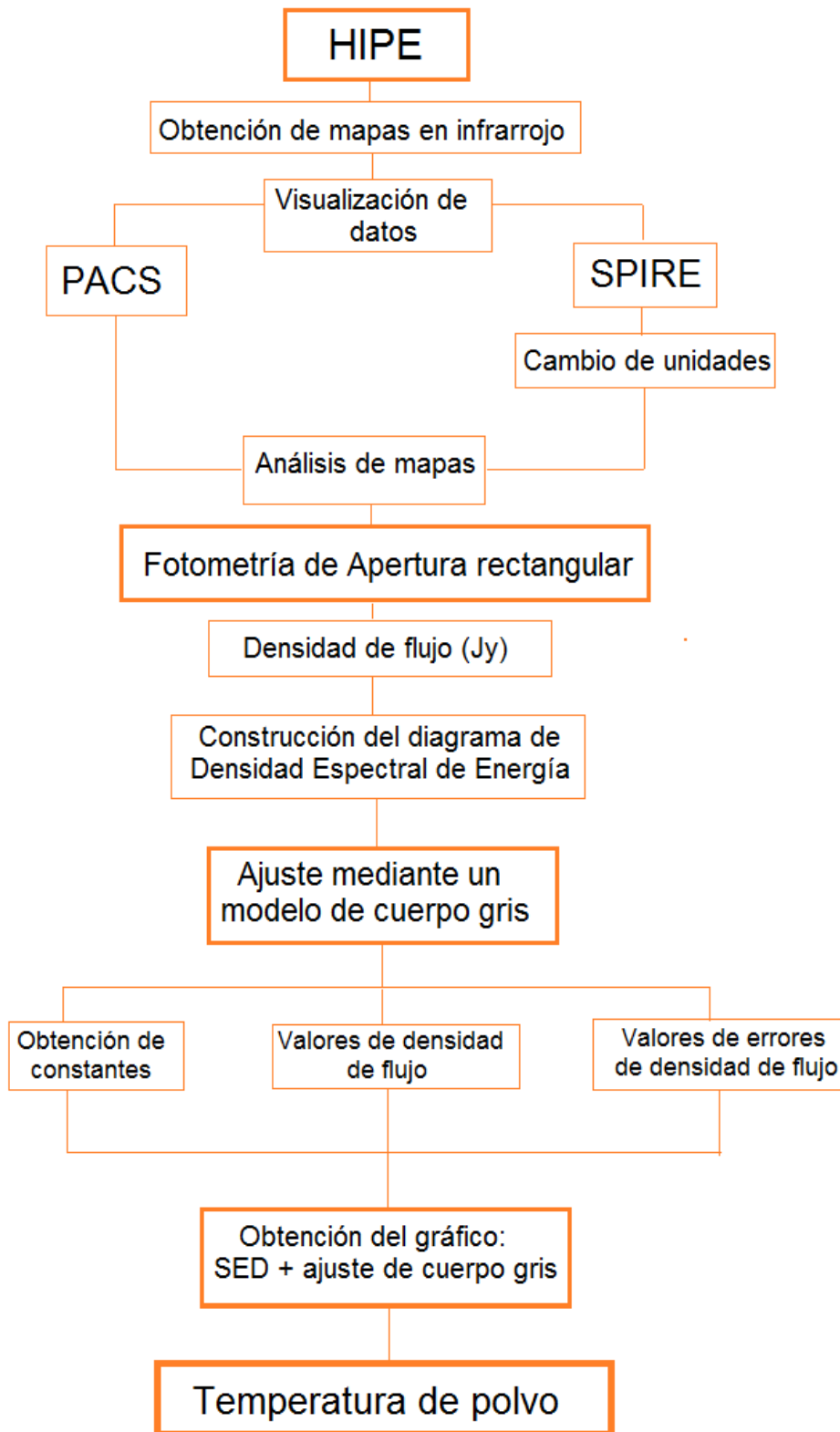


Figura 2.8: Diagrama de flujo que muestra el análisis principal para el procesamiento de datos que permitió la estimación de la temperatura de polvo en la dos regiones de estudio del complejo molecular Sgr C.

2.4. Resultados

Los valores estimados obtenidos para la temperatura de polvo en las regiones de estudio fueron: en el caso del centro de Sgr C en $(-0.53, -0.107)$ [21], fue de 19.2 K, con un error asociado de 1.5 K. Mientras que para la emisión del ion formilo el análisis se realizó con centro en $(-0.52, -0.17)$ [21] y se estimó un valor de 16.9 K para la temperatura de polvo y un error asociado de 1.0 K, como se muestra en siguiente tabla.

Fuente	Longitud Gal. [l]	Latitud Gal.[b]	T_d [K]	Error T_d [K]
C. de Sagitario C	-0.57	-0.10	19.2	± 1.5
C. de Emisión HCO ⁺	-0.52	-0.17	16.9	± 1.0

Cuadro 2.2: Resultados obtenidos en el estudio de emisión en infrarrojo para el complejo molecular Sgr C. Estimación de la temperatura de polvo y su respectivo error y las coordenadas de las regiones de estudio.

En la siguiente figura se observa el resultado obtenido para el estudio en infrarrojo del complejo molecular Sgr C. En la gráfica se puede observar la modelización de cuerpo gris que se realizó a la SED en las dos regiones de estudio:

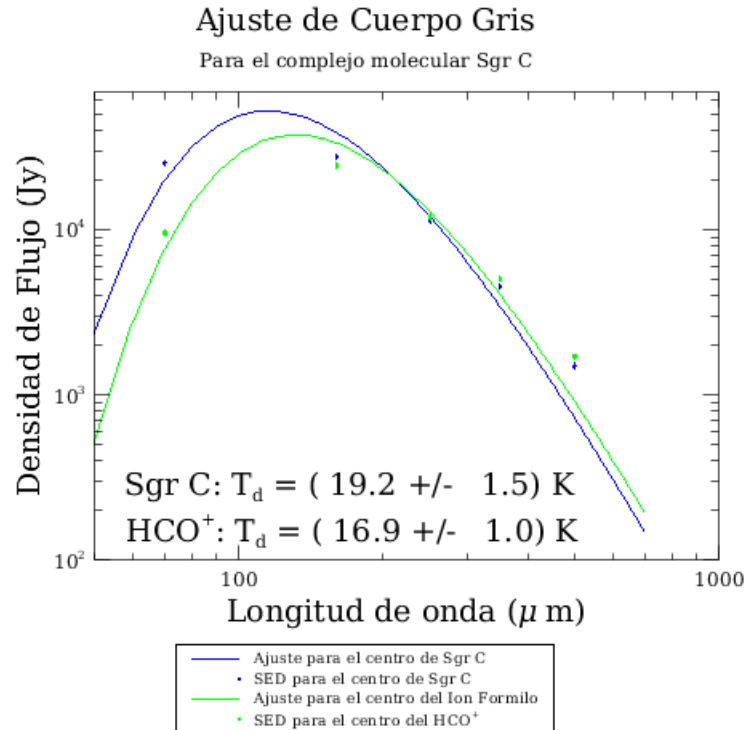


Figura 2.9: Temperatura de polvo estimada en las dos regiones de estudio (en negro). En círculos azules se muestra la SED de la región Centro de Sgr C y en cuadrados verdes se muestra la SED del Centro de emisión del HCO⁺. El ajuste de cuerpo gris se muestra en azul para Sgr C y en verde para la emisión del HCO⁺.

En la figura 4.5 podemos observar los ajustes de cuerpo gris realizados para las dos regiones de estudio, para el Centro de Sgr C la curva de ajuste se muestra en azul mientras que para la región del centro de emisión del HCO^+ se muestra en verde. Para la región de estudio del Centro de Sgr C la curva del ajuste describe de manera aproximada los valores obtenidos por la SED (azules), con una diferencia muy marcada a la longitud de onda de $160 \mu\text{m}$ donde el valor de la densidad de flujo es mucho más bajo. Como se puede observar error asociado tanto en la determinación de la densidad de flujo como en la estimación de la temperatura de polvo, se concluyó que el valor estimado para la temperatura de polvo de $T_d = 19.2 \pm 12.5 \text{ K}$ es confiable para esta región del complejo molecular Sgr C. Además se pudo observar un máximo de emisión en infrarrojo lejano del polvo a una longitud de onda de $\sim 120 \mu\text{m}$ que coincide con valores de temperatura de $\sim 20 \text{ K}$ obtenidos en la literatura para las nubes del Centro Galáctico [11].

El ajuste mostrado para la región del Centro de emisión del HCO^+ en verde muestra que los valores de la SED son mucho más próximos al ajuste que en el caso de la región del centro de Sgr C indicando que el valor estimado de temperatura de polvo $T_d = 16.9 \pm 1.0 \text{ K}$ es confiable. Este valor ligeramente menor a la temperatura de polvo obtenida en el centro de Sgr C, esto podría deberse a que el centro de Sgr C (-0.53, -0.10) [18] se encuentra cerca de una región que presenta formación estelar temprana de alta masa con dos núcleos pre-estelares (EGO) [21], elevando la T_d .

En ambas curvas puede observarse como alcanzan un máximo de emisión térmica de polvo cerca a una longitud de onda de $\sim 120 \mu\text{m}$, aunque es más notorio en la región del centro de Sgr C que se encuentra cerca de la región donde alberga el EGO G359.44-0.102, lo cual podría significar que la diferencia entre las dos temperaturas posiblemente este relacionada con la región de formación estelar. También se puede observar que a partir de un longitud de onda de $\sim 200 \mu\text{m}$ (donde las curvas se cruzan) el ajuste de las dos regiones es casi idéntico. Este estudio permitió estimar la temperatura que caracteriza a las dos regiones estudiadas en el complejo molecular Sgr C, la misma que permite explorar la población de fuentes de polvo continuo en la Zona Molecular Central y da paso a la caracterización de la actividad de formación estelar en esta región del Centro Galáctico.

DISCUSIÓN

En esta investigación se pudo estimar la temperatura de polvo en dos regiones del complejo molecular Sgr C. Mostrando así que la región donde al parecer existe presencia de formación estelar temprana de alta masa (EGO) se encuentra cerca al Centro de Sgr C, se presenta una T_d de 19.2 K . Del estudio de emisión térmica en el Centro de emisión del gas denso HCO^+ se obtuvo un valor de temperatura estimado de $\sim 3 \text{ K}$ menor al obtenido en el Centro de Sgr C. Esta región no muestra indicios de formación estelar y dado que el valor de temperatura de polvo estimada no es muy bajo, podría realizarse un estudio más detallado, que pueda mostrar indicadores de formación estelar.

El resultado obtenido en Sgr C (posición cerca del EGO) de $T_d = 19.2$ K se encuentra en concordancia con los resultados obtenidos por Kendrew (2013) [21] donde se estima un valor de ~ 20 K para la temperatura de polvo en la posición del EGO G359.44-0.102, este valor de temperatura de polvo fue estimada utilizando la misma metodología realizada en este trabajo de titulación. El valor de la estimación de la T_d del centro de Sgr C y del centro de emisión del ion formilo, donde $T_d = 16.9$ K, muestran que ambas temperaturas de las dos regiones del complejo molecular Sgr C se encuentran dentro de los valores estimados para nubes moleculares en las que se ha confirmado formación estelar. Estos valores de temperatura son superiores a otros encontrados en el estudio de cúmulos de nubes moleculares asociadas a formación estelar activa como en el caso de Orión y Tauro que presenta temperaturas de polvo de ~ 17 K [51] obtenidas mediante fotometría de apertura y ajuste de cuerpo negro modificado; o en la gran nube de Magallanes asociada a una temperatura de polvo promedio de 15 K [6] estimada mediante fotometría de mapas en el polvo frío continuo. Aún así los valores estimados de T_d es este estudio son menores que los encontrados en estudios realizados sobre otras regiones, como la nube molecular S175 con un valor de 27.9 K [52] esta temperatura de polvo fue estimada mediante un ajuste a un espectro modificado de Planck; o en el caso de la fuente IRAS 18236-1205 con un valor de temperatura de 26 K [11] obtenida mediante la misma metodología realizada en este proyecto de investigación. Todos estos valores de temperaturas de polvo y los encontrados en este proyecto se encuentra dentro de lo esperado para nubes moleculares que han mostrado presencia de formación estelar activa asociada a temperaturas de polvo típicas que va en un rango de [$\sim 15-40$] K [10].

Capítulo 3

Propiedades Físicas de Sgr C

En este capítulo se estimó la temperatura cinética T_k presente en el complejo molecular Sgr C. Para hacerlo se utilizó la molécula de acetonitrilo (CH_3CN) que traza gas denso en una región. Mediante condiciones de LTE fue posible relacionar la temperatura de excitación T_{ex} con la temperatura cinética T_k de la región. El análisis y procesamiento de datos se lo realizó en el centro de Sgr C y en el centro de emisión del ion formilo (HCO^+).

3.1. Condiciones físicas del gas molecular

En el Centro Galáctico se encuentra una gran parte del gas interestelar en forma de nubes moleculares con temperaturas que varían entre [30-200] K. El gas y las consecuencias de su movimiento en la ZMC se encuentra presente en varias propiedades físicas observadas en ellas como la turbulencia, densidad y temperatura cinética T_k descritas a continuación [17]:

Turbulencia

Indica que las nubes moleculares se disipan al colisionar entre ellas cuando atraviesan un medio con un campo fuertemente magnetizado (~ 1 mG) como el que se presenta en el Centro Galáctico [17].

Densidad

El gas en la Zona Molecular Central presenta densidades altas (10^3 – 10^5 cm^{-3}). Los estudios realizados con trazadores de gas denso en los complejos moleculares Sgr A, Sgr B y Sgr C muestran que donde se tiene una alta concentración de gas las nubes moleculares son más densas y no se dispersen por a las fuerzas de marea [17].

Temperatura del gas molecular

El gas presente en la CMZ tiene temperaturas que van desde los 30K hasta los 200K, aunque existen regiones que alcanzan temperaturas de hasta los 500K. Mediante el estudio de trazadores de gas denso, se ha determinado que los mecanismos de calentamiento (ter-

malización) del gas en las nubes moleculares no se debe a la radiación estelar de los granos de polvo ya que las nubes son relativamente frías y por ende tampoco a las colisiones entre el gas y el polvo. Este calentamiento podría deberse a colisiones nube-nube [17]. Para estudiar las propiedades físicas del gas presente en una región se usa trazadores moleculares de gas denso. La principal propiedad determinada en las nubes moleculares gracias al trazador CH₃CN es la temperatura cinética [53]. La temperatura cinética (T_k) es la temperatura a la que se encuentra el gas definida en base a la velocidad promedio de las moléculas presentes en el mismo [54].

3.2. Propiedades físicas del gas

Las propiedades cinemáticas presentes en el gas molecular se estudian mediante un análisis detallado de líneas moleculares. A parte de la temperatura cinética T_k también existen otras propiedades del gas molecular como la dispersión por efecto Doppler que se deben tomar en cuenta al momento de estudiar líneas moleculares [8].

TEMPERATURA CINÉTICA

Para estimar la temperatura cinética se lo hace en base a la temperatura de excitación (T_{ex}) que es la temperatura que relaciona dos niveles de energía en una distribución de Boltzmann (ya que la excitación de las moléculas depende de las colisiones) en condiciones de equilibrio termodinámico local, donde la velocidad de las partículas se termalizan con facilidad y como los niveles de energía se encuentran dominados por colisiones se puede aproximar la $T_{ex} \approx T_k$ [38]. La T_{ex} puede obtenerse desde estudios espectroscópicos usando un diagrama de rotación, mediante la siguiente expresión [41]:

$$\log \left(\frac{8\pi k\nu^2}{hc^3 g_u} \int T_L dv \right) = \log \left(\frac{N}{Q(T_{ex})} \right) - \frac{E_u}{kT_{ex}} \log(e) \quad (3.1)$$

donde $h=6.626070 \times 10^{-34}$ J.s es la constante de Planck, $k=1.3806485 \times 10^{-23}$ J/K es la constante de Boltzmann, ν es la frecuencia de observación en s^{-1} , T_L es la intensidad de la línea en función de la temperatura estimada en K, N es la densidad de columna en cm^{-2} , $Q(T_{ex})$ es la función de partición dependiente de la temperatura de la molécula, g_u es el peso estadístico del nivel u y E_u es su energía por encima del estado fundamental [41].

Esta ecuación relaciona la integral de la temperatura de línea en función de la distribución de velocidad, la ecuación de transporte radiativo (mostrada en 1.9) y la aproximación de que en LTE, la población de todos los niveles de energía molecular está determinada por una temperatura única (T_{ex}) [41]. Por lo tanto conociendo la temperatura de la línea $T_{L,\nu}$ de la ecuación 3.1 obtenida de la emisión espectral de los trazadores de gas denso, se puede estimar la temperatura cinética [41].

DISPERSIÓN POR EFECTO DOPPLER

El efecto Doppler muestra el cambio en la frecuencia recibida ν de una fuente que emite fotones a una frecuencia ν_0 y se mueve respecto al observador a una velocidad radial V_r . Las frecuencias emitidas y recibidas se relacionan mediante $\frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} = \frac{-V_r}{c}$ donde $c \sim 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ es la velocidad de la luz. Además si en el gas el mecanismo que determina las velocidades son las colisiones entre partículas la distribución de velocidades [38], para una T_k , que sigue el gas esta dado por la ecuación de Maxwell-Boltzmann [53]:

$$f(V_r) = 4\pi V_r^2 \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{mV_r^2}{2kT_k}\right) \propto -\left(\frac{V_r^2}{2\sigma}\right) \quad (3.2)$$

donde $\sigma = \sqrt{kT_k/m}$ es la dispersión interna de la velocidad y V_r viene expresada por la dispersión de efecto Doppler, hacen que el perfil de emisión del gas este dado por esta distribución gaussiana, que es la manera de ajustar los espectros obtenidos de los trazadores moleculares [53].

3.3. Modelo Gaussiano

El ajuste gaussiano analiza las componentes y caracterizaciones de parámetros presentes en datos de trazadores moleculares, con el fin de obtener información de propiedades físicas de dichos trazadores. Para ello se realiza estudios del perfil gaussiano de los espectros, en términos sencillos como velocidad y dispersión. Esto permitirá facilitar la determinación de las propiedades físicas del gas en una región. De la relación 3.2 y 3.1 se obtiene la ley de ajuste gaussiano [41]:

$$\tau_\nu = \tau_0 e^{\frac{-4\ln 2(v-v_0)^2}{\Delta v^2}} \quad (3.3)$$

con $\Delta v = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma = 2,354\sqrt{kT_k/m}$ es la anchura a media altura del perfil gaussiano y τ_ν es la opacidad en la velocidad ν y τ_0 es la opacidad a la velocidad ν_0 [41].

3.4. Análisis y Procesamiento de Datos

Para la derivación de la temperatura cinética T_k primero se estimó la temperatura de excitación T_{ex} del trazador molecular CH_3CN , ya que este valor es equivalente a la T_k . Para determinar la temperatura de excitación se obtuvo un espectro promedio de cada región de estudio, que posteriormente se ajustó mediante una modelización gaussiana de espectros sintéticos con la cual se obtuvo una estimación de la T_{ex} y por ende la temperatura cinética de cada región. Se eligieron como centros de estudio dos regiones de estudio del complejo

molecular Sgr C ubicados en las siguientes coordenadas galácticas:

- Centro de Sagitario C (l,b): -0.57, -0.10 [18]
- Centro de la emisión de la molécula HCO^+ (l,b): -0.52, -0.17 [18]

Para el procesamiento y análisis de los datos que permitieron estimar la temperatura cinética en estas regiones se usó cubos de datos obtenidos por la base de datos del radiotelescopio MOPRA (parte de la institución Australia Telescope National Facility, ATNF).

3.4.1. Descripción de los datos

Para la estimación de la temperatura de excitación T_{ex} en la emisión del CH_3CN se analizó el cubo de datos de la molécula de acetonitrilo en la Zona Molecular Central. El cubo se lo obtuvo de la base de datos de la Instalación Nacional del Telescopio de Australia (ATNF, por sus siglas en inglés) de las observaciones realizadas por el radio telescopio MOPRA. Para el procesamiento del cubo de datos se usó el procesador GILDAS, mientras que para el ajuste gaussiano se usó el procesador MADCUBA.

MOPRA RADIO TELESCOPE

El radiotelescopio Mopra utilizado para estudios espectroscópicos en varios rangos de frecuencia, trabaja en longitudes de onda milimétricas. Para este proyecto de investigación se utilizó datos de un estudio realizado por este radiotelescopio en la banda de 3 mm que cubre un rango de frecuencia de 76 a 117 GHz para la Zona Molecular Central. El tiempo de integración en cada una de las observaciones para los datos obtenidos de la CMZ fue de 5.5 minutos, además es parte de la ATNF, operada por la Organización de Ciencia e Investigación Industrial de la Commonwealth (CSIRO, por sus siglas en inglés). Mopra está equipado con tres receptores para observaciones de plato único que se usa principalmente para espectroscopía en 3mm e interferometría de línea de base larga. Además es el telescopio de ondas milimétricas de plato único más grande del hemisferio sur [8].

Para la obtención de los archivos de observación se eligió el rango de frecuencia de 85-93 GHz que es la banda donde los trazadores de gas denso usados en este proyecto de investigación presentan sus picos de emisión más intensos. En la base de datos se encuentra numerados los estudios realizados sobre la Zona Molecular Central en tres rangos de frecuencia [85-93]GHz, [42-50]GHz y [20-28]GHz, donde se tiene los cubos de datos para 18 líneas moleculares y 2 atómicas [19].

Los datos son de acceso libre, poseen una resolución espectral de ~ 2 km/s y una resolución espacial de ~ 40 arcsec. El cubo de datos contiene información en $-0^\circ.7 \leq l \leq 1^\circ.8$ y $-0^\circ.3 \leq b \leq 0^\circ.2$ en coordenadas galácticas. Para obtenerlos se seleccionó las frecuencias de

interés en la molécula de acetonitrilo, para este proyecto de investigación las frecuencias estuvieron centradas al rededor de 91.9870 GHz, obteniéndose así los archivos que contenían el cubo de datos de la molécula CH₃CN.

El cubo de datos fue procesado mediante el software GILDAS y MADCUBA que trabajan en radio frecuencias. Esto permitió obtener una gráfica de la región del complejo molecular Sgr C donde se tiene la máxima emisión del CH₃CN y su respectivo espectro, como se puede observar en las siguientes gráficas:

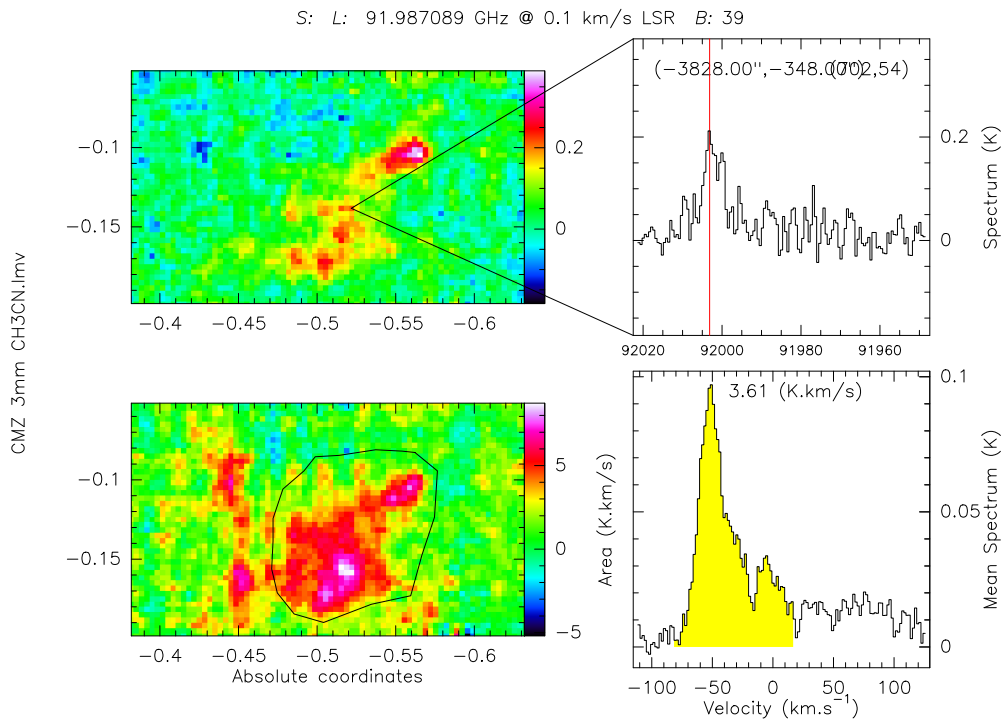


Figura 3.1: Imagen del cubo de datos de la molécula de acetonitrilo en el complejo molecular Sgr C. En la parte superior se puede encontrar un mapa instantáneo a una frecuencia dada y su respectivo espectro. En la parte inferior se puede ver el mapa integrado del área en negro y su respectivo espectro en el rango de velocidades estudiado.

En la figura 3.1 se muestra el cubo de datos del trazador molecular CH₃CN donde en los paneles superiores se puede observar un mapa instantáneo de la región a una frecuencia de 92 004 MHz que presenta una alta emisión de este trazador y en el lado derecho el espectro respectivo. En los paneles inferiores se puede observar en el lado izquierdo un mapa integrado, en negro el complejo molecular Sgr C en un rango de velocidades de [-70, 20] km/s donde se tiene la máxima emisión del acetonitrilo. A continuación se muestra el espectro promedio del trazador CH₃CN para complejo molecular Sgr C:

0;0 UNKNOWN O:03-APR-2019 R:23-JAN-2020
 l: -0.520 b: -0.170 Ga Rad. 0.0° Offs: -275.0 -150.0
 Unknown tau: 0.000 Tsys: 0. Time: 0.0sec El: 0.0
 N: 342 l0: 143.477 V0: -50.00 Dv: 1.757 LSR
 F0: 91987.0890 Df: -0.5390 Fi: N/A

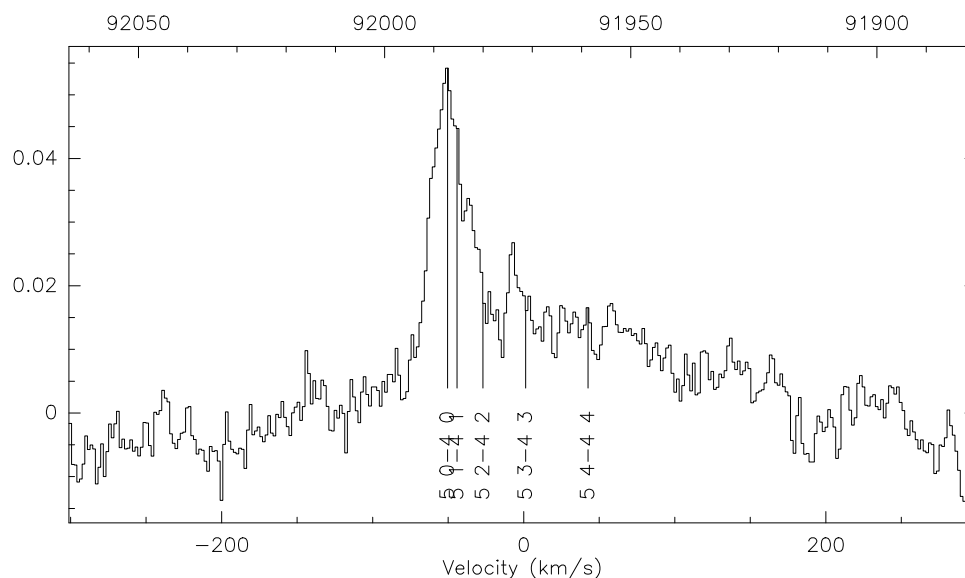


Figura 3.2: Picos de transición de las cinco líneas de emisión más estables de la molécula CH_3CN (mostradas en el tabla 1.3) para el complejo molecular Sgr Cy la corrección debido al efecto Doppler de -50km/s .

En la figura 3.2 se observa el espectro obtenido de la emisión molecular del CH_3CN así como las principales líneas de transición, mostradas en la tabla 1.3, sobre las cuales se realizó un ajuste gaussiano. También se puede observar que el espectro ya se encuentra corregido en la velocidad por el corrimiento Doppler (V_0 , parte superior del espectro) que se produjo debido a que la fuente se aproxima hacia el observador.

Para la derivación de la temperatura de excitación primero se obtuvo un espectro promedio del cubo de datos del trazador molecular acetonitrilo mediante el procesador GILDAS y posteriormente se lo ajustó mediante una modelización gaussiana con el software MADCU-BA.

3.4.2. Determinación del espectro promedio

Para estimar la temperatura cinética de cada una de las regiones de estudio fue necesario primero determinar el área de la región y el espectro de la misma. Para determinar la región donde se iba a realizar el análisis espectroscópico se usó el paquete *GREG* del procesador de datos *GILDAS*. Y para el procesamiento de los espectros en cada una de las regiones se usó el programa *CLASS* del mismo software.

ANÁLISIS DEL CUBO DE DATOS

Para el análisis espectroscópico de la molécula de acetonitrilo se usó un cubo de datos (una matriz de valores multidimensional). En este proyecto de investigación los cubos de datos poseen tres dimensiones que representan: las dos coordenadas espaciales de la CMZ y la velocidad (o la frecuencia) [55]. Para obtener el área de estudio, en cada una de las regiones, del cubo de datos se utilizó el programa GREG de GILDAS.

GILDAS: Es un sistema de procesamiento de imágenes utilizado en aplicaciones sub-milimétricas y de radio astronomía que contiene muchas facilidades orientadas principalmente al mapeo de líneas espectrales y datos tridimensionales [55].

GREG: Es un paquete de utilidad gráfica que tiene como fin preparar y analizar trazadores de datos o de los resultados de cálculos teóricos. Tiene como objetivo principal la visualización interactiva de los cubos de datos de alta resolución con sus respectivos mapas instantáneos e integrados y espectros asociados cuyos rangos se los puede modificar por teclado [55].

Para determinar un espectro que promedie todos los espectros de una región primero fue necesario determinar las regiones donde se realizaría el estudio espectroscópico. Para ello primero se usó como centro el cubo de datos el centro de Sgr C (-0.57,-0.10) [21] mediante la herramienta *run-reproject* en la cual se introdujo el centro, el tipo de proyección y el sistema coordinado deseado, esto facilitó el posterior análisis de los espectros pues ubicar al complejo molecular Sgr C fue más sencillo. Luego se procedió a visualizar el cubo de datos obtenido que abarcó en un principio toda la CMZ, donde se localizó y centró el complejo molecular Sgr C de una manera sencilla debido al paso previo, esto se llevó a cabo mediante la herramienta *Comprehensive DataCube Display*. Finalmente se determinó las regiones donde se realizó el procesamiento espectroscópico para obtener el espectro promedio: Centro de Sgr C y Centro de emisión del HCO^+ . Para esto se usó el cursor y comandos desde teclado que permitió elegir estas dos regiones del complejo molecular Sgr C que presentaban la mayor emisión del gas molecular acetonitrilo, esto se estableció en el rango de velocidades de [-70, 20] km/s. Las regiones fueron representadas por un polígono no regular que estimó el radio en el cual se determinó el espectro promedio.

Las gráficas del cubo de datos para las regiones de estudio: Centro de Sgr C y centro de emisión del HCO^+ con sus respectivas áreas estimadas para el procesamiento espectroscópico, se muestran a continuación:

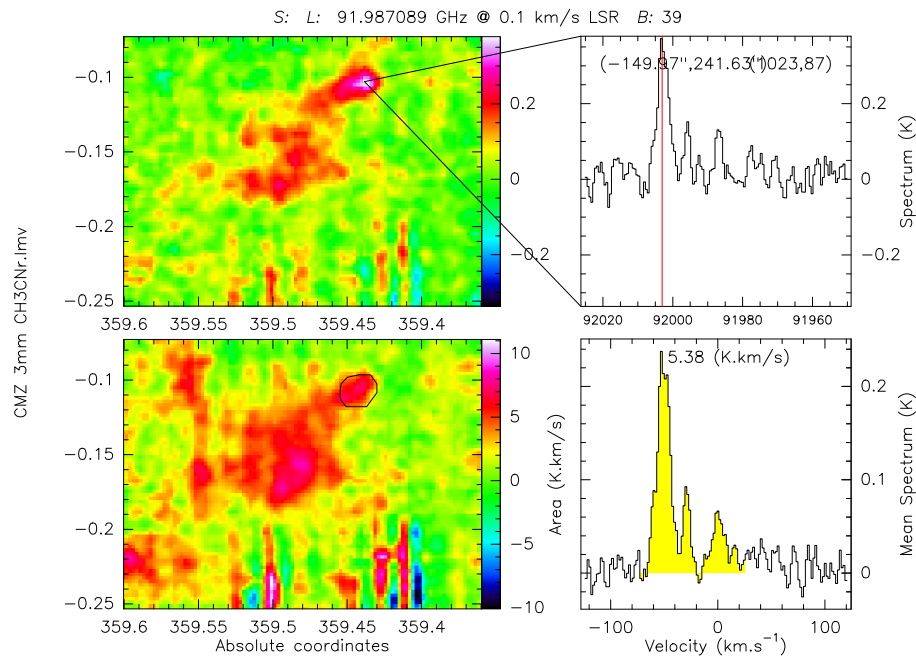


Figura 3.3: Área de estudio en el centro de Sgr C donde se determinó el espectro promedio. En el cubo de datos se puede observar los mapas instantáneo (superior izquierdo) e integrado (inferior izquierdo) de la región y sus respectivos espectros en el lado derecho. El estudio se lo realizó en un rango de velocidades de $[-70,20]$ km/s.

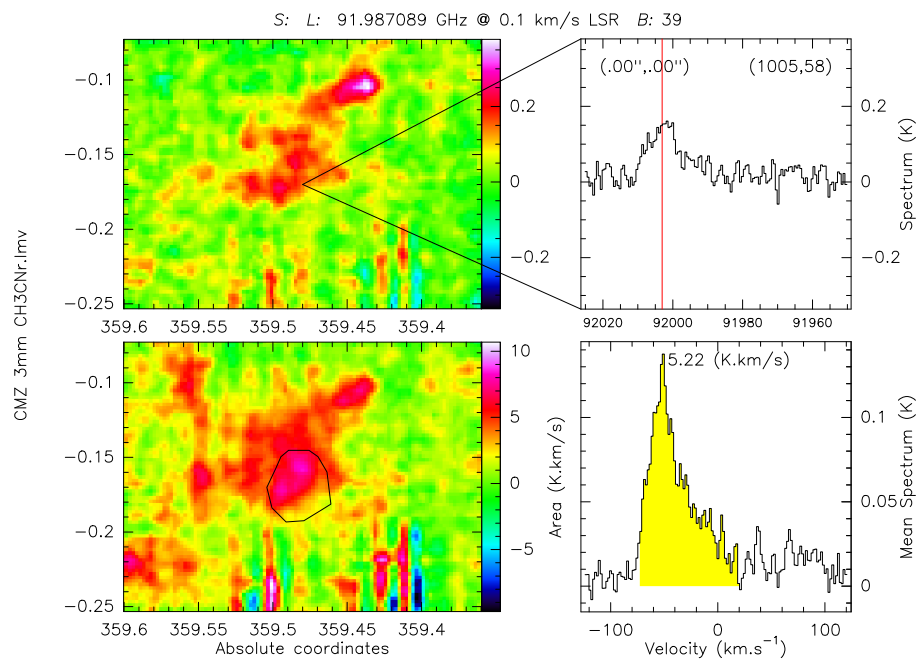


Figura 3.4: Área de estudio para el ion formilo donde se determinó el espectro promedio. En el cubo de datos se puede observar los mapas instantáneo (superior izquierdo) e integrado (inferior izquierdo) de la región y sus respectivos espectros en el lado derecho. El estudio se lo realizó en un rango de velocidades de $[-70,20]$ km/s.

En las figuras 3.3 y 3.4 se observa el cubo de datos de la emisión molecular del gas denso acetonitrilo para la región Oeste de la CMZ (Complejo molecular Sgr C). Las gráficas se

encuentran centradas en el centro de Sgr C. Cada figura se encuentra dividida en cuatro paneles. En los paneles izquierdos de las gráficas se muestra los mapas del complejo molecular Sgr C que van de $-0^{\circ}.63 \leq l \leq -0^{\circ}.4$ y $-0^{\circ}.25 \leq b \leq -0^{\circ}.8$ en coordenadas galácticas, la escala de colores muestra la intensidad en mK. En el lado derecho se encuentran los paneles que muestran los espectros, en velocidad (km/s) (o frecuencia) Vs. Temperatura (K) correspondientes a cada mapa. En el lado superior izquierdo se muestra el mapa instantáneo de la región y en lado superior derecho el espectro asociado al punto seleccionado, que es el Centro de Sgr C en la figura 3.3 y el Centro de emisión del HCO^+ para la figura 3.4. En los paneles inferiores se muestra un mapa integrado en el rango de velocidades $[-70, 20]$ km/s, que es donde se tiene la mayor intensidad de emisión del trazador CH_3CN , y en la parte derecha inferior se muestra el espectro promedio (aproximado) del área integrada en el polígono en negro, que para cada región de estudio (Centro de Sgr C y Centro de emisión del HCO^+) representa el área donde se determinó el espectro promedio de la región.

Para el procesamiento del cubo de datos en las regiones de estudio, se trabajó en el programa CLASS que permitió manipular los espectros de cada región y obtener el espectro promedio.

OBTENCIÓN DEL ESPECTRO PROMEDIO

Para determinar el espectro promedio de cada una de las regiones de estudio se trabajó en el cubo de datos con el programa CLASS del procesador GILDAS.

CLASS: Es un paquete de software para reducir los datos espectroscópicos obtenidos en un telescopio de plato único que tiene la facilidad de identificar una observación específica de un conjunto grande de espectros. El sistema también se puede utilizar como una base de datos y posee un monitor de comando que permite la manipulación de grandes volúmenes de datos. Class trabaja con datos espectrales mediante el formato .30m [55].

Para trabajar en CLASS fue necesario construir un archivo (.30m) que contenga los espectros almacenados del cubo de datos fuente (CH_3CN). Dentro del archivo primero se eligió el centro de la circunferencia donde se determinó el espectro promedio en cada una de las regiones de estudio que fueron el centro de Sgr C $(-0.57, -0.10)$ [21] y el centro de emisión del HCO^+ $(-0.52, -0.17)$ [21] que se muestran en las figuras 3.3 y 3.4 respectivamente, esto se lo realizó con la herramienta *find /pos*. Luego se procedió a elegir un radio que abarcara a todos los espectros en cada una de las regiones de estudio, el tamaño aproximado para el radio se lo tomó del polígono mostrado en las figuras 3.3 y 3.4 para el centro de Sgr C y el centro de emisión del HCO^+ respectivamente, para ello se utilizó la herramienta *set match*. Estas dos herramientas permitieron elegir un área circular donde se realizó el procesamiento espectroscópico. Posteriormente se obtuvo el espectro promedio en cada una de las regiones de estudio al promediar los espectros que se hallaban en la circunferencia descrita previamente, esto se lo llevó a cabo con la herramienta *average*. Finalmente para graficar el espectro promedio obtenido en cada región de estudio se usó el comando *plot*. Cada espectro prome-

dio tuvo que ser corregido en velocidad debido al desplazamiento Doppler, mostrado en las líneas de emisión, provocado por el movimiento de la nube con respecto al observador, esta corrección se la hizo mediante la herramienta *modify velocity*. Así se obtuvo el espectro promedio final para cada región de estudio, a continuación se muestra una tabla con los parámetros usados para llevar a cabo el procesamiento espectroscópico en las dos regiones de estudio:

Fuente	Coordenadas Gal. $[l, b]$	radio [offsets]	Corr. Doppler [km/s]
C. de Sagitario C	-0.56, -0.10 [21]	50	-52
C. de Emisión HCO ⁺	-0.52, -0.17[21]	150	-50

Cuadro 3.1: Parámetros obtenidos de CLASS para determinar el espectro promedio en las regiones de estudio en el complejo molecular Sgr C.

Los parámetros mostrados en la tabla 3.1 fueron tomados del análisis en GREG con comandos por teclado para cambiar de manera interactiva de coordenadas galácticas a coordenadas de posición offset. Para la corrección por efecto Doppler se usó el catálogo para espectroscopía molecular JPL [56] donde se observaron las líneas de transición y las frecuencias correspondientes para el trazador CH₃CN, y así determinar el valor de la velocidad a la que se encontraban desplazadas.

A continuación se muestran los espectros promedios obtenidos mediante el software GILDAS para las regiones de estudio en el complejo molecular Sgr C, el centro de Sgr C y el centro de emisión de gas denso HCO⁺:

0;0 UNKNOWN 0:03-APR-2019 R:27-JAN-2020
 l: -0.520 b: -0.170 Ga Rad. 0.0° Offs: -108.3 +158.3
 Unknown tau: 0.000 Tsys: 0. Time: 0.0sec El: 0.0
 N: 342 l0: 142.339 V0: -52.00 Dv: 1.757 LSR
 F0: 91987.0890 Df: -0.5390 Fi: N/A

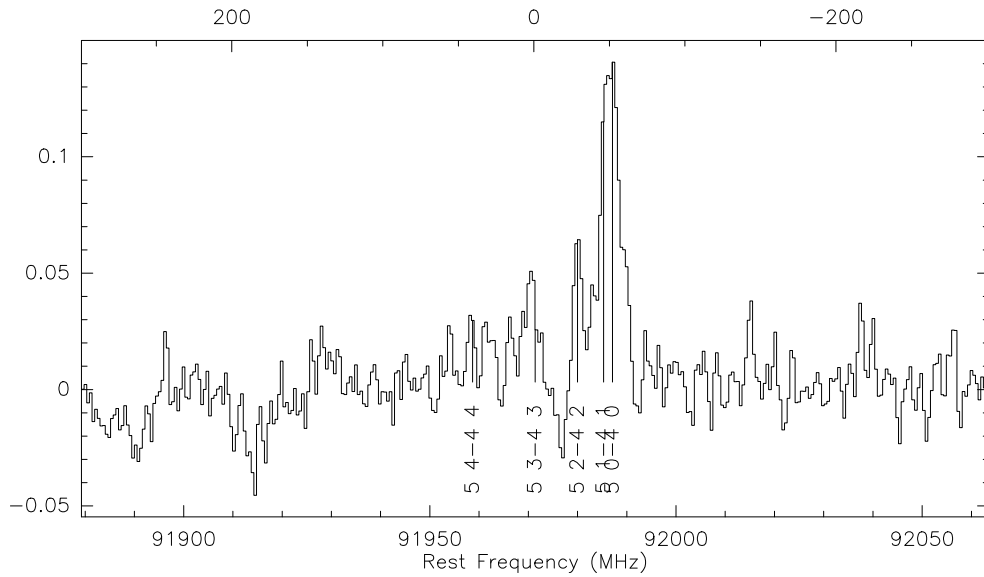


Figura 3.5: Espectro promedio obtenido en el centro de Sgr C mediante CLASS. Se puede observar la corrección por efecto Doppler en -52 km/s y las principales líneas de emisión para el CH₃CN.

0;0 UNKNOWN 0:03-APR-2019 R:27-JAN-2020
 l: -0.520 b: -0.170 Ga Rad. 0.0° Offs: -150.0 -150.0
 Unknown tau: 0.000 Tsys: 0. Time: 0.0sec El: 0.0
 N: 342 l0: 143.477 V0: -50.00 Dv: 1.757 LSR
 F0: 91987.0890 Df: -0.5390 Fi: N/A

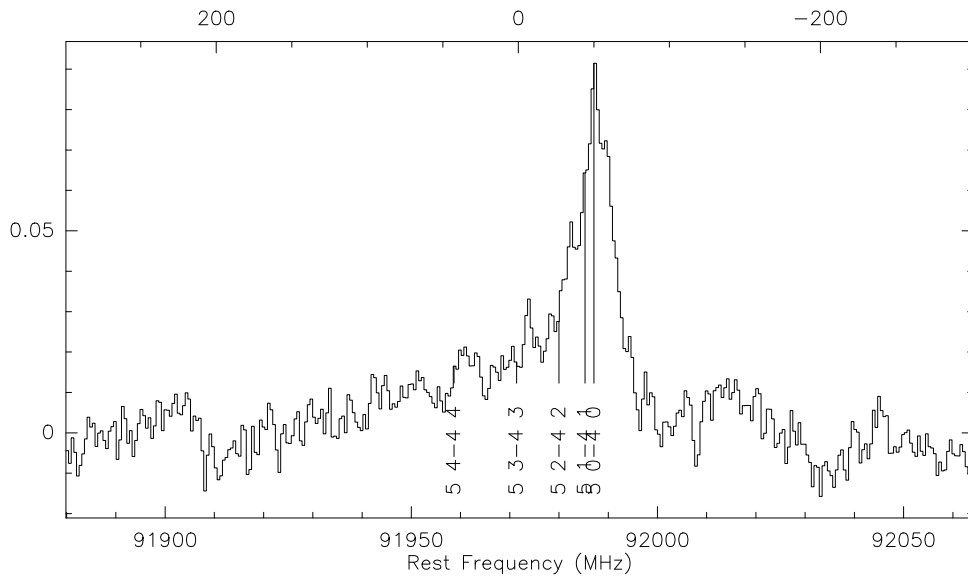


Figura 3.6: Espectro promedio obtenido en el centro de misión del HCO⁺ mediante CLASS. Se puede observar la corrección por efecto Doppler en -50 km/s y las principales líneas de emisión para el CH₃CN.

En las figuras 3.5 y 3.6 se muestran los espectros promediados obtenidos del procesamiento espectroscópico, para el centro de Sgr C y el centro de emisión del HCO^+ respectivamente. Los niveles de transición de la molécula de acetonitrilo CH_3CN y sus respectivas frecuencia dadas por la tabla 1.3 también se muestran en estas gráficas. En la parte superior de las figuras se encuentra información del espectro como el centro del cubo de datos, la velocidad a la que se tuvo que corregir los espectros por efecto Doppler y la frecuencia de reposo. Los espectros promedios mostraron diferentes perfiles de líneas en cada región donde se realizó el análisis espectroscópico, para el centro de Sgr C se pudo ver perfiles más delgados, mientras para el centro de emisión del ion formilo los perfiles de transición son más anchos.

Como se puede observar en las figuras 3.5 y 3.6 los picos de emisión para la molécula CH_3CN están muy juntos y un ajuste realizado por GILDAS, no es confiable. Por este motivo se realizó el ajuste gaussiano mediante espectros sintéticos usando el procesador MADCUBA.

3.4.3. Obtención de la temperatura cinética

Para estimar la temperatura cinética T_k se asumió un enfoque LTE debido a que el complejo molecular Sgr C presenta altas densidades [57].

A los espectros promedios de las regiones de estudio, se aplicó un modelo de ajuste gaussiano, permitiendo estimar la temperatura de excitación T_{ex} que es equivalente a la temperatura cinética T_k . Esto se lo realizó usando el procesador MADCUBA IJ que permite identificar líneas moleculares, obtener diagramas de rotación y ajustar los perfiles gaussianos sintéticos a los espectros promediados.

MODELO DE AJUSTE

Para estimar la temperatura cinética de las regiones de estudio se exportó los espectros promedios obtenidos mediante el procesador GILDAS al software MADCUBA IJ donde se los procesó ajustándolos mediante espectros sintéticos con la herramienta *SLIM*.

MADCUBA IJ: Es un software que permite la importación, visualización, procesamiento y el análisis de cubos de datos y sus espectros para derivar condiciones físicas del gas molecular trazado a partir de las líneas moleculares usando catálogos moleculares disponibles públicamente como CDMS, NASA-JPL, etc. La interfaz presente en el procesador es de fácil manejo y provee de las herramientas necesarias para interpretar cubos de datos y los espectros de líneas moleculares en condiciones de equilibrio termodinámico local. Esto permite producir espectros sintéticos de las líneas mediante la herramienta *SLIM* [41].

SLIM permite al usuario generar espectros sintéticos en LTE de múltiples moléculas y compararlas con las observaciones astronómicas, mediante herramientas de análisis espec-

tral que permiten modelar la emisión molecular de datos astronómicos cambiando los parámetros físicos de entrada de una manera totalmente interactiva a través de controles deslizantes. Además permite visualizar los espectros del modelo resultante superpuestos en los datos observados, mientras se modifican los parámetros. También proporciona herramientas para ajustar automáticamente los parámetros físicos con sus errores asociados [41].

Para realizar el ajuste gaussiano con el cual se estimó la temperatura cinética se utilizó los archivos que contenían los espectros promedios para almacenarlos en el procesador de MADCUBA. Estos espectros fueron guardados como un archivo del programa CLASS mediante el comando *import*, para posteriormente manipularlos usando la herramienta *SLIM*. Para ajustar el espectro promedio obtenido al perfil gaussiano sintético (que provee la herramienta *SLIM*) primero se obtuvo el espectro sintético utilizando el catálogo JPL [56] donde introdujo el rango de frecuencias de estudio [85-93] GHz para la molécula CH₃CN y se generó el espectro mediante la herramienta *SlimDB*. El espectro sintético superpuesto sobre el espectro promedio mostró que en las condiciones iniciales no se ajustaban correctamente por lo tanto se procedió a variar los parámetros de entrada: densidad de columna, temperatura de excitación, velocidad de la fuente (V_{LSR}) y ancho de línea (FWHM) utilizando los controles deslizantes para cada línea de transición. De esta manera se fue modificando el espectro superpuesto al espectro promedio, hasta que los parámetros modificados mostraran el mejor ajuste al espectro original este proceso se lo realizó con la función *SimFit*. Posteriormente se obtuvo el diagrama de rotación (que resuelve la ecuación 3.1) donde se mostró la densidad de columna por transición Vs. la energía de transición del espectro sintético final, mediante la función *RotDiag*, como los errores mostrados en el diagrama no fueron relevantes para el ajuste en la densidad de columna, se asumió como valor de temperatura de excitación T_{ex} el modificado en los parámetros de entrada. Así finalmente se obtuvo una estimación de la temperatura cinética T_k del gas molecular en cada una de las regiones de estudio del complejo molecular Sgr C.

A continuación se muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada para la obtención de la temperatura cinética en cada región de estudio del complejo molecular Sgr C:

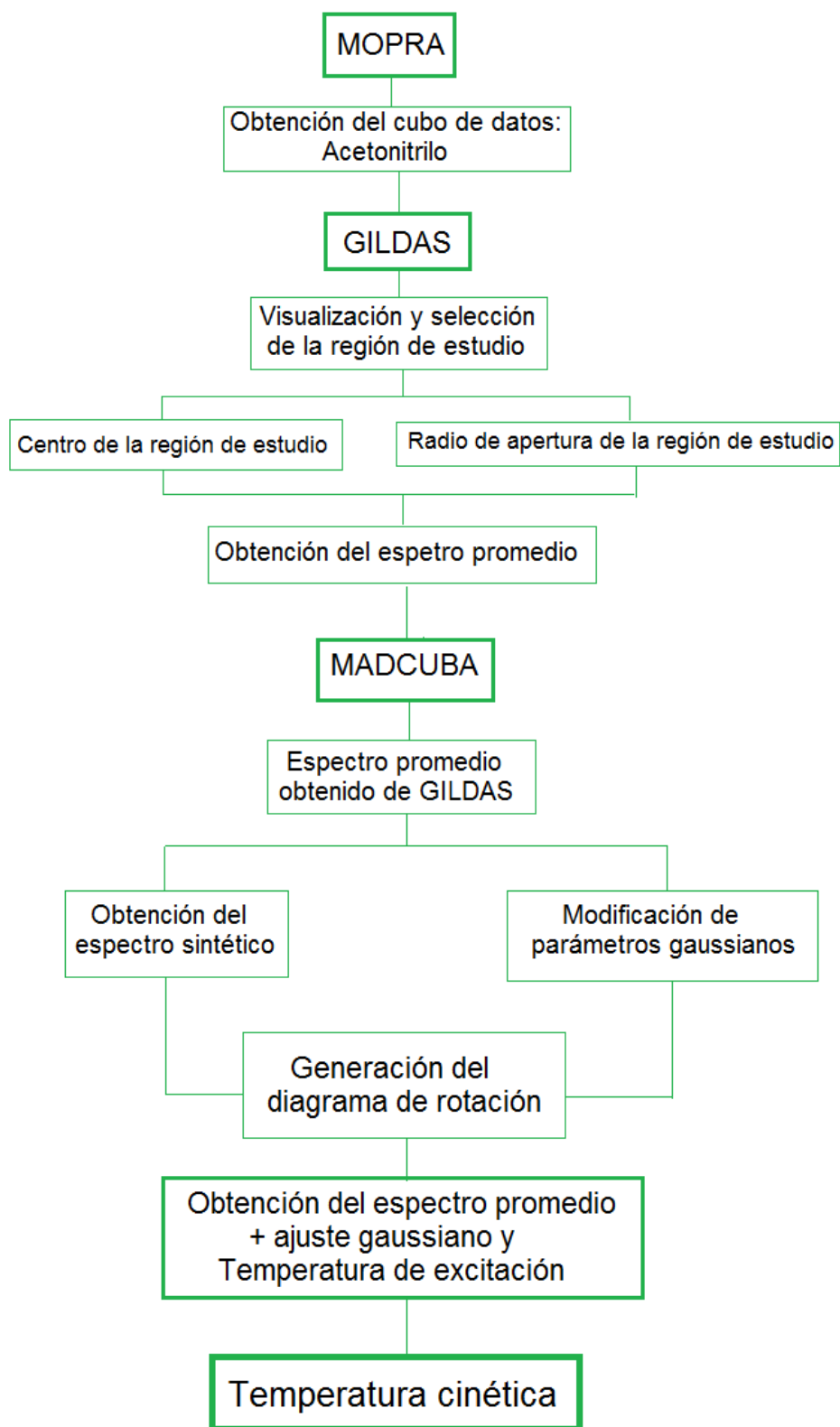


Figura 3.7: Diagrama de flujo que muestra el análisis principal para el procesamiento de datos que permitió la estimación de la temperatura cinética en la dos regiones de estudio del complejo molecular Sgr C.

3.5. Resultados

Los valores obtenidos para la estimación de la temperatura cinética T_k en las regiones de estudio, centro de Sgr C centrado en (-0.56,-0.10) [21] y el centro de emisión del ion formilo (-0.52,-0.17) [21] fueron de 58.1 K con un error asociado de ± 8.4 K y 118.8 K con un error de ± 27.5 K respectivamente. Así también se tuvo como parámetros del modelo de ajuste gaussiano con espectros sintéticos los valores de 10 [km/s] y 12 [km/s] para el ancho de línea de Sgr C e ion formilo respectivamente, la velocidad de la fuente fue fijada en -53 [km/s] para el estudio en Sgr C y de -50 [km/s] para el caso del HCO^+ , que van en concordancia con lo obtenido mediante CLASS. A continuación se pueden observar estos parámetros en la siguiente tabla: Los resultados obtenidos para la estimación de la temperatura cinéticas en dos regiones del complejo Sgr C donde se ha observado la mayor emisión del gas denso CH_3CN , así como los parámetros de ajuste usados se describen a continuación en la siguiente tabla:

Fuente	Coord. Gal. [l,b]	FWHM [km/s]	V_{LSR} [km/s]	T_k [K]	Error T_k [K]
C. de Sagitario	-0.57,-0.10	10	-53	58.1	± 8.4
C. de Emisión HCO^+	-0.52,-0.17	12	-50	118.8	± 27.5

Cuadro 3.2: Resultados del estudio cinemático del complejo molecular Sgr C. Parámetros obtenidos del ajuste gaussiano y estimación de la T_k con su respectivo error.

En las siguientes gráficas se muestra el ajuste gaussiano por espectros sintéticos (en rojo) realizado en los casos de estudio, centro de Sgr C y en el centro de emisión del HCO^+ , así también se muestran las líneas de transición para el trazador molecular CH_3CN en estas regiones:

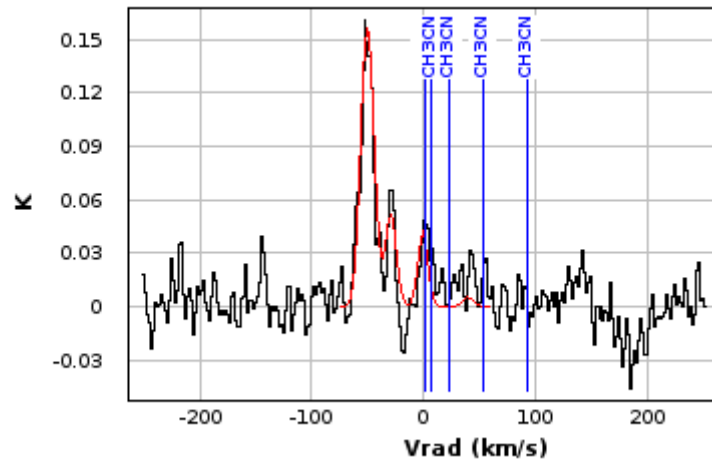


Figura 3.8: Resultado del ajuste gaussiano para la región del centro de Sgr C. En negro se observa el espectro promedio original y en rojo el ajuste gaussiano por espectros sintéticos. en azul las líneas de emisión del CH_3CN .

En la figura 3.8 se puede observar la temperatura de los picos de emisión [K] en función de la velocidad radial [km/s] donde se tiene el espectro promedio de la emisión molecular del acetonitrilo (negro) en el centro de Sgr C y superpuesta se encuentra los perfiles del espectro sintético (rojo) y las líneas de transición del CH_3CN (azul) mostrando que el ajuste realizado mediante el software MADCUBA es confiable. Se pudo observar también que los perfiles de línea para Sgr C son delgados, esto y el hecho de la presencia de un EGO G359.44-0.102 cerca de esta posición indican que es posible que la temperatura relativamente baja obtenida T_k de ~ 58 K sea debido a que los efectos del EGO no estén siendo mostrados en el entorno debido a su estado evolutivo.

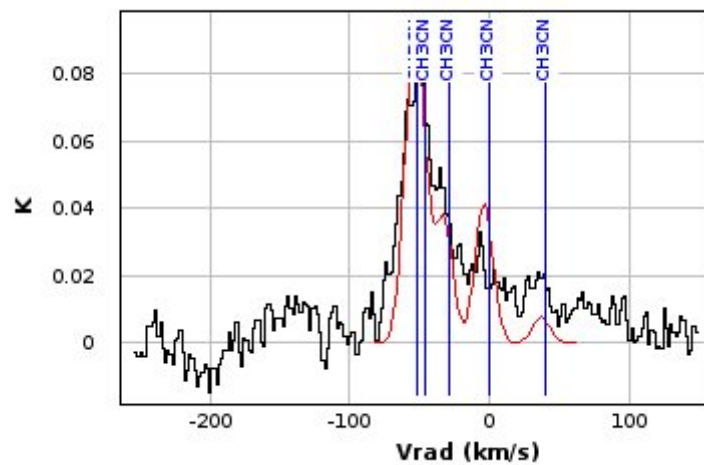


Figura 3.9: Resultado del ajuste gaussiano para la región del centro de emisión del HCO^+ . En negro se observa el espectro promedio original y en rojo el ajuste gaussiano por espectros sintéticos. En azul las líneas de emisión del CH_3CN .

En la gráfica 3.9 se puede observar que las líneas de emisión de la molécula de acetonitrilo son más gruesas que en el caso de Sgr C, lo que podría ser uno de los motivos que causa una temperatura cinética alta $T_k \sim 118$ K en esta región, además se puede ver que las líneas de transición de la molécula de acetonitrilo (azul) se las ubica en los picos de emisión mostrados, lo que indica que la velocidad de ajuste elegida para la corrección por efecto Doppler en la tabla 3.2 es el correcto. En este estudio se revela que las colisiones nube-nube juega un rol importante en los mecanismos de calentamiento del gas. Esto observando que el área de estudio en el caso del centro de emisión del ion formilo es considerablemente mayor al centro de emisión de Sgr C y por lo tanto su interior podría albergar un mayor número de nubes colisionando.

DISCUSIÓN

Del estudio de propiedades físicas realizado en frecuencias de radio del complejo molecular Sgr C mediante el trazador de gas denso CH_3CN en el centro de Sgr C dio como resultado una estimación de la temperatura cinética de 58.1 K y en el centro de emisión del HCO^+ de 118.8 K estos valores van acorde con lo obtenido en trabajos previos realizadas en el Centro Galáctico como en el caso de la nube de +50km/s donde la temperatura cinética se estima en 80 K [58] obtenida mediante el trazador CH_3OH y una metodología similar a la descrita en este proyecto de investigación; y el caso de la nube de "Brick" de 100 K [59] donde sta temperatura cinética fue estimada mediante el trazador ^{12}CO y una procesamiento similar al descrito previamente. Los valores obtenidos en este proyecto de investigación están dentro del rango de temperaturas de gas denso donde se ha confirmado formación estelar que va de [50-100] K [60]. La estimación alta de la T_k obtenida para el estudio del ion formilo podría deberse a que la medición de la temperatura cinética fue realizada en un área de estudio mucho mayor a la de Sgr C y podría albergar pequeñas nubes colisionando entre ellas haciendo que se eleve la temperatura en esa región, otro motivo podría ser la posible formación estelar en esta zona cuyo estudio podría ser parte de un estudio futuro detallado del centro de emisión del ion formilo que podría aclarar esta duda y mejorar el conocimiento que se tiene del complejo de nubes moleculares Sgr C, pero esto excede los objetivos de este proyecto de investigación.

Capítulo 4

Tasa de Formación Estelar en Sgr C

En este capítulo se determinó la densidad superficial de la tasa de formación estelar Σ_{SFR} en el complejo molecular Sgr C haciendo uso del trazador ^{13}CO y las ecuaciones que relacionan la formación estelar con propiedades físicas, como la relación Kennicutt-Schmidt, la relación tamaño lineal-tamaño angular y la relación de la densidad de columna $\text{H}_2\text{--CO}$, que fueron estimadas en base a un estudio espectroscópico de monóxido de carbono.

4.1. Formación Estelar de baja y alta masa

FORMACIÓN ESTELAR DE BAJA MASA

La formación de estrellas de baja masa ($M < M_\odot$) ocurre en las regiones más frías y densas del ISM, en las nubes que se vuelven inestables y alcanzan las condiciones para la fragmentación gravo-turbulenta mediante la autogravedad, turbulencia, la presencia de campos magnéticos que permean el medio interestelar, entre otros. La turbulencia genera fuertes fluctuaciones de densidad haciendo que la gravedad tome el control de las regiones más densas y masivas colapsando y calentando la nube hasta que comienza la fusión nuclear del hidrógeno molecular y se logra un equilibrio termodinámico [4]. Para que una nube molecular sea gravitacionalmente inestable es necesario tomar en cuenta el **Criterio clásico de Jeans** que deduce la masa mínima que la nube debe superar para ser gravitacionalmente inestable, bajo el supuesto que el gas es una esfera con una perturbación de longitud de onda λ_J en un medio isotérmico T_k y con densidad uniforme ρ_0 dada por [31]:

$$M_J = \frac{4\pi}{3} \rho_0 \left(\frac{\lambda_J}{2} \right)^3 = \frac{\pi^{5/2} c_s^3}{6G^{3/2} \rho_0} (M_\odot) \quad (4.1)$$

donde M_J es la masa de Jeans, c_s es la velocidad del sonido, ρ_0 es la densidad inicial del gas y $G=6.674 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{Kg}^2$ es la constante gravitacional; cuando la masa del gas es menor a la masa de Jeans la nube es gravitacionalmente inestable y colapsa para la formación

estelar [53].

La distribución de las masas estelares después de la formación de estrellas se la realiza mediante la **Función de masa inicial** (IMF, de sus siglas en inglés) que se escribe como una ley de potencia y define el número de estrellas $\zeta(m)dm$ que son producidas en un intervalo de masa $[m, m+dm]$ [9]:

$$\zeta(m) \propto m^{-\alpha} \quad (4.2)$$

donde α en la ecuación 4.2 es el valor de la ley de potencia, que para estrellas de baja masa es 1.3 lo que muestra que existe un gran número de estrellas de baja masa. Mientras para estrellas de alta masa ($\geq 10M_{\odot}$) α este valor es de 2.3 [9] lo que indica que se tiene un bajo número de estrellas masivas [4].

Para estrellas masivas no se conoce a ciencia cierta el proceso de formación, principalmente porque estas estrellas constituyen en número únicamente el 0.2 % de todas las estrellas formadas pero poseen una gran producción energética, desproporcionada en comparación con su número [4].

FORMACIÓN ESTELAR DE ALTA MASA

La formación estelar masiva posee vientos estelares energéticos y ondas de explosión de supernova que dirigen la evolución dinámica y la morfología del ISM. También pueden regular la tasa de formación de estrellas, la evolución de galaxias y son las responsables de ionizar el medio interestelar que a su vez contribuye mediante esta retroalimentación a la reionización del universo. A pesar de estas importantes características se conoce poco acerca de como ocurre la formación estelar de alta masa porque son raras y sus sitios de formación se encuentran a grandes distancias ($\geq 1\text{kpc}$) [22], lo que dificulta su resolución espacial [43]. Además la vida útil de las estrellas masivas y el proceso de formación es corto $\sim 10^5$ años [9] y ocurre en lo profundo de las partes más densas de las nubes moleculares en el Centro Galáctico [12].

Existen dos escenarios que intentan explicar el proceso de formación de estrellas masivas el primero es la **acreción de núcleos densos** donde se proponen dos teorías: *El modelo de acreción de núcleo turbulento* en el cual los núcleos masivos colapsarán para formar estrellas individuales; y *El modelo de acreción competitiva* donde mediante la fragmentación de grupos masivos de gas eventualmente se convierten en estrellas de alta masa. El otro escenario presente es la **colisión entre nubes** donde la formación estelar masiva se da de manera similar a la formación de GMC inducida por flujos en colisión, pero con valores de densidad inicial y velocidad de colisión diferentes [32].

La formación estelar se da en presencia de hidrógeno molecular que solo se detecta al llegar a una temperatura de 500 K [60], mientras que las nubes moleculares se encuentran a temperaturas de 10 a 30 K. Por lo tanto es necesario usar métodos indirectos para estimar la tasa formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés) como: la emisión térmica de polvo, la

foto-ionización del H_α , continuo UV, luminosidad infrarroja total y la emisión continua en radio mediante trazadores moleculares sensibles a la formación estelar [61].

La SFR (Tasa de formación estelar, por sus siglas en inglés) en una nube molecular esta directamente controlada por la cantidad de gas molecular denso presente en ella, para establecer las relaciones necesarias que expresan esta proporcionalidad se usa la relación de Kennicutt-Schmidt [62].

4.2. Relación Kennicutt-Schmidt

Las estrellas se forman exclusivamente en regiones de gas molecular donde se tiene una proporcionalidad entre las dos, para estudiar esta correlación existente se asume una ley de potencia, como se muestra a continuación [63]:

$$\Sigma_{SFR} \propto \Sigma_{gas}^N \quad (4.3)$$

donde N , es el índice de la ley de potencia, la ecuación 4.3 se formula típicamente en unidades de densidades de superficie (Σ) y es una relación que regula cómo el gas molecular está formando estrellas, para el caso de la vía láctea la **Relación de Kennicutt-Schmidt** puede expresarse de la siguiente forma [63]:

$$\Sigma_{SFR} = 10^{-2,1 \pm 0,2} \left(\frac{\Sigma_{H_2}}{10 M_\odot pc^{-2}} \right)^{1,0 \pm 0,2} (M_\odot yr^{-1} kpc^{-2}) \quad (4.4)$$

donde Σ_{SFR} es la densidad superficial de la Tasa de Formación Estelar, que se define como la velocidad con la que se forman estrellas ($M_\odot yr^{-1}$) por unidad de área dada en $M_\odot yr^{-1} kpc^{-2}$ y Σ_{H_2} es la densidad superficial del hidrógeno molecular en $M_\odot pc^{-2}$ [31].

Para determinar la Σ_{H_2} , se mide las intensidades de las líneas de emisión del trazador monóxido de carbono confinado en las regiones más densas de las nubes moleculares cuyas sus líneas de transición permiten medir el contenido de gas presente en ellas [31]. Se usa el ^{13}CO por sus líneas ópticamente delgadas, por ser estable y el segundo más abundante después del H_2 , además se encuentra en regiones de alta densidad por lo tanto puede considerarse en condiciones LTE, y principalmente porque se lo halla en las regiones donde se encuentra el H_2 así la masa trazada con el ^{13}CO tiene una correlación directa con la masa de hidrógeno molecular o su respectiva densidad superficial [4].

Para estimar la densidad superficial del H_2 se usa la definición a densidad de columna $N_{^{13}CO}$ en función de la profundidad óptica $\tau_{^{13}CO}$ y la intensidad integrada $I_{^{13}CO}$ [63] como

se muestra a continuación:

$$N_{13CO} = 2,6 \times 10^{14} \left(\frac{\tau_{13CO}}{1 - \exp(-\tau_{13CO})} \right) \times \left(\frac{I_{13CO}}{1 - \exp\left(\frac{-5,3}{T_{ex}}\right)} \right) cm^{-2} \quad (4.5)$$

donde N_{13CO} es la densidad de columna del monóxido de carbono en cm^{-2} e I_{13CO} es la intensidad integrada del ^{13}CO en K km/s. La relación de conversión entre la densidad de columna del monóxido de carbono y del hidrógeno molecular se muestra a continuación [63]:

$$N_{H_2(^{13}CO)} = (4 \pm 0,4) \times 10^5 N_{13CO} (cm^{-2}) \quad (4.6)$$

donde $N_{H_2(^{13}CO)}$ es la densidad de columna del H_2 en cm^{-2} estimada a partir de la densidad de columna del monóxido del carbono N_{13CO} . Así la densidad superficial del hidrógeno molecular se expresa como sigue [63]:

$$\Sigma_{H_2(^{13}CO)} = (2m_H \times N_{H_2(^{13}CO)} \times A_{pixel}) / A_{cloud} \quad (4.7)$$

$$\approx 10^{-33} \times m_H \times \left(\frac{N_{H_2(^{13}CO)}}{cm^{-2}} \right) \times \left(\frac{A_{pixel}}{cm^2} \right) \times \left(\frac{A_{cloud}}{pc^2} \right)^{-1} (M_{\odot} pc^{-2}) \quad (4.8)$$

donde $m_H = 1.67 \times 10^{-24} g$ es la masa del hidrógeno, A_{cloud} es el área de la nube expresada en pc^2 y A_{pixel} es el área del píxel dada en cm^2 .

Para determinar una estimación del A_{cloud} se usa la relación de tamaño lineal-tamaño angular de la nube dado por [61]:

$$l = D(pc) \times \alpha(arcsec) \times \left(\frac{\pi}{180 \times 360} \right) (pc) \quad (4.9)$$

donde l es el valor del tamaño lineal medido en pc y $\alpha(arcsec)$ es el tamaño angular de la nube en arco segundos (arcsec) [63].

El valor del A_{pixel} viene dado por la siguiente relación [63]:

$$A_{pixel} = \left(\frac{\pi}{180 \times 3600} \right)^2 \times D(cm)^2 \times R(")^2 (cm^2) \quad (4.10)$$

donde $R(")$ es el tamaño del píxel en arcsec y $D = 2.62 \times 10^{22} cm^2$ es la distancia a la fuente (8.5 kpc) [16]. Mediante la ecuación 4.8 la densidad superficial de la tasa de formación estelar (Σ_{SFR}) se relaciona con la densidad superficial del hidrógeno molecular mediante el trazador molecular de gas denso ^{13}CO (Σ_{H_2}) [63].

4.3. Análisis y Procesamiento de Datos

Para estimar la densidad superficial de la tasa de formación estelar (Σ_{SFR}) del complejo molecular Sgr C se usó la ecuación 4.4. Para ello primero se estimó la densidad superficial del hidrógeno molecular Σ_{H_2} mediante la expresión 4.8, haciendo uso del cubo de datos del trazador molecular monóxido de carbono con el cual se determinó la densidad de columna del H_2 mediante la expresión (4.6), el área de la nube (4.9) y el área de un píxel (4.10) de la región de estudio.

4.3.1. Descripción de los datos

Para determinar los parámetros observacionales de la ecuación 4.8 como el área de la nube, el área de píxel y el parámetro derivado de la densidad de columna del ^{13}CO , fue necesario trabajar con el cubo de datos del trazador molecular monóxido de carbono obtenido mediante el radio telescopio Nobeyama.

Nobeyama Radio Observatorio

El Observatorio de Radio Nobeyama (NRO, se sus siglas en inglés), una rama del Observatorio Astronómico Nacional Japonés (NAOJ). Es una instalación de observación de radio abierta a usuarios externos. El telescopio de 45 metros es uno de los radiotelescopios de plato único más grandes del mundo en la banda de 100 gigahercios, se especializa en espectroscopía de ~ 3 mm, cuenta con una alta sensibilidad con una resolución angular $17 \text{ arcsec} \pm 1 \text{ arcsec}$ en un rango de frecuencias de $[\sim 85, \sim 116]$ GHz [64].

El cubo de datos del monóxido de carbono ^{13}CO , de acceso libre, en la transición $J=1-0$ se lo obtuvo a una frecuencia de 110.201353 GHz para la Zona Molecular Central entre las coordenadas galácticas: $[-1^\circ.5 \leq l \leq 3^\circ.4]$ y $[-0^\circ.6 \leq b \leq 0^\circ.6]$ [64]. Este estudio presenta la resolución, velocidad y cobertura espacial más favorable en los estudios de gas molecular realizados en el Centro Galáctico [65].

Para determinar la densidad superficial de la tasa de formación estelar Σ_{SFR} , es necesario estimar en primer lugar la densidad superficial del hidrógeno molecular Σ_{H_2} , para esto se determinó la densidad de columna de hidrógeno molecular, el área integrada del complejo molecular, el área de la nube, y el área del píxel.

4.3.2. Determinación de los parámetros observacionales y derivados

En esta sección se determinó los parámetros necesarios para estimar la densidad superficial del hidrógeno molecular en la ecuación 4.8, para ello se determinó primero el parámetro derivado densidad de columna $N_{^{13}CO}$ y luego los parámetros observacionales, el área de la nube A_{cloud} y el área del píxel A_{pixel} del cubo de datos.

ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE COLUMNA: N_{H_2}

Para determinar la densidad de columna de la molécula de hidrógeno H_2 , fue necesario hacerlo en base a la densidad de columna del monóxido de carbono N_{13CO} , como se muestra en la ecuación 4.6. Para esto fue necesario derivar la densidad de columna de la molécula ^{13}CO mediante la ecuación 4.5 analizando el cubo de observaciones de esta molécula donde se estimó el área integrada de la región de estudio y el espectro promedio de la misma, mediante el procesador GILDAS, luego con estos datos se usó el software MADCUBA para estimar la densidad de columna N_{13CO} .

Primero se determinó la región de estudio donde se realizaría el análisis espectroscópico para la determinación del espectro promedio y el área integrada que posteriormente permitieron estimar la densidad de columna del monóxido de carbono N_{13CO} . Con este fin se manipuló el cubo de datos del monóxido de carbono mediante el procesador GILDAS, donde se determinó la región que presentaba mayor emisión del ^{13}CO , haciendo uso de comandos desde teclado. Se marcó la región de interés en el complejo molecular Sgr C, centrada en las coordenadas galácticas (-0.53,-0.107); luego se varió el rango de velocidades hasta obtener la máxima emisión de monóxido de carbono en esta región, teniendo como resultado un rango [-80, 60] km/s que posteriormente se usó para estimar el área integrada de la región de estudio, a continuación se muestra una gráfica de este proceso:

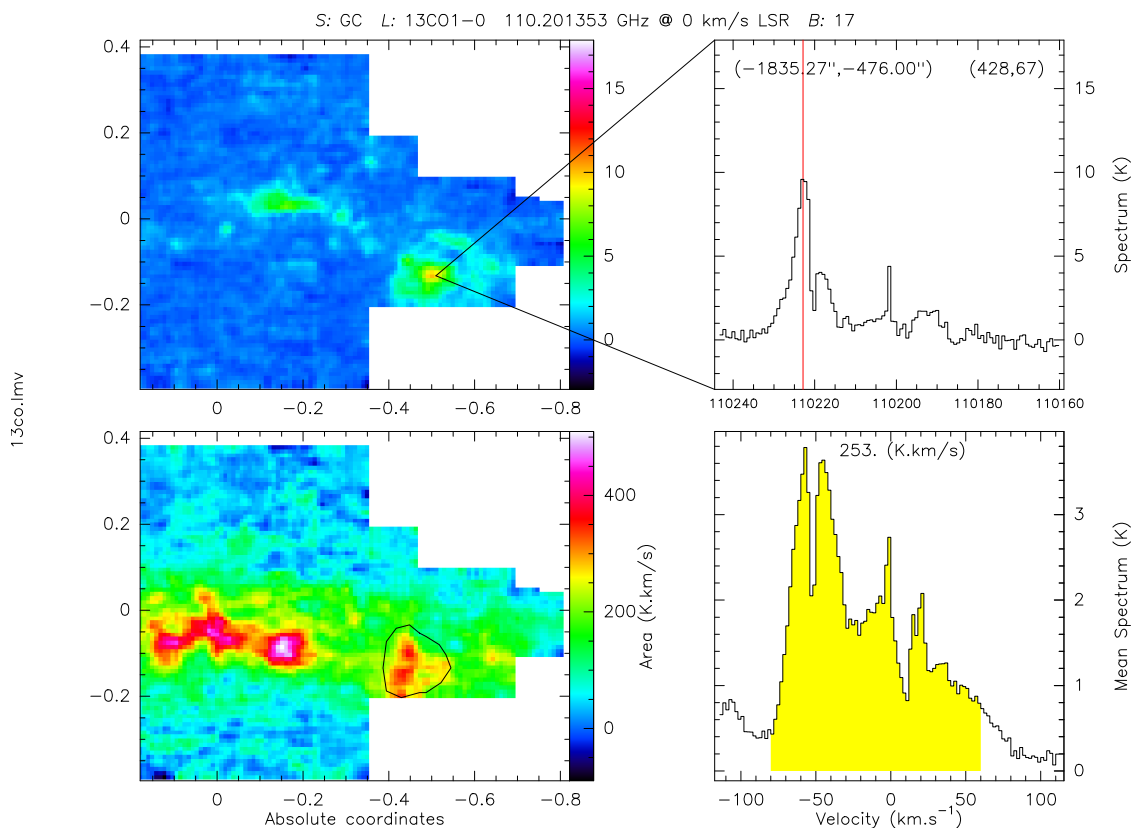


Figura 4.1: Cubo de datos de la emisión molecular del ^{13}CO : Determinación del área estimada de estudio y del rango de velocidades de estudio (-80, 60 km/s). En los paneles se observan los mapas integrados (izquierdos) y sus respectivos espectros (derechos).

En la figura 4.1 se puede observar cuatro paneles con información de la emisión del ^{13}CO en el complejo molecular Sgr C. en el panel superior izquierdo se muestra el mapa instantáneo de la región de estudio en el cual se determinó que la única estructura que se encuentra presente a una frecuencia de 110.223 GHz en el complejo molecular Sgr C es la nube donde se tiene la mayor emisión del trazador ^{13}CO . En el lado derecho se muestra el espectro instantáneo del punto seleccionado. En el panel inferior izquierdo se puede ver un mapa integrado de la región de estudio aparte se muestran otras nubes presentes en la CMZ en el rango de velocidades escogido, en negro se puede observar un polígono que encierra la nube que se caracterizó en el complejo molecular Sgr C. En el espectro de la derecha se puede observar el rango de velocidades escogido para este estudio y el espectro promedio de la región estimada (en negro), así como también se pudo tener un valor estimado de área integrada de esta región, que se calculó posteriormente de forma más precisa.

Obtención del espectro promedio

Para determinar del espectro promedio de la nube del complejo molecular Sgr C en el rango de velocidades escogidas, se usó el procesamiento descrito en el capítulo 3, para esto se usó el procesador de cubo de datos y espectros GILDAS.

Primero se creó un archivo de datos (.30m, propio del programa Class de GILDAS) donde se guardarían los espectros de una región determinada, los mismos que posteriormente serian promediados esto se lo realizó mediante la herramienta *file in*. Luego se realizó el análisis espectroscópico, para ello se determinó el radio y el centro de la circunferencia que albergaría todos los espectros de la región de estudio, mediante la herramienta *set match* y *find /pos*, respectivamente; para obtener los espectros contenidos en la región de la nube se usó la herramienta *find /off*. Finalmente los espectros fueron promediados mediante la herramienta *average*. A este espectro promedio se lo corrigió en velocidad debido al efecto Doppler presente, usando la herramienta *modify velocity*, a continuación se muestra el espectro promediado final para la nube del complejo molecular Sgr C:

0;0 GC ¹³CO1-0 UNKNOWN 0:05-APR-2019 R:10-FEB-2020
 l: 0.000 b: 0.000 Ga None 0.0° Offs: -1869.3 -714.0
 Unknown tau: 0.000 Tsys: 0. Time: 0.0sec El: 0.0
 N: 300 ID: 127.000 V0: -47.00 Dv: 2.000 LSR
 F0: 110201.353 Df: -0.7352 Fi: N/A

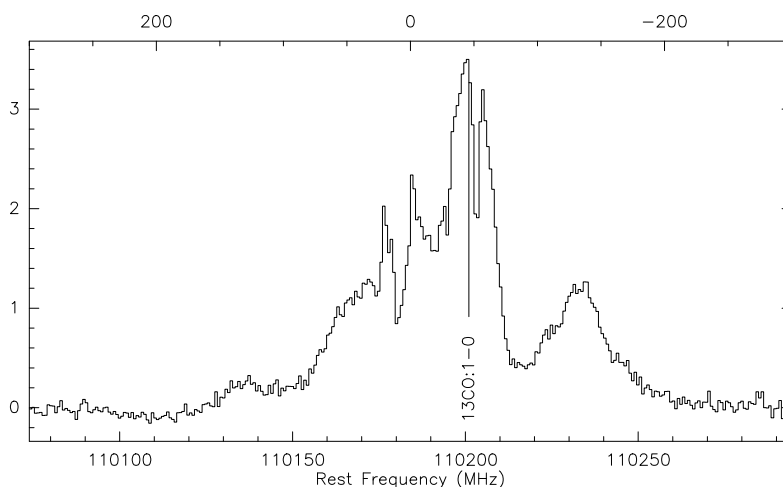


Figura 4.2: Espectro promedio, línea principal de emisión (110.22 GHz) y corrección por efecto Doppler (-47 km/s) del ¹³CO para la nube asociada al complejo molecular Sgr C.

Para obtener la figura 4.2 se usó como radio de la región de estudio el aproximado mostrado en la figura 4.1 que cubría toda la nube con centro en (-0.48, -0.12) que equivale al centro de la nube. En la figura puede observarse la frecuencia de reposo y la línea de transición observada. Además en la parte superior de la figura 4.2 se puede observar varios valores característicos del espectro promedio entre los cuales se encuentra la corrección del espectro a una velocidad de -47km/s debido al efecto Doppler.

Determinación del área integrada

El espectro promedio obtenido se usó para determinar el área integrada de la nube, caracterizada en el complejo Sgr C. Para ello se estimó el área bajo la curva de los perfiles de líneas mostrados en la figura 4.2 en el rango de velocidades estudiadas (-80, 60) km/s. Para estimar el área bajo la curva, primero se tuvo que invertir las unidades representativas del espectro, de frecuencias a velocidades, esto se lo realizó mediante la herramienta *set unit*. Luego se eligió la ventana en velocidades en la que se calculó el área bajo la curva, donde no se realizó un ajuste por línea de base, y se la mostró mediante las herramientas *set window* y *draw window* respectivamente. Posteriormente se determinó la línea base para la medición del área, mediante la herramienta *base*. Así el área bajo los perfiles de línea calculados por el comando *base* en el rango de velocidades de estudio, se mostró usando la herramienta *print area*. En la siguiente gráfica se muestra el espectro promedio obtenido, con la ventana y línea de base usada para la determinación del área integrada:

0;0 GC ¹³CO1-0 UNKNOWN 0:05-APR-2019 R:10-FEB-2020
 l: 0.000 b: 0.000 Ga None 0.0° Offs: -1869.3 -714.0
 Unknown tau: 0.000 Tsys: 0. Time: 0.0sec El: 0.0
 N: 300 l0: 127.000 V0: -47.00 Dv: 2.000 LSR
 FO: 110201.353 Df: -0.7352 Fi: N/A

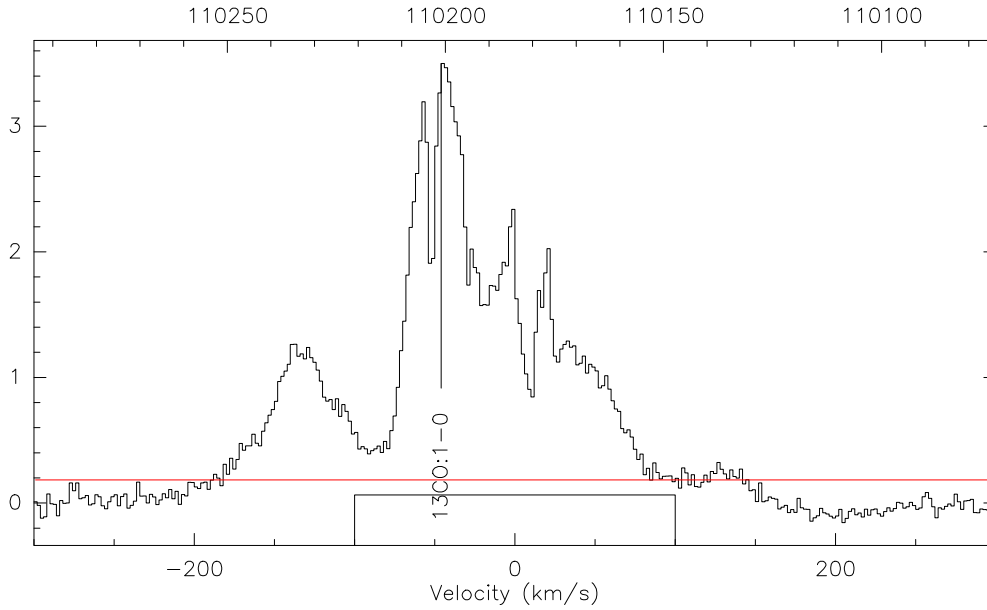


Figura 4.3: Espectro promedio, línea principal de emisión (110.22 GHz), línea de base en rojo (para determinar el área integrada) y corrección por efecto Doppler (-47 km/s) del ¹³CO para la nube asociada al complejo molecular Sgr C.

En la figura 4.3 se muestra el espectro promedio de la nube del complejo Sgr C en función de la velocidad, la ventana de velocidades donde se realizó el análisis espectroscópico fue de [-100, 100] km/s. Para la línea de base se eligió un polinomio de grado cero (línea recta) pues como se puede observar en la figura 4.3 el ruido es plano, mientras que para estimar el área integrada se usó el rango de velocidades donde se tiene la máxima emisión del monóxido de carbono en el complejo molecular Sgr C [-80, 60] km/s. Así el valor estimado obtenido para el área integrada de la nube de estudio fue:

$$A_{int} = 278,02(K \cdot km/s) \quad (4.11)$$

con un error de:

$$A_{int-err} = 1,3(K \cdot km/s) \quad (4.12)$$

Con los valores estimados del área integrada, el error asociado y el espectro promedio obtenido se determinó la densidad de columna $N_{^{13}\text{CO}}$ en cm^{-2} , usando la herramienta SLIM del programa MADCUBA, previamente descrito en el capítulo anterior.

Para estimar finalmente un valor a la **densidad de columna** del monóxido de carbono ¹³CO, primero se importó el archivo que contenía el espectro promedio desde CLASS a

MADCUBA mediante la herramienta *import*, luego se cargó este archivo al paquete SLIM. Posteriormente en el catálogo JPL, incorporado a este software, se escogió el isótopo de la molécula del monóxido de carbono ^{13}CO usando la herramienta *SlimDB*. Luego para calcular la densidad de columna $N_{^{13}\text{CO}}$ se realizó un ajuste gaussiano sintético del espectro promedio haciendo variar los parámetros V_{SLR} , FWHM, $\log_{10}N$ y manteniendo fija la T_{ex} , esto se lo realizó mediante la herramienta *SlimFit* como se mencionó en el capítulo anterior. Después se introdujeron los valores del área integrada y su error, mostrados en las ecuaciones 4.11 y 4.12 respectivamente, para estimar la intensidad integrada $I_{^{13}\text{CO}}$ y la opacidad $\tau_{^{13}\text{CO}}$ de la región mediante la herramienta *Ncol*, que resuelve la ecuación 4.5, de esta manera se obtuvo un valor estimado de densidad de columna y error asociado mostrado a continuación:

$$N_{^{13}\text{CO}} = 10^{17,44 \pm 15,10} (\text{cm}^{-2}) \quad (4.13)$$

Por último para obtener el valor de densidad de columna del H_2 , se usó la ecuación 4.6 que relaciona la densidad de columna del hidrógeno molecular H_2 y el monóxido de carbono ^{13}CO , $N_{\text{H}_2(^{13}\text{CO})}$, para eso se reemplazó el valor obtenido de la densidad de columna del ^{13}CO mostrado en la ecuación 4.13 en la ecuación 4.6, obteniendo así un valor estimado para la densidad de columna del hidrógeno molecular de:

$$N_{\text{H}_2(^{13}\text{CO})} = 1,10 \times 10^{23} (\text{cm}^{-2}) \quad (4.14)$$

Posteriormente se realizó la estimación de los valores asociados tanto al área de la nube A_{cloud} como al área del píxel A_{pixel} , usando el cubo de datos del ^{13}CO y el paquete *GREG* del programa **GILDAS** con el que se obtuvo un mapa integrado de velocidades con el cual se determinó estos parámetros observacionales.

DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE LA NUBE: A_{cloud}

Para obtener un mapa integrado del cubo de datos en el rango de velocidades [-80, 60] km/s se usó la herramienta *Run Map-Sum* de *GREG* que suma planos de un cubo de datos 3D en un rango de velocidades. Posteriormente se incluyó este mapa en un script llamado "visual.greg" en el cual se usó un polígono irregular conforme al contorno que mejor definiera la emisión de la molécula ^{13}CO para la nube caracterizada al complejo molecular Sgr C. Con este polígono se estimó el valor del área de la nube y luego el área del píxel, mediante la herramienta *polygon*, a continuación se muestra el mapa integrado y el polígono que define la nube de estudio (CLOUD AREA):

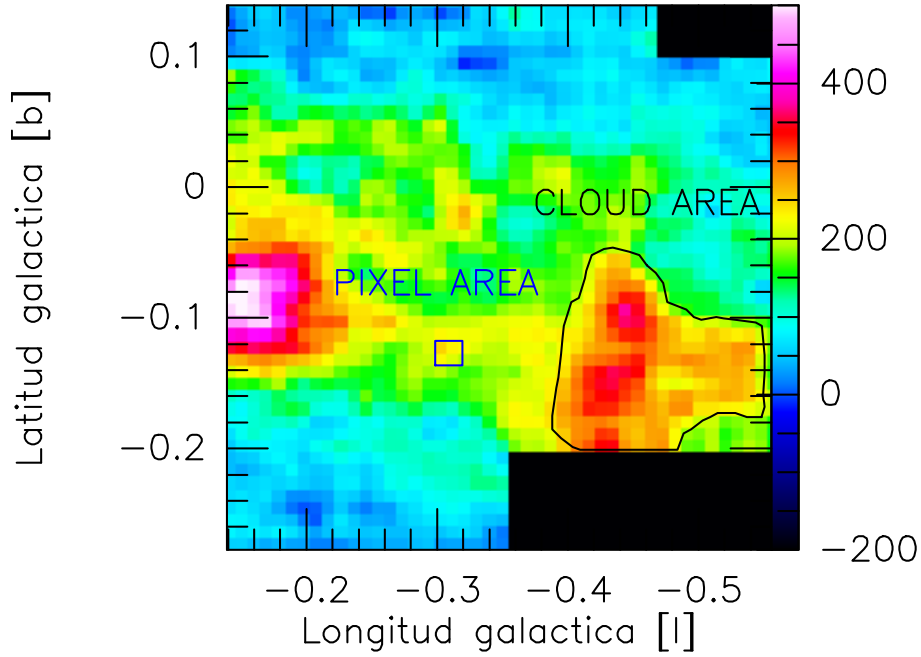


Figura 4.4: Mapa integrado en el rango de velocidades $[-80, 60]$ km/s. Se puede observar el área de la nube asociada al complejo molecular Sgr C (CLOUD AREA) y área del píxel (PIXEL AREA).

En la figura 4.4 se muestra el polígono irregular **CLOUD AREA** que representa la nube estudiada en el complejo molecular Sgr C, con el cual se determinó el área de la nube. También se muestra una región marcada como **PIXEL AREA** que es el polígono regular con el que se estimó el área del píxel.

Para obtener el valor de área de la nube A_{cloud} en pc^2 , primero se determinó el área del polígono irregular CLOUD AREA que encierra a la nube estudiada, para ello se usó la función *mean* con la cual se obtuvo un valor de área de 5.4342×10^{-6} (rad^2). Posteriormente se procedió a cambiar las unidades de rad^2 a $arcsec^2$ que son las unidades necesarias para emplear la relación de tamaño lineal-tamaño angular mostrada en la ecuación 4.9, a continuación se muestra esta conversión:

$$A_{cloud_{rad^2}} = 5,4342 \times 10^{-6}(rad^2) \times \left(\frac{180 \times 60 \times 60}{\pi rad} \right)^2 (arcsec^2) \quad (4.15)$$

En la ecuación 4.15 se observa el valor obtenido para el área de la nube en rad^2 y su conversión, así se obtuvo el valor del área de la nube en $arcsec^2$ mostrado a continuación:

$$\rightarrow A_{cloud_{arcsec^2}} = 231198,96(arcsec^2) \quad (4.16)$$

usando la definición de tamaño angular dado por $\alpha(arcsec) = \sqrt{A_{cloud}_{arcsec^2}}$ se obtiene:

$$\rightarrow \alpha = 480,83(arcsec) \quad (4.17)$$

donde α es el tamaño angular de la nube en arcsec. Finalmente se usó la relación tamaño lineal-tamaño angular dada en la ecuación 4.9 para obtener el área de la nube en pc^2 , como se muestra a continuación:

$$l = 8500(pc) \times 480,83(arcsec) \times \left(\frac{\pi}{180 \times 3600} \right) = 19,81(pc) \quad (4.18)$$

donde la distancia a la nube se estimó con un valor de 8.5 kpc [16], de esta manera se obtuvo un valor para el tamaño lineal de la nube asociada al complejo molecular Sgr C, dado por:

$$\rightarrow l = 19,81(pc) \quad (4.19)$$

por lo tanto la estimación del área de la nube asociada al complejo molecular Sgr C A_{cloud} en pc^2 se lo obtuvo al elevar al cuadrado el resultado mostrado en la expresión 4.19 como se muestra a continuación:

$$A_{cloud} = 392,62(pc^2) \quad (4.20)$$

DETERMINACIÓN DEL ÁREA DEL PÍXEL: A_{pixel}

Para determinar el área del píxel A_{pixel} en cm^2 se utilizó el polígono PIXEL AREA mostrado en el mapa integrado mostrado en la figura 4.4 y la ecuación 4.10. Primero se obtuvo una región de distribución homogénea y cuadrada compuesta por cuatro píxeles, mostrado en la figura 4.4 para ello se usó la herramienta *polygon*. Después se obtuvo la estimación del área dentro de este polígono, que estimó el valor del tamaño del píxel R en rad^2 mediante la herramienta *mean*, obteniendo un valor de $1,09 \times 10^{-7} (rad)^2$. Posteriormente para poder usar la ecuación 4.10 se procedió a cambiar las unidades de rad^2 a $arcsec^2$, esta conversión se muestra a continuación:

$$R = 1,09 \times 10^{-7}(rad)^2 \times \left(\frac{180 \times 60 \times 60}{\pi} \right)^2 (arcsec^2) \quad (4.21)$$

En la ecuación 4.21 se muestra la conversión para modificar el valor obtenido del tamaño del píxel, R, en rad^2 a unidades a $arcsec^2$, así se obtuvo de:

$$\rightarrow R = 4623,80(arcsec^2) \quad (4.22)$$

Luego se dividió el valor obtenido en la ecuación 4.22 entre cuatro, pues se necesita el tamaño de un píxel y el mostrado es el correspondiente a cuatro píxeles, así se obtuvo el valor del tamaño del píxel en arcsec^2 :

$$\rightarrow R(")^2 = 1156(\text{arcsec}^2) \quad (4.23)$$

Después se estimó el valor de la distancia al Centro Galáctico $d=8.5\text{kpc}$ [16] en cm^2 usando una conversión lineal, como se muestra a continuación:

$$d = 8,5\text{kpc} \times \frac{3,086 \times 10^{21}\text{cm}}{1\text{kpc}} \quad (4.24)$$

$$\rightarrow d = 2,62 \times 10^{22}\text{cm} \quad (4.25)$$

$$\therefore D = 6,87 \times 10^{44}(\text{cm}^2) \quad (4.26)$$

donde D es la distancia al Centro Galáctico en cm^2 . Finalmente se reemplazó las expresiones 4.23 y 4.26 en la ecuación 4.10 para estimar el área del píxel A_{pixel} , este reemplazo se muestra a continuación:

$$A_{\text{pixel}} = \left(\frac{\pi}{180 \times 60 \times 60 \text{arcsec}} \right)^2 \times \left(6,87 \times 10^{44}(\text{cm}^2) \right) \times 1156(\text{arcsec}^2) \quad (4.27)$$

así se obtuvo el valor asociado al área del píxel en cm^2 :

$$A_{\text{pixel}} = 1,87 \times 10^{37}(\text{cm}^2) \quad (4.28)$$

Por último los valores de $N_{\text{H}_2(^{13}\text{CO})}$, A_{cloud} y A_{pixel} fueron usados para estimar la densidad superficial del gas formador de estrellas y por ende la densidad superficial de la tasa de formación estelar.

4.3.3. Cálculo de la densidad de la tasa de formación estelar: Σ_{SFR}

Para estimar la densidad superficial de la tasa de formación estelar Σ_{SFR} mediante la ecuación 4.4, primero fue necesario derivar la densidad superficial del hidrógeno molecular Σ_{H_2} usando la expresión 4.8.

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL DEL HIDRÓGENO MOLECULAR: Σ_{H_2}

Para determinar el valor de la densidad superficial del hidrógeno molecular en la nube de estudio del complejo molecular Sgr C, se usarón los parámetros: densidad de columna del H_2 , $N_{\text{H}_2(^{13}\text{CO})}$, obtenido en la ecuación 4.14, el valor estimado del área de la nube A_{cloud} mostrado en la ecuación 4.20 y el valor del área del píxel A_{pixel} estimado en la expresión

4.28, estos valores fueron reemplazados en la ecuación 4.4 como se muestra a continuación:

$$\Sigma_{H_2} \approx 10^{-33} \frac{M_{\odot}}{g} \times (1,67 \times 10^{-24} g) \times (392,62 pc^2)^{-1} \times \left(\frac{1,87 \times 10^{37} cm^2}{1,10 \times 10^{23} cm^{-2}} \right) (M_{\odot} pc^{-2}) \quad (4.29)$$

donde el termino 10^{-33} en unidades de $\frac{M_{\odot}}{g}$ expresa la relación 4.8 en masas solares [63], $m_H = 1.6735575 \times 10^{-24} g$ es la masa del hidrógeno en gramos [21], $N_{H_2} = 1.10 \times 10^{23}$ en cm^{-2} es el valor de la densidad de columna, el área de la nube en pc^2 esta dado por $A_{cloud} = 392.62 pc^2$ y $A_{pixel} = 1.87 \times 10^{37} cm^2$ es el área del píxel en cm^2 , de esta manera se obtuvo como valor estimado para la densidad superficial del hidrógeno molecular:

$$\Sigma_{H_2} \approx 8,75 (M_{\odot} pc^{-2}) \quad (4.30)$$

Finalmente se reemplazó la ecuación 4.30, que muestra la cantidad de hidrógeno molecular por unidad de área en la nube del complejo Sgr C Σ_{H_2} en unidades de $M_{\odot} pc^{-2}$, en la expresión 4.4, con la que se obtuvo Σ_{SFR} como se muestra a continuación:

$$\Sigma_{SFR} = 10^{-2,1 \pm 0,2} \left(\frac{8,75 M_{\odot} pc^{-2}}{10 M_{\odot} pc^{-2}} \right)^{1,0 \pm 0,2} (M_{\odot} yr^{-1} kpc^{-2}) \quad (4.31)$$

$$\therefore \Sigma_{SFR} = 0,004 (M_{\odot} yr^{-1} kpc^{-2}) \quad (4.32)$$

La ecuación 4.32 muestra la densidad superficial de la tasa de formación estelar en unidades de $M_{\odot} yr^{-1} kpc^{-2}$ y expresa la rapidez con la que se forman estrellas por unidad de área en la nube de estudio del complejo molecular Sgr C, esta manera de expresar la tasa de formación estelar permite comparar la formación de estrellas con otras regiones sin tomar en cuenta el área de las mismas. Este estudio de formación estelar en ambientes extremos permitió precisar de manera cuantitativa la importancia de gas denso para promover el nacimiento de estrellas en una región pequeña y de gran densidad. La baja densidad de tasa de formación estelar mostrada en el complejo molecular podría ser consecuencia de la estructura de densidad de la nube.

A continuación se muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada para la obtención de la densidad superficial de la tasa de formación estelar en la región de estudio del complejo molecular Sgr C:

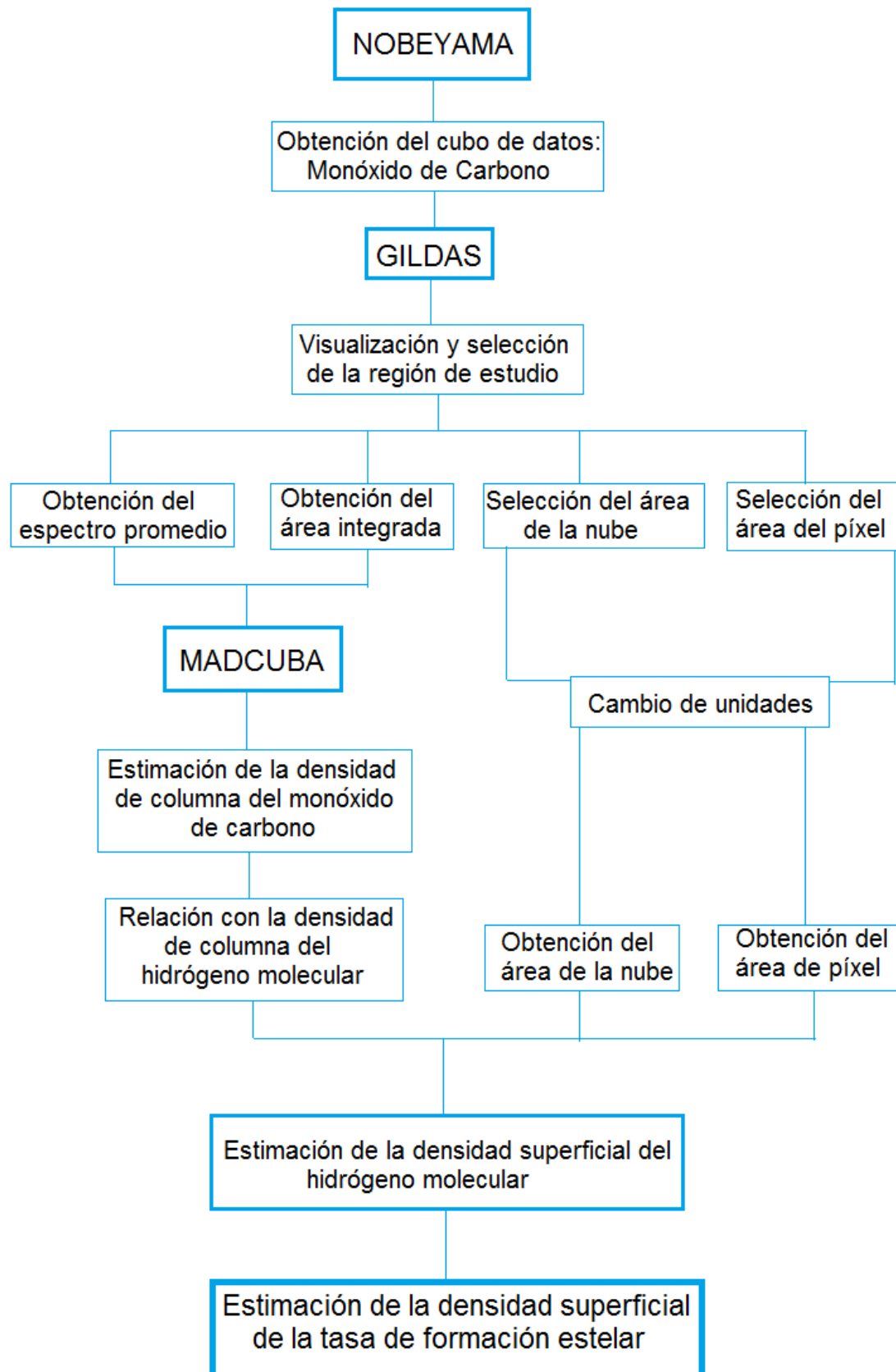


Figura 4.5: Diagrama de flujo que muestra el análisis principal para el procesamiento de datos que permitió la estimación de la densidad superficial de la tasa de formación estelar en la región de estudio del complejo molecular Sgr C.

4.4. Resultados

Como resultados para el estudio de la tasa de formación estelar en la nube asociada al complejo molecular Sgr C, que posee un tamaño aproximado de $-0^\circ.61 \leq l \leq -0^\circ.39$ y $-0^\circ.04 \leq b \leq -0^\circ.2$, se obtuvo el área de la nube mostrada en la ecuación 4.20 con un valor de 392.62 pc^{-2} . así también se determinó la densidad superficial de la cantidad de hidrógeno molecular estimado en la ecuación 4.30 con un valor de $8.75 \text{ M}_\odot \text{pc}^{-2}$, la densidad superficial de la tasa de formación estelar mostrada en la expresión 4.30 con un valor de $0.004 \text{ M}_\odot \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$. También se estimó el valor logarítmico de estas últimas dos cantidades, para poder ubicarlas en la gráfica dada para la relación Kennicutt-Schmidt, a continuación se muestra una tabla con estos resultados:

Propiedad de la formación estelar en el complejo Sgr C	Resultado	Unidades
Área de la nube	392.62	$[\text{pc}^2]$
Σ_{H_2}	8.75	$[\text{M}_\odot \text{pc}^{-2}]$
Σ_{SFR}	0.004	$[\text{M}_\odot \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}]$
$\log(\Sigma_{H_2} [\text{M}_\odot \text{pc}^{-2}])$	0.9419	-
$\log(\Sigma_{SFR} [\text{M}_\odot \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}])$	-2.37	-

Cuadro 4.1: Resultados en el estudio de la formación estelar en el complejo molecular Sgr C mediante el trazador molecular ^{13}CO . En los parámetros estimados Σ_{SFR} y Σ_{H_2} se calculó el logaritmo natural para poder ubicarlo en la relación K-S.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados del estudio de la tasa de formación estelar en el complejo molecular Sgr C donde los valores de $\log(\Sigma_{H_2})$ y $\log(\Sigma_{SFR})$ fueron usados para ubicar la densidad superficial del hidrógeno molecular (que corresponde al gas formador de estrellas en el ISM) y la densidad superficial de la tasa de formación estelar en el diagrama de Schmidt-Kennicutt que relaciona $\log \Sigma_{SFR}$ Vs. $\log \Sigma_{gas}$, como se muestra en la siguiente gráfica:

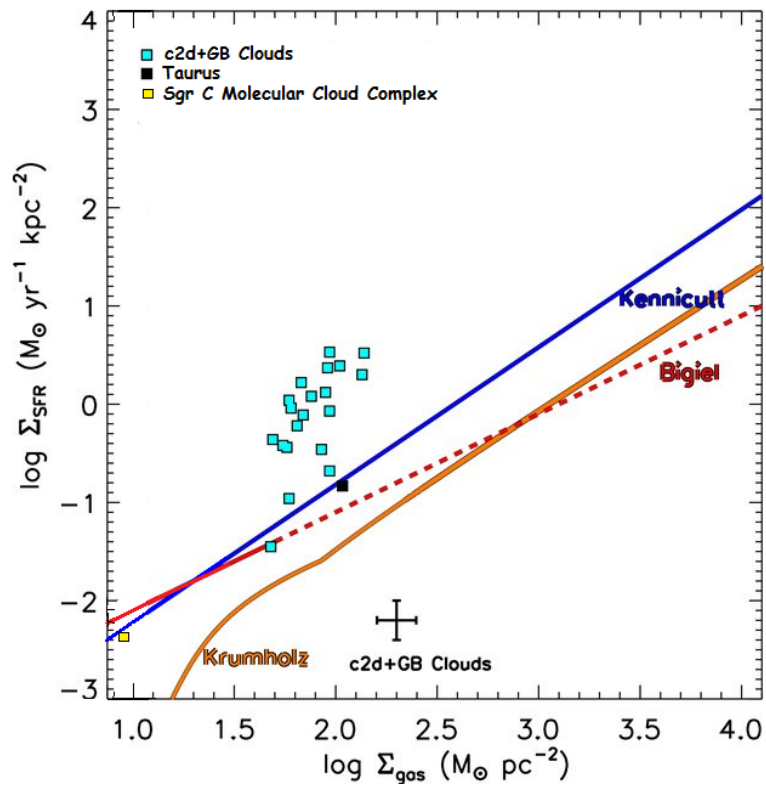


Figura 4.6: Relación Schmidt-Kennicutt para los resultados obtenidos en el estudio de la tasa de formación estelar en el complejo molecular Sgr C. Gráfica base obtenida de [63], donde se realizó un estudio realizado sobre un conjunto de nubes moleculares galácticas. En amarillo se puede observar el resultado obtenido en este trabajo de titulación.

En la figura 4.6 se muestra la relación entre la densidad superficial de la tasa de formación estelar y la densidad superficial del gas molecular [11]. La gráfica base muestra un estudio de regiones formación estelar galáctica realizado sobre un total de veinte nubes moleculares a lo largo del Disco Galáctico [63]. El resultado obtenido en el estudio de formación estelar para el complejo molecular Sgr C se muestra en amarillo.

Para el resultado obtenido en el complejo molecular Sgr C estudiado en este capítulo se ha usado un cuadrado en amarillo, que permitió ubicarlo en la figura 4.6 con los puntos $\log \Sigma_{H_2} = 0.9419$ y $\log \Sigma_{SFR} = -2.37$. Así se ubicó a la única región que mostraba presencia de monóxido de carbono (trazador de formación estelar en nubes moleculares) en el complejo molecular Sgr C, en la relación de Kennicutt-Schmidt. Esta ubicación muestra que el resultado obtenido para este estudio se encuentra ubicado muy por debajo de los resultados obtenidos para un estudio en nubes moleculares del Disco Galáctico, lo que indica de manera cuantitativa que la formación estelar existente en el complejo molecular Sgr C es prácticamente inactiva, puesto que el resultado mostrado está muy por debajo de regiones que presentan formación estelar activa en el Disco Galáctico.

DISCUSIÓN

A pesar de que el complejo molecular Sgr C posee las condiciones necesarias para evi-

denciar una alta formación estelar, se confirmó de manera cuantitativa que presenta una tasa formación estelar baja de $0.0004 [M_{\odot}yr^{-1}kpc^{-2}]$ para un valor relativamente grande de área, de $392.62 pc^2$, en comparación con otras nubes y complejos moleculares que de acuerdo a la literatura presentan una tasa de formación estelar alta a pesar que sus áreas de estudio son significativamente inferiores; como el complejo de Perseo de $1.32 [M_{\odot}yr^{-1}kpc^{-2}]$ a un área de $73.2 pc^2$ [63] o el complejo de nubes Tauro que presenta una densidad superficial de la tasa de formación estelar de $0.147 [M_{\odot}yr^{-1}kpc^{-2}]$ para un área de $252 pc^2$ [63]; estos valores estimados fueron obtenidos usando un procesamiento que incluía el análisis de mapas de extinción y el trazador HCN, sin embargo con una metodología similar a la presentada en este trabajo de investigación. Esto muestra que el complejo molecular Sgr C presenta una baja tasa de formación estelar ya que a pesar de tener un área relativamente grande de estudio, la densidad superficial de la tasa de formación estelar encontrada es significativamente menor que la observada en estudios de complejos de nubes moleculares galácticas, como se muestra en el trabajo de Heiderman [63] donde se realizó un estudio sobre Gould's Belt y otras nubes obteniendo valores de 1.7-2.4 en $\log[\Sigma_{gas}]$ y -1.6-0.6 en $\log[\Sigma_{SFR}]$ (como se muestra en la gráfica base 4.6). Por lo tanto debe haber condiciones que están inhibiendo la formación de estrellas en esta región como la dinámica de las estructuras morfológicas en este complejo molecular que se estudió en el siguiente capítulo. Otras causas que expliquen esta baja formación estelar en esta región tan característica de la CMZ podría ser una modificación en los procesos de formación de estrellas.

Capítulo 5

Estudio morfológico en el Complejo Molecular Sagitario C

En este capítulo se realizó un estudio cualitativo morfológico de las estructuras presentes en el complejo molecular Sgr C, haciendo uso de la emisión de polvo a una longitud de onda de $350\mu\text{m}$, el trazador molecular HCO^+ y la emisión en radio-continuo del hidrógeno atómico neutro HI. Este estudio se lo realizó a lo largo de todo el complejo molecular Sgr C.

5.1. Morfología en las nubes moleculares en el Centro Galáctico

La formación estelar esta ligada de manera compleja a las estructuras de gas presentes en las nubes moleculares a la dinámica de mismo que caracterizan la estructura interna de las nubes y a los efectos de la turbulencia, gravedad y campos magnéticos en ellas. Todas las estructuras presentes en las nubes moleculares como burbujas, capas, filamentos, anillos y cavidades varían en forma desde casi esféricas hasta irregulares. Estas pueden interaccionar e influir en la formación estelar por ser un proceso altamente dinámico que modifica el entorno físico de las nubes [66]. Estas estructuras han sido detectadas y estudiadas en amplios rangos del espectro electromagnético, desde rayos X hasta radio-continuo pasando por el infrarrojo y el óptico [67].

Entre las estructuras más sobresalientes de las nubes moleculares se tiene: **Filamentos** que son estructuras alargadas y estrechas de alta densidad que pudieron surgir de movimientos turbulentos del gas. Son consecuencia de los intensos campos magnéticos, son perpendiculares al plano galáctico y son los sitios donde se encuentran la mayoría de los núcleos formadores de estrellas [22]. **Burbujas** son estructuras casi esféricas de gas ionizado en expansión, un ejemplo de estas estructuras son las regiones HII que rodean estrellas masivas y provocan que exista alta presión en ellas [67]. **Capas** presentes en diferentes regio-

nes permiten la formación de nuevas nubes moleculares en especial en regiones HII donde se tiene formación estelar y con suficiente flujo de gas ionizante la nube puede destruirse para que las capas del material en expansión pueden aglomerarse para volver a formarse [31]. **Cavidades** son lugares calientes, debido a una alta eyección de energía que no se contrarresta por radiación. Además la alta presión que posee origina los vientos galácticos. Estas estructuras presentan baja opacidad y son los lugares por donde escapan los fotones de alta energía [31]. Una caracterización cualitativa de estructuras morfológicas podrían determinar los mecanismos físicos de donde y cuantas estrellas pueden formarse en las nubes moleculares. El estudio puede realizarse en frecuencias de radio con trazadores moleculares, pero debido a que cada especie molecular es sensible únicamente en un rango de densidad, la información que se puede obtener está sesgada dependiendo de la molécula usada [53]. Es por ello que para este proyecto de investigación se usaron tres trazadores en diferentes longitudes de onda que trazan diferentes propiedades físicas para estudiar las estructuras presentes en el complejo molecular Sgr C.

HIDRÓGENO ATÓMICO NEUTRO (HI)

El gas de hidrógeno atómico neutro HI es difuso, comprende la mayor parte del medio interestelar y es el mejor indicador de la estructura y rotación de la Galaxia en estudios dinámicos en el Centro Galáctico. El hidrógeno atómico neutro consta de dos fermiones un protón y un electrón cuyo espín es $s=1/2$ y pueden encontrarse paralela o antiparalela ubicados. Cuando están en la misma dirección se repelen y por ende su estado de energía es alto, pero cuando están en dirección antiparalela el sistema se vuelve estable con un nivel de energía en el estado fundamental bajo asociado a la transición superfina de hidrógeno a una longitud de onda de ~ 21 cm, que es nombre con el que se conoce a este trazador [32].

La línea de 21cm y las regiones donde se encuentra es observable únicamente en longitudes de onda de radio a una frecuencia de ~ 1420 GHz. Se encuentra asociado a las regiones de hidrógeno molecular donde el hidrógeno neutro se encarga de proteger el gas molecular de la foto-disociación [65].

5.1.1. Movimiento del gas en la Zona Molecular Central

La evolución de la materia bariónica en las galaxias se ve impulsada principalmente por la formación de estrellas que podría estar íntimamente relacionada con la dinámica orbital del flujo del gas presente en las nubes moleculares [68]. Para estudiar el flujo de gas en tres dimensiones de la CMZ existen tres escenarios:

1. **Brazos espirales:** Muestra una buena aproximación cualitativa de la cinemática del gas y sugiere que se distribuye en dos brazos espirales que crean una estructura de anillo ~ 120 pc [5] donde el brazo más cercano al Centro Galáctico alberga los comple-

jos donde existe alta formación estelar como Sgr B y el brazo más lejano los que no, representado por Sgr C [69].

2. **Orbita cerrada elíptica:** Aquí el flujo muestra un anillo elíptico de gas y polvo abierto debido a la distribución de masa extendida en la CMZ. Se tiene una evolución temporal de las nubes para la abundancia de polvo entre la nube de *Brick* y Sgr B y tiene forma de un "anillo torcido" en cuyo vértice occidental se encuentra Sgr C [68].
3. **Flujo abierto:** Este escenario se desarrolló en base a un modelo de estudio dinámico de la Zona Molecular Central. La dinámica orbital se divide en cuatro flujos abiertos y se tiene una línea de tiempo para las nubes de la cresta de polvo en la región de formación estelar activa en la parte Este del GC que va acorde a las observaciones de nubes y complejos moleculares de la zona [5].

Estas interpretaciones se pueden observar en la siguiente figura:

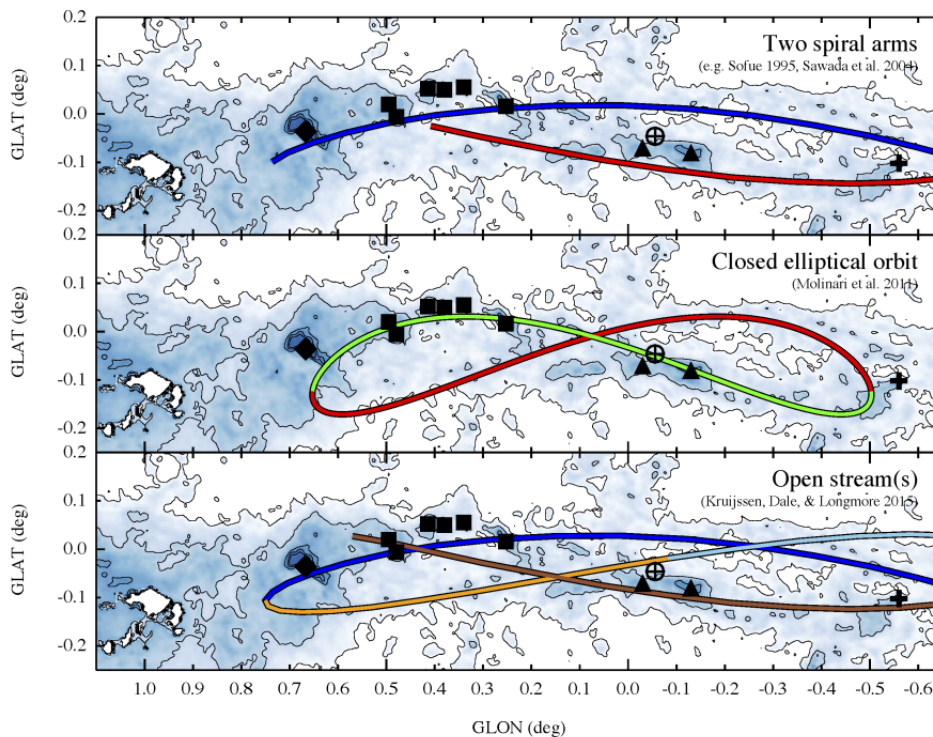


Figura 5.1: Interpretaciones más acertadas del movimiento del gas en la parte interna de la CMZ. El escenario más acertado en la actualidad corresponde al panel inferior. Imagen tomada de [5].

En la figura 5.1 se muestra las tres interpretaciones de la distribución del flujo del gas para la CMZ proyectadas sobre el plano del cielo, aquí la rotación está dada en dirección a las agujas del reloj y la posición de la Tierra está hacia la parte inferior de la página. En los tres mapas se puede observar Sgr A* con una cruz en el centro de un círculo negro, las nubes de 20 km/s y 50 km/s en triángulos negros, la nube de Brick y las nubes B-F se

muestran en cuadrados negros, Sgr B en un diamante negro y Sgr C en una cruz. En el panel superior se tiene el caso de los brazos espirales donde la línea azul representa el flujo del gas en el lado cercano "Arm I" asociado con Sgr B y la línea roja muestra el lado lejano del Centro Galáctico "Arm II" asociado con Sgr C. En el panel del medio se tiene la segunda interpretación de la órbita cerrada donde las nubes de 20 km/s y 50 km/s están situadas en el lado cercano del Centro Galáctico a diferencia de los brazos espirales. En el panel inferior se tiene la interpretación más acertada hasta el momento debido a sus estudios dinámicos que van acorde con las observaciones [5].

Un estudio morfológico incluye, a parte de las estructuras presente en un región, el movimiento del gas en la CMZ que podría estar relacionado con la formación estelar [66].

5.2. Análisis y procesamiento de datos

Para el estudio cualitativo la morfología en el complejo molecular Sgr C se usó tres trazadores que en principio permiten observar la región en diferentes longitudes de onda: la emisión térmica en infrarrojo del polvo, la emisión molecular en radio del ion formilo y la emisión en radio-continuo del hidrógeno atómico neutro. Con el trazador HCO^+ , que en su estado rotacional mas bajo es un excelente trazador de núcleos de gas frío de alta densidad de hidrógeno molecular [26] y traza regiones donde se produce formación estelar, se realizó una distribución espacial del gas denso en diferentes rangos de velocidad en contornos de emisión. La superposición de las emisiones provenientes del polvo (en una longitud de onda de $350 \mu\text{m}$) con la emisión en radio-continuo del HI y la emisión molecular del HCO^+ permitieron obtener mapas detallados de las estructuras morfológicas del complejo Sgr C e interpretarlas.

Los datos fueron de libre acceso y se los obtuvieron de tres telescopios, dos en frecuencias de radio: ATNF (Australia Telescope National Facility), NRAO (National Radio Astronomy Observatory); y uno en longitudes de onda de infrarrojo: Herschel (Herschel Spatial Telescope).

5.2.1. Descripción de los datos

Para realizar los mapas de la distribución espacial con el trazador de gas denso se usó los datos obtenidos del radio telescopio MOPRA, descrito en 3.4.1. Se usó como molécula trazadora de gas denso al ion formilo HCO^+ observado a una frecuencia de reposo de 89.188526 GHz. El cubo de datos de la emisión molecular del HCO^+ se obtuvo de la base de datos del telescopio ATNF. El mapa de emisión de polvo en infrarrojo a una longitud de onda de $350 \mu\text{m}$ fue obtenido de la base de datos del telescopio espacial Herschel, HSA

descrita en 2.3.1 y la emisión en radio-continuo del HI se la obtuvo de la base de datos del radio telescopio VLA del Observatorio en radioastronomía Nacional (NRAO, por sus siglas en inglés).

OBSERVATORIO NACIONAL DE RADIOASTRONOMÍA

NRAO en Estados Unidos es un Centro de Investigación y Desarrollo con Fondos Federales que diseña, construye y opera radiotelescopios de alta sensibilidad para el estudio astronómico en frecuencias del radio. Para observar la línea de 21 cm de hidrógeno atómico se utilizó el radio telescopio VLA que es un telescopio con datos de acceso libre [65].

Very Large Array: VLA

Es un arreglo interferométrico de 27 elementos, dispuesta en forma de Y invertida, que produce imágenes del cielo en una amplia frecuencia y resolución del radio, cubre un rango de frecuencia que va de 1-50 GHz. Para las observaciones realizadas en la Zona Molecular Central del cual se obtuvo el mapa del hidrógeno atómico neutro se usó las configuraciones DnC y CnB en una resolución espacial de 15 arcsec y el tiempo de integración en cada observación fue de 1.6 horas en la configuración DnC y 4 horas en CnB. El mapa en radio-continuo para el hidrógeno neutro fue centrado en el Centro Galáctico con un tamaño de 250×125 pc, la frecuencia de reposo a la que se obtuvo los datos fue de 1 420.406 MHz que corresponde a la línea de 21cm del hidrógeno [65].

5.2.2. Obtención de mapas de distribución espacial de gas denso

Para obtener los mapas de distribución espacial del flujo de gas denso en el complejo molecular Sgr C, primero se obtuvo los mapas de emisión integrada del trazador molecular HCO^+ en los diferentes rangos de velocidades donde se obtuvo la mayor emisión de este gas en la región estudiada.

OBTENCIÓN DE LOS MAPAS INTEGRADOS

Para obtener los mapas integrados del gas denso en el complejo molecular Sgr C se usó el cubo de datos del ion formilo y el paquete GREG del procesador GILDAS.

Con el cubo de datos se determinó el rango de velocidades en el cual se realizaría el estudio morfológico. Para ello se usó el paquete GREG en el cual se visualizó el cubo de datos de la molécula ion formilo mediante la herramienta *Comprehensive DataCube Display*, con los comandos insertados desde teclado se ubicó al mapa en el complejo molecular Sgr C y se fueron variando los rangos de velocidad hasta obtener el intervalo en el cual se tuvo la máxima emisión de gas denso que fue de $\Delta v = [-100, -10]$ km/s, en la siguiente figura puede observarse el proceso descrito:

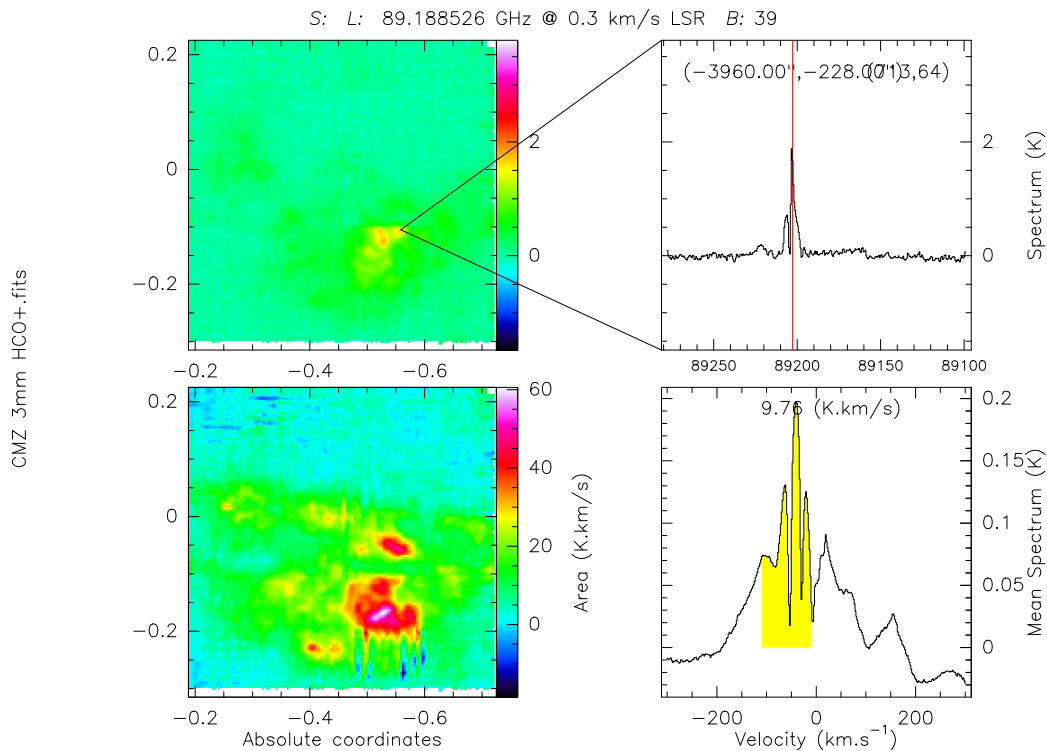


Figura 5.2: Cubo de datos de la emisión molecular del HCO^+ en 89.1885GHz: Determinación del intervalo de velocidad utilizada para el estudio morfológico [-100,-10] km/s.

En la figura 5.2 se puede observar cuatro paneles que describen el cubo de datos en coordenadas galácticas en el lado izquierdo y los espectros asociados a esos mapas (en el derecho). En el panel superior izquierdo se puede ver el mapa del complejo molecular Sgr C a la frecuencia instantánea de 89.188526 GHz, cuyo espectro se muestra en el panel superior derecho, este valor corresponde a la frecuencia de reposo del HCO^+ . En el panel inferior izquierdo se muestra el mapa integrado del complejo molecular Sgr C en el rango de velocidades mostrado en el panel inferior derecho, de -100 a 10 km/s, donde se puede observar que no existe más emisión del gas denso, en ese rango de velocidades, que en complejo molecular Sgr C.

Posteriormente se obtuvo los mapas de distribución del gas denso. Para lo cual mediante la herramienta *run map-sum* del paquete GREG, se crearon mapas integrados al ingresar el nombre del cubo de datos y el rango de corte de velocidades de cada mapa. Aunque el rango de estudio fue de -100 a -10 km/s se dividió este rango en nueve intervalos de $\Delta v = 10 \text{ km/s}$ para realizar un estudio más detallado del movimiento del gas en complejo molecular Sgr C y poder observar como se modifica a lo largo del rango de velocidades escogido. Así se obtuvo 9 mapas de distribución espacial en el intervalo de estudio señalado, a continuación se muestran los mapas obtenidos:

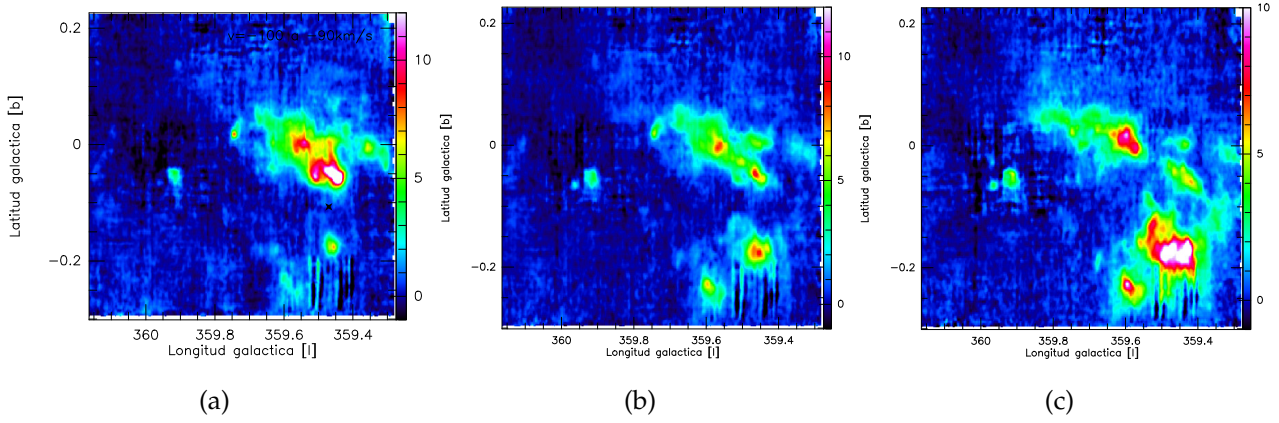


Figura 5.3: Mapas de emisión integrada del HCO^+ en el complejo molecular Sgr C. En los paneles de (a), (b) y (c) se pueden ver los mapas integrados en los rangos de velocidades $v = [-100, -90]$ km/s, $v = [-90, -80]$ km/s y $v = [-80, -70]$ km/s, respectivamente.

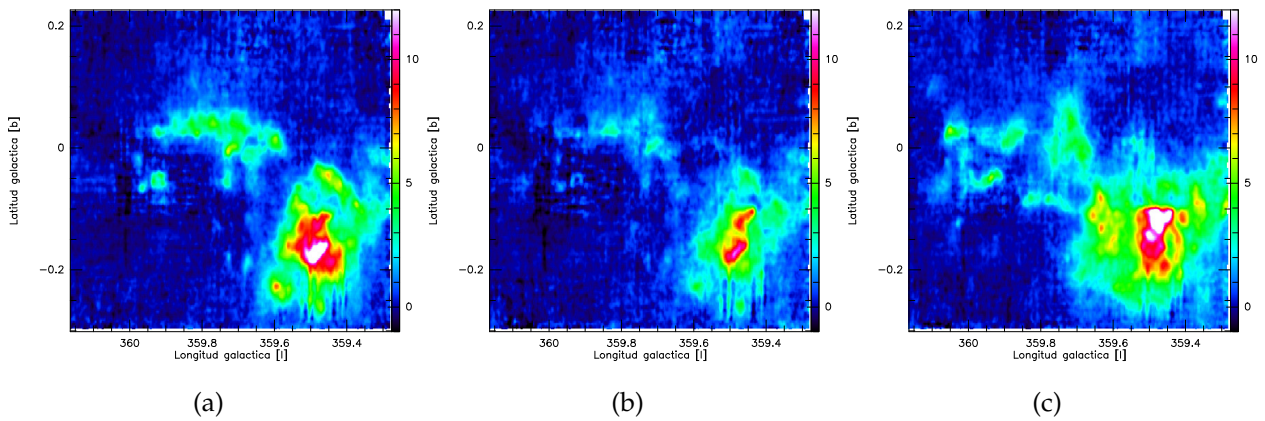


Figura 5.4: Mapas de emisión integrada del HCO^+ en el complejo molecular Sgr C. En los paneles de (a), (b) y (c) se pueden ver los mapas integrados en los rangos de velocidades $v = [-70, -60]$ km/s, $v = [-60, -50]$ km/s y $v = [-50, -40]$ km/s, respectivamente.

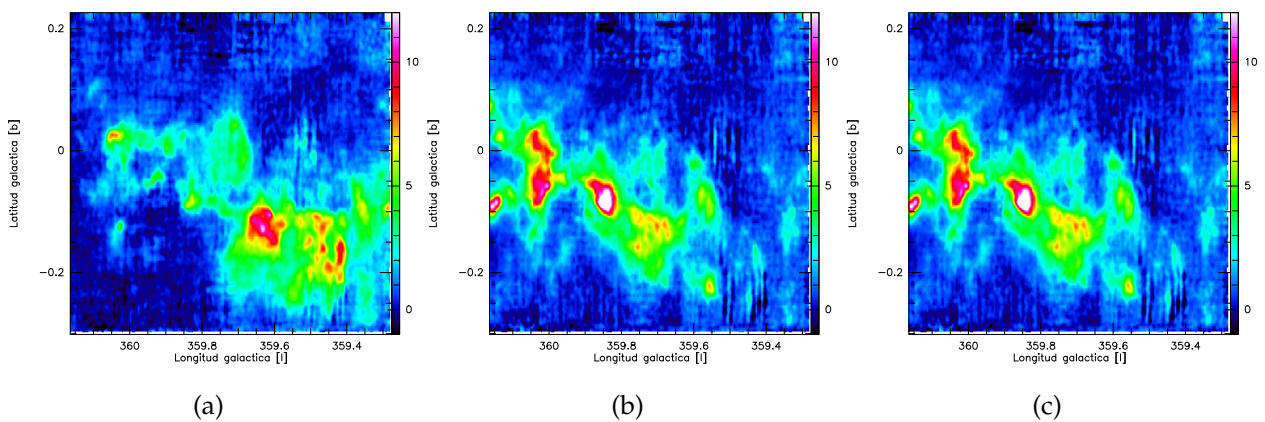


Figura 5.5: Mapas de emisión integrada del HCO^+ en el complejo molecular Sgr C. En los paneles de (a), (b) y (c) se pueden ver los mapas integrados en los rangos de velocidades $v = [-40, -30]$ km/s, $v = [-30, -20]$ km/s y $v = [-20, -10]$ km/s, respectivamente.

En las figuras 5.3 al 5.5 se puede observar como va moviéndose el gas en los diferentes intervalos de velocidad desde [-100, -90] km/s a [-20, -10] km/s. Estos mapas al igual que el cubo de datos se encuentran proyectados en el plano del cielo, observando así que el gas se mueve en velocidades negativas de Este a Oeste en el intervalo de [-100, -40] km/s, como se puede ver en los paneles de las figuras 5.3, 5.4. Luego se pudo observar como el movimiento del gas denso parece dirigirse de nuevo hacia el Este en los intervalos de [-40, -10] km/s cuando se aproximan a velocidades positivas como se muestran en los tres paneles de la gráfica 5.5. En ese intervalo se pudo observar que ya no se tiene emisión fuerte de gas denso en el complejo molecular Sgr C pues se va perdiendo, esto podría deberse al movimiento asimétrico del gas en la Zona Molecular Central.

SUPERPOSICIÓN DE MAPAS DE EMISIÓN: HCO^+ , POLVO Y RADIO-CONTINUO DEL HI

Se realizó una superposición de tres mapas en cada uno de los nueve intervalos de velocidad estudiados, esto mediante un algoritmo que unió los mapas obtenidos de gas denso HCO^+ , mostrados en contornos de emisión, con el mapa de la emisión del polvo en infrarrojo a una longitud de onda de $350 \mu\text{m}$, que se usó de base, y el mapa integrado de emisión en radio-continuo del hidrógeno atómico neutro, que se lo usó en forma de contornos.

Para obtener la superposición de los tres mapas en cada uno de los nueve intervalos de velocidad, primero fue necesario cambiar el formato de los archivos que contendían los mapas de gas denso, pues se encontraban en el formato GDF (Gildas Data Format), para poder visualizarlos y manipularlos, en formato FITS (Flexible Image Transport System), en el script "Mapa*".*greg*, esto se lo realizó mediante la herramienta *fit*. Luego se visualizó los nueve mapas obtenidos para el gas denso HCO^+ y el mapa en radio-continuo del hidrógeno atómico neutro en contornos de emisión mediante la herramienta *level* y se los graficó mediante el comando *plot*. Finalmente se ubicó al mapa de emisión del polvo como base en escala de grises y los otros dos mapas en los límites en los que se estudió al complejo molecular Sgr C que en coordenadas galácticas es $-0^\circ.7 \leq l \leq -0^\circ.2$ y $-0^\circ.3 \leq b \leq 0^\circ.12$ que abarca casi por completo el complejo de nubes moleculares Sgr C, esto se lo realizó mediante la herramienta *limit*. Para superponer los dos mapas de contornos (emisión de gas denso HCO^+ y emisión en radio continuo HI) al mapa base se usó la herramienta *rgmap* obteniendo así nueve mapas, uno por cada intervalo de velocidad, a continuación se muestran los nueve mapas obtenidos de la superposición:

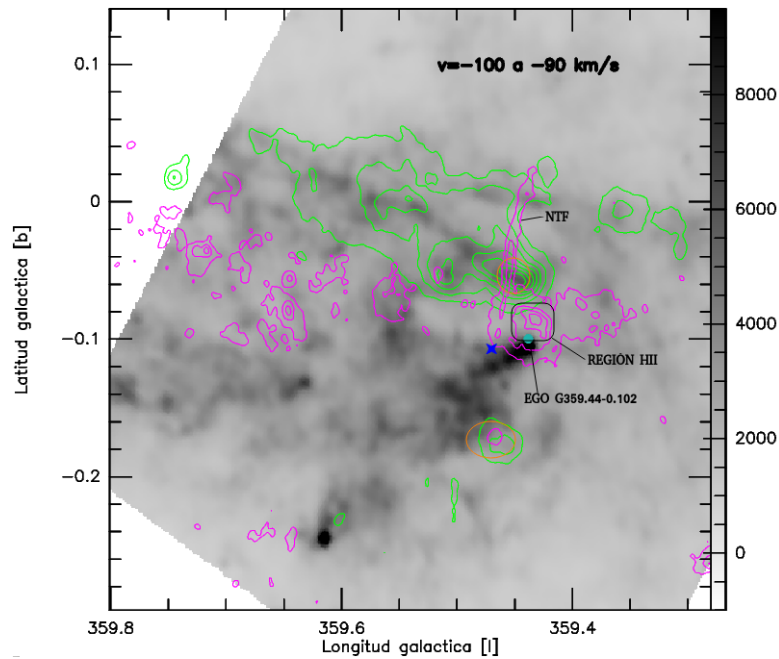


Figura 5.6: Composición 1: Imagen de fondo (escala de grises) emisión de polvo en $350\mu\text{m}$, contornos de emisión del HCO^+ (verde) en el rango $v = [-100, -90]$ km/s y emisión en radio continuo de HI (lavanda). En este rango de velocidades se observa que el gas molecular HCO^+ presenta un pico cerca del filamento no térmico (NTF), en cuya base se encuentra la región III del complejo molecular Sgr C. Se puede observar que a estas velocidades el gas se moviliza desde la parte Norte hacia la parte Oeste de la CMZ.

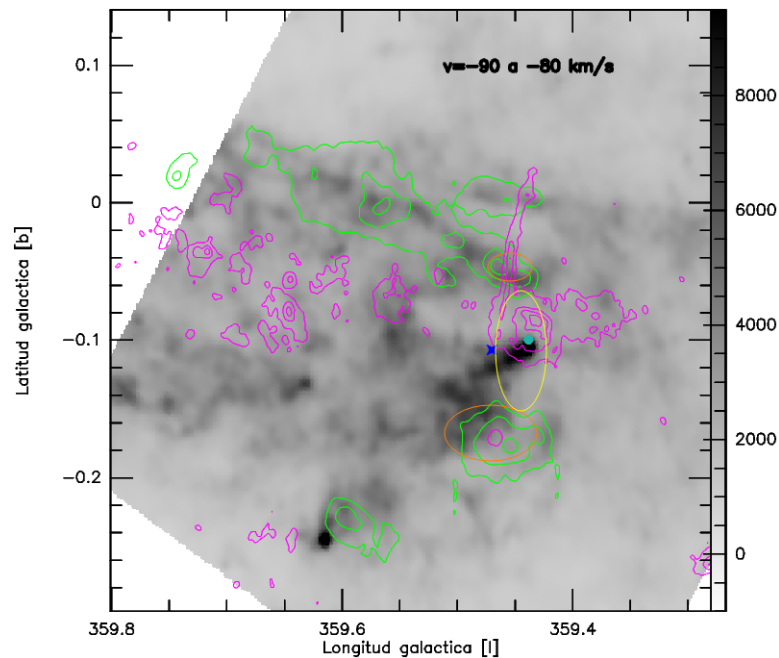


Figura 5.7: Composición 2: Imagen de fondo (escala de grises) emisión de polvo en $350\mu\text{m}$, contornos de emisión del HCO^+ (verde) en el rango $v = [-90, -80]$ km/s y emisión en radio continuo de HI (lavanda). En este rango de velocidades se puede observar que la componente molecular (HCO^+) parece estar relacionada con la componente atómica y la emisión térmica del polvo (elipses naranjas). También se puede encontrar una cavidad en la componente de material molecular (elipse amarilla).

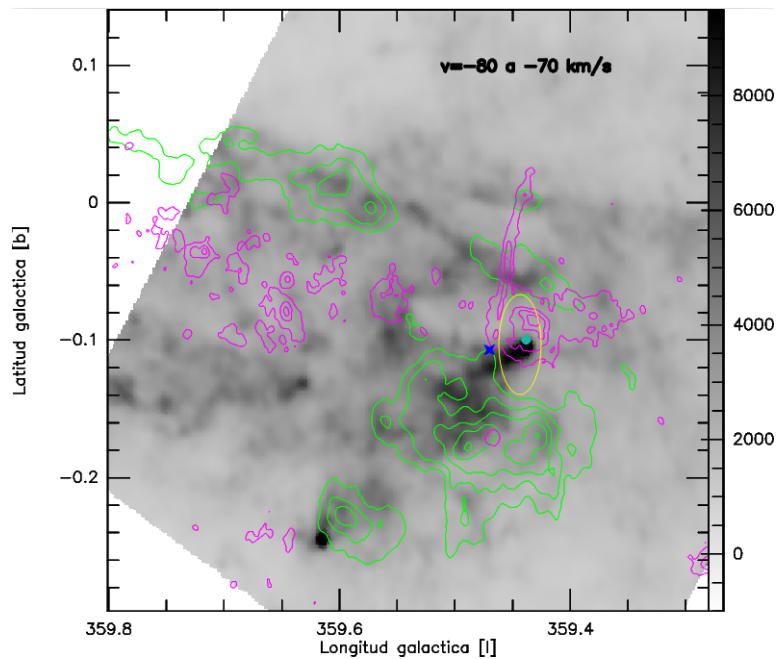


Figura 5.8: Composición 3: Imagen de fondo (escala de grises) emisión de polvo en $350\mu\text{m}$, contornos de emisión del HCO^+ (verde) en el rango $v = [-80, -70]$ km/s y emisión en radio continuo de HI (lavanda). A estas velocidades se observa que el gas molecular HCO^+ empieza a ubicarse en el complejo molecular Sgr C. También se puede observar una ausencia de gas (cavidad) en las regiones asociadas a la emisión en radio-continuo, específicamente cerca de la región HII (elipse amarilla), y en la posición del EGO.

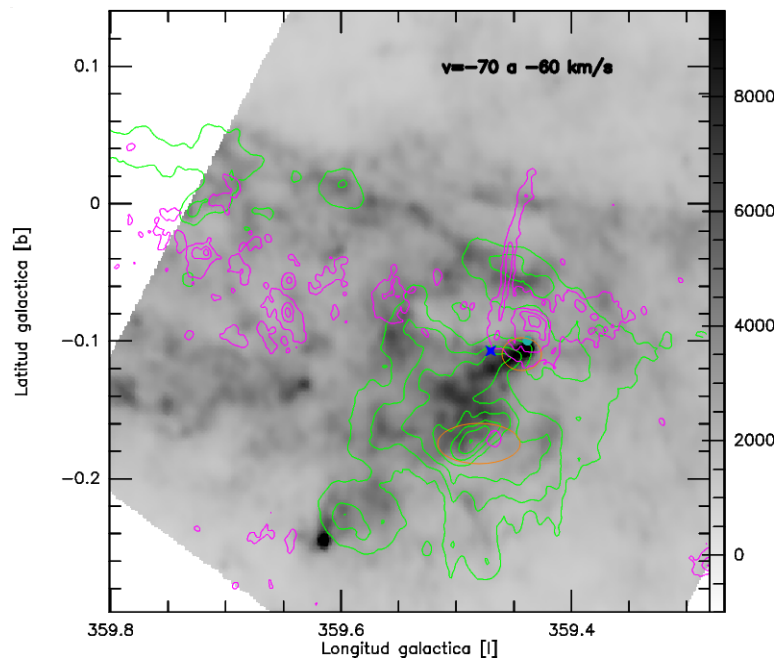


Figura 5.9: Composición 4: Imagen de fondo (escala de grises) emisión de polvo en $350\mu\text{m}$, contornos de emisión del HCO^+ (verde) en el rango $v = [-70, -60]$ km/s y emisión en radio continuo de HI (lavanda). En este rango de velocidades se puede observar la máxima emisión el gas molecular HCO^+ asociada con la emisión térmica de polvo (elipse naranja inferior). Se observa también una emisión cerca del EGO en la emisión del polvo (elipse naranja superior).

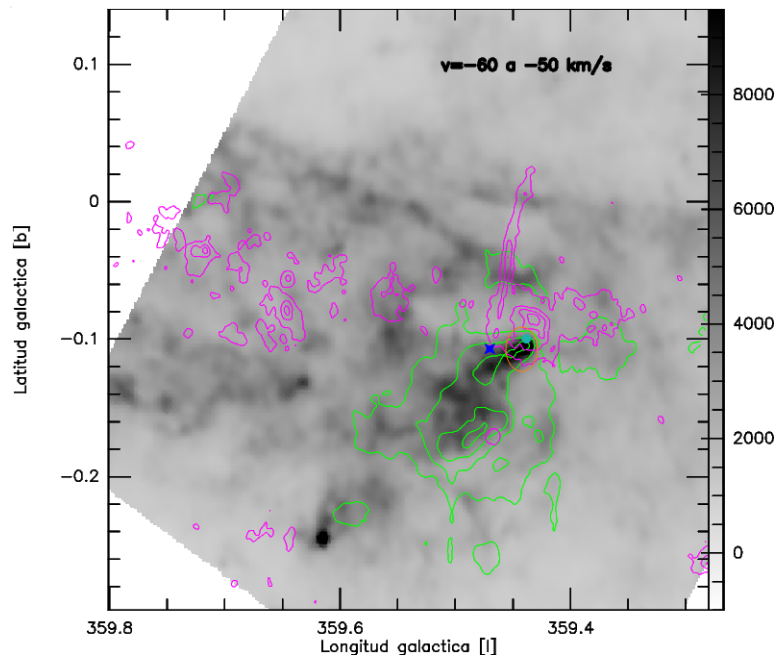


Figura 5.10: Composición 5: Imagen de fondo (escala de grises) emisión de polvo en $350\mu\text{m}$, contornos de emisión del HCO^+ (verde) en el rango $v = [-60, -50]$ km/s y emisión en radio continuo de HI (lavanda). A estas velocidades se puede observar que el gas molecular HCO^+ se encuentra relacionado con la emisión en infrarrojo del complejo molecular Sgr C, en la parte cerca del EGO (elipse amarilla). En estas velocidades se puede observar que el gas molecular está totalmente asociado al complejo molecular Sgr C.

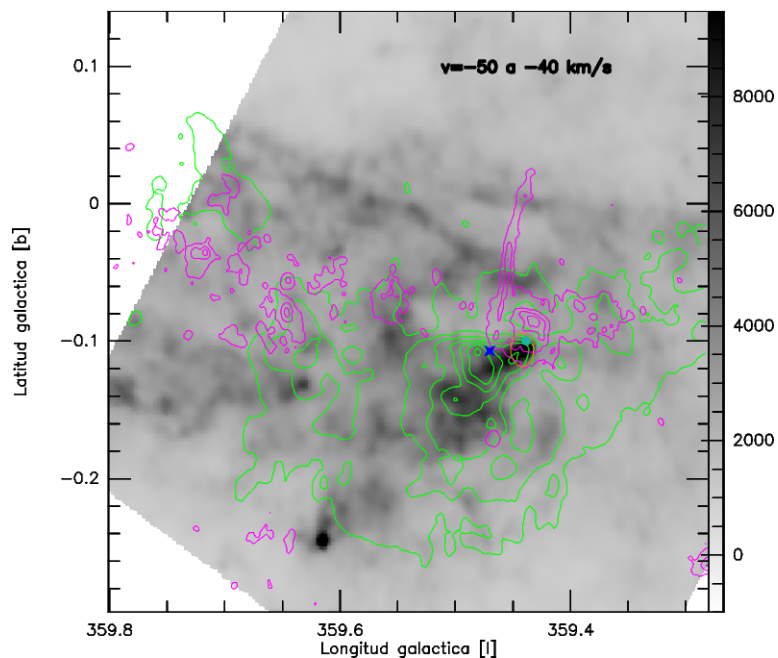


Figura 5.11: Composición 6: Imagen de fondo (escala de grises) emisión de polvo en $350\mu\text{m}$, contornos de emisión del HCO^+ (verde) en el rango $v = [-50, -40]$ km/s y emisión en radio continuo de HI (lavanda). En este rango de velocidades se puede observar que el gas molecular HCO^+ tiene una emisión notoria en todo el complejo molecular Sgr C y es comparable en varios lugares con la emisión en infrarrojo, sobre todo en la ubicación del centro de Sgr C y el EGO donde se puede observar contornos bien definidos (elipse naranja).

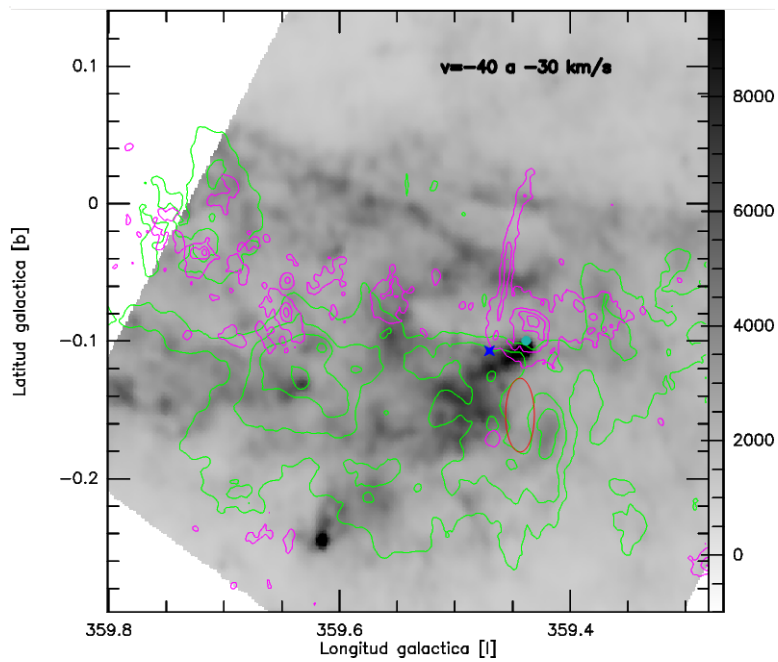


Figura 5.12: Composición 7: Imagen de fondo (escala de grises) emisión de polvo en $350\mu\text{m}$, contornos de emisión del HCO^+ (verde) en el rango $v = [-40, -30]$ km/s y emisión en radio continuo de HI (lavanda). En estas velocidades se puede observar que el gas molecular HCO^+ se encuentra disipado al rededor del complejo molecular Sgr C. Esto muestra que el gas empieza a moverse en otra dirección, hacia coordenadas positivas. También se puede encontrar una región en forma de capa (elipse roja) donde se podría formar estrellas en el futuro.

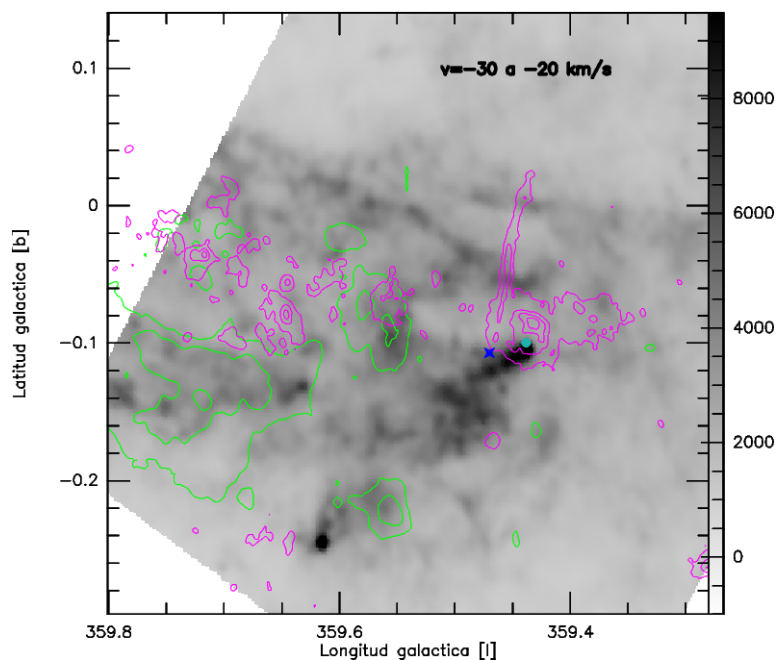


Figura 5.13: Composición 8 del estudio morfológico: Imagen de fondo (escala de grises) emisión de polvo en $350\mu\text{m}$, contornos de emisión del HCO^+ (verde) en el rango $v = [-30, -20]$ km/s y emisión en radio continuo de HI (lavanda)). A estas velocidades se puede observar que ya no se tiene emisión representativa del HCO^+ asociada al complejo molecular Sgr C, sino que la emisión se ha movilizado hacia coordenadas y velocidades positivas.

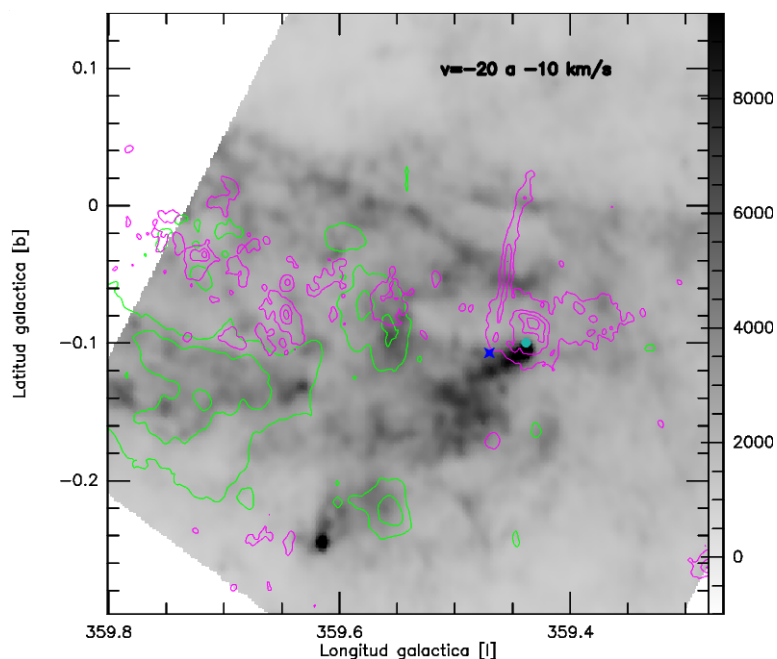


Figura 5.14: Composición 9 del estudio morfológico: Imagen de fondo (escala de grises) emisión de polvo en $350\mu\text{m}$, contornos de emisión del HCO^+ (verde) en el rango $v = [-20, -10]$ km/s y emisión en radio continuo de HI (lavanda). A estas velocidades se puede observar que el gas molecular HCO^+ ya no esta relacionado con el complejo molecular Sgr C con una emisión incluso menor que en la gráfica anterior, sino que se mueve hacia coordenadas y velocidades positivas hacia el Centro Galáctico.

En las figuras 5.6 a 5.14 se muestra la superposición de los tres mapas: emisión del polvo en longitud de onda de $350\mu\text{m}$, que se la usó como base de la superposición en escala de grises que muestra la intensidad del mapa de emisión de polvo en MJy/sr, mapa de contornos de emisión de gas denso en verde y contornos de emisión en radio-continuo del hidrógeno atómico neutro en lavanda. La posición de Sgr C y el EGO de la región se muestran en azul y celeste respectivamente. Estas posiciones ayudaron a visualizar como iba cambiando el movimiento del gas al rededor del complejo molecular Sgr C. De la emisión de gas denso en las figuras 5.9 y 5.11 se puede ver que en el complejo molecular Sgr C presenta un máximo de emisión, en la región donde se caracterizó las propiedades físicas, en los intervalos de velocidad de $[-70,-30]$ km/s. Además en las gráficas 5.6 y 5.7 se puede observar la presencia de cavidades en regiones cercanas a la región HII.

5.3. Resultados

Del estudio cualitativo morfológico y del movimiento de gas denso en el complejo molecular Sgr C se obtuvo una composición de nueve mapas mostradas en las figuras del 5.6 al 5.14 obtenidos de la superposición de tres mapas: emisión de polvo en infrarrojo a una longitud de ondas de $350\mu\text{m}$, ubicándola como imagen de fondo, y superpuestas a esta se

usó contornos de emisión molecular de gas denso, HCO^+ en un intervalo de velocidad de 10 km/s en cada uno de los mapas, y contornos de emisión en radio-continuo del hidrógeno atómico neutro. Estos mapas muestran estructuras como el característico filamento no térmico en la posición (-0.55, -0.09) en cuya base se encuentra una región HII, que alberga formación estelar antigua. También se tiene la presencia de el EGO G359.44-0.102 en el cual se muestra formación estelar joven con núcleos pre-estelares masivos [21]. En el movimiento del gas molecular se puede ver la presencia de cavidades que son estructuras asociadas a la formación estelar. A continuación se muestra la figura resultante de la composición de los tres mapas en cada uno de los nueve rangos de velocidad:

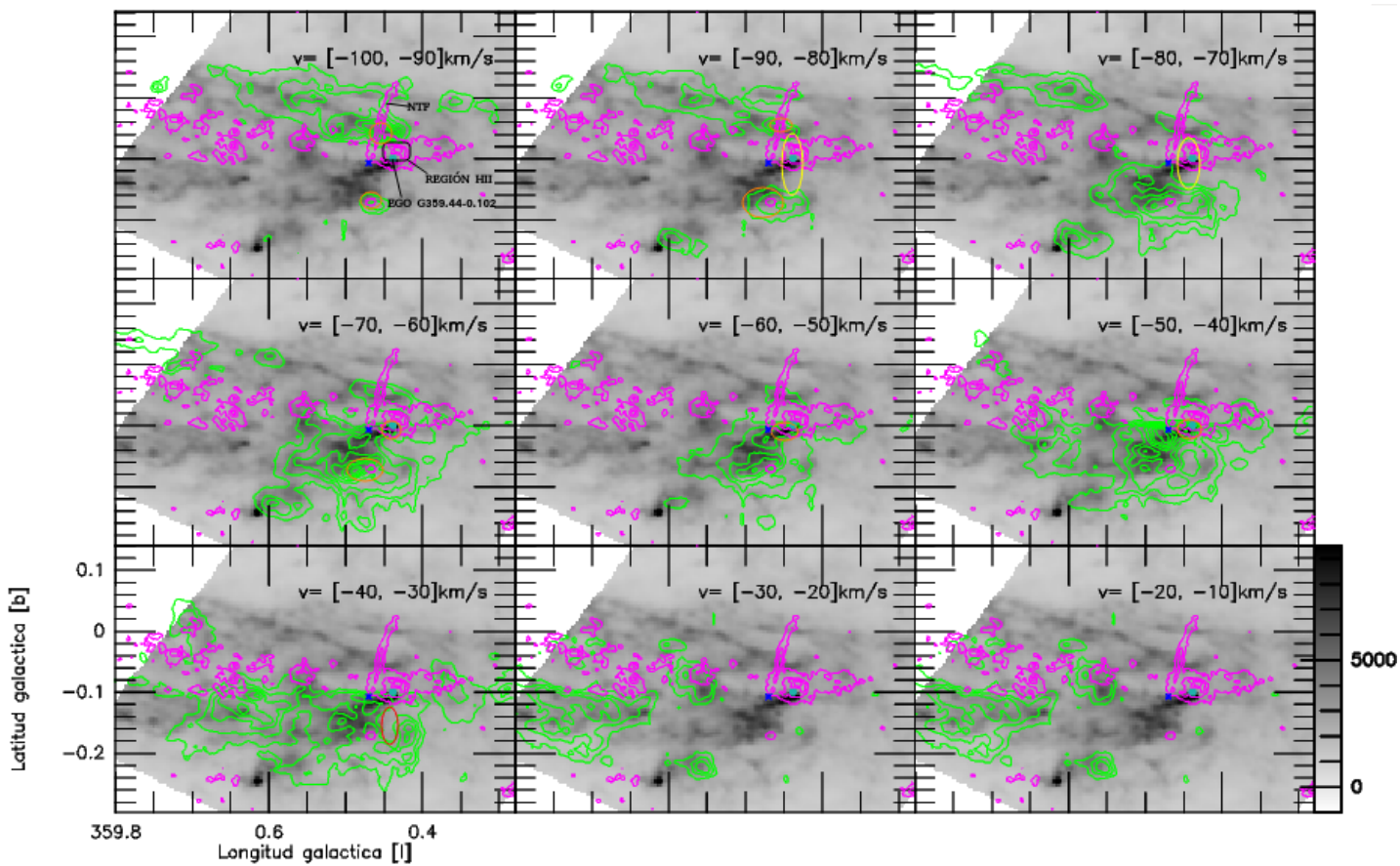


Figura 5.15: Composición de los nueve mapas integrados en el rango de velocidad [-100, -10] km/s para el complejo molecular Sgr C. En cada mapa se puede observar estructuras específicas del complejo molecular Sgr C como el característico filamento (NTF) en la posición (-0.55, -0.09), en cuya base se haya una región HII y cerca se encuentra el EGO G359.44-0.102 (en celeste). La mayor emisión del HCO^+ en el complejo molecular Sgr C a un rango de velocidad [-70, -40] km/s. En los últimos mapas se observa que a velocidades cercanas de las positivas no se tiene gas asociado al complejo molecular Sgr C.

En la figura 5.15 se puede observar la composición de los nueve mapas, en los distintos rangos de velocidad, desde los -100 a los -10 km/s. Los puntos de referencia centro de Sgr C (estrella en azul) y el centro del EGO G359.44-0.102 (punto celeste) ayudaron a comprender el movimiento del gas denso ion formilo a lo largo del complejo molecular Sgr C.

La composición de los tres mapas dan una visión única de las estructuras formadas por el movimiento del gas y la relación entre las diferentes componentes estudiadas. La escala de grises muestra la intensidad de flujo del mapa de emisión de polvo en unidades de MJy/sr.

En cuanto al movimiento del gas denso, estudiado a través de la emisión de la molécula HCO^+ , se observó que mostraba actividad desde la parte superior Este hacia la parte Oeste inferior del complejo molecular Sgr C y de allí hacia la parte Este de nuevo, esto en todo el intervalo de velocidades $[-100, -10]$ km/s, describiendo una especie de curva con el vértice en las velocidades $[-70, -40]$ km/s, donde se encuentra la región asociada a la mayor actividad del complejo molecular Sgr C [65].

En los dos primeros paneles (de izquierda a derecha) en un intervalo de velocidad de $[-100, -80]$ km/s se observó que la emisión del gas denso HCO^+ y de radio-continuo en el punto $(-0.55, -0.06)$ parecen estar relacionados (elipse naranja superior), aquí la emisión de polvo no es muy relevante, en el primer panel se puede ver que la emisión del HCO^+ alcanza un pico de emisión en estas coordenadas. En los siguientes paneles se pudo observar como esta relación se va perdiendo hasta desaparecer a medida que la velocidad aumenta. En los paneles 1 y 2 se observó otra relación de este estilo (elipse naranja inferior) entre las mismas emisiones en la región al rededor del punto $(-0.55, -0.18)$ pero a diferencia del caso anterior se puede observar que la emisión del polvo es más significativa y la emisión molecular va aumentando a medida que aumenta la velocidad, hasta alcanzar mayor emisión de gas en el complejo molecular Sgr C, en el segundo panel se puede observar como se va formando una cavidad de la componente molecular (elipse amarilla). En el tercer panel a una velocidad de $[-80, -70]$ km/s se puede ver una cavidad formada al rededor de las coordenadas $(-0.56, -0.102)$ que parece estar asociada con la región HII. En este intervalo de velocidad ya se puede observar como la emisión de gas denso es mayor cerca de las regiones donde se caracterizaron las diferentes propiedades físicas, en este trabajo de investigación, y es menor en los alrededores.

En el intervalo $[-70, -60]$ km/s se pudo observar que aparentemente existe una correlación entre los tres mapas (elipse naranja inferior) en la región centrada en $(-0.53, -0.17)$ donde también se tiene un pico de emisión del gas denso y una alta emisión de polvo. A estas velocidades se pudo observar también otra correlación entre los tres mapas en la región asociada a las coordenadas $(-0.51, -0.11)$, esta correlación ocurre donde la emisión del polvo presenta un máximo y se encuentra cerca de la posición del EGO G359.44-0.102. Asimismo puede observarse como la emisión molecular de gas denso empieza tomar la forma de la emisión de polvo (imagen de fondo). En los mapas asociados a velocidades de $[-70, -40]$ km/s se tiene un pico de máxima intensidad para la emisión de gas denso asociadas con el centro de Sgr C $(-0.57, -0.10)$, aún mas marcado a una velocidad de $[-50, -40]$ km/s. Los contornos de emisión de gas denso se extiende hasta la posición del EGO (elipse naranja).

En los últimos tres paneles se pudo observar como el movimiento del gas HCO^+ va

desapareciendo del complejo molecular Sgr C hacia coordenadas positivas de la CMZ. A una velocidad de $[-40, -30]$ km/s se puede observar que la emisión de gas molecular se encuentra dispersa por toda la parte inferior del complejo molecular Sgr C y que ya no se aproxima en forma a la emisión de polvo. En la región al rededor de las coordenadas $(-0.56, -0.15)$ se puede observar una especie de capa entre la emisión del gas molecular (elipse roja). Los últimos dos paneles muestran la ausencia de gas denso en el complejo molecular Sgr C, lo cual indica que a esas velocidades las nubes de gas ya no se encuentran relacionadas con el complejo de estudio, sino que el gas se dirige hacia coordenadas y velocidades positivas del Centro Galáctico.

Entre las estructuras morfológicas presentes en el complejo molecular Sgr C se tiene un filamento no térmico (NTF) característico de esta región ubicado en las coordenadas galácticas $(-0.55, -0.04)$. También se tiene la presencia de una región HII en la base del filamento, donde se presenta formación estelar masiva tardía, en la parte inferior de esta región se encuentra el EGO G359.44-0.102 que caracteriza la única región de formación estelar temprana de alta masa del complejo molecular Sgr C. En los nueve intervalos de velocidad de $[-100, -70]$ km/s se puede observar la presencia de una cavidad de material molecular denso en la zona asociada con la región HII, así como también se pudo encontrar una región en forma de capa entre la emisión molecular a un velocidad de $[-40, -30]$ km/s.

DISCUSIÓN

Del estudio cualitativo de las estructuras morfológicas y del movimiento del gas denso HCO^+ en el complejo molecular Sgr C se pudo observar que el gas parece describir una trayectoria en forma de arco desde la parte superior del complejo molecular, que presenta un vértice donde la emisión de gas alcanza un máximo en la región, donde se caracterizó las diferentes propiedades físicas del complejo molecular Sgr C, asociado a un rango de velocidades de $[-70, -40]$ km/s (que son las velocidades asociadas al complejo de nubes moleculares Sgr C [65], [21]) esto parece coincidir al menos de manera cualitativa con el escenario de Órbita cerrada elíptica en la dinámica del gas, donde Sgr C se ubica en el vértice occidental [68] mostrado en la figura 5.1; luego a velocidades mayores esta emisión se pierde. También se visualizó la presencia de varias estructuras formadas por la presencia o ausencia de gas denso. En este estudio se pudo observar la distribución del gas atómico neutro en forma de caparazón al rededor de la región HII y cavidades que podrían indicar la ionización del material molecular y su posterior expulsión de la región como se observo en el estudio realizado por Lang (2010) [65] en el cual se estudió el Centro Galáctico con diferentes trazadores moleculares entre los cuales se encuentra el ^{12}CO ; en este caso se observó una concordancia entre las componentes moleculares de ambos estudios a pesar de ser diferentes trazadores de gas denso. A pesar que las regiones del EGO y la región HII parecen estar relacionadas, no es así pues estas presentan distintas etapas de formación estelar en el complejo molecular Sgr C. Los resultados obtenidos del estudio cualitativo de estructuras morfológicas va acorde a

lo observado en la literatura, de estudios realizados sobre esta región como en los trabajos de Liszt (1995) donde se estudió por primera vez el NTF [23] mediante un análisis realizado mediante el trazador molecular ^{13}CO . En cuanto a las velocidades en las que se encuentra el complejo de nubes moleculares Sgr C Kendrew (2013) expresó que las velocidades a las que se halla este complejo está en un rango de $[-65, -55]$ km/s [21], este resultado va acorde a la máxima emisión molecular mostrada en este trabajo de investigación cuyo pico se encontró en un rango de velocidades de $[-70, -40]$ km/s. Además se tiene que la emisión en radiocontinuo del hidrógeno atómico neutro de la parte filamentosa tiene varias similitudes con otra región del Centro Galáctico mucho más marcada conocida como el arco central cerca de Sgr A mostrado en Liszt (1995) [23]. Los resultados del movimiento del gas denso en esta región evidencia una anticorrelación entre las componentes atómica y molecular del gas en las regiones donde se tiene cavidades, un resultado similar fue presentado por Lang (2010) al realizar un estudio parecido en toda la zona del Centro Galáctico con otro trazador molecular [65]; esta evidencia de cavidades con diferentes trazadores moleculares y su implicación en la inhibición de formación estelar podría ser de interés a futuro. Este estudio del movimiento del gas denso HCO^+ y las estructuras morfológicas, en conjunto con los resultados obtenidos previamente por otras investigaciones aporta al entendimiento de las causas de la baja formación estelar en esta región tan poco caracterizada del centro galáctico; ya que estructuras como cavidades podrían estarse formando por vientos estelares fuertes, que expulsan el material molecular de la región, provocados por la formación estelar masiva de la región del EGO haciendo que el gas se disperse y no pueda condensarse para seguir con el proceso de formación estelar. Esto explicaría el hecho de que a pesar de tener una alta densidad, que sus componentes de emisión molecular y de polvo se encuentren relacionadas (lo cual es un punto clave para la formación estelar) y presentar las condiciones apropiadas en temperatura para presentar una gran formación de estrellas, la dinámica salvaje del gas y sus consecuentes estructuras morfológicas no favorecen a la formación de estrellas en la parte interna de la CMZ, este resultado es realizado de manera cualitativa, para poder hacer un aporte más significativo es necesario realizar estudios cuantitativos, estos van más allá de los propósitos de este trabajo de investigación.

Capítulo 6

Conclusiones

De este proyecto que permitió realizar un nuevo estudio en diferentes longitudes de onda en infrarrojo lejano y en frecuencias de radio en el complejo molecular Sgr C se obtuvo lo siguiente:

- El valor estimado de la temperatura de polvo en el centro de Sgr C es 19.2 K y en el centro de emisión del ion formilo es 16.9 K. Ambos valores son superiores a las estimaciones de temperatura de polvo en otras regiones que presentan formación estelar activa, como la gran nube de Magallanes con una temperatura de polvo asociada de 15 K [6]. Aunque son menores a valores encontrados en otras regiones de formación estelar como el estudio realizado en la región HII de la nube molecular S175 con un valor de 27.9 K [52]. Los valores de temperatura de polvo obtenidos en el estudio de emisión térmica de polvo en dos regiones del complejo molecular Sgr C están dentro del rango de [15-40] K, este intervalo de temperatura es asignado a nubes moleculares que son los lugares donde se presenta formación estelar [10]. La diferencia de temperatura de ~ 3 K mostrado entre las dos regiones podría deberse la presencia de formación estelar en el EGO G359.44-0.102 cerca de la parte mas fría de la nube característica del complejo molecular Sgr C.
- En el caso de la temperatura cinética T_k el valor encontrado en el centro de Sgr C es 58.1 K y en el centro de emisión del HCO^+ es 118.8 K. Ambos valores son consistentes con los resultados obtenidos en otros estudios de nubes moleculares del Centro Galáctico, donde se ha encontrado regiones de formación estelar activa. La temperatura cinética encontrada en otras nubes moleculares alcanza valores altos como en la nube de +50km/s de 80 K [58] y en la nube de "Brick" de 100 K [59]. Los valores encontrados en este proyecto de investigación se encuentran en conformidad con las cifras de temperatura cinética del gas molecular denso encontrado en nubes moleculares con presencia de formación estelar que va en un rango de [50-100] K [60].
- Los valores obtenidos en temperatura de polvo y temperatura cinética en el complejo

molecular Sgr C, indica que al una región que se encuentra en un medio interestelar violento con altas densidades en su interior, en el Centro Galáctico, cumple con características favorables presentes en nubes moleculares bien estudiadas que muestran formación estelar masiva y activa en su interior. Estas condiciones son, aparte de la temperatura de polvo y temperatura cinética, poseer una alta densidad de H_2 que para la región donde se presenta la formación estelar en este complejo molecular es de $\sim 10^4 \text{cm}^{-3}$ mostrado en Tanaka et. al (2014) [20].

- La densidad superficial de la tasa de formación estelar estimada en el complejo molecular Sgr C es de $0.004 [M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}]$ para un valor de área de 392.62pc^2 lo cual confirma de manera cuantitativa que el complejo molecular Sgr C posee una tasa formación de estrellas prácticamente inactiva en comparación con sus homólogos galácticos como el complejo de Perseo que muestra un valor de densidad de tasa de formación estelar de $1.32 [M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}]$ en un área de 73.2pc^2 [63] o el complejo de nubes Tauro de $0.147 [M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}]$ para un área de 252pc^2 [63], estos muestran una formación de estrellas por unidad de área y tiempo alta a pesar de tener áreas relativamente pequeñas que muestran una formación estelar continua, en comparación con la usada en este proyecto de investigación.
- En base a un estudio cualitativo de las estructuras morfológicas y el movimiento del gas denso HCO^+ en el complejo molecular Sgr C, que en su estado rotacional más bajo (1-0) es un excelente trazador de núcleos de gas frío de alta densidad de hidrógeno molecular [26], se concluyó que la cavidad de gas molecular encontrada, bajo la región HII donde se tiene la presencia del EGO G359.44-0.102, en el intervalo de velocidades $[-100, -70] \text{km/s}$ tiene concordancia con la encontrada en la misma región usando trazadores moleculares diferentes en el estudio realizado por Lang (2010) [65]. Esta cavidad podría ser la causante de inhibir la formación estelar masiva en esta región del complejo molecular Sgr C, pues es una evidencia clara de la presencia de vientos estelares fuertes, como se indicó en el trabajo de Liszt Spiker (1995) [23], que disipan la aglomeración del gas en las nubes moleculares por la presencia de las capas de gas ionizado que existe al rededor de la región HII estudiado por Lang (2010) [65].
- La caracterización de propiedades físicas en la única región que presenta evidencia de formación estelar en la parte oeste de la CMZ permitió establecer que las condiciones físicas de densidad y temperatura presente en esta región no podrían ser las causantes de una baja tasa de formación estelar en esta región de la CMZ ya que los valores estimados son consistentes con estudios realizados en nubes moleculares que presentan formación estelar activa. Por lo tanto podrían ser los efectos de la dinámica del gas en la región, la ausencia de núcleos densos o un mecanismo diferente de formación de estrellas los que podrían estar frenado la rápida producción de estrellas en esta región.

Por lo tanto, los estudios observacionales sistemáticos y comparativos de las propiedades físicas estimadas en el complejo molecular Sgr C y la relación de estas propiedades con las diferentes estructuras presentes en las nubes moleculares permitieron caracterizar la formación estelar dentro del complejo molecular Sgr C en la parte interna de la Zona Molecular Central.

Bibliografía

- [1] Jens Kauffmann. Central molecular zone of the milky way: Star formation in an extreme environment. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 11:163–166, 08 2015.
- [2] Viti S. Williams D.A. *Observational Molecular Astronomy: Exploring the Universe using Molecular Line Emissions*. CUP, 2013.
- [3] Valerio Lattanzi, Adam Walters, Brian J. Drouin, and John C. Pearson. Rotational spectrum of the formyl cation, HCO, to 1.2 THz. *The Astrophysical Journal*, 662(1):771–778, jun 2007.
- [4] Mark R. Krumholz. Notes on Star Formation. *arXiv e-prints*, page arXiv:1511.03457, Nov 2015.
- [5] J. D. Henshaw, S. N. Longmore, J. M. D. Kruijssen, B. Davies, J. Bally, A. Barnes, C. Battersby, M. Burton, M. R. Cunningham, J. E. Dale, and A. et al. Ginsburg. Molecular gas kinematics within the central 250 pc of the Milky Way. , 457(3):2675–2702, Apr 2016.
- [6] C.C. Herrera. Polvo frío y gas molecular en la región n11 de la nube grande de magallanes, 2010. Tesis de Magíster en Ciencias mención Astronomía.
- [7] K.J. Chuang. The formation of complex organic molecules in dense clouds, 2018. PhD. thesis.
- [8] G.F. Wong. Characterising the structure of molecular clouds, 2016. Thesis for Doctor of Philosophy.
- [9] Willem Freerk Frieswijk. *Early stages of clustered star formation -massive dark clouds throughout the Galaxy-*. PhD thesis, 2008. date submitted:2008 Rights: Frieswijk, W.F.
- [10] Steven N. Shore (auth.) Loris Magnani. *A Dirty Window: Diffuse and Translucent Molecular Gas in the Interstellar Medium*. Astrophysics and Space Science Library 442. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1 edition, 2017.
- [11] Ricardo Retes Romero. Poblacion estelar joven embebida en la nube molecular galactica asociada a la fuente IRAS 18236-1205. Master's thesis, Instituto Nacional de Astrofísica, Optica y Electronica, June 2008.

- [12] Jairo Vladimir Armijos Abendaño. Química en las nubes moleculares del centro galáctico, 2014. Galaxias - Tesis doctorales; Física.
- [13] Alicia. Lopez Jimenez. *Química de moléculas orgánicas en regiones de formación de estrellas masivas*. PhD thesis, UAM. Departamento de Física Teórica; Centro de Astrobiología, 2017.
- [14] Roxana-Adela Chira. On Filaments within Molecular Clouds and their Connection to Star Formation. *arXiv e-prints*, page arXiv:1806.02286, June 2018.
- [15] Anneila Isabel. Sargent. *Molecular Clouds and Star Formation*. PhD thesis, California Institute of Technology, 1978.
- [16] M. J. Reid, K. M. Menten, A. Brunthaler, X. W. Zheng, T. M. Dame, Y. Xu, Y. Wu, B. Zhang, and A. et al. Sanna. Trigonometric Parallaxes of High Mass Star Forming Regions: The Structure and Kinematics of the Milky Way. , 783(2):130, Mar 2014.
- [17] Miguel Ángel Requena Torres. *Complejidad química en las nubes moleculares del centro de la galaxia*. PhD thesis, Madrid, 2008. Tesis de la Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica II, leída el 16-10-2007.
- [18] K. Immer, J. Kauffmann, T. Pillai, A. Ginsburg, and K. M. Menten. Temperature structures in Galactic center clouds. Direct evidence for gas heating via turbulence. , 595:A94, November 2016.
- [19] P. A. Jones, M. G. Burton, M. R. Cunningham, M. A. Requena-Torres, K. M. Menten, P. Schilke, and A. et al. Belloche. Spectral imaging of the Central Molecular Zone in multiple 3-mm molecular lines. , 419(4):2961–2986, February 2012.
- [20] Kuniyiko Tanaka, Tomoharu Oka, Shinji Matsumura, Makoto Nagai, and Kazuhisa Kamagai. High Velocity Compact Clouds in the Sagittarius C Region. , 783(1):62, March 2014.
- [21] S. Kendrew, A. Ginsburg, K. Johnston, H. Beuther, J. Bally, C. J. Cyganowski, and C. Battersby. Early-stage Massive Star Formation near the Galactic Center: Sgr C. , 775(2):L50, October 2013.
- [22] Charles J. Lada (auth.), Ralph E. Pudritz and Michel Fich (eds.). *Galactic and Extragalactic Star Formation*. NATO ASI Series 232. Springer Netherlands, 1 edition, 1988.
- [23] Harvey S. Liszt and Robert W. Spiker. Radio Images of Sagittarius. II. Sagittarius C and Its Neighbors. , 98:259, May 1995.

- [24] C. J. Cyganowski, B. A. Whitney, E. Holden, and E. et al. Braden. A Catalog of Extended Green Objects in the GLIMPSE Survey: A New Sample of Massive Young Stellar Object Outflow Candidates. , 136(6):2391–2412, December 2008.
- [25] Maximilien R. P. Schirm, Christine D. Wilson, Suzanne C. Madden, and Dave L. Clements. The Dense Gas in the Largest Molecular Complexes of the Antennae: HCN and HCO⁺ Observations of NGC 4038/39 Using ALMA. , 823(2):87, June 2016.
- [26] David A Williams and T W Hartquist. *The Cosmic-Chemical Bond*. The Royal Society of Chemistry, 2013.
- [27] Muller, H. S, Drouin, B. Jand Pearson, J. C, and Ordu, M. H. Rotational spectra of isotopic species of methyl cyanide, CH₃CN, in their $\nu_8=1$ excited vibrational states. *AA*, 586:6pp, feb 2016.
- [28] Tielens, A. G. G. M. The molecular universe. *Reviews of Modern Physics*, 85:1021–1081, jul 2013.
- [29] D. MacKay. Ch₃cn photochemistry at hot core margins. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 304:61 – 66, 09 2008.
- [30] D. J. Wilner, M. C. H. Wright, and R. L. Plambeck. Maps of GHz Methyl Cyanide Emission in Orion-KL. , 422:642, February 1994.
- [31] Peter H. Bodenheimer (auth.). *Principles of Star Formation*. Astronomy and Astrophysics Library. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1 edition, 2011.
- [32] Kosuke Fujii. *Giant Molecular Cloud Formation at the Interface of Colliding Supershells in the Large Magellanic Cloud*. PhD thesis, Facultad de Ciencias de la Universidad de Tokio, 2015.
- [33] Nakamura, F., Ishii, S. and Dobashi, K., and Shimoikura, T. Nobeyama 45-m mapping observations toward nearby molecular clouds, Orion A, Aquila Rift, and M17: Project overview. *PASJ*, 71:23pp, dec 2019.
- [34] S. aalto. Dense gas, chemistry and star formation in luminous galaxies. In W. H. Baan, editor, *Dense molecular gas around protostars and in galactic nuclei*, volume 295 of *Astrophysics and Space Science*, pages VI, 330, November 2005.
- [35] T. W. Hartquist. *Molecular Astrophysics: A Volume Honouring Alexander Dalgarno*. Cambridge University Press, 2005.
- [36] P. M. Solomon, D. B. Sanders, and N. Z. Scoville. Giant Molecular Clouds in the Galaxy; Distribution, Mass, Size and Age. In W. B. Burton, editor, *The Large-Scale Characteristics of the Galaxy*, volume 84 of *IAU Symposium*, page 35, January 1979.

- [37] Nikolaos D. Kylafis (eds.) Leo Blitz (auth.), Charles J. Lada. *The Physics of Star Formation and Early Stellar Evolution*. NATO ASI Series 342. Springer Netherlands, 1 edition, 1991.
- [38] Andrea Bustamante Silva. *Acreción en Núcleos Densos Masivos*. Master's thesis, UNIVERSIDAD DE CHILE, June 2010.
- [39] Annamaneni Peraiah. *An Introduction to Radiative Transfer*. 1st edition, 2001.
- [40] Paul F. Goldsmith and William D. Langer. Population Diagram Analysis of Molecular Line Emission. , 517(1):209–225, May 1999.
- [41] S. Martín and J. el al. Martín-Pintado. Spectral Line Identification and Modelling (SLIM) in the MAdrid Data CUBe Analysis (MADCUBA) package. Interactive software for data cube analysis. , 631:A159, November 2019.
- [42] H. Beuther, E. B. Churchwell, C. F. McKee, and J. C. Tan. The Formation of Massive Stars. In Bo Reipurth, David Jewitt, and Klaus Keil, editors, *Protostars and Planets V*, page 165, January 2007.
- [43] S. Molinari, B. Swinyard, J. Bally, M. Barlow, J. P. Bernard, P. Martin, T. Moore, A. Noriega-Crespo, R. Plume, L. Testi, A. Zavagno, and A. et al. Abergel. Hi-GAL: The Herschel Infrared Galactic Plane Survey. , 122(889):314, March 2010.
- [44] E. Krugel. *The physics of interstellar dust*. Series in astronomy and astrophysics. Institute of Physics Pub, 1 edition, 2003.
- [45] Massoud Kaviany. *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. Mechanical Engineering Series. Springer, 2nd edition, 1995.
- [46] Caitlin M. Casey. Far-infrared spectral energy distribution fitting for galaxies near and far. , 425(4):3094–3103, October 2012.
- [47] B. Magnelli, D. Lutz, P. Santini, A. Saintonge, S. Berta, M. Albrecht, B. Altieri, and P. et al Andreani. A Herschel view of the far-infrared properties of submillimetre galaxies. , 539:A155, March 2012.
- [48] A. Poglitsch, C. Waelkens, N. Geis, H. Feuchtgruber, B. Vandenbussche, L. Rodriguez, O. Krause, E. Renotte, and C et al. van Hoof. The Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACS) on the Herschel Space Observatory. , 518:L2, July 2010.
- [49] Bernhard Schulz, Gábor Marton, Ivan Valtchanov, Ana María Pérez García, Sándor Pintér, Phil Appleton, and Csaba. et al. Kiss. SPIRE Point Source Catalog Explanatory Supplement. *arXiv e-prints*, page arXiv:1706.00448, June 2017.

- [50] Th. de Graauw and F. P. Helmich. Herschel-HIFI: The Heterodyne Instrument for the Far-Infrared. In G. L. Pilbratt, J. Cernicharo, A. M. Heras, T. Prusti, and R. Harris, editors, *The Promise of the Herschel Space Observatory*, volume 460 of *ESA Special Publication*, page 45, July 2001.
- [51] Yuefang Wu, Tie Liu, Fanyi Meng, Di Li, Sheng-Li Qin, and Bing-Gang Ju. GAS EMISSIONS IN PLANCK COLD DUST CLUMPS—a SURVEY OF THE J= 1-0 TRANSITIONS OF ^{12}CO , ^{13}CO , AND C^{18}O . *The Astrophysical Journal*, 756(1):76, aug 2012.
- [52] Mohaddesseh Azimlu, Michel Fich, and Carolyn McCoey. STUDIES OF MOLECULAR CLOUDS ASSOCIATED WITH h II REGIONS: S175. *The Astronomical Journal*, 137(6):4897–4910, may 2009.
- [53] G.A. Hacar. *Formación de núcleos densos en las nubes moleculares de Tauro y Perseo*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2013.
- [54] H. Oja, M. Poutanen, K.J. Donner, H. Karttunen, P. Kröger. *Fundamental Astronomy*. Springer, 4th ed edition, 2007.
- [55] GILDAS Team. GILDAS: Grenoble Image and Line Data Analysis Software, May 2013.
- [56] J. C. Pearson, B. J. Drouin, and H. M. Pickett. Molecular Spectroscopy and Line Catalogs at JPL. In Dariusz C. Lis, Geoffrey A. Blake, and Eric Herbst, editors, *Astrochemistry: Recent Successes and Current Challenges*, volume 231 of *IAU Symposium*, page 270, January 2005.
- [57] C. Dedes, S. Leurini, F. Wyrowski, P. Schilke, K. M. Menten, S. Thorwirth, and J. Ott. A study of three southern high-mass star-forming regions. , 526:A59, February 2011.
- [58] Aa. Sandqvist, B. Larsson, Å. Hjalmarson, P. Encrenaz, M. Gerin, P. F. Goldsmith, D. C. Lis, R. Liseau, L. Paganì, E. Roueff, and S. Viti. Herschel HIFI observations of the Sgr A +50 km s⁻¹ Cloud. Deep searches for O₂ in emission and foreground absorption. , 584:A118, December 2015.
- [59] A. Mangilli, J. Aumont, J. Ph. Bernard, A. Buzzelli, G. de Gasperis, J. B. Durrive, K. Ferrrière, G. Foënard, A. Hughes, A. Lacourt, R. Misawa, and L. et al. Montier. The geometry of the magnetic field in the central molecular zone measured by PILOT. , 630:A74, October 2019.
- [60] David A. Millar, T. J.; Williams. *Dust and chemistry in astronomy*. Graduate series in astronomy. Routledge, 2019.
- [61] Anthony P. Whitworth, Derek Ward-Thompson. *An Introduction to Star Formation*. Cambridge University Press, 1 edition, 2011.

- [62] Charles J. Lada, Jan Forbrich, Marco Lombardi, and João F. Alves. Star Formation Rates in Molecular Clouds and the Nature of the Extragalactic Scaling Relations. , 745(2):190, Feb 2012.
- [63] Amanda Heiderman, II Evans, Neal J., Lori E. Allen, Tracy Huard, and Mark Heyer. The Star Formation Rate and Gas Surface Density Relation in the Milky Way: Implications for Extragalactic Studies. , 723(2):1019–1037, Nov 2010.
- [64] Tomoharu Oka, Tetsuo Hasegawa, Fumio Sato, Masato Tsuboi, and Atsushi Miyazaki. A Large-Scale CO Survey of the Galactic Center. , 118(2):455–515, Oct 1998.
- [65] Cornelia C. Lang, W. M. Goss, Claudia Cyganowski, and Kelsey I. Clubb. A High-resolution Survey of H I Absorption Toward the Central 200 pc of the Galactic Center. , 191(2):275–300, Dec 2010.
- [66] Dirk Froebrich and Jonathan Rowles. The structure of molecular clouds - II. Column density and mass distributions. , 406(2):1350–1357, Aug 2010.
- [67] G. F. Gahm. Interstellar cloud morphologies and their origins. *Baltic Astronomy*, 3:85–103, Jan 1994.
- [68] J. M. Diederik Kruijssen, James E. Dale, and Steven N. Longmore. The dynamical evolution of molecular clouds near the Galactic Centre - I. Orbital structure and evolutionary timeline. , 447(2):1059–1079, Feb 2015.
- [69] Jonathan D. Henshaw. Molecular gas kinematics of the CMZ: Great oaks from little acorns grow. In Roland M. Crocker, Steven N. Longmore, and Geoffrey V. Bicknell, editors, *The Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre*, volume 322 of *IAU Symposium*, pages 85–89, Jan 2017.