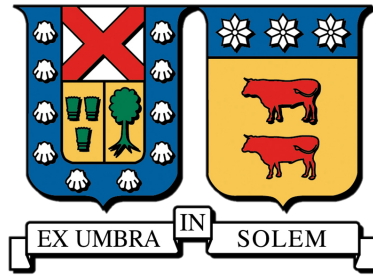


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
CAMPUS SAN JOAQUÍN - SANTIAGO - CHILE

TESIS DE LICENCIATURA EN ASTROFÍSICA



Ignacio Alejandro Araya González

**Caracterización cinemática de streamers
moleculares en el sistema triple T Tau a
partir de observaciones interferométricas
de ALMA**

Departamento de Física

Supervisora de la tesis de Licenciatura: APhD. CAROLINA AGURTO G.
COMITÉ ACADÉMICO: APhD. CAROLINA AGURTO G.
APhD. MATÍAS MONTESINOS A.
APhD. ALEJANDRA ROJAS L.

Enero 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo:

Caracterización cinemática de streamers moleculares en el sistema triple T Tau a partir de observaciones interferométricas de ALMA

Nombre del candidato(a): Ignacio Alejandro Araya González:

Carrera / Grado: Licenciatura en Astrofísica

Campus: San Joaquín Departamento: Departamento de física

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carolina Agurto Gangas, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 26/01/2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/01/2026

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

“El futuro depende del pasado, incluso si no llegamos a verlo.”

— Riebeck, *Outer Wilds*

Abstract

En este trabajo, se presenta la primera caracterización cinemática de primer orden de streamers moleculares en el dinámicamente complejo sistema triple T Tau, usando cubos interferométricos de ALMA Banda 6 productos de la campaña ALMA-DOT (2018.1.01037.S). Analizando tres trazadores en ventanas espectrales distintas: CN(spw25), H₂CO(spw29) y CN(spw31).

La emisión se aisló en el espacio PPV identificando dos componentes dominantes coherentes con infall y se ajustó luego una trayectoria balística simple con TIPSy. Se estimaron streamers de longitudes consistentes entre $L_{3D} \sim 0.8-2.8 \times 10^3$ [au] y flujos moleculares de $F \sim 2.6 \times 10^{-21}-1.93 \times 10^{-20}$ [W/m^{-2}]. Además se estimó la masas de gas de los streamers con valores $M_{gas} \sim 1.09-2.93 \times 10^{-3}$ [M_{\odot}]. Por otro lado se acotaron por primera vez la tasa de acreción molecular en este sistema $\dot{M} \sim 3.89 \times 10^{-7}-2.24 \times 10^{-6}$ [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$] indicando valores consistentes con otros sistemas que contienen streamers. Este trabajo constituye el primer análisis de streamers en el sistema T Tau, demostrando que su caracterización es importante para entender la dinámica y la influencia en la formación planetaria.

Agradecimientos

A mi querido padre, a mi querida madre y a mi querido hermano. A mis amistades, que me acompañaron y apoyaron durante todos estos años. A mis queridos de cuatro patas ,Terry y Max, por su compañía fiel durante días y noches de estudios. A la profesora Carolina, por su confianza y guía para realizar este trabajo. Y, finalmente, a mí mismo, por la confianza, perseverancia y por no rendirme.

Contents

1	Introducción	3
1.1	Sistema y Disco Protoplanetarios	3
1.1.1	Contexto general	3
1.1.2	Estructura del Disco	5
1.1.3	Estructuras Dinámicas	7
1.2	Astroquímica de Discos Protoplanetarios	8
1.2.1	Composición molecular	8
1.2.2	Procesos Químicos y Moléculas Trazadoras	9
1.3	Streamers	11
1.3.1	Definición y Propiedades	11
1.3.2	Hipótesis de formación	12
1.3.3	Evidencias observacionales y rol en acreción	13
1.4	Interferometría en Radioastronomía	14
1.4.1	Principios básicos	14
1.4.2	Resolución y Sensibilidad	14
1.4.3	Limitaciones	15
1.4.4	Calibración, Imagen y Deconvolución	16
1.5	ALMA	17
1.5.1	Instrumento y Antenas	17
1.5.2	Configuraciones	18
1.6	Caracterización de Streamers	18
1.6.1	Panorama observacional	18
1.6.2	Impacto en la formación planetaria	19
1.6.3	Objetivos	20
2	Datos y Herramientas	22
2.1	Datos Observacionales	22
2.1.1	Estrellas T Tauri y Sistema T Tau	22
2.1.2	Datos y Líneas moleculares	23
2.1.3	Cubos espectrales y mapas de momentos	25
2.2	CASA	29
2.2.1	Descripción general	29
2.3	TIPSY	29
2.3.1	Descripción general	29
2.3.2	Código y Modelos utilizados	30
3	Metodología	37
3.1	Visualización y criterio de selección de moléculas	37
3.2	Estrategia para el estudio de T Tau	38

4	Resultados	42
4.1	CN - SPW25 - 226.655 GHz	42
4.2	H ₂ CO - SPW29 - 226.697775 GHz	46
4.3	CN - SPW31 - 226.874781 GHz	55
5	Discusión	62
5.1	Geometría y modelo balístico	62
5.2	Comparación con trabajos previos	63
5.3	Límites del modelo	67
6	Conclusiones	69
7	Trabajo futuro	71
	Bibliography	72
	List of Figures	92
	List of Tables	101

Chapter 1

Introducción

En los últimos años la imagen común, o típica, de un sistema protoplanetario ha ido cambiando a una más dinámica, química y estructuralmente más diversa. Observaciones de alta resolución obtenidas mediante ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), NOEMA (NOrtHern Extended Millimeter Array) y VLA (Very Large Array), por nombrar algunos telescopios, han ido revelando que la construcción de un sistema planetario comienza en fases tempranas, cuando el polvo y el gas establecen las condiciones iniciales del material que luego evoluciona en el disco protoplanetario. En particular, la evolución del polvo (crecimiento, transporte y redistribución) opera en escalas de tiempo del orden de varios millones de años (Myr), lo cual es consistente con la evolución a lo largo de la vida del disco [Testi et al. \(2014\)](#). Es en esta etapa temprana donde la acreción de material suele ser asimétrica y puede coexistir con las estructuras de polvo y del disco en general, y en particular, con evidencias cada vez mayores, con las estructuras llamadas *streamers* [Tobin & Sheehan \(2024\)](#); [Valdivia-Mena et al. \(2022\)](#); [Valdivia-Mena \(2024\)](#). Estas estructuras, inicialmente poco consideradas u omitidas, serían conectores del entorno natal del sistema con el disco o protoestrella durante su formación y evolución, cumpliendo así el rol de ingresar un flujo adicional de material nuevo y fresco hacia el sistema, el cual estará involucrado potencialmente en los procesos posteriores.

1.1 Sistema y Disco Protoplanetarios

1.1.1 Contexto general

En la actualidad se consideran a los discos protoplanetarios como los conectores/puentes entre el colapso de la nube molecular, con la posterior etapa de nacimiento y formación de los planetas. Este proceso comienza cuando una región densa de la nube molecular se vuelve gravitacionalmente inestable, generando así un colapso debido a que la autogravedad domina por sobre los procesos principales que la soportaban (turbulencias, campos magnéticos, rotación y presión térmica) iniciando así el colapso y acreción que conducirá a la formación de una protoestrella y su disco [Hartmann et al. \(1998\)](#); [Tobin & Sheehan \(2024\)](#).

Como el gas y el pequeño polvo inicial tienen algo de rotación, su momento angular se conservará haciendo que el material no caiga directamente a la protoestrella, por lo que se ven obligados a tomar la característica forma aplanada y de disco alrededor de esta. Es este disco quien regula el cómo y dónde caerá

el material hacia la estrella como alimentación para sus procesos, y a su vez, es donde el polvo crecerá, se concentrará y pasará de simples granos a planetesimales, finalizando en algunos casos núcleos planetarios [Andrews \(2020\)](#).

Ahora bien, en un comienzo se creía que estos discos eran estructuras simples y uniformes [Andrews \(2020\)](#), pero gracias al desarrollo tecnológico de la interferometría, por ejemplo las antenas de ALMA, sabemos que poseen estructuras internas y son muy dinámicos, solo a escalas de unas pocas unidades astronómicas (au) aparecen anillos, cavidades y otras variaciones geométricas. Es así como, los anillos presentes en los discos protoplanetarios, son una característica particular que nos ayudan a entender y modelar cambios en la presión, temperatura y cinemática del gas, el cual atraparé las partículas de polvo, dejándolo retenido y aumentando así la densidad local, favoreciendo posteriormente a la formación de objetos más grandes cambiando así la evolución esperada del polvo y el gas [Testi et al. \(2014\)](#); [Andrews \(2020\)](#).

Todo esto ocurre en épocas muy tempranas de la formación y estas estructuras ya se ven en fases embebidas (Clases 0/I), pero antes definamos qué se entiende por una fase embebida. Durante Clase 0/I el disco y la protoestrella aún están rodeados por lo que se conoce como envoltura (envelope) de forma masiva que es la encargada de aportar material al sistema (gas y polvo). Posteriormente avanza a fases expuestas (Clase II/III) donde esta envoltura ya es más tenue o inexistente, junto con que el disco es más observable y la dinámica y procesos suelen estar más relacionados con procesos internos que del medio. La [Figure 1.1](#) representa de forma más sencilla y con sus ordenes de magnitud asociadas a cada etapa mencionada.

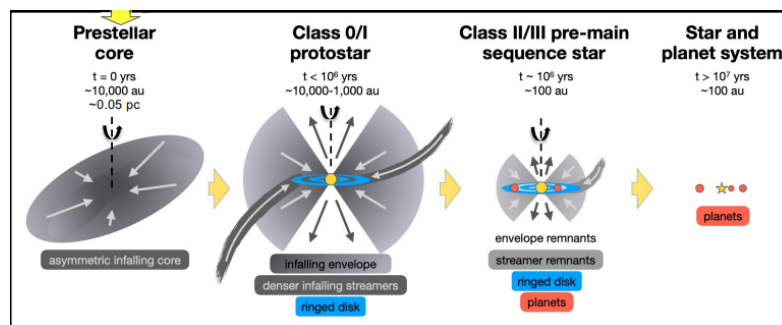


Figure 1.1: Esquema del proceso de formación estelar a diversas escalas, destacando el crecimiento anisotrópico de estructuras densas en el isótopo intermedio frío (ISM), que conduce a la formación de estrellas y sistemas planetarios. El esquema también destaca el papel del momento angular y las corrientes no axisimétricas a escala de núcleo/disco; el núcleo denso clásico y estas corrientes coexisten en diferentes etapas evolutivas de la formación del disco protoplanetario. La orientación de las corrientes no está necesariamente alineada con el eje de rotación del núcleo denso, pero sí sigue una trayectoria coherente con la caída libre y la rotación. Figura obtenida de [Pineda et al. \(2023\)](#)

Es en estas Clases 0/I, que se han detectado unas estructuras llamadas "streamers", que definiremos como flujos de forma alargada que canalizan el material desde un rango de $\sim 10^2$ - 10^3 [au] hacia el disco. Este flujo de material no es simétrico, continuo, ni posee una forma exacta, sino más bien son intermitentes, con diferentes morfologías y cinemáticas, ya que todo dependerá

según el trazador molecular que se esté estudiando [Tobin & Sheehan \(2024\)](#); [Valdivia-Mena et al. \(2022\)](#). Por lo que evidentemente al estar aportando masa, son parte fundamental como causantes de los procesos que puedan o no ocurrir durante la formación y evolución del sistema, que tendrán repercusiones en la configuración final con la que terminará el sistema.

El disco, por su parte, evoluciona mientras redistribuye masa y momento angular mediante procesos internos (transporte, turbulencias, inestabilidades y acreción), además de la interacción con la protoestrella y protoplanetas en formación [Hartmann et al. \(1998\)](#); [Andrews \(2020\)](#). He aquí la importancia y motivación de estudiar las fases tempranas, ya que la composición e inventario químico disponible se hereda del disco y de su historia de alimentación desde el comienzo de su entorno natal.

1.1.2 Estructura del Disco

Los discos protoplanetarios nacen junto con la protoestrella y van evolucionando transportando masa y momento angular. Este gas se va a dirigir hacia el centro del sistema para que así exista acreción estelar por parte de la protoestrella, mientras que el disco puede o no extenderse hacia afuera. Con el tiempo, el disco va a perder material por sus bordes a través de acreción, vientos y fotoevaporación, el resultado simple, es un sistema que obviamente va a cambiar con la edad y cuya arquitectura final es el resultado de varios procesos internos y externos que le afectaron y estuvieron presentes en éste [Hartmann et al. \(1998\)](#).

Su estructura como tal, está estratificada radial y verticalmente [Montesinos et al. \(2021\)](#); [Andrews \(2020\)](#). Presentan radios característicos de $\sim 10\text{-}300$ [au], posee regiones internas más calientes y ópticamente gruesas, y zonas medias y externas más frías, con líneas de nieve (H_2O , CO_2 , CO) que marcan saltos en opacidad, química y adhesión del polvo [Öberg & Bergin \(2021\)](#) (ver [Figure 1.3](#)). Además, tiene una geometría en flared, lo que significa que el espesor del disco crece con el radio, por lo que el disco se abre cada vez más a medida que uno se aleja de la protoestrella [Montesinos et al. \(2021\)](#), donde las capas superficiales irradiadas (las superior e inferior) conviven con un plano medio denso y frío [Öberg & Bergin \(2021\)](#). Esta evolución del polvo se rige por crecimiento, su ubicación radial y la retroalimentación polvo-gas. Para esto se asume una razón de gas:polvo de 100:1 que viene heredada del medio interestelar y además se debe recordar que estos granos van a migrar y a tender a acumularse en donde existan estos máximos de presión o llamados Dust Traps (trampas de polvo), lo que favorece su salto hacia posteriormente planetesimales [Testi et al. \(2014\)](#); [Öberg & Bergin \(2021\)](#).

En términos de escalas, los discos contienen típicamente entre un $\sim 0.1\%$ y unos pocos por ciento de la masa de la estrella central, y en edad se observan durante los primeros $\sim 1 - 10$ [Myr] de evolución del sistema. En este periodo, las tasas de acreción estelar pueden variar en el rango de $\sim 10^{-7}\text{-}10^{-9}$ [$M_\odot \text{ yr}^{-1}$] [Hartmann et al. \(1998\)](#); [Andrews \(2020\)](#), reflejando una fase inicial más violenta y posteriormente una fase de alimentación más tenue. De este modo, el disco no solo actúa como un lugar de acumulación de material, sino como un regulador dinámico que controla cuánta masa termina en la estrella, cuánta se retiene en el propio disco y cuánta se transforma en planetas

y pequeños objetos.

Desde un punto de vista observacional, ALMA mostró que las subestructuras (anillos, huecos, entre otros) son comunes ya a escalas de pocos [au]. Esto, sistematizado por DSHARP (Disk Substructures at High Angular Resolution Project, programa de ALMA), consolidó un cambio de paradigma: los discos "lisos" son la excepción. En muchos casos, estas estructuras de anillos y huecos son compatibles con protoplanetas moldeando la presión local del gas en el anillo y, por ende, el tráfico de polvo como se aprecia en la [Figure 1.2 Andrews et al. \(2018\)](#); [Andrews \(2020\)](#).

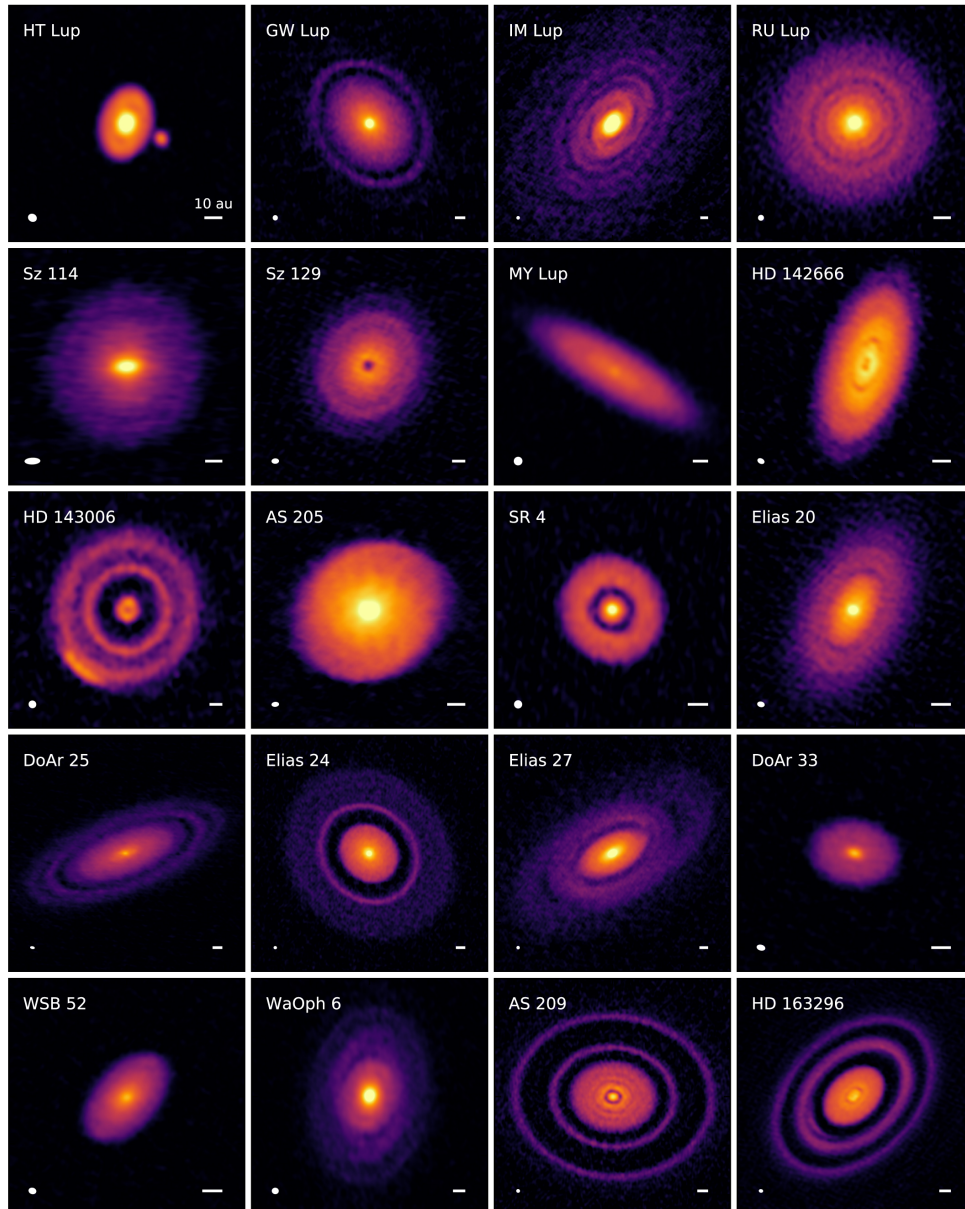


Figure 1.2: Galería de subestructuras en continuo milimétrico del programa DSHARP (anillos, huecos y asimetrías) a alta resolución angular [Andrews et al. \(2018\)](#); síntesis general en [Andrews \(2020\)](#).

Aunque el gas y polvo coexisten en el anillo, no cuentan la misma historia. El continuo milimétrico traza principalmente polvo grande hacia el plano

medio. En cambio, las líneas moleculares trazan el gas en capas, radios y ubicaciones distintas [Andrews \(2020\)](#). Es por eso que, el hecho de que el polvo esté concentrado en el plano medio y el gas distribuido en capas da la explicación de por qué las imágenes del continuo y las líneas moleculares no siempre coinciden, lo cual da como clave el lograr de alguna forma el estimar el material real que hay disponible en el sistema.

1.1.3 Estructuras Dinámicas

Los discos no son estructuras uniformes, sino más bien su estructura cambia con el tiempo y el gas con el polvo no siempre comparten la misma distribución ni el mismo comportamiento, es por eso que para comprender mejor este comportamiento se definen como estructuras dinámicas a los patrones de densidad y de velocidad que indican transporte de masa y momento angular, o desviaciones, respecto de un disco Kepleriano simple [Andrews \(2020\)](#). Estas estructuras aparecen desde etapas embebidas y que son claves para entender cómo se alimenta el disco, cómo migra el material y dónde se concentrarán los sólidos posteriormente.

Estas subestructuras, que se pueden observar en el continuo y en líneas de emisión (anillos, huecos, etc) no tienen un único origen posible. En algunos casos son compatibles con la existencia de algún protoplaneta que modifican el perfil de presión del gas. En otros, pueden asociarse a cambios abruptos de opacidad en torno a líneas de nieve, inestabilidades hidrodinámicas o magnetohidrodinámicas, entre otros. Todas estos procesos apuntan a un mismo significado: el disco es un sistema dinámico donde la distribución de gas y polvo está siendo continuamente modificada por procesos internos y externos.

Ahora, las definiciones de estas estructuras de una forma simple y operativa:

- **Anillos y Huecos:** Se aprecian en el continuo y señalan máximos de presión en el gas. Favorecen la concentración de granos y pueden estar asociadas a los protoplanetas.
- **Espirales:** Son "brazos" visibles en polvo o gas que indican perturbaciones gravitacionales o térmicas, que canalizan material a lo largo del brazo del disco.
- **Warps:** Son cambios de orientación entre disco interno y externo.
- **Streamers:** Si bien aún no se detalla a profundidad qué son, eso se ve en la Sección 1.3, se asemejan a flujos de forma filamentosa que conectan la envoltura con el disco, alimentando de masa y momento angular de forma intermitente y asimétrica.
- **Vientos y fotoevaporación:** Son flujos de salida desde la superficie del disco que abren huecos internos y contribuyen a su disipación.

Ahora, estas estructuras tienen una jerarquía temporal de aparición, no fija, pero si fases en las que dominan más. En fases embebidas (Clases 0/I), dominan los streamers, ya que están ligados con el aporte externo del tipo envoltura-disco y con señales de material cayendo que alimente al sistema

(procesos ligados al colapso y aporte externo) [Valdivia-Mena et al. \(2022\)](#); [Han et al. \(2025\)](#); [Tobin & Sheehan \(2024\)](#). Ya en fases expuestas (Clases II/III), como los protagonistas son los procesos internos, se vuelven más notorios los anillos, huecos, espirales, vientos, entre otros.

1.2 Astroquímica de Discos Protoplanetarios

1.2.1 Composición molecular

Conociendo qué son los discos protoplanetarios, hay que entender como están compuestos molecularmente y además de el cómo estarán distribuidos según sus propiedades y características, ya que de eso dependen tanto las líneas que observamos en ciertas ubicaciones que estarán directamente relacionadas como los procesos físicos y químicos que suceden. Hay que comentar eso sí, que la Astroquímica es toda una rama de estudio, por lo que solo se comentará de forma general para contextualizar y entender que ocurre.

El disco sigue una estratificación vertical [Figure 1.3](#), que deja una distribución clara en su química. Las capas más superficiales, directamente irradiadas por la estrella central, están dominadas por la fotoquímica asociada a radiación UV y rayos X, mientras que el plano medio se mantiene más frío, denso y resguardado, con moléculas mayoritariamente congeladas en forma de hielo sobre los granos. Además de la radiación interna, en entornos con formación estelar puede existir un campo UV externo significativo, que erosiona e ioniza las capas exteriores del disco. La combinación de todas estas fuentes de energía define dónde se ubican las especies y por lo tanto qué moléculas trazan mejor cada región.

Gas

El gas es $\sim 99\%$ de la masa inicial del disco. Dominado por el H_2 (la cual es la especie más abundante, pero al ser sin dipolo y que sus transiciones cuadrupolares son muy débiles, es difícil de detectar) y He. En el gas es donde se encuentran las moléculas trazadoras más observables, como H_2 no emite fuerte a temperaturas $T \leq 200\text{ K}$, se utiliza el CO y sus isotopólogos como trazadores del gas molecular, y en zonas más frías o ionizadas, aparecen especies como N_2H^+ , HCO^+ , CN, HCN, etc.

Lo que domina realmente la composición molecular es cuánto Carbono (C), Oxígeno (O), Nitrógeno (N) y Azufre (S) quedan disponibles cuando existe gas vs polvo/hielo. Por ejemplo, la razón C/O no es fija, baja o sube según cuánto oxígeno y carbono queden atrapados en los hielos, así moléculas como CO, CO_2 o H_2O se congelan en el plano medio del disco, el oxígeno disminuye, la relación C/O aumenta y se favorece la producción de hidrocarburos y generando cambios en las moléculas dominantes. Del mismo modo ocurren eventos que aumentan el carbono, por lo que estos cambios irán controlando la composición del disco durante toda su evolución.

También existen las llamadas líneas de nieve, las cuales van a determinar los radios donde la temperatura cae por debajo del punto de condensación de las especies (por ejemplo, H_2O , CO_2 , CO), por lo que a distancias menores a cada línea de nieve, la especie y moléculas se encuentran mayoritariamente en

forma gaseosa, mientras que hacia fuera se congela sobre los granos de polvo como hielo. Esta es la transición que provoca saltos en la opacidad, en la composición química del gas y en las propiedades de adhesión de los granos, lo que a su vez, influirá en que tan eficientemente es el crecimiento de sólidos y en la acumulación de material en anillos o trampas de polvo [Öberg & Bergin \(2021\)](#).

Polvo

Por otra parte, tenemos el polvo $\sim 1\%$, es el encargado de la opacidad, enfriamiento y formación de los planetesimales. Está conformado ya por minerales del tipo Silicato, Carbonáceo, Metales y Hielo.

Su tamaño en los discos va aumentando de milímetros a centímetros, generando que estos granos más grandes se asienten, o migren al plano medio del disco (reduciendo la opacidad en capas externas). Con esto, comienzan a concentrar y frenar sólidos y hielos en las presiones máximas de los anillos, cambiando localmente como se mencionaba antes, la relación C/O y las moléculas dominantes.

1.2.2 Procesos Químicos y Moléculas Trazadoras

La química no es algo que se tenga que pasar por alto al estudiar un planeta, disco o sistema, es algo que controla la opacidad, temperatura del gas y polvo, la ionización y otras características que finalizará con qué configuración contarán luego, por eso también es importante saber brevemente los procesos que controlan estos ciclos de cambios moleculares, los cuales algunos son:

Fuentes de energía

- **Radiación UV y Rayos X:** Proviene de la estrella por la acreción. Fotoionizan y fotodisocian a las capas superficiales generando radicales (CN, C₂H) e iones (C⁺, HCO⁺).
- **Rayos Cósmicos y Radiactividad:** Ionizan el plano medio si logran ingresar y sostienen trazas de química iónica.

Ciclo Gas-Hielo

- **Freeze-Out:** Por debajo de un umbral de temperatura, las moléculas se absorben en granos (CO a $T \lesssim 20\text{--}25$ [K], y H₂O a 150 [K] $\geq T$). Este proceso reduce la abundancia de volátiles en fase gaseosa, y al secuestrar oxígeno en hielos, modifica la razón de C/O.

Transporte

- **Infall(streamers):** Material que está ingresando al disco o sistema, aportando material "poco procesado", reconfigurando abundancias y alterando la termodinámica, cinemática y procesos.

Ahora, para entender los procesos físicos y dinámicos alrededor de los discos protoplanetarios se debe estudiar las moléculas más abundantes en estas regiones. Normalmente se trabaja en las frecuencias ($\sim 211\text{--}275$ [GHz], $\lambda \approx 1.09\text{--}1.42$ [mm]) que corresponden a la Banda 6 de ALMA, que es donde

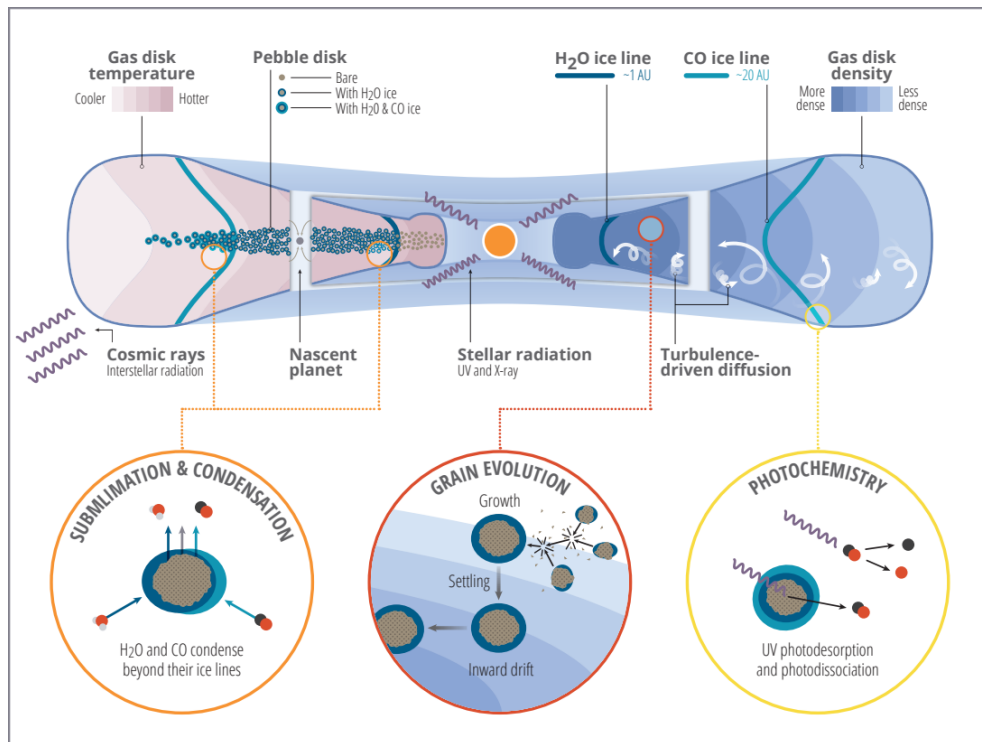


Figure 1.3: Esquema de la estructura y procesos astroquímicos en un disco protoplanetario: capas fotoquímicas irradiadas por UV/X, líneas de nieve de H₂O y CO, evolución del polvo (crecimiento, asentamiento y deriva) y mecanismos de sublimación/condensación y fotoquímica (foto-desorción y foto-disociación) Öberg & Bergin (2021).

están varias líneas/transiciones espectrales de interés. Aquí se puede ver la cinemática y estructura con $CO(2-1)$ y sus isotopólogos, y además podemos explorar trazadores de fotoquímica (CN, HCN), ionización (HCO^+), hielos (H_2CO , CH_3OH), densidades (CS), entre otros. Ahora bien, algunas veces se utiliza Banda 7 ($\sim 275\text{--}373$ [GHz], $\lambda \approx 0.87 - 1.09$ [mm]) que nos da transiciones energéticas más altas y con mejor resolución angular a igual configuración [ALMA Partnership \(2025\)](#).

Claramente existen un sin fin de moléculas diferentes, pero a continuación se señalan las que serán de estudio más adelante y su línea aproximada de emisión:

- **CN $N = 2-1$ (226.655 GHz):**
Complemento del paquete hiperfino de CN.
- **H_2CO $3_{12}\text{-}2_{11}$ (225.697775 GHz):**
Formaldehído de origen en hielos (hidrogenación de CO) y desorción.
- **CN $N = 2-1$ (226.874781 GHz):**
Traza fotoquímica superficial y campo UV efectivo.

1.3 Streamers

1.3.1 Definición y Propiedades

Un streamer se asemeja a una estructura filamentaria de gas (y por supuesto polvo muy fino a comparación del que está en el disco) que conecta el entorno externo con el disco, y sus cercanías, durante la fase embebida. Su función es ingresar, o mejor dicho canalizar, material hacia el disco y este a su vez posteriormente redistribuirla mediante sus procesos internos.

Al día de hoy se sigue estudiando si los streamers son un remanente de la envoltura, medio interestelar u otra componente sobrante de un sistema múltiple. Para identificar su morfología, comúnmente se visualiza un cubo de datos de un sistema protoplanetario, ya sea 2D o 3D, (donde exista emisión de una línea molecular). Suele verse como una emisión curvada que aparece en canales cerca de la velocidad sistemática y viene desde grandes radios hasta el borde del disco, por lo que su tamaño puede variar, como se decía antes, en un rango $\sim 10^2\text{-}10^3$ [au]. En otras palabras, al comparar las velocidades observadas con la curva Kepleriana esperada para el disco, los streamers se manifiestan como desviaciones localizadas en mapas de momento 0 y en diagramas posición-velocidad (PV) trazados a lo largo de su eje. Estas estructuras muestran componentes radiales significativas ($v_r \neq 0$) que las distinguen tanto del gas que orbita en equilibrio, como de los outflows (flujos de salida).

Por simplicidad se asume que el disco sigue una rotación kepleriana, lo cual da una curva de referencia contra cual comparar cualquier desviación que pueda estar asociada al ingreso de un streamer:

$$v_\phi(r) = \sqrt{\frac{GM_\star}{r}} \quad (1.1)$$

donde $v_\phi(r)$ es la velocidad tangencial del gas en la órbita circular, G la constante de gravitación universal, M_\star la masa de la estrella o la masa total

dentro de un radio r y radio r desde la estrella o hasta el punto que se evalúe.

Sin embargo, lo que se obtiene desde el cubo de datos de ALMA es lo que se conoce como la proyección de las velocidades sobre la línea de visión, por eso para interpretar estas desviaciones en los mapas de velocidad se suele usar:

$$v_{los} = v_{sys} + (v_{\phi} \cos \phi + v_r \sin \phi) \sin i + v_z \cos i \quad (1.2)$$

donde v_{los} es la velocidad observada en la línea de visión, v_{sys} es la velocidad sistemática de la fuente, v_{ϕ} la componente tangencial, i es la inclinación del disco, ϕ el ángulo azimutal en el plano del disco, v_r la parte radial y v_z la vertical.

De aquí podemos decir que por lógica si $v_r \approx 0$ y $v_z \approx 0$, todo vuelve a la proyección kepleriana, pero los streamers normalmente cuentan con $v_r \neq 0$, por lo que es lo que genera estas desviaciones locales.

1.3.2 Hipótesis de formación

Ahora bien, ya conociendo brevemente el se detectan estos streamers y el como se visualizaran, estos obviamente deben provenir de algún lugar. Lamentablemente, aún no se tiene certeza de cuál es su origen, aunque estas 3 hipótesis son las más propuestas y que podrían dar esta respuesta:

1. Remanentes de la envoltura:

En las fases embebidas del sistema, el material existente en la envoltura no caerá de forma esférica ni uniformemente como se suele estudiar por simplicidad, sino siguiendo recorridos que estén determinados por el potencial del sistema. Por lo que si se recuerda que en fases tempranas de la formación la envoltura puede llegar a tener un radio de $\sim 5-15 \times 10^3$ [au] (Clase 0) y $\sim 1-5 \times 10^3$ [au] (Clase I), no sería erróneo suponer que son flujos de material de puntos lejanos de la envoltura o remanentes de éste.

2. Conexiones entre sistemas múltiples:

No solo existen sistemas con una estrella central, existen los sistemas binarios o más complejos, donde el potencial resultante entre dos, o más, sistemas puede generar flujos que canalicen gas desde un sistema a otro, formando un tipo de puente que alimenten uno o más discos.

3. Filamentos del medio circundante:

El sistema se encuentra claramente dentro de una estructura mayor, donde el disco podría estar "parcialmente" conectado a filamentos del medio interestelar. Como existe diferencias de potencial o pueden existir perturbaciones externas, el gas puede terminar ingresando al sistema.

Los nombrados son alguno de los posibles escenarios, pero cada uno deja una huella observacional distinta. Si tiene como origen ser parte de los remanentes de la envoltura, se espera que conecten de manera continua el entorno lejano con el borde del disco, siguiendo aproximadamente trayectorias de caída libre con momento angular. En el caso de ser una conexión entre componentes de un sistema múltiple, pueden adoptar la forma de puentes/brazos que enlazan los discos o las protoestrellas. Y si se trata de filamentos del medio circundante, la estructura del gas se extiende más allá del entorno que "envuelve" a la protoestrella y puede recibir material de la nube natal. Por lo que,

definir entre estos escenarios requiere observaciones que combinen buena resolución angular, sensibilidad a escalas grandes y el uso de múltiples trazadores moleculares.

1.3.3 Evidencias observacionales y rol en acreción

Ahora, la evidencia que tenemos desde el cubo de datos de ALMA, es que hay líneas de emisión que vienen de fuera del sistema y se acercan al centro, o borde, del disco. Según va cambiando el canal, esta emisión se va moviendo de forma coherente en velocidades y cercanas a las velocidades sistemáticas, por lo que da señal de una estructura que viene desde un radio externo hasta el r_{disk} .

Claramente esto no refleja la compleja realidad de lo que ocurre (geometría real 3D, turbulencias, gradientes de radiación, entre otros), pero si nos da una base para estimar su velocidad radial y ver su aporte de material. Recordemos que suministra material, lo que está generando un constante cambio de la composición, abundancia y gradientes del gas de la superficie del disco y cercanías, donde cambiará posteriormente su composición interna.

Un punto importante de mencionar, es que los streamers no están presentes en todos los sistemas. En algunos casos la emisión puede coincidir y verse afectada por ambigüedades geométricas, y en algunos casos puede coincidir especialmente con el outflow o las paredes del mismo y no pertenecer a un flujo de material que ingresa hacia el disco [Tobin & Sheehan \(2024\)](#); [Valdivia-Mena \(2024\)](#)(vea [Figure 1.4](#)).

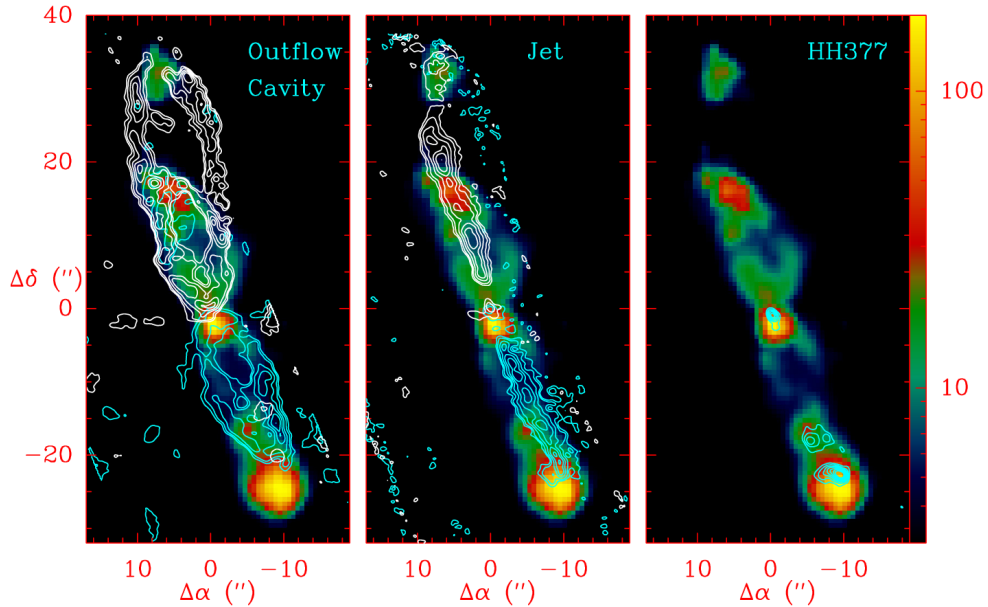


Figure 1.4: Estructura del *outflow* protostelar Cepheus E. Los contornos muestran la emisión en $\text{CO}(J=2-1)$ observada con el Plateau de Bure Interferometer (PdBI) a $\sim 1''$ de resolución, mientras que el mapa en color corresponde a la emisión a $4.5 \mu\text{m}$ (IRAC/*Spitzer*), dominada por líneas de H_2 . De izquierda a derecha se distinguen las paredes de la cavidad del *outflow*, la componente colimada del *jet* (altas velocidades) y la emisión asociada al *bow shock* HH 377. Adaptada de [Lefloch et al. \(2015\)](#).

1.4 Interferometría en Radioastronomía

1.4.1 Principios básicos

La interferometría consiste en, mediante varias antenas separadas entre sí, simular un telescopio cuyo diámetro "hipotético" es la distancia entre las dos antenas más alejadas. Cada par de antenas (baseline) obtiene una visibilidad compleja, que no es más que una muestra de la transformada de Fourier del cielo que de forma estándar viene dada por el Teorema de Van Cittert-Zernike:

$$V(u, v) = \int \int A(l, m) I(l, m) e^{-2\pi i(ul+vm)} dldm \quad (1.3)$$

donde $I(l, m)$ es el brillo superficial del cielo en las direcciones l y m (angulares), $A(l, m)$ es el patrón del haz primario de cada antena y (u, v) componentes espaciales del baseline proyectado en longitudes de onda.

Además, las antenas convierten la radiación en voltajes que son correlacionados por el correlador, por lo que para dos antenas separadas por un vector baseline B_{pq} las coordenadas espaciales serán determinadas por:

$$(u, v, w) = \frac{1}{\lambda} B_{pq} \cdot (\hat{e}_u, \hat{e}_v, \hat{e}_w) \quad (1.4)$$

donde \hat{e}_w apunta hacia la fuente de fase (centro del campo).

La visibilidades ($V(u, v)$), nombradas anteriormente, se miden en un conjunto discreto de puntos que vienen determinado por la geometría y por la rotación de la tierra, es decir, a medida que la tierra rota, un mismo par de antenas considerará distintas posiciones (u, v) , favoreciendo la cobertura uv . Este muestreo discreto puede expresarse como la función $S(u, v)$ y el sucio del cielo (dirty image) se obtiene aplicando una transformada de fourier inversa a los datos medidos:

$$I_D(l, m) = \int \int S(u, v) V(u, v) e^{+2\pi i(ul+vm)} dudv \quad (1.5)$$

Pero I_D aún no es el cielo verdadero que se busca, solo será el cielo real convolucionado con el haz sintetizado:

$$I_D(l, m) = [I(l, m) A(l, m)] * B(l, m) \quad (1.6)$$

donde $*$ denota convolución, por lo que la presencia de $*B(l, m)$ motiva los métodos de deconvolución (Clean/TClean) que se realiza luego de el proceso de calibración.

1.4.2 Resolución y Sensibilidad

La calidad de una observación no solo depende de tener datos, sino de básicamente dos propiedades fundamentales de ese muestreo: qué tan fino es el haz (resolución) y qué tan débil es la señal mínima que distinguimos por sobre el ruido (sensibilidad).

Resolución Angular

La resolución angular está controlada por la longitud de onda y el mayor espaciamiento proyectado de B_{max} . Se suele utilizar:

$$\theta \simeq \kappa \frac{\lambda}{B_{max}} \quad (1.7)$$

donde κ es un factor geométrico (del orden 1.02-1.22 según el ajuste de haz ?). Ahora, en términos de su PSF (Point Spread Function, que viene de la transformada inversa $S_{u,v}$), se suele caracterizar su resolución por su FWHM (Full Width at Half Maximum, anchura a mitad de máximo). De aquí salen tres elecciones a considerar:

- **Natural:**
Maximiza sensibilidad, ruido mínimo a costa de mayor FWHM.
- **Uniform:**
Minimiza FWHM, mejor resolución a costa de aumentar el ruido.
- **Briggs/robust:**
Equilibrio entre ambos.

Sensibilidad

Para una observación el RMS (Root Mean Square, desviación estándar o ruido térmico) ideal se suele aproximar por la ecuación radiométrica para un interferómetro:

$$\sigma_S \approx \frac{SEFD}{\eta_s \sqrt{N_{pol} N_{ant}} (N_{ant} - 1) \Delta\nu t} \quad (1.8)$$

donde SEFD es el flujo equivalente al ruido del sistema, η_s la eficiencia correlativa, η_{pol} el número de polarizaciones sumadas, N_{ant} el número de antenas, $\Delta\nu$ el ancho de banda efectivo y t tiempo de integración. Pero como utilizaremos las líneas espectrales de ciertas moléculas, se reemplaza $\Delta\nu$ por el ancho del canal, pero expresado en velocidad. De modo que tendríamos:

$$\Delta v = \frac{c \Delta\nu}{\nu} \quad (1.9)$$

$$\sigma_S \propto \frac{1}{\sqrt{\Delta\nu t}} = \frac{1}{\sqrt{\nu \Delta v t}} \quad (1.10)$$

1.4.3 Limitaciones

Aunque se tenga buena resolución y sensibilidad, las imágenes enfrentan tanto limitaciones físicas, como instrumentales. Las más relevantes son:

1. **Atmósfera y decorrelación de fase:**
En longitudes de onda milimétrica la turbulencia troposférica afecta induciendo fluctuaciones rápidas de fase.
2. **Promediado en tiempo y frecuencia:**
Promedio excesivo que suavizan radialmente las fuentes lejos del centro de fase y reducen su pico.

3. Pérdida de gran escala:

Arreglos interferométricos no muestran (u,v) cercanos a cero si B_{min} es grande. Genera huecos de flujo, bordes artificiales y morfología fragmentada.

4. Calibración imperfecta:

Errores residuales que limitan el rango y pueden limitar o enmascarar la emisión tenue.

1.4.4 Calibración, Imagen y Deconvolución

Estas limitaciones generan que las visibilidades no lleguen "limpias", sino afectadas por ganancias del sistema y la atmósfera. He aquí un paso que es fundamental para lograr obtener las verdaderas visibilidades que es la calibración.

Si bien, en este trabajo los datos fueron calibrados por ALMA, de forma breve y operativa se puede explicar la calibración desde la medida interferométrica para el baseline qp en aproximación escalar como:

$$V_{pq}^{obs}(\nu, t) = g_p(\nu, t) g_q^*(\nu, t) V_{pq}^{true}(\nu, t) + N_{pq} \quad (1.11)$$

donde g_p y g_q son las ganancias complejas (aporte instrumental y atmósfera) y N_{pq} es el ruido térmico. Lo que se realiza es estimar estas ganancias como calibradores y aplicar su inversa, de modo que tenemos:

$$\tilde{V}_{pq} = \frac{V_{pq}^{obs}}{g_p g_q^*} \sim V_{pq}^{true} \quad (1.12)$$

Claramente es una explicación de forma resumida, el flujo estándar utilizado por ALMA posee su desarrollo a detalle y muy especificado en:

1. Flagging básico:

Remoción automática de datos corruptos/transitorios antes de calibrar.

2. Calibración de banda o bandpass:

Se utiliza $G_p(\nu)$ como espectralmente estable para corregir la forma en la frecuencia de cada antena.

3. Escala absoluta de flujo:

Se fija g con un calibrador de flujo S_μ conocido.

4. Ganancia en el tiempo:

Con un calibrador cercano a la fuente se obtiene un g_t que ayuda a mitigar la decorrelación atmosférica.

5. Correcciones atmosféricas y de sistema:

WVR para vapores de agua y T_{sys} para amplitudes del ruido.

Posterior a la calibración, las visibilidades se convierten en una imagen sucia. Estas siguen sin ser la imagen real, por lo que ahora se debe realizar el imagenado y la deconvolución, cuyo objetivo es estimar un modelo de cielo que, al reconvolucionarse con un haz ideal, represente fielmente la emisión.

Se realiza CLEAN/TCLEAN, lo cual aproxima la imagen como suma de los componentes puntuales que junto con la PSF, reproducen I_D , por lo que si tenemos un modelo tipo:

$$I_{model}(l, m) \simeq \sum_k a_k \delta(l - l_k, m - m_k) \quad (1.13)$$

$$I_{res} = I_D - (I_{model} * B) \quad (1.14)$$

donde el modelo itera restando fracciones de B(factor gain) desde las posiciones del máximo hasta que se alcanza el umbral. Con esto, la imagen restaurada se obtendrá al reconvolucionar el modelo con un haz gaussiano y sumando el residual.

$$I_{rest} = (I_{model} * G_{rest}) + I_{res} \quad (1.15)$$

Cabe mencionar que se trabaja en unidades de $Jy/beam$, y la corrección del haz primario se realiza al final para recuperar la verdadera atenuación del campo (pbcor).

Finalizando, para el continuo (MFS - Multi-Frequency synthesis) se modela un espectro como expansión de Taylor entorno de ν_0 :

$$I(\nu) \simeq I_0 + I_1 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} \right) \quad (1.16)$$

Y para líneas espectrales (cubos), se realiza la sustracción del continuo en uv ajustando canales libres de líneas y luego imagenado por cada canal.

1.5 ALMA

1.5.1 Instrumento y Antenas

Toca comprender de donde vienen estos datos interferométricos. El Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, o abreviado ALMA, es un interferómetro ubicado en el desierto de Atacama al norte de Chile, específicamente en el llano de Chajnantor a unos 5.000 [m] sobre el nivel del mar.

Como lo dice su nombre, opera en ondas de longitudes milimétricas y submilimétricas, aproximadamente entre $\sim 0,3-9,6$ [mm] ($\sim 31 - 950$ [GHz]), el cual es un rango ideal para el estudio de gas frío, polvo y formación de estrellas y planetas. Demás está decir que al ubicarse a gran altura y en un lugar con atmósfera seca (al ser un desierto), junto con el gran número de antenas hace que ALMA tenga una sensibilidad y resolución muy superior a la de otros interferómetros que previamente de estos rangos de frecuencias.

En la actualidad ALMA, de forma completa, está conformado por 66 antenas de alta precisión, de las cuales 54 son de 12 [m] y 12 de 7 [m]. Las de 12 [m] constituyen la matriz principal (12-m array), mientras que las de 7 [m], junto con 4 de 12 [m] operando en modo total power, forman el Atacama Compact Array (ACA o Morita Array).

Cada antena es un radiotelescopio completo, que posee una montura altazimutal que apunta la parábola metálica y con un sistema de receptores (criogénicos) que son los encargados de convertir la señal de tipo radio en una señal eléctrica. Esta precisión de los reflectores es del orden de una fracción del grosor del cabello humano, motivo por el cual se mantiene la eficiencia a

longitudes de onda del tipo submilimétricas.

Ahora, funcionan de la siguiente manera. La señal recogida en cada antena se enfría, amplifica y se convierte en una frecuencia intermedia. Se digitaliza y transporta a un correlador, el cual es un sistema que combina en paralelo las salidas de todos los pares de antenas. Aquí es donde el correlador calcula las visibilidades de las que se habló anteriormente y aplica las técnicas de apertura (Fourier, deconvolución, etc) generando la reconstrucción de las imágenes del cielo.

1.5.2 Configuraciones

Algo clave sobre ALMA, es la configuración de sus antenas. Aparte de su movimiento propio al apuntar al cielo, es que se pueden reubicar por el llano de Chajnantor. Esto permite el poder configurar con diferentes longitudes de base, desde separaciones de 150 [m] hasta extendidas con baselines de hasta 16 [km], remarcando así el que, a mayor separación máxima entre antenas, más fina es la resolución angular, mientras que más compactas son más sensibles a estructuras extendidas. Dando así el resultado de que la combinación de configuraciones y de tamaño de antenas, le permite funcionar a ALMA desde mapear nubes moleculares a varios [pc], a resolver detalles de pocas [au] en discos protoplanetarios cercanos y todo gracias a su poder configuración.

Llevemos lo mencionado a un ejemplo de orden de magnitud. En Band 6 ($\lambda \sim 1.3$ [mm]) una configuración de baseline máximo de $B_{\max} \sim 1$ [km] entrega una resolución angular típica de $\theta \sim 0.3''$, suficiente para resolver escalas de ~ 45 [au] a una distancia de 150 [pc]. Otras configuraciones más extendidas, con B_{\max} de varios [km], permiten alcanzar resoluciones de unas pocas [au], ideales para estudiar subestructuras dentro del propio disco, pero configuraciones muy compactas son más sensibles a estructuras extendidas, como envolturas y filamentos, pero sacrifican resolución en las escalas internas. Por eso elegir la configuración adecuada dará como resultado entre ver bien el disco y no perder las conexiones con su entorno, como los streamers.

1.6 Caracterización de Streamers

1.6.1 Panorama observacional

Como se decía en el comienzo, el panorama de la formación estelar y planetaria en lo últimos años ha ido cambiando desde una visión simple de colapso y evolución, a un escenario donde la estructura y flujos de gas son fundamentales. Dentro de este nuevo escenario es donde aparecen estas estructuras llamadas streamers los cuales transportan material hacia los discos protoplanetarios desde escalas $\sim 10^2$ - 10^3 .

Es por eso que las observaciones interferométricas han sido fundamental para identificar y caracterizar estas nuevas estructuras. Trabajos como el programa PRODIGE en entornos de Per-emb-50 [Valdivia-Mena et al. \(2022\)](#), mostraron un streamer de ~ 3000 [au] distinguible en líneas de H_2CO y C^{18}O . Su emisión es coherente con la velocidad de caída libre con momento angular, respaldando de que se trata de gas infall canalizado hacia el disco.

Por otra parte, estudios en regiones como Barnard 5 [Valdivia-Mena \(2024\)](#) siguieron el flujo de material desde escalas del filamento hasta el entorno de protoestrellas embebidas. Aquí se identificó un streamer en H_2CO que conecta la estructura de mayor escala con el disco protoestelar. Debido a los gradientes de velocidad que se curvan en posición del streamer sugieren una conexión continua, reforzando la idea de que la masa disponible de la protoestrella no solo está determinada por la envoltura clásica, si no que sigue durante su evolución recibiendo gas poco procesado desde la nube y de los mismos filamentos.

Uno de los más relevantes, el trabajo de Valdivia-Mena y sus colaboradores ha sido bastante relevante para avanzar de detecciones individuales a tener una visión más demográfica de estas estructuras. Del programa ProPStar [Valdivia-Mena et al. \(2024\)](#), que consistió en una búsqueda de streamers en una región de formación estelar agrupada, el 40% eran candidatos y aumentaba a un 60% si se consideraban solo protoestrellas embebidas. Estos streamers se detectan en la molécula de HC_3N y sugiere un escenario que los streamers actuaría como etapa entre el gas que cae hacia los filamentos y el que efectivamente alcanza a el disco.

Se puede apreciar que según estos resultados, que los streamers no son estructuras aisladas, sino una componente frecuente (siendo difícil de detectar) de los entornos protoestelares y protoplanetarios. Sin embargo, pese a algunas detecciones, los casos bien caracterizados en cinemática, proveniencia del gas y posible origen, siguen siendo muy limitados, más si se considera sistemas evolucionados (etapa de formación planetaria más avanzada). He aquí, esa falta de caracterización detallada, uno de los motivos que impulsa la necesidad de nuevos estudios de alta resolución, con combinación y mejoras en los moldeamientos dinámicos y químicos para entender su naturaleza y rol en las distintas etapas de un sistema.

1.6.2 Impacto en la formación planetaria

Es evidente que al estar interactuando con el disco serán relevantes al modificar el material disponible y por consiguiente las condiciones físicas y químicas de este. Ya con el hecho de estar ingresando masa al sistema después de la fase clásica de colapso, afectará al prolongar la etapa de acreción y el resultado de masa final tanto de la estrella como del disco.

Nuevamente si revisamos los últimos estudios, por ejemplo en el caso de Per-emb-50 [Valdivia-Mena et al. \(2022\)](#), la tasa de infall asociada al streamer es del orden de $\dot{M}_{\text{infall}} \simeq 1.3 \times 10^{-6} [M_{\odot} \text{yr}^{-1}]$ y excede a la actual tasa de acreción estimada de la protoestrella en un factor de $\sim 5-10$, es decir $\dot{M}_{*} \sim 1-3 \times 10^{-7} [M_{\odot} \text{yr}^{-1}]$. Esta discrepancia sugiere que el aporte externo puede acumular masa en el sistema y gatillar episodios de intensa acreción con aumentos de luminosidad.

Aparte hay que considerar el impacto que generan químicamente estas estructuras. Al llegar el gas a el disco genera choques y calentamientos, como SO y SO_2 cuya distribución podría trazar potencialmente las zonas de impacto del material infall. Claramente esto puede separar especies congeladas en granos, variar las abundancias, gradientes químicos, composición de sólidos y así en la configuración de los planetas que se formen.

Algo que si se repite como una característica importante, es que los streamers suelen trazarse con moléculas de gas menos procesadas, por lo que le dan ese toque de material nuevo. Esto podría implicar que al estar el disco recibiendo gas con una historia química distinta y si son persistentes durante la evolución del sistema, inclusive en etapas ya de formación activa planetaria, estarían influyendo continuamente en la composición de las atmósferas planetarias y zonas que el disco tal vez hubiera experimentado pérdidas.

Finalmente, más allá de su origen, el impacto de los streamers en la formación planetaria radica en que canaliza gas nuevo a el disco, potencialmente mucho después de la fase de colapso más violento. Además del aporte de material, prolongar la etapa de acreción, modificar la distribución radial de masas, alterar las abundancias con las que se forman planetesimales y atmósferas, la presencia o ausencia de streamers durante la evolución del sistema introduce por lo tanto un tipo de “memoria química” adicional que va más allá de la historia interna del disco: los planetas que se formen heredarán no solo la física del disco, sino también las huellas del entorno y de los episodios de infall canalizado.

1.6.3 Objetivos

Como se aprecia, pese a los avances y resultados recientes en la observación de discos protoplanetarios, siguen existiendo vacíos importantes en nuestra forma de comprender el papel que estas estructuras juegan en la evolución temprana y posterior de los sistemas. No se conoce con claridad su origen (remanentes de la envoltura, conexiones entre sistemas múltiples o filamentos del medio), ni bajo qué condiciones físicas y/o geométricas se forman y mantienen en existencia.

Del mismo modo, el número de casos bien caracterizados por ahora siguen siendo en una cantidad muy reducida, especialmente en etapas avanzadas de los sistemas, lo cual dificulta estudiar y cuantificar cuánto material aportan realmente al disco, el cómo modifican las abundancias, la relación gas/polvo y en qué medida pueden alterar la configuración química que heredaran los planetas. En por eso que surge la necesidad de realizar estudios que combinen datos interferométricos con modelos dinámicos y químicos, para así acotar mejor el origen, la frecuencia y el impacto de los streamers en la arquitectura final de los sistemas planetarios.

Por lo tanto, conociendo esto, lo que se busca realizar en el presente trabajo de forma específica es:

- **Caracterizar en morfología y cinemática a los streamers:**
Identificar los streamers en diagramas PPV, cuantificando sus desviaciones respecto de un campo de velocidad Kepleriano de referencia para el disco.
- **Validar la eficiencia de moléculas trazadoras:**
Verificar para diferentes moléculas su capacidad y eficiencia para trazar el material infall.
- **Cuantificar su longitud, masa y tasa de infall asociado:**
Estimar sus longitudes, masas y tasas de infall.

En este contexto, que el sistema múltiple T Tau, constituye un desafiante e interesante sistema de estudio. Su potencial gravitacional no es el de una única estrella, y su entorno presenta estructuras de gas donde la confusión y emisión extendida puede dificultar el estudio de la masa infall. A diferencia de los casos clásicos de protoestrellas embebidas donde los streamers han sido reportados con mayor frecuencia, T Tau representa un escenario más complejo y evolucionado, donde una caracterización cinemática consistente permitiría evaluar si el aporte anisotrópico de material puede persistir en sistemas múltiples y seguir alimentando discos en etapas avanzadas.

Es por eso que en esta tesis se presenta una caracterización cinemática de primer orden basada en la identificación de estructuras coherentes en espacio PPV y en el ajuste de trayectorias balísticas simples, con el objetivo de obtener cotas inferiores robustas y comparables para longitudes, flujos, masas de gas y tasas de infall. El manuscrito se organiza como sigue: en el Capítulo 2 se describen los datos interferométricos y las herramientas utilizadas; el Capítulo 3 se detalla la metodología de selección y ajuste; el Capítulo 4 presenta los resultados por trazador molecular; y en los Capítulos 5-7 se discuten implicancias, limitaciones, conclusiones y trabajo futuro.

Chapter 2

Datos y Herramientas

2.1 Datos Observacionales

2.1.1 Estrellas T Tauri y Sistema T Tau

Las estrellas T Tauri son estrellas que se encuentran en la fase previa a la secuencia principal de estrellas de baja masa. Aún no han comenzado el proceso de quema estable de hidrógeno en sus núcleos, por lo que son objetos bastante jóvenes. Normalmente tienen edades $\sim 1-10$ [Myr] y masas $\lesssim 2 [M_{\odot}]$?.

Se caracterizan por una fuerte actividad cromosférica, magnetosférica, líneas de emisión prominentes y una variabilidad fotométrica significativa ?. Por esto, muchas presentan un exceso de emisión en el infrarrojo cercano que está asociado a la presencia de un disco protoplanetario de gas y polvo que sabemos, rodea a la estrella central. Este disco actúa como reservorio de material para la formación posterior de planetas y canalizador para la acreción del gas hacia la estrella.

Aún así, las estrellas T Tauri se distinguen entre clásicas y de líneas débiles. Las primeras cuentan con acreción activa desde el disco, con perfiles de líneas anchos y asimétricos. Las segundas cuentan con líneas más débiles, lo que sugiere una acreción menor, por lo que se relacionan con discos evolucionados o disipados ?. Pero lo clave de estas estrellas es que, sea cual sea la clase, son fundamentales para estudiar la relación de disco-estrella, el material circunestelar y las condiciones iniciales donde se darán posteriormente la formación de sistemas planetarios.

Una característica importante de considerar, es que una cantidad importante de las estrellas T Tauri son parte de sistemas múltiples, desde binarias, triples o de ordenes superiores. Como se puede suponer, la existencia de estrellas compañeras puede afectar los discos, generando que dejen de ser circunestelares y pasen a ser circunbinarios y den lugar a estructuras dinámicas más complejas (brazos, cavidades, flujos canalizados entre componentes, entre otros) [Beck et al. \(2020\)](#).

Dado eso, el sistema estudiado en este trabajo corresponde a T Tau, el cual se encuentra en una región de formación estelar Taurus-Auriga, aproximadamente a 140 - 150 [pc] de distancia [Beck et al. \(2020\)](#). Este sistema es bastante atípico, dado que se trata de un sistema múltiple joven, con emisión

extendida de gas y asociado a la nebulosa NGC 1555 (la nebulosa variable de Hind) y a una estructura de gas/polvo restante del núcleo molecular que lo formó.

T Tau (ver [Figure 2.1](#)) como se conoce, es un sistema triple compuesto por una estrella al norte llamada T Tau N y un sistema binario al sur llamados T Tau Sa y T Tau Sb. La separación entre la estrella norte y el binario del sur es del orden de $\sim 300 - 400$ [au], mientras que las componentes del binario solo por unos pocos [au] [Figure 2.2](#), con periodo orbital aproximado de 27 [yr]. En cuanto a sus masas, se estiman valores de $\sim 2.1, 2$ y 0.4 [M_{\odot}] para T Tau N, T Tau Sa y T Tau Sb respectivamente [Beck et al. \(2020\)](#).

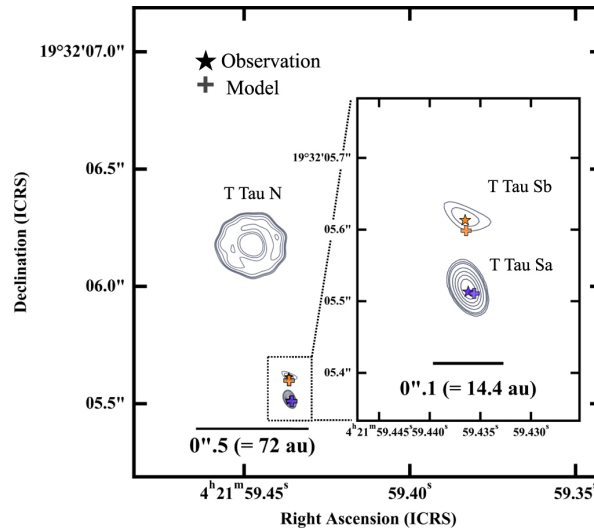


Figure 2.1: Comparación de las posiciones de T Tau Sa y Sb entre el pico de emisión en la imagen submilimétrica y el modelo de órbita estelar en la fecha de las observaciones de ALMA (18 de agosto de 2017 UTC). Las posiciones de los picos de emisión submilimétrica están marcadas con estrellas, y las posiciones predichas de T Tau Sa y Sb están marcadas con cruces. Estas posiciones marcadas se superpusieron en la imagen submilimétrica [Yamaguchi et al. \(2021\)](#).

Este sistema, en particular T Tau N, reúne varias características que lo hacen idóneo para estudiar los flujos de acreción y las posibles estructuras del tipo streamers [Yamaguchi et al. \(2021\)](#), pero principalmente, al ser un sistema en estado múltiple y con presencia de discos subestructurados, dan señal de una redistribución activa de material a escalas de centenas de au. Y dado que existen datos de ALMA de alta resolución angular y espectral [ALMA Science Operations \(2025\)](#), hace que al tener una compleja dinámica, variación morfológica y calidad de datos, lo convierte en un caso ideal de estudio, centrando el estudio y análisis cinemático principalmente en el entorno de T Tau N y su vecindad inmediata.

2.1.2 Datos y Líneas moleculares

El cubo de datos corresponde a observaciones públicas de ALMA en Banda 6 del sistema T Tau, obtenidas en el marco del proyecto 2018.1.01037.S (PI:L. Podio), donde la finalidad principal era estudiar la distribución y formación

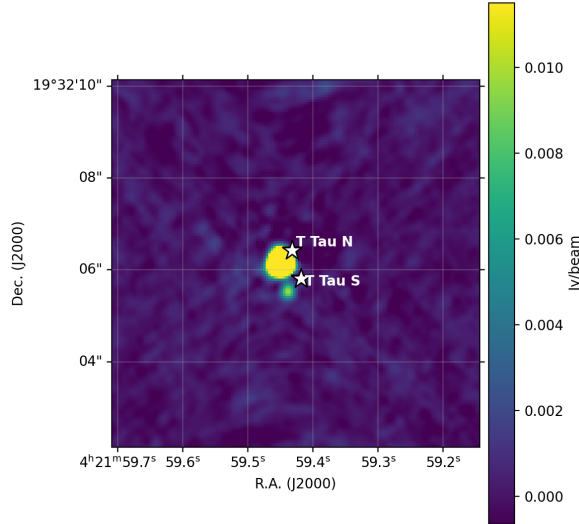


Figure 2.2: Mapa de continuo del programa [Garufi et al. \(2021\)](#) del sistema T Tau, mostrando la emisión compacta asociada al sistema binario sur y a su componente norte. Se superponen las posiciones de T Tau N y T Tau S (T Tau Sa y T Tau Sb como una sola) adoptadas de la solución reportada por [Yamaguchi et al. \(2021\)](#). Se aprecia un pequeño desfase (del orden de $\sim 0.3''$, comparable al tamaño del haz), pero consistente con diferencias de época de observación y/o con incertidumbres astrométricas de calibración. Este corrimiento corresponde a un desplazamiento rígido del campo y, por lo tanto, no afecta el análisis y resto de estudio de los streamers.

del formaldehído (H_2CO) en discos T Tauri embebidos, además de ser parte de la campaña ALMA-DOT [Garufi et al. \(2021\)](#).

Las observaciones fueron realizadas con la configuración de antenas de 12 m de ALMA, en modo de líneas espectrales, donde resultaron 13 ventanas espectrales (SPWs: spectral windows) que abarcaban los rangos de ~ 225.7 - 245.4 [GHz]. Todas las SPWs se observaron con la misma configuración interferométrica, por lo que los cubos tienen resoluciones angulares comparables. No obstante, el haz sintetizado, la MRS (maximum recoverable scale o escala máxima recuperable) y el FOV (campo de visión) varían levemente entre SPWs debido a su dependencia con la frecuencia y a las decisiones de imageado. Como referencia, reportamos un beam típico de $0.28''$, MRS 4.8 - $5.0''$ y FOV $24''$ (a 245 [GHz]) [Garufi et al. \(2021\)](#).

Las 13 SPWs, cubren un conjunto de moléculas que se encuentran en discos jóvenes. Por ejemplo, alrededor de 225.7 [GHz], incluye la transición orto- H_2CO $3_{1,2} - 2_{1,1}$ ($\nu_0 \simeq 225.697$ [GHz]), trazador principal del formaldehído. Otras ventanas cubren las líneas hiperfinas del CN $N=2-1$ que están en torno a ~ 226.66 - 226.87 [GHz] o cerca de 230.54 [GHz] que incluyen la transición ^{12}CO $J=2-1$, que traza el gas más extendido. También hay ventanas de alta frecuencia 244.935 [GHz] que abarca la transición CS $J=5-4$, junto con otras moléculas como SO, SO_2 y CH_3OH [Garufi et al. \(2021\)](#).

Cada SPW se obtiene por separado, generando así cubos de datos de cuatro dimensiones (RA, Dec, frecuencia/velocidad y Stokes) y poseen, en este caso, un tamaño de 800×800 píxeles en el plano del cielo, donde cada píxel reportado

en el encabezado es $CDEL T \simeq 1.5 \times 10^{-5} [deg]$, equivalente a $0.054''$.

$$1.5 \times 10^{-5} [deg] \times 3600 [arcsec/deg] \simeq 0.054'' \quad (2.1)$$

En los capítulos siguientes el enfoque será principalmente en CN (spw25 y spw31) y H₂CO (spw29), donde se identificaron las estructuras extendidas más relevantes para el análisis de streamers y mencionar nuevamente que en este trabajo utilizamos los cubos imagenados provistos por la pipeline (productos QA2), sin re-imagenado adicional, salvo recortes espaciales/espectrales y mediciones posteriores.

2.1.3 Cubos espectrales y mapas de momentos

Se posee un cubo de datos interferométricos del sistema T Tau, pero a detalle, un cubo de datos es el producto típico utilizado en radioastronomía e interferometría. Estos se describen como $I(x, y, \nu)$ o $I(x, y, v)$, dependiendo de si el eje espectral se expresa como frecuencia o como velocidad radial. Donde x e y son las posiciones en el cielo (A.R. y Dec. en grados) y v o ν como velocidad radial del sistema o como frecuencia. Cada plano a una velocidad/frecuencia fija representa un mapa del canal generando así que se pueda estudiar como varía la distribución espacial de emisión en diferentes velocidades/frecuencia.

Típicamente las unidades de la intensidad utilizada en los cubos están expresadas en $[Jy/beam]$ y la velocidad en $[km\ s^{-1}]$ [CASA Team \(2025\)](#). Así, es que se puede estudiar tanto la información espacial como la cinemática del gas trazado por la línea molecular estudiada.

Además, a partir de estos cubos de datos espectrales, se pueden generar lo que se conocen como mapas de momentos, que son proyecciones bidimensionales del cubo sobre el plano del cielo [Teague & Foreman-Mackey \(2019\)](#).

- **Momento 0**

Corresponde a la intensidad integrada a lo largo del eje espectral y representa la distribución total de la emisión de la línea.

- **Momento 1**

Corresponde a la velocidad media ponderada por la intensidad y está asociada al campo de velocidad del gas.

- **Momento 2**

Corresponde a la dispersión de velocidades y está relacionado con el ancho de la línea.

- **Momento 9 (peak velocity)**

Corresponde a la velocidad asociada al máximo del perfil espectral en cada píxel.

Vea [Figure 2.3](#), [Figure 2.4](#) y [Figure 2.5](#), donde se muestran los mapas de momentos para las moléculas de interés de este trabajo, calculados en rangos de canales seleccionados alrededor de la emisión.

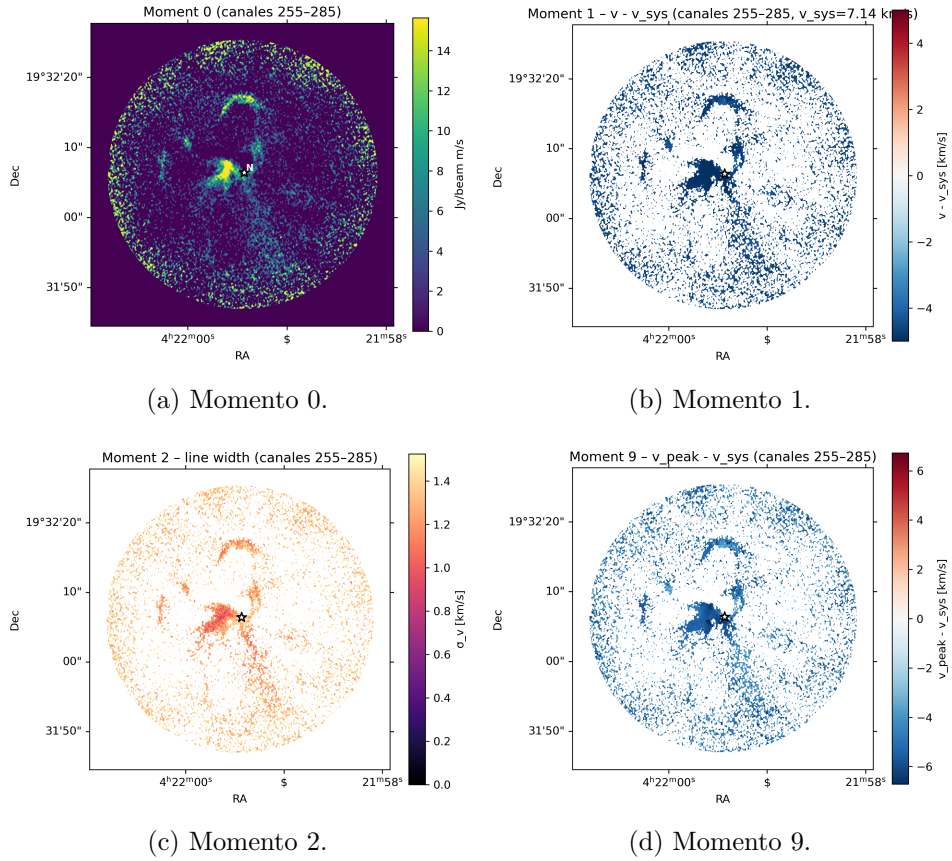


Figure 2.3: Mapas de momentos del cubo espectral de T Tau (ventana espectral spw25, molécula CN), calculados en el rango de canales 255–285. La posición del sistema T Tau esta representado por el símbolo de estrella en cada uno de los momentos. El panel (a) muestra la intensidad integrada (Momento 0), (b) el campo de velocidades respecto a la velocidad sistémica adoptada $v_{\text{sys}} = 7.14 \text{ [km s}^{-1}\text{]}$ (Momento 1), (c) el ancho de línea (Momento 2) y (d) la velocidad asociada al máximo de emisión (Momento 9). Los momentos se obtuvieron con `bettermoments` [Teague & Foreman-Mackey \(2019\)](#)

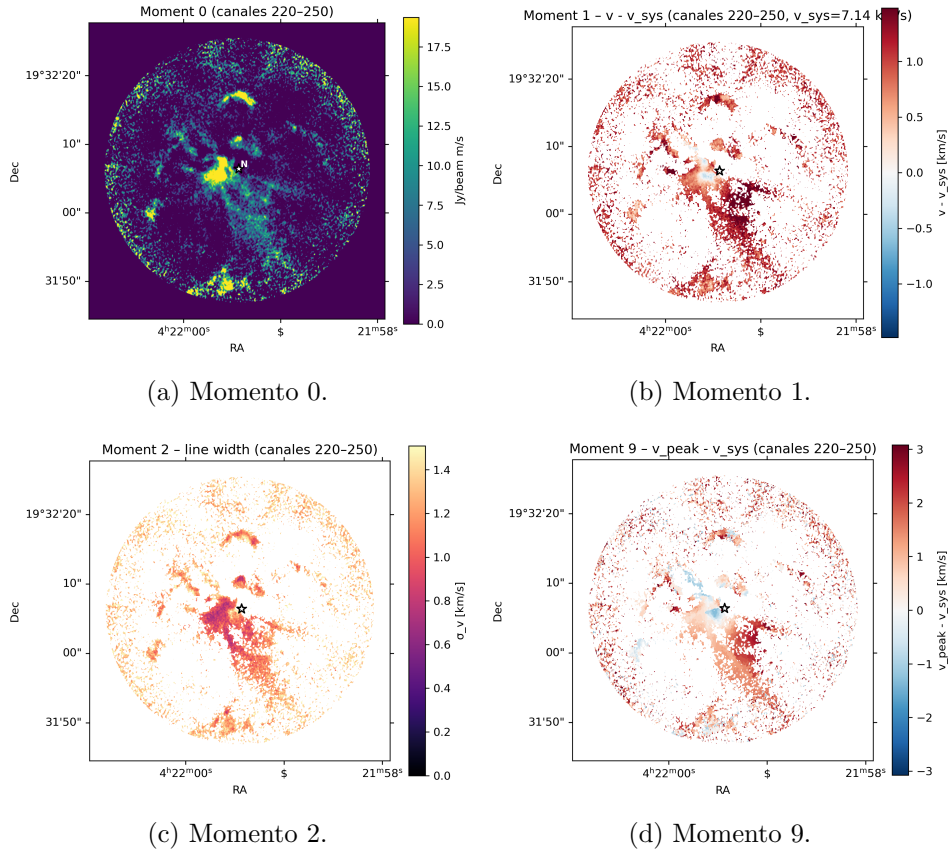


Figure 2.4: Mapas de momentos del cubo espectral de T Tau (ventana espectral spw29, molécula H_2CO), calculados en el rango de canales 220–250. La posición del sistema T Tau esta representado por el símbolo de estrella en cada uno de los momentos. El panel (a) muestra la intensidad integrada (Momento 0), (b) el campo de velocidades respecto a la velocidad sistémica adoptada $v_{\text{sys}} = 7.14 \text{ [km s}^{-1}\text{]}$ (Momento 1), (c) el ancho de línea (Momento 2) y (d) la velocidad asociada al máximo de emisión (Momento 9). Los momentos se obtuvieron con `bettermoments` Teague & Foreman-Mackey (2019).

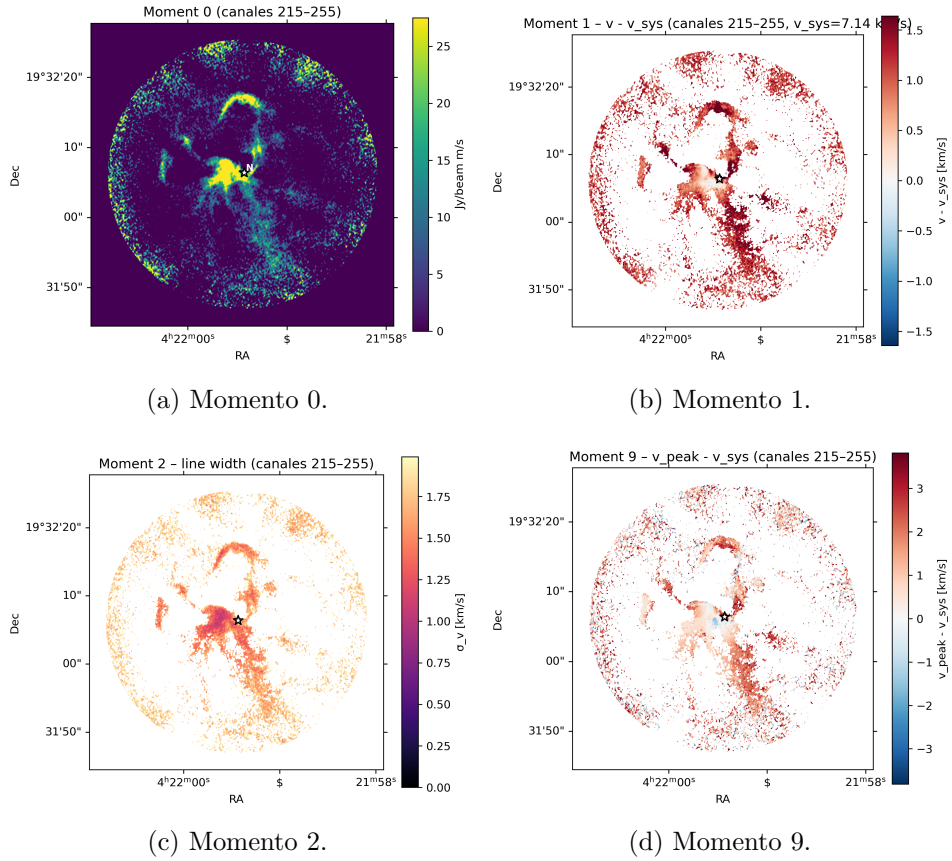


Figure 2.5: Mapas de momentos del cubo espectral de T Tau (ventana espectral spw31, molécula CN), calculados en el rango de canales 215–255. La posición del sistema T Tau esta representado por el símbolo de estrella en cada uno de los momentos. El panel (a) muestra la intensidad integrada (Momento 0), (b) el campo de velocidades respecto a la velocidad sistémica adoptada $v_{\text{sys}} = 7.14 [km s^{-1}]$ (Momento 1), (c) el ancho de línea (Momento 2) y (d) la velocidad asociada al máximo de emisión (Momento 9). Los momentos se obtuvieron con `bettermoments` [Teague & Foreman-Mackey \(2019\)](#).

2.2 CASA

2.2.1 Descripción general

CASA (Common Astronomy Software Applications) [CASA Team \(2025\)](#) es un software utilizado actualmente para la reducción, calibración e imageado de los datos tanto de radioastronomía e interferometría. Fue desarrollado conjuntamente por instituciones como NRAO, ALMA y NAOJ, ofreciendo una interfaz gráfica como un entorno de trabajo en Python para lograr ejecutar tareas mediante funciones de CASA y códigos.

En este trabajo no se realiza el proceso de calibración desde los datos crudos, sino que desde productos ya calibrados y validados por la pipeline y el proceso de QA2 de ALMA [ALMA Science Operations \(2025\)](#). Pero principalmente se utilizó para inspeccionar y realizar la verificación básica de los datos (espectros, ruido, estructuras, entre otros.) y comprender la información contenida en los encabezados de las imágenes (por ejemplo, resolución angular, tamaño de píxel, tamaño del campo y resolución espectral).

Aunque CASA cuenta con herramientas para poder generar los mapas de momentos, en este trabajo no se utilizó para ese fin, sino mediante el paquete de `bettermoments` [Teague & Foreman-Mackey \(2019\)](#).

2.3 TIPSy

2.3.1 Descripción general

Para desarrollar el análisis de los cubos de datos, se utilizó TIPSy [Gupta \(2025\)](#), el cual es un código que utiliza las ecuaciones de [Mendoza et al. \(2009\)](#) para modelar si las estructuras observadas alrededor de estrellas jóvenes son filamentos de acreción. Su objetivo principal es confirmar la dinámica de caída del material y determinar con qué precisión se pueden caracterizar sus propiedades físicas. A través de este código es posible analizar el cubo de datos (en formato .fits), manipular los ejes espectrales y generar mapas interactivos de las estructuras presentes. TIPSy se encuentra disponible públicamente en un repositorio de GitHub, creado y actualizado por Aashish Gupta, cuya metodología se describe a detalle en su repositorio [Gupta et al. \(2024\)](#).

La razón central por la que se utiliza TIPSy, es debido a la posibilidad de superponer por sobre el cubo de datos trayectorias modeladas de elementos de gas que se mueven bajo un potencial gravitacional simple. Dado que T Tau es un sistema múltiple, este modelo debe entenderse como una aproximación de primer orden con potencial puntual centrado en la componente dominante adoptada (T Tau N). Los efectos del potencial no puntual y de otras fuerzas se discuten más adelante.

Es así que teniendo los parámetros físicos mas cercanos del sistema estudiado (masa estelar, distancia, velocidad sistemática) y las condiciones iniciales de donde comienza la trayectoria (punto mas lejano del streamer), el código logra integrar el movimiento, proyectar la órbita al sistema de coordenadas del cubo y expresar en unidades comparables con los datos. Logrando así que se puedan comparar y superponer en mapas de PPV las estructuras ob-

servadas con modelos balísticos sencillos, evaluando así las configuraciones geométricas y dinámicas más idóneas para la emisión asociada a la existencia de un streamer en cierta molécula.

2.3.2 Código y Modelos utilizados

Los puntos esenciales para comprender lo que se está realizando con el cubo de datos se pueden separar en cuatro puntos: 1) Lectura y visualización, 2) Funciones principales para el ajuste de trayectoria, 3) El modelo balístico utilizado y 4) Implementación.

Cabe mencionar que todos los códigos utilizan librerías de Python comunes en el contexto de astrofísica (numpy, scipy, astropy, spectral cube, fits, matplotlib, plotly, etc), que facilitan el desarrollo y ejecución de los modelos y códigos utilizados.

Lectura y Visualización

TIPSY prepara la visualización basándose en dos funciones principales: **read_cube** y **make_ppv**. La primera se encarga de transformar el cubo de datos que se encuentra en formato .fits en puntos en el espacio PPV y la segunda en construir las figuras tridimensionales.

read_cube, utiliza una rutina para leer el archivo y acceder a sus ejes espaciales y espectral (R.A., Dec. y velocidad radial). De ser necesario se homogeneizan las unidades de coordenadas (ejemplo [km/s] a [m/s]) para que así sean compatibles con el resto del código.

Luego se recorta el cubo en función de los valores mínimos y máximos de la velocidad, así que solo se analizan los canales en ese intervalo, los cuales son los de interés, ya que se busca centrar el rango donde está la emisión relevante de los streamers.

Es sobre este cubo limitado por velocidades, donde se calculan máscaras espaciales y espectrales, calculando así el ruido de referencia y definiendo una máscara señal-ruido, donde se conservan solo los píxeles cuya intensidad supere el umbral del ruido (RMS).

El RMS (root mean square o conocido también como raíz del promedio cuadrático) es una medida típica de fluctuaciones del ruido en el cubo. Se calcula a partir de canales o regiones donde no existe emisión real, siendo considerado en la práctica de la forma como $N \times \text{RMS}$, donde únicamente sobreviven píxeles cuya intensidad supere este umbral.

Además, para cada píxel del cubo se calcula el radio proyectado en el plano del cielo hacia el centro (a partir de los ejes de R.A. y Dec.). Con esta distancia r se aplica una máscara radial que conserva solo la emisión dentro de un radio r_{max} en torno al centro. Esto reduce la contaminación extendida o estructuras de no interés para que así TIPSY construya la nube PPV. El resultado final es un conjunto de vóxeles seleccionados que representaran una nube de puntos en este espacio PPV, que alimentaran al binning y al ajuste

balístico [Figure 2.6](#).

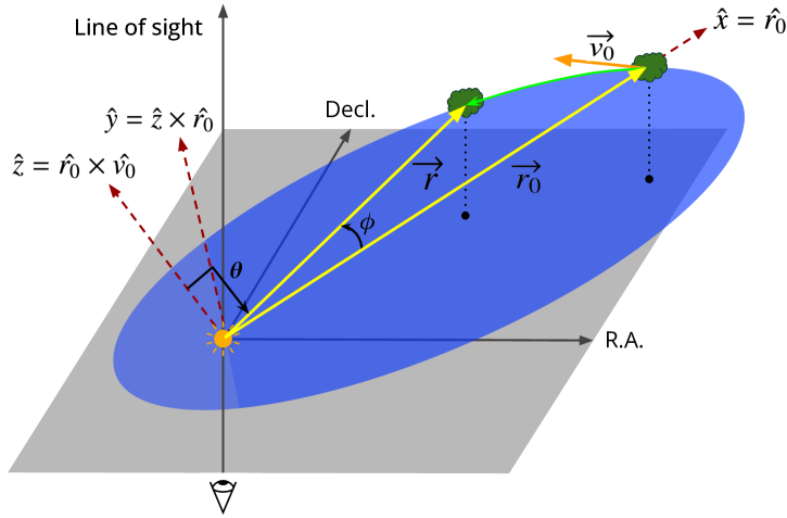


Figure 2.6: Diagrama esquemático de los ejes de coordenadas usados para calcular las trayectorias teóricas de gas en caída (*infall*) (nube verde) alrededor de un sistema protoestelar (estrella naranja). \vec{r}_0 y \vec{v}_0 denotan, respectivamente, el vector de posición inicial y el vector de velocidad inicial del gas en caída. \vec{r} representa el vector de posición del gas en un punto futuro de su trayectoria (circunferencia de la elipse azul), con θ y ϕ denotando los ángulos polar y acimutal, respectivamente. Las flechas rojas segmentadas muestran los vectores unitarios \hat{x} , \hat{y} y \hat{z} , definidos usando las direcciones de \vec{r}_0 y \vec{v}_0 . En conjunto, estos establecen el marco de coordenadas en el que TIPSY resuelve las ecuaciones de [Mendoza et al. \(2009\)](#). El plano gris representa el POS, y las flechas gris oscuro superpuestas denotan el marco de coordenadas de nuestras observaciones. Figura obtenida de [Gupta et al. \(2024\)](#).

Ahora la segunda función, **make_ppv**, toma el cubo junto con parámetros de visualización y llama a la primera función, **read_cube** generando así el diagrama PPV tridimensional. Las coordenadas X e Y corresponden a R.A. y Dec., y Z a la velocidad radial, donde el color de los puntos generados corresponden típicamente a la velocidad (o intensidad). Luego se puede ajustar los ejes espaciales y espectrales, activar proyecciones, añadir marcadores, velocidad sistemática, masa central, etc. Finalmente, se pueden exportar las figuras en diversos formatos estáticos e interactivos, facilitando así la posterior inspección visual de la geometría y ajuste del modelo en el streamer. Esto se ejemplifica para los sistemas S Cra [Figure 2.7](#) y HL Tau [Figure 2.8](#).

Funciones principales

Además de las funciones utilizadas para visualizar, TIPSY proporciona funciones para el análisis y modelamiento. Las más relevantes: **streamer_subcube**, **streamer_cleaning**, **traj_fitting** y **parameter_errors**.

En **streamer_subcube** se recibe el cubo original, pero se le parametriza en un conjunto de límites espaciales y espectrales, los cuales son como ya se mencionó anteriormente R.A., Dec. y velocidad radial. A partir de la información del encabezado del cubo de datos (tamaño del píxel, píxel de referencia, etc) convierte los límites físicos en índices de píxel (en [arcsec] y [km/s]),

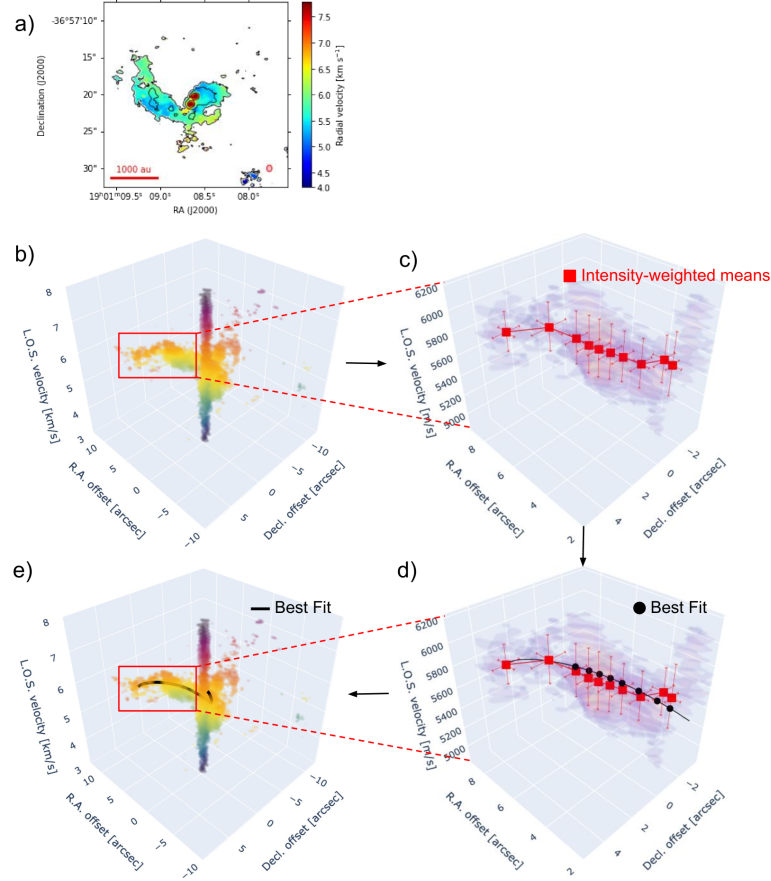


Figure 2.7: Flujo de datos de ^{13}CO (2-1) de S CrA en el *pipeline* de TIPSy. Panel a: mapa de velocidad ponderada por intensidad (momento 1) en colores, con contornos superpuestos que representan la intensidad integrada (momento 0). Los segmentos rojos en las esquinas inferior izquierda muestran una escala de longitud de 1.000 [au]. Las elipses rosadas en las esquinas inferior derecha indican el tamaño del haz (*beam*) de los datos. Panel b: proyección isométrica del diagrama 3D PPV de píxeles con intensidad $> 5\sigma$ en todo el campo de visión. Panel c: proyección isométrica del diagrama PPV de un *streamer* aislado y limpiado. El cuadrado rojo y sus barras de error representan, respectivamente, los promedios ponderados por intensidad y las desviaciones estándar. Panel d: igual que el Panel c, pero con la trayectoria de mejor ajuste, representada por la línea negra. Los círculos negros denotan los valores interpolados de la trayectoria teórica, comparados directamente con los promedios ponderados por intensidad. Panel e: igual que el Panel b, pero con la trayectoria de mejor ajuste, representada por la línea negra. Figura obtenida de Gupta et al. (2024).

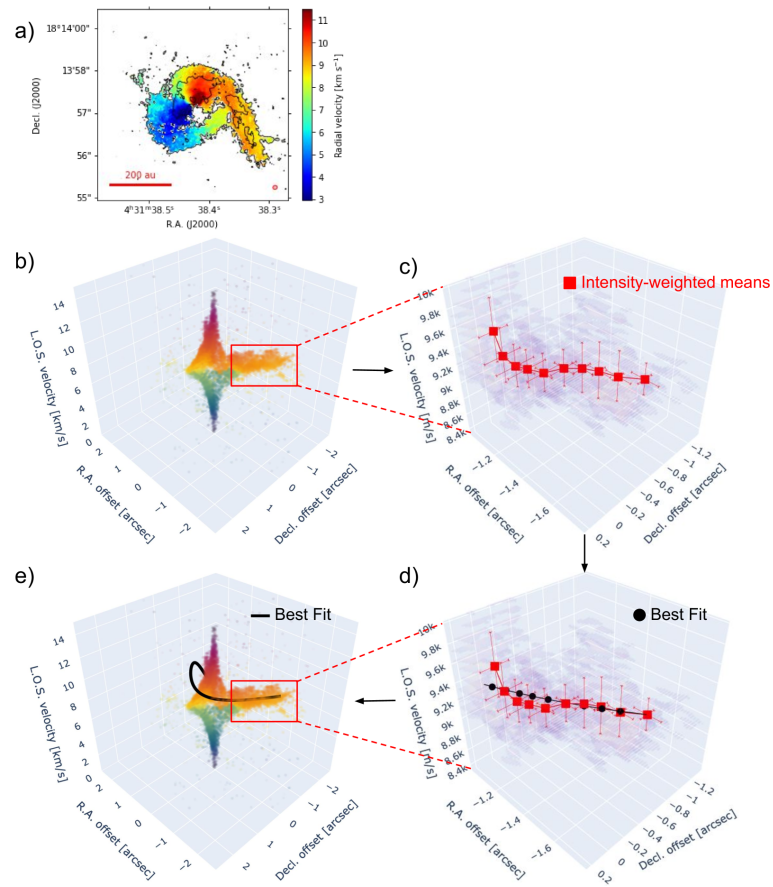


Figure 2.8: Mismo procedimiento descrito en la [Figure 2.7](#), pero aplicado a HL Tau en lugar de S CrA. Figura obtenida de [Gupta et al. \(2024\)](#).

extrayendo así la región que unicamente contiene el streamer. Además, definimos el umbral de ruido (**rms_tresh**) para eliminar vóxeles de baja intensidad, quedándonos solo con los que poseen una emisión significativa dentro del subcubo. Este criterio busca reducir la contaminación por ruido termino y dejar el subcubo mas limpio, centrado en la emisión del streamer.

Una vez identificado y separado el streamer de interes, se utiliza la función **streamer_cleaning**, la cual refina aún mas el subcubo que se tiene utilizando técnicas de clustering, dado que, por mucho que se haya recortado el streamer, aún pueden existir "puntos" aislados de emisión o que no pertenezcan al streamer como tal, y esto afectará a la hora de realizar el modelo balístico. Para solucionar esto, la función toma la nube de puntos del subcubo que se tiene y aplica un algoritmo de agrupamiento, por defecto se usa OPTICS, pero se puede tomar otro modelo de **sklearn.cluster**. El modelo así selecciona el cluster de puntos dominante (el que contiene la mayor parte de la emisión) y descarta al resto.

Luego de refinar el cubo de datos con la emisión del streamer deseado, actuará la función, más importante desde el punto de vista del ajuste, **traj_fitting**. Esta función vuelve a tomar los puntos en el PPV y a partir de esa construye una representación del streamer, definiendo una métrica de distancia a lo largo de la estructura (esto lo hace combinando la distancia radial en el plano del cielo y angulo polar), dividiendo al streamer en un numero de elementos (**N_elements**). Para cada uno de estos elementos calcula promedios de intensidad de R.A., Dec. y velocidad con sus dispersiones, buscando generar la curva más suave que sigue el eje del streamer con su respectiva incertidumbre.

Posterior a realizar el ajuste de la trayectoria, **traj_fitting** también explora el espacio de los parámetros iniciales para la trayectoria balística, que son posición inicial (z_0), módulo de velocidad y dirección ($V_{xy,0}$ y $V_{xy,ang}$), junto con otros parámetros libres que determinarán la órbita de la partícula de gas bajo el potencial gravitacional de la estrella. Para cada combinación, el código integra la trayectoria balística en 3D bajo este potencial gravitacional asumido y luego la proyecta al mismo sistema observacional del cubo (R.A., Dec. y velocidades). Finalmente compara esta trayectoria proyectada con la trayectoria promedio construida a partir de los datos (bins del streamer), interpolándola a los mismos puntos del subcubo para apreciar el grado de coincidencia.

Para cuantificar la calidad del ajuste entre la cinemática observada y una trayectoria balística, TIPSY utiliza dos métricas de goodness-of-fit. Primero, la fracción de puntos bien ajustados, **fit_fraction**, definida como la proporción de valores observacionales (R.A., Dec. y velocidad LOS) cuyas medias intensidad-ponderadas $\mu_{k,j}$ son consistentes con la trayectoria teórica $T_{k,j}$ dentro de sus incertidumbres $\sigma_{k,j}$:

$$r_{k,j} = \frac{\mu_{k,j} - T_{k,j}}{\sigma_{k,j}}, \quad \text{fit_fraction} = \frac{1}{3N} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^3 \mathbf{1}(r_{k,j}^2 < 1), \quad (2.2)$$

donde N es el número de puntos discretizados a lo largo del *streamer* y k recorre (R.A., Dec. y velocidad radial).

Segundo, una “*deviation*” definida como la suma de residuales normalizados al cuadrado:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^3 r_{k,j}^2. \quad (2.3)$$

La solución corresponde a la trayectoria que maximiza `fit_fraction` y, en caso de empate, minimiza χ^2 .

Por último, la función de **parameter_errors** estima los valores representativos y sus errores de los parámetros libres del conjunto de soluciones. Utiliza la tabla de parámetros producidas por la función de **traj_fitting** y define una submuestra de soluciones aceptables imponiendo un umbral de calidad, que por defecto tiene un valor de 0,9 pero varía según el ajuste obtenido. Sobre esta submuestra de resultados, calcula las distribuciones para cada parámetro libre, obtiene sus valores y desviaciones estándar. Finalmente da como resultado un conjunto de valores con sus barras de error estimadas para dar las estimaciones más correctas de los parámetros del modelo balístico.

Modelo balístico

TIPSY asume que el gas del *streamer* se describe como partículas de prueba que se están moviendo bajo un potencial gravitatorio que corresponde a la estrella central del sistema. Se ignoran efectos de presión, campos magnéticos, autogravedad del gas, etc.; la trayectoria será puramente balística (movimiento bajo potencial gravitatorio puntual) y luego Kepleriano como consecuencia. Este modelo está basado en las soluciones analíticas presentadas por Mendoza [et al. \(2009\)](#) y que fueron implementadas en la función: **falling_trajectory**.

Parte de una condición inicial definida por una posición claramente especificada (x_0, y_0, z_0) en au y una velocidad inicial en tres dimensiones (v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}) en $[\text{km s}^{-1}]$ [Figure 2.6](#). A partir de estos vectores, se construye un sistema de referencia adaptado al plano orbital, calculando primero el vector de posición inicial r_0 y el vector de velocidad inicial v_0 , y desde ellos se obtiene el momento angular específico inicial mediante el producto cruz $n = r_0 \times v_0$. Luego, con r_0 y n normalizados se define una base ortonormal (m, r_0, n) que fija la órbita y permite construir una matriz de transformación entre el sistema original y un sistema rotado donde el movimiento se vuelve más sencillo de describir.

En este nuevo sistema rotado, la posición inicial se expresa en coordenadas esféricas (r_0, θ_0, ϕ_0) . Por como está construido, el plano orbital coincide casi exactamente con el plano ecuatorial de este sistema, por lo que se asume que $\theta_0 = \pi/2$. Por otra parte, la velocidad se transforma usando otra matriz de rotación que pasa de componentes cartesianas a esféricas, obteniendo $(v_{r0}, v_{\theta0}, v_{\phi0})$. Así se pueden definir las constantes de movimiento, como el momento angular específico $h_0 = v_{\phi0} r_0$ y la energía total del sistema.

Ahora, con la masa estelar M_\star que se define para T Tau N y la constante gravitacional G , el código calcula la energía total por unidad de masa como la suma de la energía cinética radial y tangencial menos el término del potencial gravitatorio. De aquí se define un radio característico $r_u = h_0^2/(GM_\star)$, una

escala de energía asociada y la excentricidad de la órbita, que determina si la trayectoria es elíptica, parabólica o hiperbólica. Lo importante es que las ecuaciones garantizan que a lo largo de la trayectoria se conserven la energía y el momento angular.

La posición de la partícula a lo largo de la órbita se parametriza mediante un ángulo “paramétrico” cuyo valor inicial se calcula a partir de las constantes de la órbita. A partir de esto, el código genera una secuencia de pasos angulares con resolución **ang_step** y signo controlado por la velocidad radial inicial (con la finalidad de que siga el sentido de caída). Para cada uno de los valores del ángulo paramétrico, la rutina evalúa la solución analítica para el radio el radio $r(\varphi)$, donde φ es el parámetro angular de la solución analítica (no necesariamente el azimut observacional ϕ), y mantiene θ aproximadamente constante; como ya se mencionó, el ángulo ϕ avanza de forma consistente con el signo de la velocidad tangencial, reconstruyendo la órbita en las coordenadas esféricas.

A partir de estas soluciones para la posición, el código calcula las velocidades v_r , v_θ y v_ϕ usando las expresiones de [Mendoza et al. \(2009\) Equation 2.7](#)), de manera que las partículas respeten la cinemática y las restricciones del potencial gravitatorio. Luego convierte la trayectoria (r, θ, ϕ) y sus velocidades a coordenadas cartesianas en el sistema rotado, y aplica la matriz de transformación inversa para volver al sistema original. Esto da como resultado las posiciones $x(t), y(t), z(t)$ y velocidades $v_x(t), v_y(t), v_z(t)$ a lo largo de la órbita en cada uno de los puntos.

$$r(\theta) = \frac{\sin^2 \theta_0}{1 - e \cos \xi}, \quad \xi = \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_0} \right) + \varphi_0, \quad (2.4)$$

$$v_\phi = \frac{\sin^2 \theta_0}{r \sin \theta}, \quad (2.5)$$

$$v_\theta = \frac{\sin \theta_0}{r \sin \theta} (\cos^2 \theta_0 - \cos^2 \theta)^{1/2}, \quad (2.6)$$

$$v_r = -\frac{e \sin \xi \sin \theta_0}{r (1 - e \cos \xi)}. \quad (2.7)$$

Además de la geometría espacial, se estima una escala de tiempo asociada a este movimiento. Para ello, se evalúa la distancia radial entre los pasos de la órbita y la velocidad radial media de cada segmento, calculando el incremento de tiempo $\Delta t \approx \Delta r / v_r$. Si el incremento resultara negativo (típicamente asociado a ramas no físicas de órbitas muy abiertas), se descarta. La finalidad es que la suma acumulada de los incrementos de tiempo “buenos” entregue una estimación de lo que tarda la partícula en moverse desde las condiciones iniciales hasta cada punto de la trayectoria, que puede interpretarse como escalas de tiempos de caída libre aproximados.

Implementación

Por último, todo lo explicado anteriormente se integra en cuaderno de Jupyter donde se aplica TIPSy a los cubos de ALMA de T Tau en las diferentes moléculas de este estudio.

Chapter 3

Metodología

3.1 Visualización y criterio de selección de moléculas

Los datos utilizados corresponden a cubos interferométricos de ALMA del entorno del sistema T Tau, los cuales ya se encuentran calibrados y procesados mediante el procesamiento estándar del observatorio [ALMA Science Operations \(2025\)](#). El objetivo es explorar estos productos y lograr observar la morfología y cinemática del gas molecular en distintos trazadores. Para esto se utilizaron las herramientas interactivas de CASA para inspeccionar mapas por canal, espectros, entre otros [CASA Team \(2025\)](#).

Esta inspección visual preliminar permitió identificar, en algunas líneas moleculares, la existencia de estructuras elongadas y coherentes en velocidad, las cuales fueron consideradas candidatas a streamers [Valdivia-Mena et al. \(2022, 2024\)](#). Pero dado que diferentes líneas moleculares son sensibles a unas u otras condiciones físicas y ópticas distintas, se debió establecer criterios para decidir con cuáles trabajar finalmente.

El primer criterio es puramente observacional, donde se seleccionaron las líneas que presentaban suficiente emisión en el entorno de T Tau en un conjunto continuo de canales. Así se descartaron los que estuvieran dominados por ruido térmico.

El segundo criterio se relaciona con la profundidad óptica, la cual representa cuánto se atenúa la radiación a una frecuencia al atravesar un medio, siendo este el motivo de si la emisión queda dominada por las capas superficiales o si puede trazar la distribución de gas en su interior. Si una línea es ópticamente gruesa (por ejemplo: ^{12}CO) puede estar afectada por absorción/autoabsorción y emisión extendida, lo que puede ocultar y/o distorsionar la cinemática del gas más interno complicando el estudio del material en caída hacia el sistema (vea [Figure 3.1](#)). Por eso, se priorizaron trazadores menos abundantes y que fueran ópticamente delgados, cuya emisión es proporcional a la cantidad de gas emisor en la línea de visión, por lo que permiten sondear de forma más directa las estructuras internas.

En consecuencia, se priorizaron aquellas líneas que mostraban una morfología compatible con gas relativamente extendido a escalas de cientos de unidades astronómicas con gradientes de velocidad suaves y continuos.

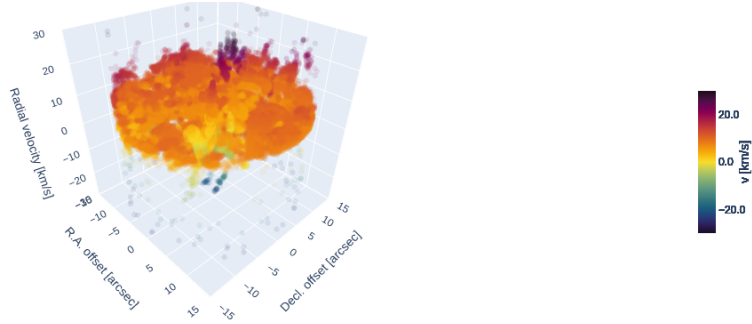


Figure 3.1: Visualización en diagrama PPV del cubo de datos de la molécula ^{12}CO en el sistema T Tau, donde se aprecia la complejidad de diferenciar estructuras internas debido a que es una línea ópticamente gruesa.

3.2 Estrategia para el estudio de T Tau

TIPSY fue desarrollado para caracterizar y ajustar trayectorias para streamers individuales mediante un modelo balístico que define un potencial central en un origen fijo (0,0,0). Dado que T Tau es un sistema múltiple con estructuras elongadas superpuestas en PPV, fue necesario aislar componentes cinemáticas de manera consistente para permitir el ajuste con TIPSY.

Para cada molécula se definieron dos regiones/candidatos (Componentes 1 y 2) que representan sectores distintos de la cinemática global, definidos como "streamers generales". Para esto se definieron subcubos de datos en el diagrama PPV restringiendo en rangos de R.A., Dec y velocidad, con el fin de maximizar la continuidad de la morfología y cinemática de cada sector Table 3.1, donde estos rangos corresponden a offsets angulares respecto del centro del cubo. Además, se definieron distintos umbrales de RMS para conservar solo los vóxeles de mayor intensidad o evitar reducir la conectividad del flujo según fuera el caso, junto con ajustar el parámetro de limpieza por clustering para eliminar los puntos aislados sin afectar la continuidad del streamer Table 3.2.

Table 3.1: Rangos adoptados para definir subcubos PPV.

Molécula / SPW	Componente	Rango R.A. (arcsec)	Rango Dec. (arcsec)	Rango v_{LOS} (km s^{-1})
CN / spw25	1	[-4 , 1]	[-8 , 0]	[-1 , 5]
CN / spw25	2	[1 , 6]	[-5 , 2]	[0.5 , 3]
H ₂ CO / spw29	1	[-4 , 2]	[-10 , 0.5]	[4 , 11]
H ₂ CO / spw29	2	[1 , 10]	[-4 , 0]	[4 , 11]
CN / spw31	1	[-5 , 1]	[-11 , 1]	[4 , 11]
CN / spw31	2	[1 , 7]	[-5 , 2]	[6.5 , 10]

Gracias a esto se logró generar un ajuste y modelo para cada uno de los trazadores y sus componentes definidas, pero como se mencionó anteriormente, TIPSY considera las coordenadas (0,0,0) como la ubicación del centro del potencial del sistema y como se apreció en los mapas de Momento 0 la caída del material no es hacia el centro directamente, está desfasado Figure 3.2. Es por eso que lo que los modelos resultantes debieron restringirse hasta que fueran consistentes físicamente según el criterio de mínima distancia radial o velocidad radial Table 3.3.

Para el criterio de mínima distancia radial, se buscaba evitar que se inter-

Table 3.2: Umbrales de selección de emisión y parámetros de limpieza adoptados para cada subcubo.

Molécula / SPW	Componente	Umbral (RMS)	ξ (clustering)
CN / spw25	1	3.3	0.3
CN / spw25	2	4	0.25
H ₂ CO / spw29	1	4.2	0.25
H ₂ CO / spw29	2	4.2	0.25
CN / spw31	1	4.2	0.25
CN / spw31	2	4.2	0.25

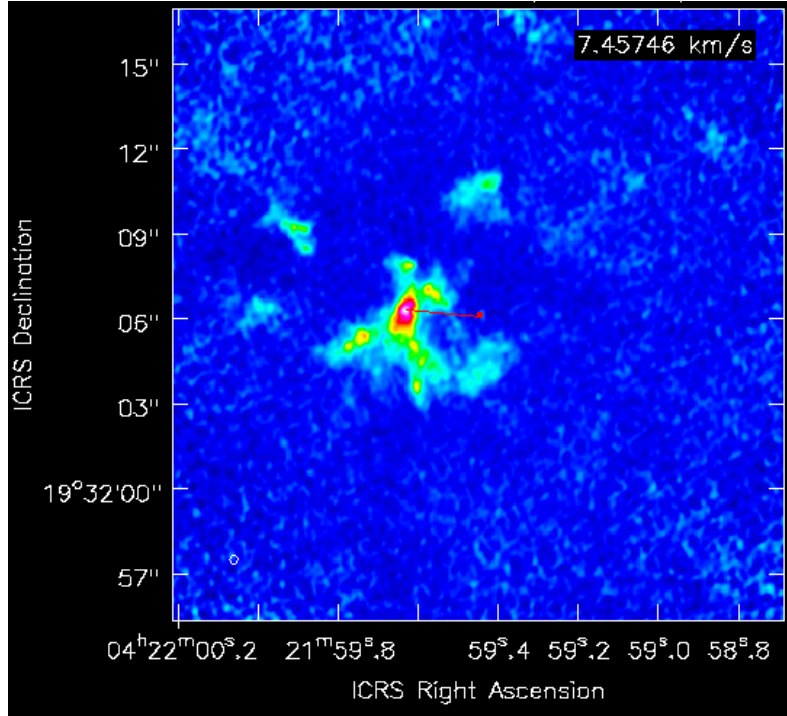


Figure 3.2: Desplazamiento entre la posición del máximo de emisión integrado (momento 0) de H₂CO (spw29) y la posición de T Tau N, adoptada como referencia del centro del sistema. El corrimiento angular estimado es de $\sim 2.7''$ (equivalente a ~ 397 [au] para $d \simeq 147$ [pc]), calculado a partir de la escala de píxel del cubo ($|CDELTA2| = 1.5 \times 10^{-5}$ [deg pix⁻¹], $\approx 0.054''$ [pix⁻¹]) y un desplazamiento de ~ 50 [pix]. Un comportamiento similar se observa en las demás moléculas analizadas (véase Figure 7.1).

Table 3.3: Criterio adoptado para recortar la trayectoria del mejor ajuste a un tramo físicamente consistente.

Molécula / SPW	Componente	Criterio de recorte del modelo
CN / spw25	1	Velocidad
CN / spw25	2	Radial
H ₂ CO / spw29	1	Radial
H ₂ CO / spw29	2	Ninguno
CN / spw31	1	Ninguno
CN / spw31	2	Ninguno

pretara como infall el tramo del modelo que ocurría posterior al máximo acercamiento al centro del potencial y conservar solamente el segmento compatible con efectivamente un comportamiento de infall. Para eso, se identifica el índice de tiempo asociado a dicho punto de $r(t)$, donde $r(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2 + z(t)^2}$ es la distancia al centro del potencial adoptado, y se recorta la trayectoria. Por otra parte, el criterio de mínima velocidad radial se basa en cuando la trayectoria llega a una velocidad con un valor extremo, se recorta debido a una oscilación entre aumento y disminución en velocidad previo llegar al centro del sistema.

Una vez obtenidos los modelos con consistencia física, se procedió a realizar el cálculo de su longitud característica, el cual se estimó integrando el arco de la trayectoria balística, dando como resultado la suma de distancias entre los puntos consecutivos [Equation 3.1](#). También se generó la longitud proyectada en el plano del cielo usando solo los desplazamientos en los ejes x e y [Equation 3.2](#).

$$L_{3D} = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}, \quad (3.1)$$

$$L_{\text{proj}} = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}. \quad (3.2)$$

Posteriormente se calculó el flujo integrado de la línea integrando la emisión del subcubo sobre el ancho del canal. Los cubos de ALMA están calibrados en unidad de intensidad superficial por haz, típicamente S_ν en [Jy beam^{-1}], por lo tanto antes de integrar espacialmente es necesario convertir de "por haz" a "por píxel", utilizando el número de píxeles contenidos en un haz efectivo. Aproximando el haz como una gaussiana 2D con ejes mayores y menores (BMAJ, BMIN que se encuentran en el header), dicha área sólida del haz se obtiene desde [Equation 3.3](#), donde σ es un factor de conversión [Equation 3.4](#).

$$\Omega_{\text{beam}} = 2\pi \sigma_{\text{maj}} \sigma_{\text{min}} \quad (3.3)$$

$$\sigma = \frac{\text{FWHM}}{2\sqrt{2 \ln 2}}. \quad (3.4)$$

Por otra parte, el área sólida de un píxel se calcula desde el tamaño angular del píxel (CDELTA2 del header) [Equation 3.5](#), dando finalmente la relación de píxeles por haz [Equation 3.6](#).

$$\Omega_{\text{pix}} = (\Delta\theta_{\text{pix}})^2 \quad (3.5)$$

$$N_{\text{pix/beam}} = \frac{\Omega_{\text{beam}}}{\Omega_{\text{pix}}}. \quad (3.6)$$

Con esto se puede transformar a flujo integrado de línea. Primero calculamos el flujo integrado en unidades observacionales [Jy km s^{-1}]:

$$F_{\text{line}}^{(\text{Jy km/s})} = \frac{\sum_{i,j,k} S_\nu(i, j, k) \Delta v}{N_{\text{pix/beam}}}, \quad (3.7)$$

donde Δv es el ancho de canal en [km s^{-1}] (constante para el subcubo) y la suma incluye todos los píxeles (i, j) y canales k del subcubo. Si se requiere el flujo en unidades físicas [W m^{-2}], se convierte S_ν de [Jy] a [$\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$] ($1 \text{ [Jy]} = 10^{-26} \text{ [W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}]$) y se integra sobre $\Delta\nu$.

Desde el flujo total obtenido se estimar la masa del gas asociada a dicho subcubo, desde dos supuestos. El primero, que es una emisión ópticamente delgada y el segundo, que existe equilibrio térmico local (LTE) a una temperatura de excitación T_{ex} . Por esto, el flujo se relaciona directamente con el número total de moléculas del trazador en el nivel superior u, porque cada molécula en ese nivel decae hacia uno inferior l con probabilidad por unidad de tiempo A_{ul} y va a emitir fotones de energía $h\nu$ (vea relación de ecuaciones [Equation 3.8](#) y [Equation 3.9](#)).

$$L_{\text{line}} = N_u A_{ul} h\nu, \quad F_{\text{line}} = \frac{L_{\text{line}}}{4\pi D^2}. \quad (3.8)$$

$$N_u = \frac{4\pi D^2 F_{\text{line}}}{h\nu A_{ul}}. \quad (3.9)$$

Ahora, bajo la suposición de LTE, se busca obtener el N_{tot} usando la fracción de población superior [Equation 3.10](#), donde g_u es la degeneración estadística del nivel, E_u su energía, $Q(T_{ex})$ la función partición y k la constante de Boltzmann. También se fija una abundancia fija [Equation 3.11](#). Obteniendo así la relación para la masa total del gas [Equation 3.12](#). Cabe mencionar que se realizó el ejemplo con la molécula de H_2 , pero para cada molécula se utilizaron sus respectivos valores químicos.

$$f_u \equiv \frac{N_u}{N_{\text{tot}}} = \frac{g_u \exp(-E_u/kT_{ex})}{Q(T_{ex})}, \quad N_{\text{tot}} = \frac{N_u}{f_u}. \quad (3.10)$$

$$x_{\text{mol}} \equiv \frac{n_{\text{mol}}}{n_{\text{H}_2}} \approx \frac{N_{\text{tot}}}{N(\text{H}_2)}, \quad N_{\text{H}_2, \text{tot}} = \frac{N_{\text{tot}}}{x_{\text{mol}}}. \quad (3.11)$$

$$M_{\text{gas}} = \mu m_{\text{H}} N_{\text{H}_2, \text{tot}} = \mu m_{\text{H}} \frac{N_{\text{tot}}}{x_{\text{mol}}}. \quad (3.12)$$

Finalmente se calculó la tasa de infall simplemente realizando el cociente entre la masa estimada del streamer y el tiempo asociado al modelo balístico, donde se toma `final_time` como el tiempo acumulado a lo largo del tramo recortado de la trayectoria [Equation 3.13](#).

$$\dot{M} = \frac{M_{\text{gas}}}{t_{\text{infall}}}, \quad t_{\text{infall}} \equiv \text{final_time}. \quad (3.13)$$

Chapter 4

Resultados

Los resultados obtenidos a partir del análisis de los cubos espectrales de ALMA [Garufi et al. \(2021\)](#), mediante TIPSy [Gupta \(2025\)](#) se enfocan en la identificación y caracterización de estas estructuras compatibles a streamers. Como se señaló en la sección anterior, se basó en la emisión en el espacio PPV, lo cual permitió definir subcubos espaciales [Table 3.1](#), filtrar mediante criterios de RMS y clustering [Table 3.2](#), para posteriormente construir un modelo que se ajustara a la trayectoria del gas.

Dada la complejidad de individualizar mediante TIPSy en más de un streamer, se decidió para cada trazador molecular separar en dos componentes principales (1 y 2), definidas como subestructuras con comportamiento de infall hacia el potencial adoptado. Esto no quiere decir que existen solamente dos corrientes de flujo independientes, sino corresponden al criterio descrito en la sección anterior. Estos resultados están organizados por línea molecular (vea [Table 4.1](#)).

Table 4.1: Resumen de las transiciones analizadas en Banda 6 y parámetros observacionales.

Molécula	Transición	ν_0 (GHz)	E_u (K)	Δv (km s ⁻¹)	Beam (")	RMS (mJy beam ⁻¹)
CN	$N = 2-1$ (hfs)	226.655000	11.34	0.161737	0.329×0.271	4.323
H ₂ CO	$3_{1,2} - 2_{1,1}$	225.697775	33.45	0.162422	0.331×0.273	4.196
CN	$N = 2-1$ (hfs)	226.874781	11.35	0.161581	0.347×0.272	4.286

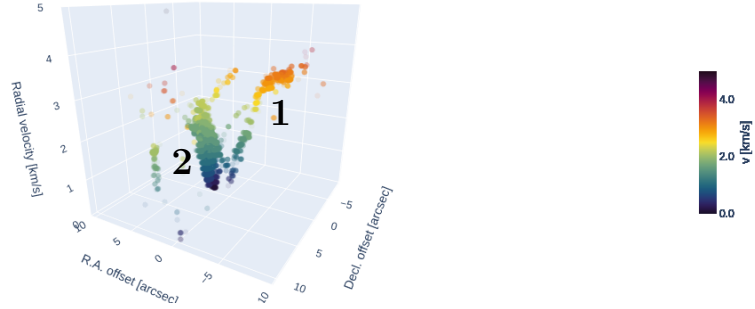
Beam y RMS se obtienen del encabezado (header) del cubo, medidos en canales libres de línea. Δv es el espaciamiento entre canales.

4.1 CN - SPW25 - 226.655 GHz

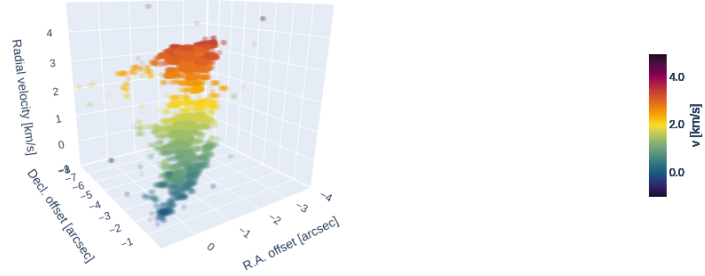
La [Figure 4.1](#) muestra la visualización PPV del trazador molecular CN para la spw25. En el cubo completo (panel a) se identifican dos componentes elongadas y coherentes a candidatos a streamers que apuntan hacia la región central del sistema. Se definieron ambas componentes, se realizó en proceso de limpieza para cada componente individualmente, donde finalmente (panel b) corresponde a la componente 1 y (panel c) a la componente 2.

A diferencia de la componente 1, en la componente 2 la emisión de infall se superpone parcialmente con material asociado a otras trayectorias de infall, dificultando la separación en un subcubo idóneo. Por lo que, como se está considerando el análisis de "streamers generales", basta con delimitar con el

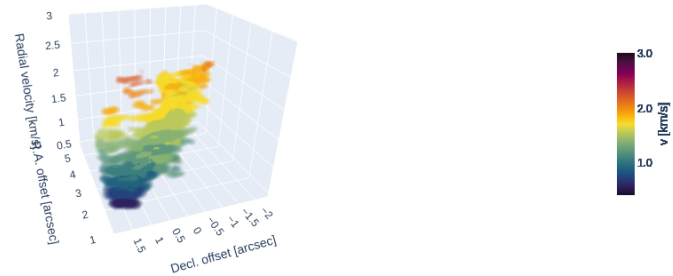
material cruzado de la componente 1, determinar un RMS levemente más alto para así lograr que TIPSY genere un modelo balístico cercano al recorrido de la mayor cantidad de material infall.



(a) PPV del cubo completo (CN-spw25).



(b) PPV del subcubo (componente 1).

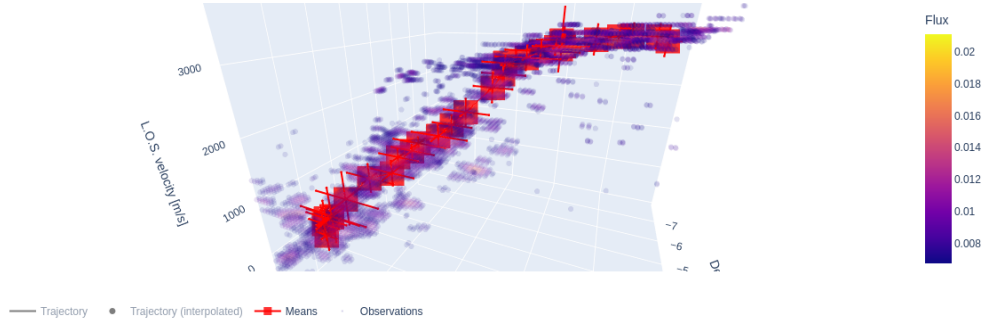


(c) PPV del subcubo (componente 2).

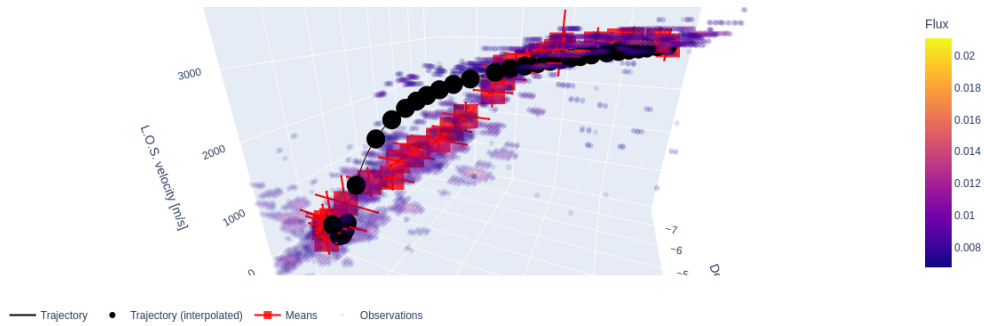
Figure 4.1: Diagramas PPV del trazador molecular CN para el cubo de datos de la spw25. (a) Visualización del cubo completo, utilizada para identificar estructuras elongadas coherentes en velocidad. (b) Subcubo adoptado para aislar la componente 1. (c) Subcubo adoptado para aislar la componente 2.

En las [Figure 4.2](#) (componente 1) y [Figure 4.3](#) (componente 2) se presentan, para cada una, en el panel (a) la trayectoria balística de mejor ajuste superpuesta a los puntos observados y a la trayectoria promedio. En el panel (b) se visualiza la misma nube de puntos junto a las medias/bins, sin superponer la curva balística, con el objetivo de destacar la geometría efectiva que el algoritmo intenta reproducir. Lo anterior indica que CN (spw25) presenta al menos dos componentes cinemáticas compatibles con infall bajo un potencial central de primer orden ([Gupta et al., 2024](#); [Mendoza et al., 2009](#)).

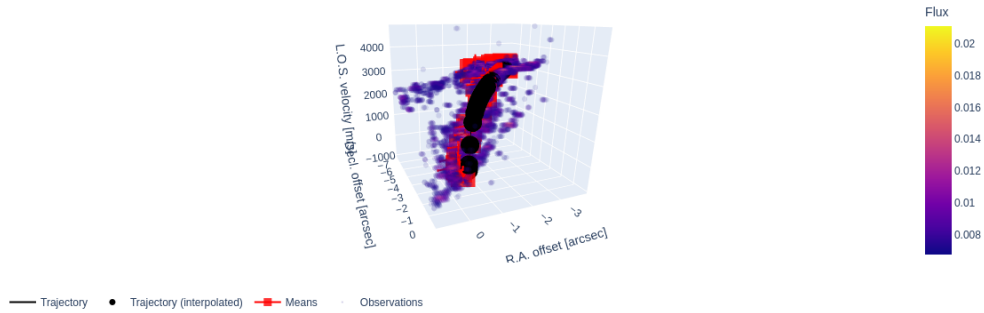
Estas soluciones balísticas se obtienen explorando las condiciones iniciales



(a) Ajuste balístico en el espacio PPV.

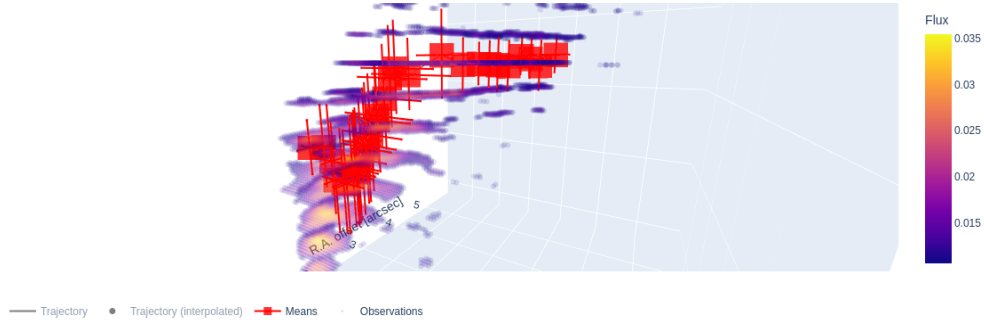


(b) Geometría PPV del streamer sin la curva dominante.

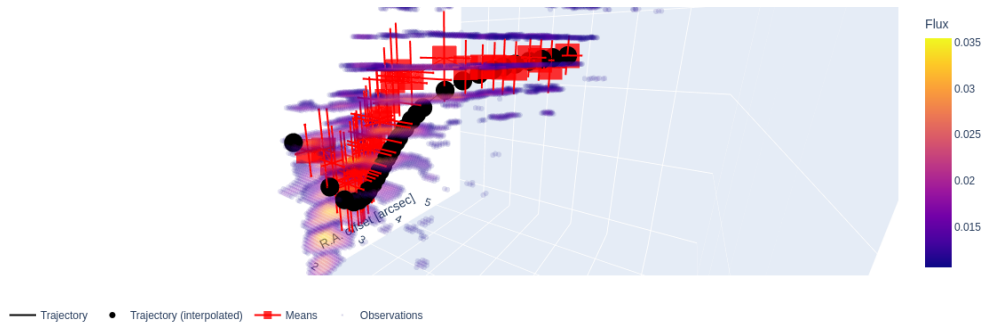


(c) Visión completa del ajuste balístico en el espacio PPV.

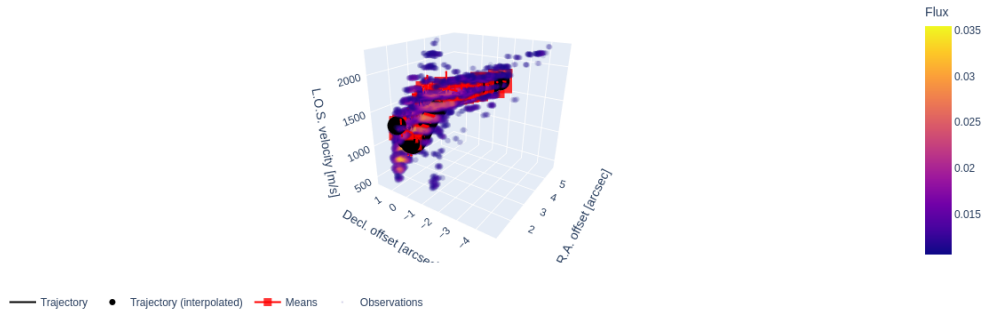
Figure 4.2: Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para CN (spw25) componente 1; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSY al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).



(a) Ajuste balístico en el espacio PPV.



(b) Geometría PPV del streamer sin la curva dominante.



(c) Visión completa del ajuste balístico en el espacio PPV.

Figure 4.3: Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para CN (spw25) componente 2; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSy al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).

determinadas por TIPSYP para cada componente [Table 4.2](#) y [Table 4.3](#), previamente discretizadas desde las posibles trayectorias a considerar para el ajuste [Figure 4.4](#). Obteniendo así el mejor rango de espacio de parámetros [Figure 4.5](#) mostrando que (i) la fracción de ajuste (*fit_fraction*), que cuantifica qué fracción de bins del streamer son reproducidos dentro de la dispersión observada, y (ii) una métrica global de desviación (*deviation*) expresada según la definición interna del código. La cruz roja marca la solución óptima, mientras que las barras reflejan la incertidumbre estimada a partir del conjunto de soluciones aceptables ([Gupta et al., 2024](#)).

Table 4.2: Parámetros del modelo balístico para CN (spw25) componente 1.

Parámetro	Mejor ajuste	Incertidumbre
z_0 [au]	2600.0	± 100.0
$v_{xy,0}$ [km s^{-1}]	1.7791	± 0.1627
$v_{xy,\text{ang},0}$ [$^\circ$]	62.6285	± 5.0
<i>fit_fraction</i>	0.77	—
<i>deviation</i>	314.09	—

z_0 es la separación inicial a lo largo de la línea de visión (profundidad) del punto de partida respecto al plano del cielo. $v_{xy,0}$ es el módulo de la velocidad inicial en el plano del cielo y $v_{xy,\text{ang},0}$ define su dirección (medida desde el eje x del sistema de TIPSYP). *fit_fraction* cuantifica la fracción de bins cuya cinemática es reproducida por el modelo dentro de la dispersión observada y *deviation* es la métrica global de discrepancia usada para ordenar soluciones.

Table 4.3: Parámetros del modelo balístico para CN (spw25) componente 2.

Parámetro	Mejor ajuste	Incertidumbre
z_0 [au]	2650	± 667
$v_{xy,0}$ [km s^{-1}]	1.132	± 0.596
$v_{xy,\text{ang},0}$ [$^\circ$]	140.84	± 5.00
<i>fit_fraction</i>	1.00	—
<i>deviation</i>	16.79	—

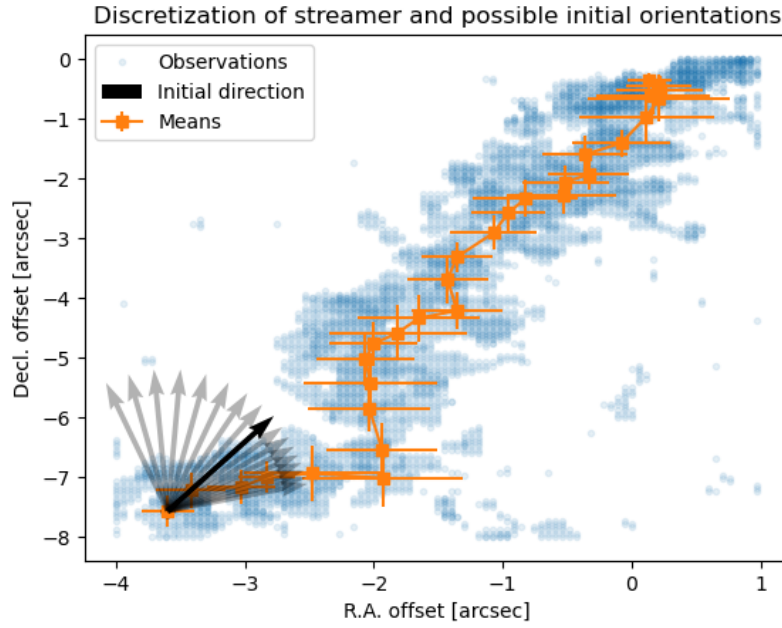
z_0 es la separación inicial a lo largo de la línea de visión (profundidad) del punto de partida respecto al plano del cielo. $v_{xy,0}$ es el módulo de la velocidad inicial en el plano del cielo y $v_{xy,\text{ang},0}$ define su dirección (medida desde el eje x del sistema de TIPSYP). *fit_fraction* cuantifica la fracción de bins cuya cinemática es reproducida por el modelo dentro de la dispersión observada y *deviation* es la métrica global de discrepancia usada para ordenar soluciones.

La [Figure 4.6](#) muestra para cada componente la nube de puntos del cubo completo y la trayectoria balística seleccionada como mejor ajuste en el espacio PPV. Esta visualización resume en una sola figura la geometría observacional y la proyección del modelo, facilitando la inspección cualitativa de consistencia entre ambos.

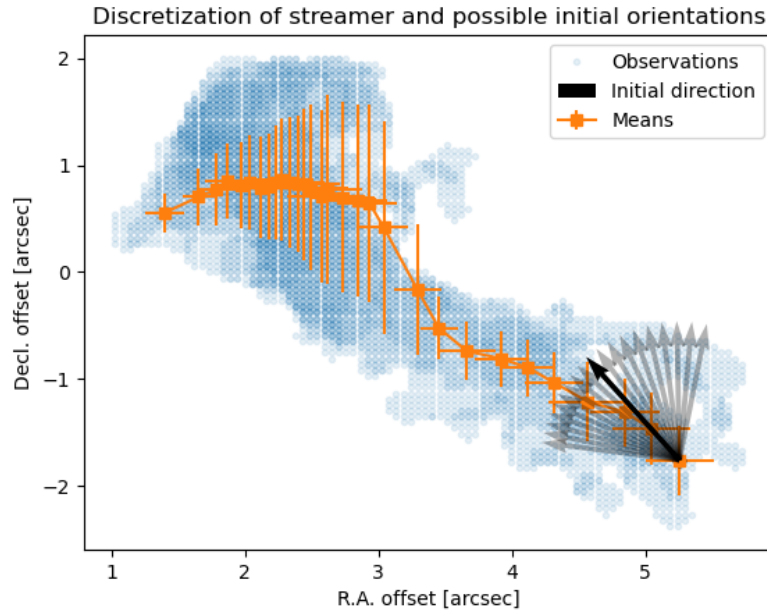
A partir de la trayectoria balística de mejor ajuste, se obtuvieron sus propiedades derivadas respectivas en [Table 4.4](#) y [Table 4.5](#) siguiendo el criterio de velocidad radial o distancia radial, se estimó una longitud característica del streamer tridimensional y su proyección en el plano del cielo, el flujo total, la masa del gas y su tasa de infall.

4.2 H₂CO - SPW29 - 226.697775 GHz

En esta segunda molécula se observa una morfología más extensa, con estructuras que dan señales de la existencia de más de dos streamers de forma evidente en PPV [Figure 4.7](#), pero se sigue con la generalización y estudio de

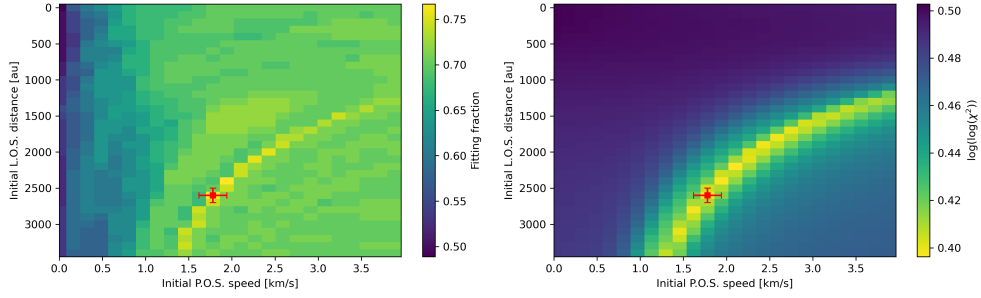


(a) Discretización del recorrido para la componente 1.

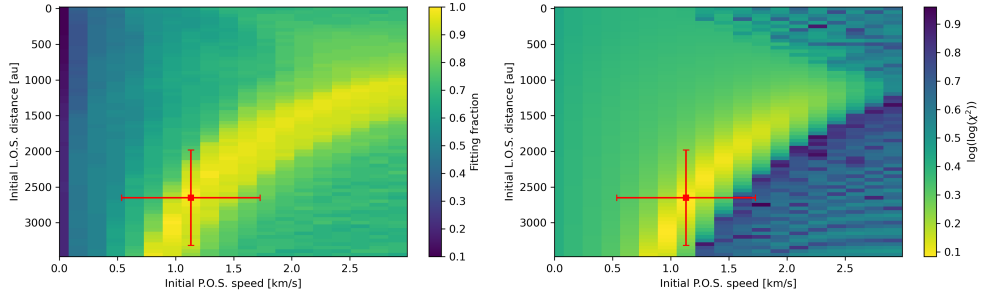


(b) Discretización del recorrido para la componente 2.

Figure 4.4: La nube azul corresponde a los píxeles (2D) del subcubo CN (spw25) componente 1 (superior) y componente 2 (inferior) con emisión significativa (tras el umbral de RMS), proyectados en offsets de R.A. y Dec. [arcsec]. Los puntos naranjos representan la trayectoria promedio observacional (*means*) construida por TIPSY al agrupar la emisión en bins a lo largo de la estructura; las barras indican la dispersión asociada en cada bin. Desde la región de inicio del flujo se ilustran posibles direcciones iniciales en el plano del cielo usadas para explorar el espacio de parámetros del modelo balístico: la flecha negra marca la dirección adoptada por el mejor ajuste dentro del conjunto evaluado. (Gupta et al., 2024).



(a) Espacio de parámetros para la componente 1.



(b) Espacio de parámetros para la componente 2.

Figure 4.5: Se muestra un corte del grid fijando el ángulo inicial $v_{xy,ang,0}$ al valor del mejor ajuste para el streamer CN spw25 componente 1 y 2 respectivamente. Para cada uno: **Izquierda** fracción de ajuste ($fit_fraction$), definida como la proporción de bins del *streamer* cuya diferencia modelo-datos es menor que la dispersión observada. **Derecha** métrica global de desviación ($deviation$) según la definición interna del código. La cruz roja marca la solución óptima y las barras indican las incertidumbres estimadas para $v_{xy,0}$ y z_0 a partir del conjunto de soluciones aceptables (Gupta et al., 2024).

Table 4.4: Propiedades derivadas para CN (spw25) componente 1.

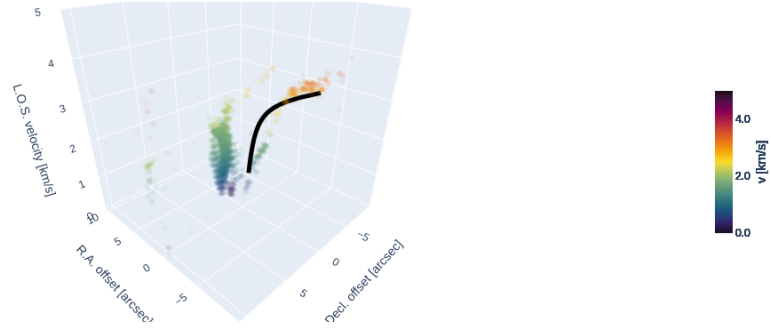
Cantidad	Valor
Longitud 3D L_{3D} [au]	2776.3
Longitud proyectada L_{proj} [au]	1103.3
Tiempo característico (<code>final.time</code>) [yr]	2794.683535 ± 109.4093
Flujo integrado de línea [W m^{-2}]	2.63×10^{-21}
M_{gas} [M_{\odot}]	1.086×10^{-3}
\dot{M} [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$]	3.887×10^{-7}

L_{3D} y L_{proj} se obtienen integrando el arco de la trayectoria ajustada (3D y proyectada, respectivamente). El tiempo `final.time` corresponde al tiempo característico del modelo balístico de mejor ajuste hasta congruencia física. Las estimaciones M_{gas} y \dot{M} asumen LTE y emisión ópticamente delgada, adoptando parámetros moleculares de CN (A_{ul} , E_u , $Q(T)$, g_u y una abundancia x_{CN} ; ver LAMDA Team, 2026) y un tratamiento consistente de la estructura hiperfina.

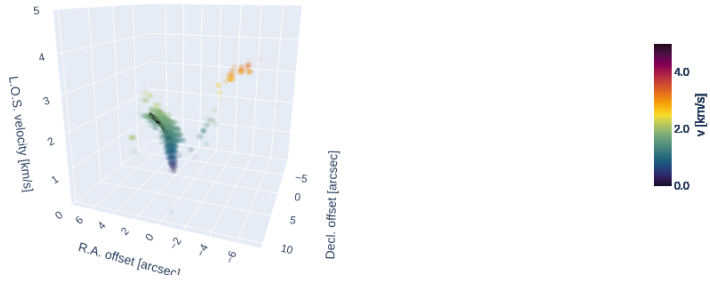
Table 4.5: Propiedades derivadas para CN (spw25) componente 2.

Cantidad	Valor
Longitud 3D L_{3D} [au]	2765.5
Longitud proyectada L_{proj} [au]	595.9
Tiempo característico (<code>final.time</code>) [yr]	2308 ± 560
Flujo integrado de línea [W m^{-2}]	4.33×10^{-21}
M_{gas} [M_{\odot}]	1.464×10^{-3}
\dot{M} [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$]	6.345×10^{-7}

L_{3D} y L_{proj} se obtienen integrando el arco de la trayectoria ajustada (3D y proyectada, respectivamente). El tiempo `final.time` corresponde al tiempo característico del modelo balístico de mejor ajuste hasta congruencia física. Las estimaciones M_{gas} y \dot{M} asumen LTE y emisión ópticamente delgada, adoptando parámetros moleculares de CN (A_{ul} , E_u , $Q(T)$, g_u y una abundancia x_{CN} ; ver LAMDA Team, 2026) y un tratamiento consistente de la estructura hiperfina.



(a) Trayectoria completa para la componente 1.



(b) Trayectoria completa para la componente 2.

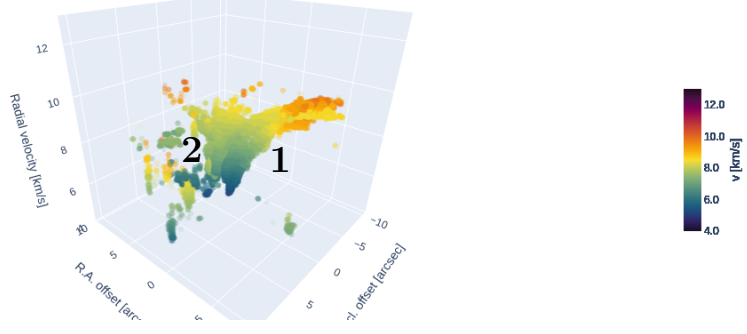
Figure 4.6: La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSY en el cubo completo de datos para CN spw25. (Gupta et al., 2024; Mendoza et al., 2009).

los dos recorridos predominantes.

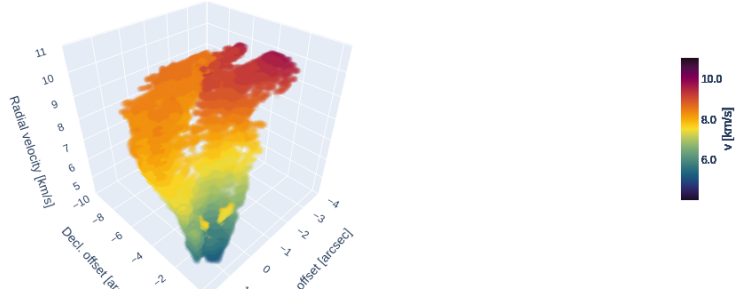
En esta ocasión para su componente 1, se pueden apreciar dos corrientes que siguen una misma cinemática global, por lo que se agrupan dentro de una misma componente cinemática con el fin de obtener el recorrido promedio de la zona. A diferencia de la componente 2, la cual se debe restringir aún más debido a que como se aprecia, en esta molécula existe gran cantidad de interacción a medida que se disminuye la distancia radial, junto con que es más visible el punto de interacción entre ambas componentes de estudio.

Es por eso que se evidencia que el campo presenta múltiples puntos de origen y zonas de interacción a radios pequeños, lo que limita la identificación de streamers estrictamente aislados con un recorte PPV único para una restricción coherente de estudio.

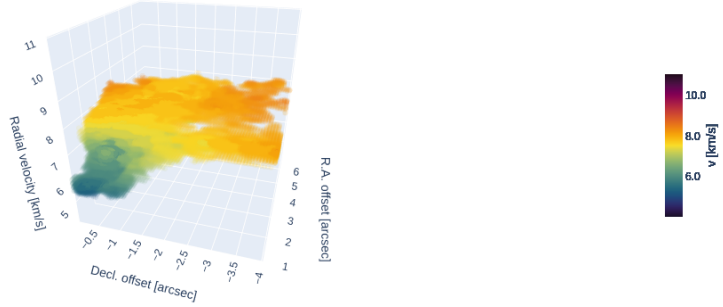
Aún así, es posible generar un ajuste y modelo que represente de forma general la dirección y el recorrido consistente de gran parte de estos materiales hacia el punto central del sistema. Figure 4.9. Nuevamente desde condiciones iniciales Table 4.6 y Table 4.7, pero que las grandes incertidumbres reflejan degeneraciones del ajuste en el espacio de parámetros debido a superposición cinemática en PPV. Con una discretización del recorrido Figure 4.10 y un rango de parámetros Figure 4.11, se obtiene como resultado la trayectoria promedio de ambas componentes Figure 4.12, junto con sus propiedades de interés Table 4.8 y Table 4.9.



(a) PPV del cubo completo (H_2CO -spw29).



(b) PPV del subcubo (componente 1).



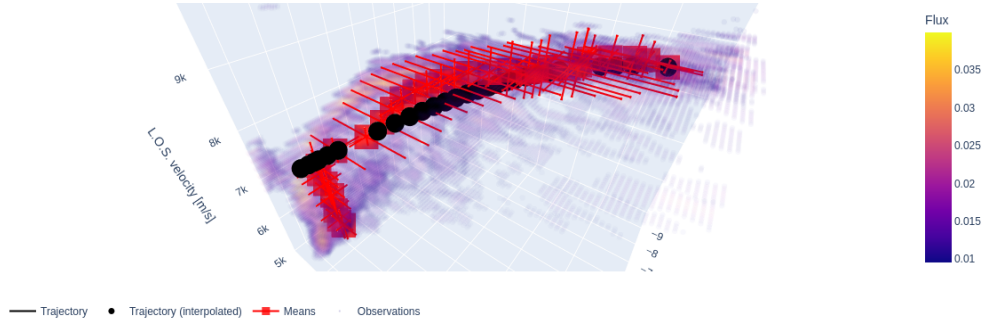
(c) PPV del subcubo (componente 2).

Figure 4.7: Diagramas PPV del trazador molecular H_2CO para el cubo de datos de la spw29. (a) Visualización del cubo completo, utilizada para identificar estructuras elongadas coherentes en velocidad. (b) Subcubo adoptado para aislar la componente 1. (c) Subcubo adoptado para aislar la componente 2.

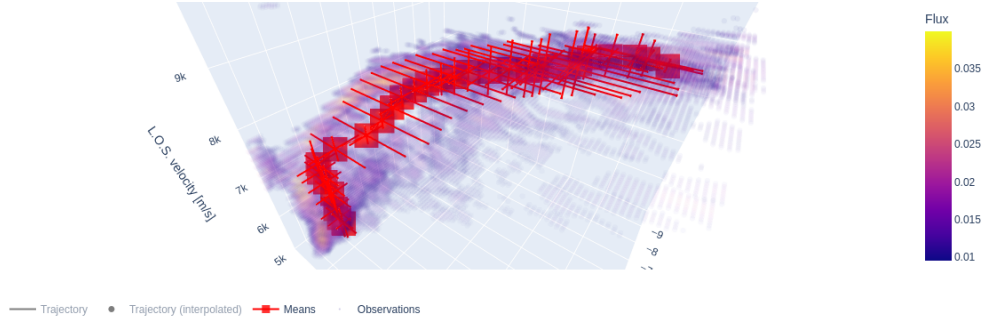
Table 4.6: Parámetros del modelo balístico para H_2CO (spw29) componente 1.

Parámetro	Mejor ajuste	Incertidumbre
z_0 [au]	-400	—
$v_{xy,0}$ [km s^{-1}]	0.649	± 0.162
$v_{xy,ang,0}$ [$^\circ$]	0.909	± 0.087
$fit_fraction$	0.86	—
$deviation$	698.68	—

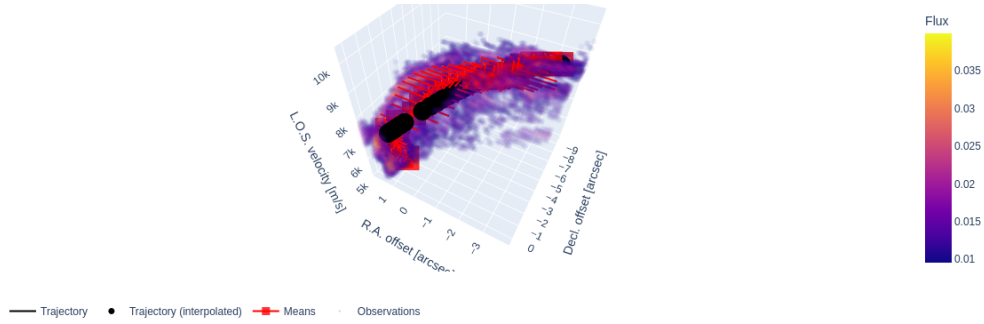
z_0 es la separación inicial a lo largo de la línea de visión (profundidad) del punto de partida respecto al plano del cielo. $v_{xy,0}$ es el módulo de la velocidad inicial en el plano del cielo y $v_{xy,ang,0}$ define su dirección (medida desde el eje x del sistema de TIPSy). $fit_fraction$ cuantifica la fracción de bins cuya cinemática es reproducida por el modelo dentro de la dispersión observada y $deviation$ es la métrica global de discrepancia usada para ordenar soluciones.



(a) Ajuste balístico en el espacio PPV.



(b) Geometría PPV del streamer sin la curva dominante.



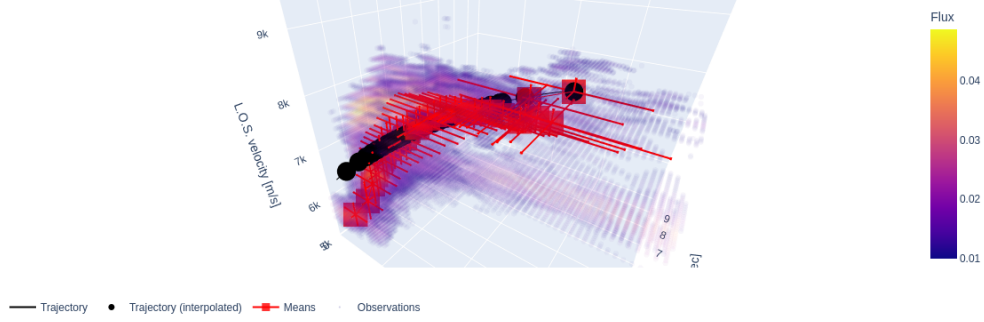
(c) Visión completa del ajuste balístico en el espacio PPV.

Figure 4.8: Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para H_2CO (spw29) componente 1; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSy al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).

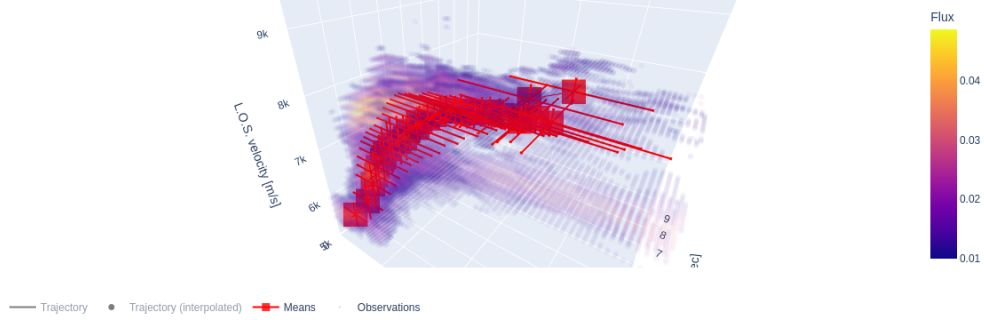
Table 4.7: Parámetros del modelo balístico para H_2CO (spw29) componente 2.

Parámetro	Mejor ajuste	Incertidumbre
z_0 [au]	0	± 388
$v_{xy,0}$ [km s^{-1}]	0.198	± 0.66
$v_{xy,\text{ang},0}$ [$^\circ$]	2.431	± 0.398
<i>fit_fraction</i>	0.9	—
<i>deviation</i>	900.47	—

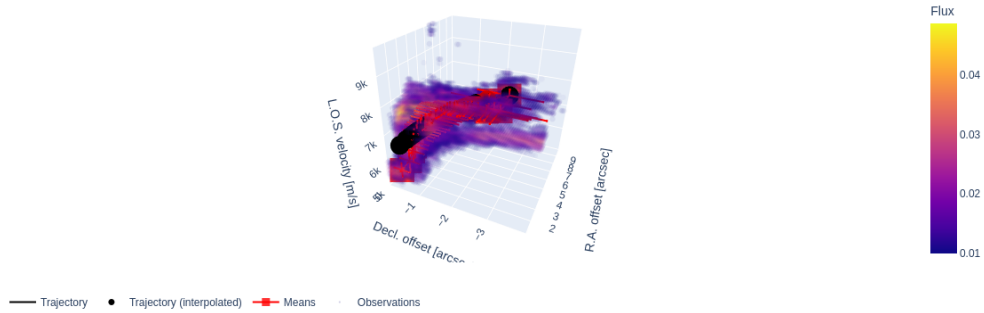
z_0 es la separación inicial a lo largo de la línea de visión (profundidad) del punto de partida respecto al plano del cielo. $v_{xy,0}$ es el módulo de la velocidad inicial en el plano del cielo y $v_{xy,\text{ang},0}$ define su dirección (medida desde el eje x del sistema de TIPSy). *fit_fraction* cuantifica la fracción de bins cuya cinemática es reproducida por el modelo dentro de la dispersión observada y *deviation* es la métrica global de discrepancia usada para ordenar soluciones.



(a) Ajuste balístico en el espacio PPV.



(b) Geometría PPV del streamer sin la curva dominante.



(c) Visión completa del ajuste balístico en el espacio PPV.

Figure 4.9: Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para H_2CO (spw29) componente 2; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSy al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).

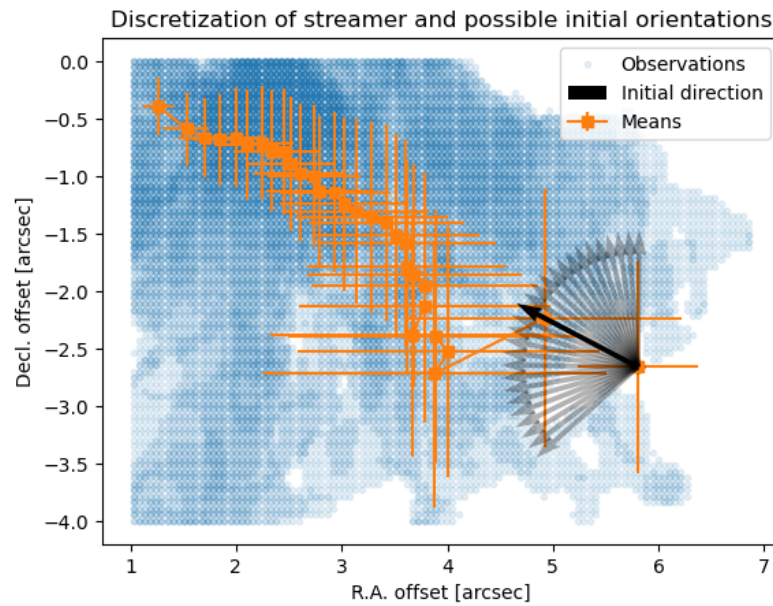
Table 4.8: Propiedades derivadas para H_2CO (spw29) componente 1.

Cantidad	Valor
Longitud 3D L_{3D} [au]	1652.3
Longitud proyectada L_{proj} [au]	1114.1
Tiempo característico (<code>final.time</code>) [yr]	4347.8 ± 2.7
Flujo integrado de línea [W m^{-2}]	1.89×10^{-20}
$M_{\text{gas}} [M_{\odot}]$	2.9288×10^{-3}
$\dot{M} [M_{\odot} \text{ yr}^{-1}]$	6.7362×10^{-7}

L_{3D} y L_{proj} se obtienen integrando el arco de la trayectoria ajustada (3D y proyectada, respectivamente). El tiempo `final.time` corresponde al tiempo característico del modelo balístico de mejor ajuste hasta congruencia física. Las estimaciones M_{gas} y \dot{M} asumen LTE y emisión ópticamente delgada, adoptando parámetros moleculares de H_2CO (A_{ul} , E_u , $Q(T)$, g_u) y una abundancia $x_{\text{H}_2\text{CO}}$ (ver LAMDA Team, 2026).

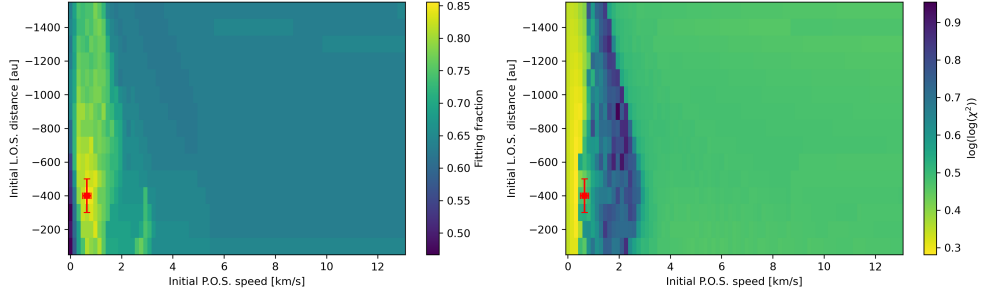


(a) Discretización del recorrido para la componente 1.

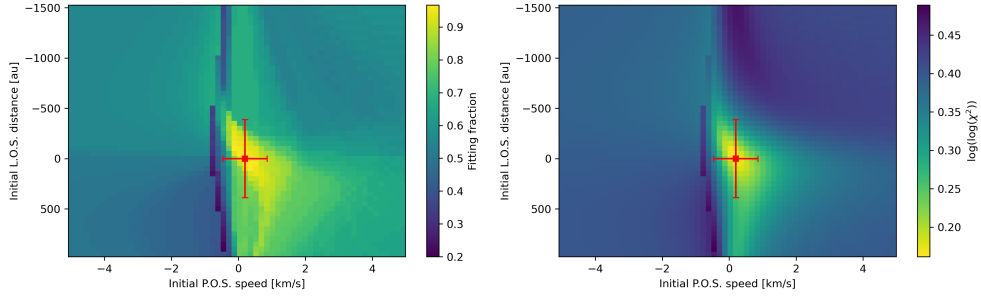


(b) Discretización del recorrido para la componente 2.

Figure 4.10: La nube azul corresponde a los píxeles (2D) del subcubo H_2CO (spw29) componente 1 (superior) y componente 2 (inferior) con emisión significativa (tras el umbral de RMS), proyectados en offsets de R.A. y Dec. [arcsec]. Los puntos naranjos representan la trayectoria promedio observacional (*means*) construida por TIPSY al agrupar la emisión en bins a lo largo de la estructura; las barras indican la dispersión asociada en cada bin. Desde la región de inicio del flujo se ilustran posibles direcciones iniciales en el plano del cielo usadas para explorar el espacio de parámetros del modelo balístico: la flecha negra marca la dirección adoptada por el mejor ajuste dentro del conjunto evaluado. (Gupta et al., 2024).



(a) Espacio de parámetros para la componente 1.



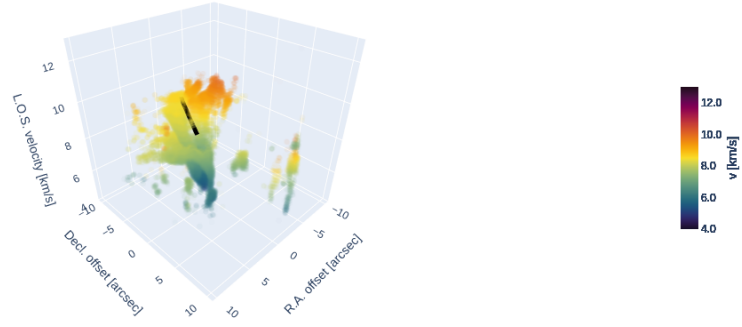
(b) Espacio de parámetros para la componente 2.

Figure 4.11: Se muestra un corte del grid fijando el ángulo inicial $v_{xy,ang,0}$ al valor del mejor ajuste para el streamer H₂CO spw29 componente 1 y 2 respectivamente. Para cada uno: **Izquierda** fracción de ajuste (*fit_fraction*), definida como la proporción de bins del *streamer* cuya diferencia modelo-datos es menor que la dispersión observada. **Derecha** métrica global de desviación (*deviation*) expresada según la definición interna del código. La cruz roja marca la solución óptima y las barras indican las incertidumbres estimadas para $v_{xy,0}$ y z_0 a partir del conjunto de soluciones aceptables (Gupta et al., 2024).

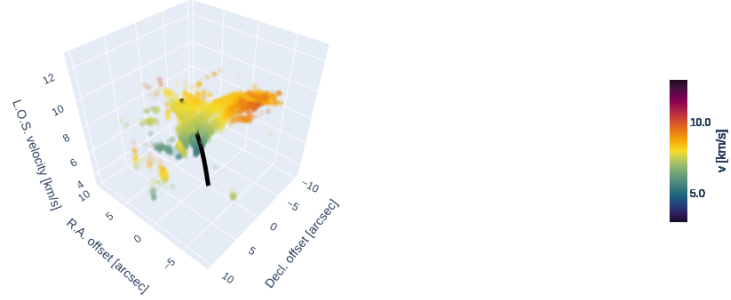
Table 4.9: Propiedades derivadas para H₂CO (spw29) componente 2.

Cantidad	Valor
Longitud 3D L_{3D} [au]	903.6
Longitud proyectada L_{proj} [au]	731.3
Tiempo característico (<i>final_time</i>) [yr]	4062.1 ± 3962
Flujo integrado de línea [$W m^{-2}$]	1.599×10^{-20}
M_{gas} [M_{\odot}]	2.4831×10^{-3}
\dot{M} [$M_{\odot} yr^{-1}$]	6.1129×10^{-7}

L_{3D} y L_{proj} se obtienen integrando el arco de la trayectoria ajustada (3D y proyectada, respectivamente). El tiempo *final_time* corresponde al tiempo característico del modelo balístico de mejor ajuste hasta congruencia física. Las estimaciones M_{gas} y \dot{M} asumen LTE y emisión ópticamente delgada, adoptando parámetros moleculares de H₂CO (A_{ul} , E_u , $Q(T)$, g_u) y una abundancia x_{H_2CO} (ver LAMDA Team, 2026).



(a) Trayectoria completa para la componente 1.



(b) Trayectoria completa para la componente 2.

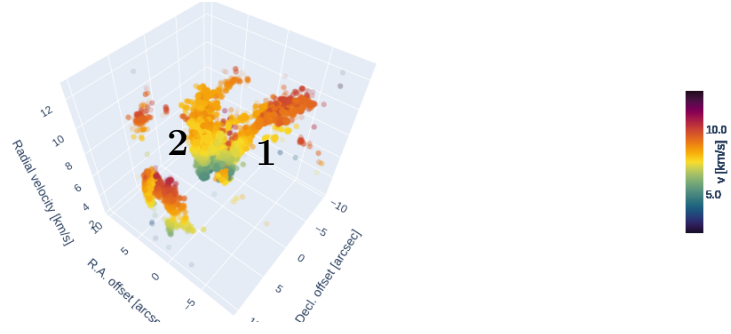
Figure 4.12: La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSY en el cubo completo de datos para H₂CO spw29. (Gupta et al., 2024; Mendoza et al., 2009).

4.3 CN - SPW31 - 226.874781 GHz

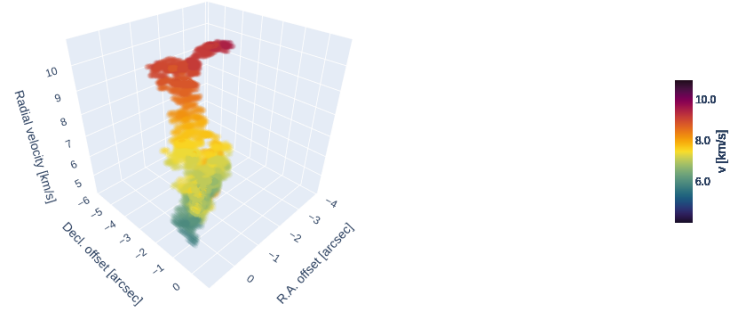
Para este segundo grupo molecular de CN, se puede apreciar una morfología similar del gas al caso de la spw25. Dado que al tratarse de la misma especie y transición rotacional N=2-1, pero en un grupo hiperfino distinto, tendrán un comportamiento en su distribución similar, pero con variaciones locales de intensidad asociadas a diferencias en la estructura hiperfina y condiciones de excitación [Figure 4.13](#).

Aún así, el procedimiento consiste en lo mismo, restringir ambas componentes para obtener una trayectoria balística de similar comportamiento [Figure 4.14](#) y [Figure 4.15](#). Desde parámetros iniciales [Table 4.10](#) y [Table 4.11](#), con su trayectoria inicial discretizada [Figure 4.16](#) y su rango señalado en [Figure 4.17](#).

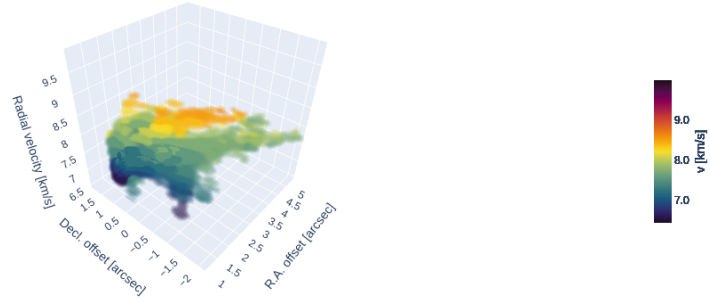
De este modo se obtienen las trayectorias balísticas que logran representar en su gran medida el recorrido de este material infall [Figure 4.18](#), resolviendo posteriormente sus propiedades de interés [Table 4.12](#) y [Table 4.13](#).



(a) PPV del cubo completo (CN-spw31).



(b) PPV del subcubo (componente 1).



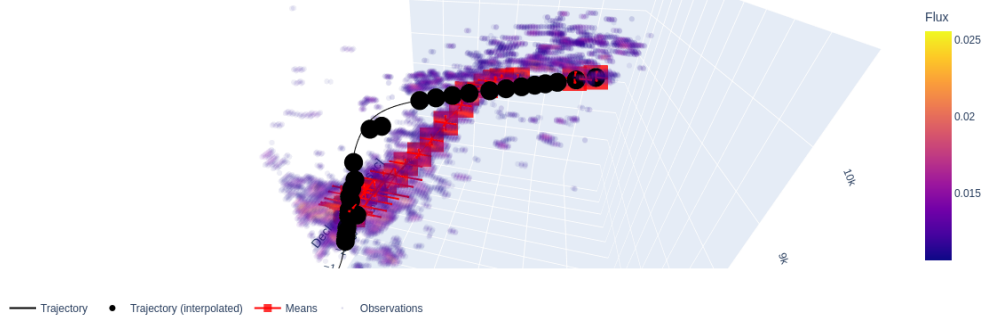
(c) PPV del subcubo (componente 2).

Figure 4.13: Diagramas PPV del trazador molecular CN para el cubo de datos de la spw31. (a) Visualización del cubo completo, utilizada para identificar estructuras elongadas coherentes en velocidad. (b) Subcubo adoptado para aislar la componente 1. (c) Subcubo adoptado para aislar la componente 2.

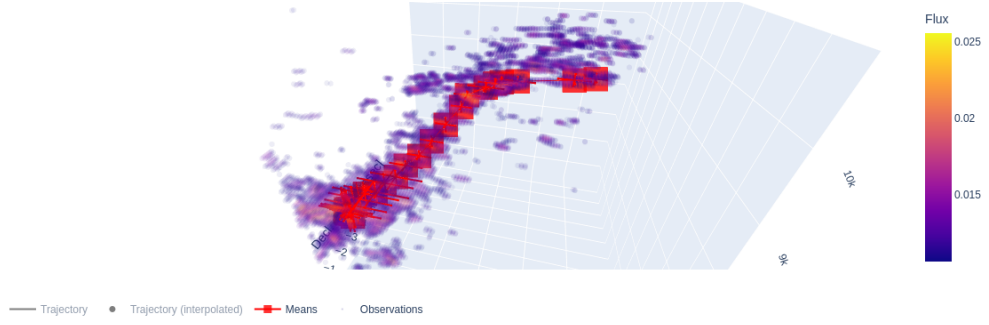
Table 4.10: Parámetros del modelo balístico para CN (spw31) componente 1.

Parámetro	Mejor ajuste	Incertidumbre
z_0 [au]	-150	± 50
$v_{xy,0}$ [km s^{-1}]	7.555	± 0.162
$v_{xy,ang,0}$ [$^\circ$]	52.53	± 5.00
<i>fit_fraction</i>	0.46	—
<i>deviation</i>	900.47	—

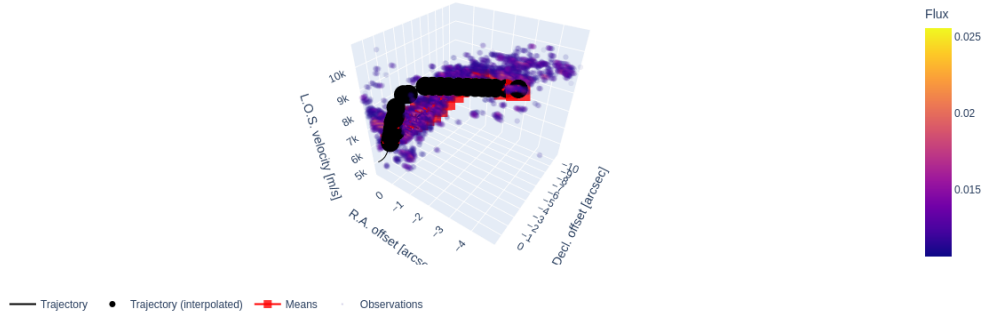
z_0 es la separación inicial a lo largo de la línea de visión (profundidad) del punto de partida respecto al plano del cielo. $v_{xy,0}$ es el módulo de la velocidad inicial en el plano del cielo y $v_{xy,ang,0}$ define su dirección (medida desde el eje x del sistema de TIPSy). *fit_fraction* cuantifica la fracción de bins cuya cinemática es reproducida por el modelo dentro de la dispersión observada y *deviation* es la métrica global de discrepancia usada para ordenar soluciones.



(a) Ajuste balístico en el espacio PPV.



(b) Geometría PPV del streamer sin la curva dominante.



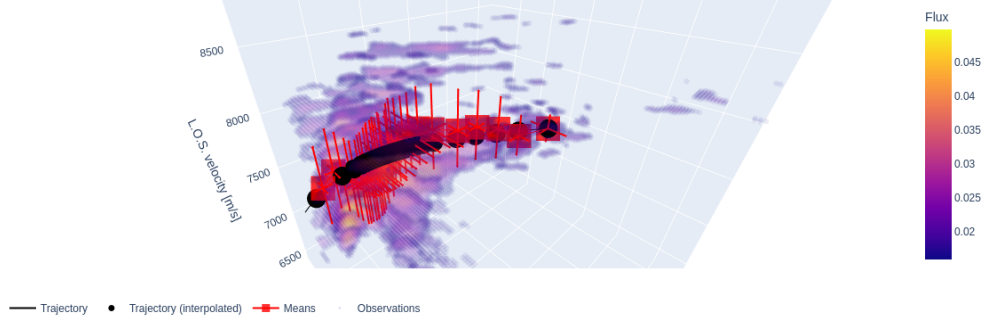
(c) Visión completa del ajuste balístico en el espacio PPV.

Figure 4.14: Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para CN (spw31) componente 1; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSY al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).

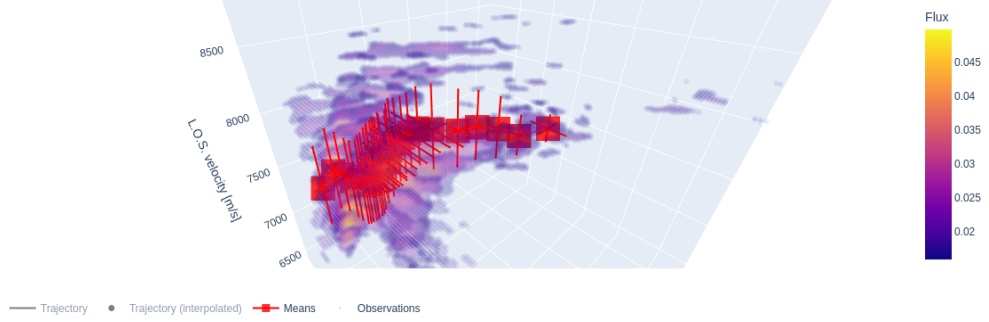
Table 4.11: Parámetros del modelo balístico para CN (spw31) componente 2.

Parámetro	Mejor ajuste	Incertidumbre
z_0 [au]	-50.0	± 1228.9
$v_{xy,0}$ [km s^{-1}]	2.433	± 3.387
$v_{xy,ang,0}$ [$^\circ$]	143.73	± 5.00
$fit_fraction$	1.00	—
$deviation$	18.16	—

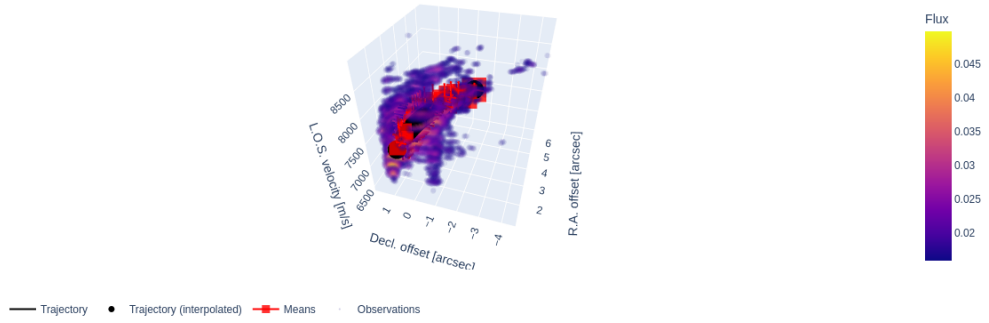
z_0 es la separación inicial a lo largo de la línea de visión (profundidad) del punto de partida respecto al plano del cielo. $v_{xy,0}$ es el módulo de la velocidad inicial en el plano del cielo y $v_{xy,ang,0}$ define su dirección (medida desde el eje x del sistema de TIPSY). $fit_fraction$ cuantifica la fracción de bins cuya cinemática es reproducida por el modelo dentro de la dispersión observada y $deviation$ es la métrica global de discrepancia usada para ordenar soluciones.



(a) Ajuste balístico en el espacio PPV.



(b) Geometría PPV del streamer sin la curva dominante.



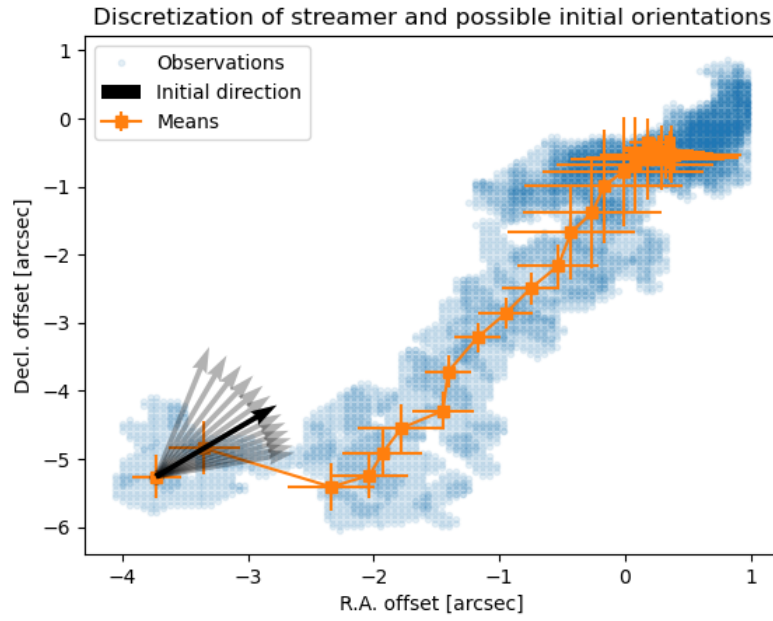
(c) Visión completa del ajuste balístico en el espacio PPV.

Figure 4.15: Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para CN (spw31) componente 2; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSY al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).

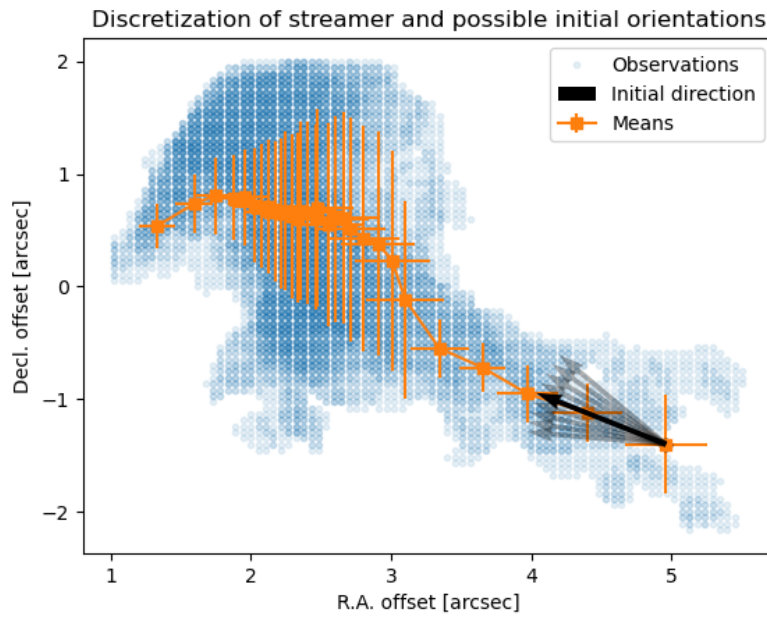
Table 4.12: Propiedades derivadas para CN (spw31) componente 1.

Cantidad	Valor
Longitud 3D L_{3D} [au]	906.9
Longitud proyectada L_{proj} [au]	877.9
Tiempo característico (<code>final.time</code>) [yr]	546 ± 27
Flujo integrado de línea [W m^{-2}]	5.64×10^{-21}
$M_{\text{gas}} [M_{\odot}]$	1.224×10^{-3}
$\dot{M} [M_{\odot} \text{ yr}^{-1}]$	2.2424×10^{-6}

L_{3D} y L_{proj} se obtienen integrando el arco de la trayectoria ajustada (3D y proyectada, respectivamente). El tiempo `final.time` corresponde al tiempo característico del modelo balístico de mejor ajuste hasta congruencia física. Las estimaciones M_{gas} y \dot{M} asumen LTE y emisión ópticamente delgada, adoptando parámetros moleculares de CN (A_{ul} , E_u , $Q(T)$, g_u y una abundancia x_{CN} ; ver LAMDA Team, 2026) y un tratamiento consistente de la estructura hiperfina.

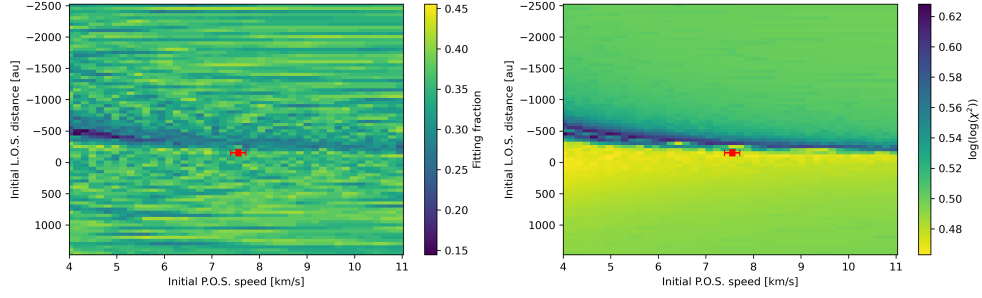


(a) Discretización del recorrido para la componente 1.

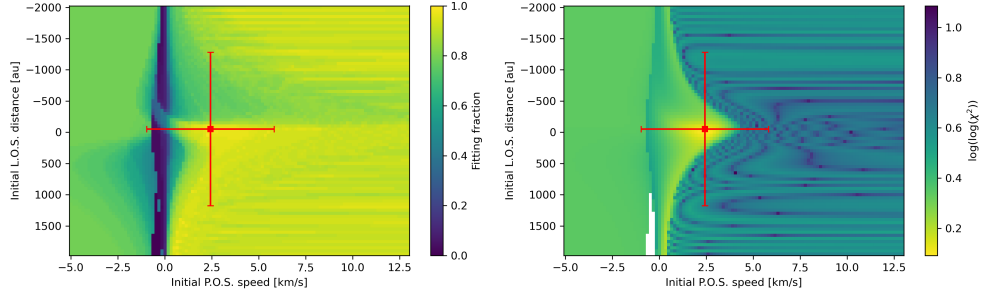


(b) Discretización del recorrido para la componente 2.

Figure 4.16: La nube azul corresponde a los píxeles (2D) del subcubo CN (spw31) componente 1 (superior) y componente 2 (inferior) con emisión significativa (tras el umbral de RMS), proyectados en offsets de R.A. y Dec. [arcsec]. Los puntos naranjos representan la trayectoria promedio observacional (*means*) construida por TIPSY al agrupar la emisión en bins a lo largo de la estructura; las barras indican la dispersión asociada en cada bin. Desde la región de inicio del flujo se ilustran posibles direcciones iniciales en el plano del cielo usadas para explorar el espacio de parámetros del modelo balístico: la flecha negra marca la dirección adoptada por el mejor ajuste dentro del conjunto evaluado. (Gupta et al., 2024).



(a) Espacio de parámetros para la componente 1.



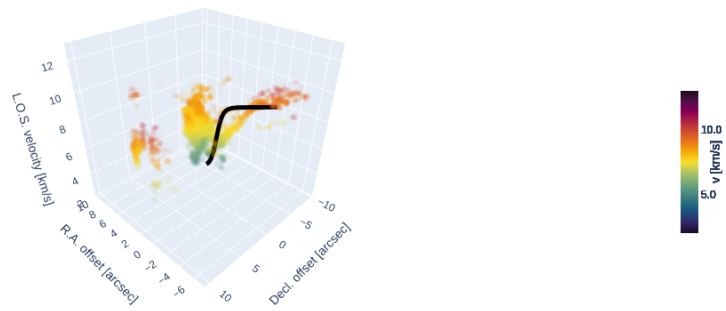
(b) Espacio de parámetros para la componente 2.

Figure 4.17: Se muestra un corte del grid fijando el ángulo inicial $v_{xy,ang,0}$ al valor del mejor ajuste para el streamer CN spw31 componente 1 y 2 respectivamente. Para cada uno: **Izquierda** fracción de ajuste (*fit_fraction*), definida como la proporción de bins del *streamer* cuya diferencia modelo-datos es menor que la dispersión observada. **Derecha** métrica global de desviación (*deviation*) expresada según la definición interna del código. La cruz roja marca la solución óptima y las barras indican las incertidumbres estimadas para $v_{xy,0}$ y z_0 a partir del conjunto de soluciones aceptables (Gupta et al., 2024).

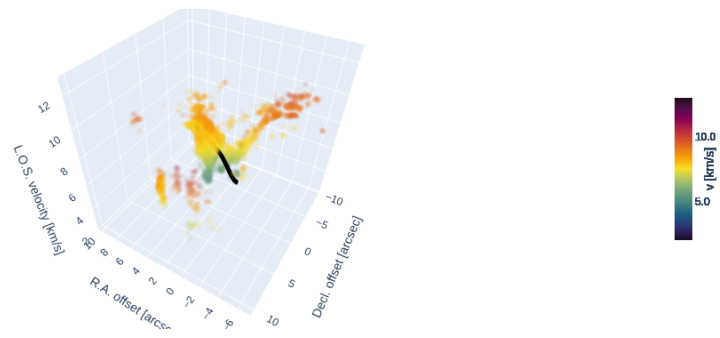
Table 4.13: Propiedades derivadas para CN (spw31) componente 2.

Cantidad	Valor
Longitud 3D L_{3D} [au]	815.0
Longitud proyectada L_{proj} [au]	734.8
Tiempo característico (<i>final.time</i>) [yr]	1183 ± 28501
Flujo integrado de línea [W m^{-2}]	9.749×10^{-21}
M_{gas} [M_{\odot}]	2.115×10^{-3}
\dot{M} [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$]	1.788×10^{-6}

L_{3D} y L_{proj} se obtienen integrando el arco de la trayectoria ajustada (3D y proyectada, respectivamente). El tiempo *final.time* corresponde al tiempo característico del modelo balístico de mejor ajuste hasta congruencia física. Las estimaciones M_{gas} y \dot{M} asumen LTE y emisión ópticamente delgada, adoptando parámetros moleculares de CN (A_{ul} , E_u , $Q(T)$, g_u y una abundancia x_{CN} ; ver LAMDA Team, 2026) y un tratamiento consistente de la estructura hiperfina.



(a) Trayectoria completa para la componente 1.



(b) Trayectoria completa para la componente 2.

Figure 4.18: La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSYS en el cubo completo de datos para CN spw31. (Gupta et al., 2024; Mendoza et al., 2009).

Chapter 5

Discusión

Este trabajo constituye el primer estudio dedicado a la identificación y caracterización de streamers moleculares en el sistema múltiple T Tau usando cubos interferométricos de ALMA en Banda 6 y un modelado cinemático de primer orden. El objetivo de este trabajo fue generar un modelo aislando las estructuras moleculares que fuesen coherentes con la descripción de un streamer en el espacio PPV. Se ajustaron trayectorias siguiendo un modelo balístico utilizando el código TIPSYS donde se derivaron propiedades físicas como longitud del streamer, flujo integrado de línea, masas y tasas de acreción, que fueron comparados con otros sistemas [Valdivia-Mena et al. \(2022\)](#); [Han et al. \(2025\)](#); [Valdivia-Mena et al. \(2024\)](#); [Gupta et al. \(2024\)](#); [Flores et al. \(2023\)](#).

Respecto a los valores obtenidos [Table 5.1](#) se debe enfatizar que deben interpretarse como cotas inferiores debido a la complejidad de modelar mediante un único centro de potencial en el origen de coordenadas, y aunque T Tau es un sistema triple ([Beck et al., 2020](#)), una parte de la cinemática aislada es consistente con un escenario dominado por gravedad.

Table 5.1: Resumen de propiedades derivadas y calidad del ajuste para todas las componentes modeladas.

Trazador	Comp.	L_{3D} [au]	L_{proj} [au]	F [W m^{-2}]	M_{gas} [M_{\odot}]	\dot{M} [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$]	fit_fraction	deviation
CN spw25	1	2776	1103	2.6×10^{-21}	1.09×10^{-3}	3.89×10^{-7}	0.77	314
CN spw25	2	2766	596	4.3×10^{-21}	1.46×10^{-3}	6.35×10^{-7}	1.00	16.8
H ₂ CO spw29	1	1652	1114	1.9×10^{-20}	2.93×10^{-3}	6.74×10^{-7}	0.86	699
H ₂ CO spw29	2	904	731	1.6×10^{-20}	2.48×10^{-3}	6.11×10^{-7}	0.90	900
CN spw31	1	907	878	5.6×10^{-21}	1.22×10^{-3}	2.24×10^{-6}	0.46	900
CN spw31	2	815	735	9.7×10^{-21}	2.12×10^{-3}	1.79×10^{-6}	1.00	18.2

5.1 Geometría y modelo balístico

Un resultado robusto es que la relación entre longitudes L_{3D} y L_{proj} varía significativamente entre trazadores y componentes, lo que sugiere geometrías 3D distintas. En particular, para CN (spw25) se obtiene $L_{3D} \gg L_{proj}$, indicando que una fracción importante de la trayectoria se proyecta a lo largo de la línea de visión, consistente además con valores de $|z_0|$ del orden de $\sim 2.6 \times 10^3$ [au]. En contraste, para H₂CO (spw29) y CN (spw31) se obtiene típicamente $L_{3D} \approx L_{proj}$, compatible con trayectorias más cercanas al plano del cielo.

Para la componente 1 de la molécula CN (spw25) muestra un ajuste razonable con fit fraction ≈ 0.77 , pero con una desviación ~ 314 mayor que aún

así describe bien la cinemática promedio. En contraste con la componente 2, presenta un ajuste muy alto con fit fraction ≈ 1 y baja desviación ~ 17 , sugiriendo que el subcubo aislado y su trayectoria son altamente compatibles.

Para H₂CO (spw29), ambas componentes logran un ajuste alto con una fit fraction ≈ 0.86 para la componente 1 y $\approx 0,9$ para la componente 2, pero con desviaciones grandes ~ 699 y ~ 900 respectivamente. Esto es coherente con lo observado en los diagramas PPV donde, como se mencionó anteriormente, presenta una morfología más extensa y con mezcla de flujos. Es por esto que el modelo balístico simple actúa completamente como promedio de la tendencia cinemática general, más que como un ajuste cercano a un único flujo determinado.

En CN (spw31), las componentes muestran comportamientos muy diferentes. Para el caso de la componente 1 tiene fit fraction baja ≈ 0.46 y alta desviación ~ 900 , mientras que la componente 2 ajusta casi perfectamente con fit fraction ≈ 1 y baja desviación ~ 18 . Estos resultados indican que la componente 2 de CN (spw31) puede describirse físicamente mediante un modelo balístico simple, mientras que la componente 1 no es compatible con una única trayectoria balística, probablemente debido a la superposición de flujos o a una geometría más compleja.

5.2 Comparación con trabajos previos

En trabajos previos, los streamers se han ido consolidando como un mecanismo y estructura observable de acreción que conecta escalas de la envoltura con las escalas cercanas al disco (Tobin & Sheehan, 2024; Pineda et al., 2023). Por ejemplo, (Valdivia-Mena et al., 2024) muestra que no son estructuras raras, ya que ProPStar II reporta una incidencia global de detección de $\sim 40\%$ y de $\sim 60\%$ en fuentes embebidas Clase 0-I, y en general, las longitudes reportadas en la literatura abarcan desde $\sim 10^3$ hasta $\sim 10^4$ [au] dependiendo de la escala (Tobin & Sheehan, 2024). Para el caso de objetos más evolucionados (Clase II), también destaca la existencia con longitudes menores ($\sim 3\text{-}5 \times 10^2$ [au]), aunque con brazos y/o exenciones que alcanzan $\sim 2 \times 10^3$ [au].

T Tau muestra también dos flujos principales (definidas componentes 1 y 2) que se detectan en los distintos trazadores estudiados. Dichas longitudes ($\sim 0.8\text{-}2.8 \times 10^3$ [au]) están en el rango típico de unión entre escalas típicas de Clase I y de los casos más extendidos reportados. Siendo esto consistente para un sistema dinámicamente complejo (Momose et al., 1996; Beck et al., 2020).

PRODIGE (Valdivia-Mena et al., 2022) presenta un caso prototipo de un streamer de ~ 3000 [au] que está alimentando una protoestrella Clase I, interpretado finalmente como un canal dominante de entrega de masa a escalas de disco. Por otro lado para HL Tau, Gupta et al. (2024) modelan un streamer de unas pocas centenas de au y reportan un parámetro geométrico de profundidad/offset en línea de visión de $z_0 = -1400 \pm 573$ [au], que usamos como escala tridimensional característica del ajuste (no como longitud total) y $z_0 = +3001 \pm 50$ [au] para S CrA, siendo estas a escalas comparables para las estructuras más compactas que en este estudio se trazan en el grupo de

CN(spw31). En la Fig. 5.1 presentamos un resumen del número de streamers presentes en diferentes sistemas, incluido este trabajo, y su longitud.

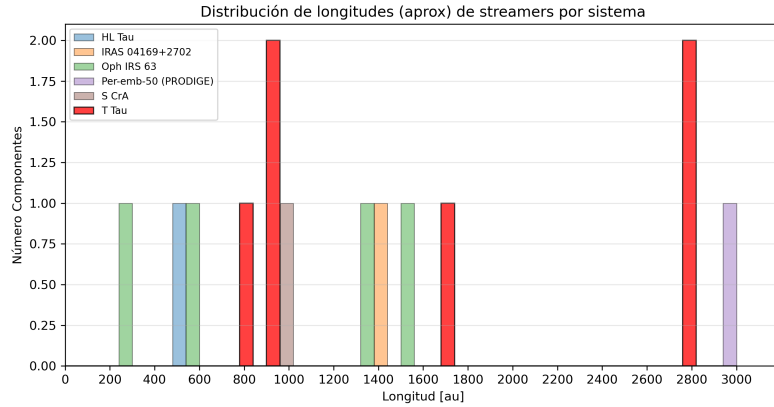


Figure 5.1: Histograma de longitudes de streamers estimadas para distintos sistemas (cada color corresponde a un sistema; ver leyenda). Las longitudes provienen de este trabajo (T Tau; CN y H₂CO) y de la literatura HL Tau (HCO⁺), S CrA (¹³CO, Oph IRS 63 (C¹⁸O/SO, IRAS 04169+270 (C¹⁸O,SO,H₂CO) y Per-emb-50(H₂CO/C¹⁸O).

Respecto a los valores de las tasas de infall, T Tau alcanza órdenes entre $\dot{M} \sim 10^{-7}$ - $10^{-6} [M_{\odot} \text{ yr}^{-1}]$ derivados desde la emisión de los subcubos de los trazadores CN y H₂CO. Por ejemplo, las tasas reportadas en Per-emb-50 son en líneas de C¹⁸O y H₂CO, por ser trazadores relativamente ópticamente delgados, con órdenes de ($\sim 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$) para un streamer a escala de ~ 3000 [au] en una fuente embebida (Valdivia-Mena et al., 2022). Y si bien, el orden de magnitud es comparable para los obtenidos para T Tau, se debe interpretar con cuidado cuando los trazadores difieren en opacidad, excitación y región del sistema que muestrean.

La comparación entre la masa de gas asociada a cada componente y su tasa de infall Figure 5.2 muestra que, aunque M_{gas} se mantiene en un rango relativamente acotado de $\sim 10^{-3} [M_{\odot}]$ para todos los trazadores, las tasas \dot{M} presentan una separación clara. En particular, CN(spw25) entrega $M_{\text{gas}} = (1.09-1.46) \times 10^{-3} [M_{\odot}]$ y $\dot{M} = (3.89-6.35) \times 10^{-7} [M_{\odot} \text{ yr}^{-1}]$, mientras que H₂CO(spw29) concentra las mayores masas $M_{\text{gas}} = (2.48-2.93) \times 10^{-3} [M_{\odot}]$ con tasas comparables $\dot{M} = (6.11-6.74) \times 10^{-7} [M_{\odot} \text{ yr}^{-1}]$. En contraste, CN(spw31) arroja tasas significativamente más altas, $\dot{M} = (1.79-2.24) \times 10^{-6} [M_{\odot} \text{ yr}^{-1}]$, para masas $M_{\text{gas}} = (1.22-2.12) \times 10^{-3} [M_{\odot}]$, es decir, masas comparables pero con un infall más intenso.

A masas similares, el hecho de que CN(spw31) produzca \dot{M} mayores sugiere que la tasa inferida no está controlada solo por M_{gas} , sino por la cinemática (velocidades/proyección) y por qué fracción del flujo es muestreada por cada trazador (opacidad, excitación y abundancia efectiva).

Además, también importa la etapa evolutiva en la que se encuentran. Per-emb-50 es una fuente embebida (Clase 0/I), donde aún existe una envoltura masiva y, por consiguiente, mayor reserva de gas disponible para generar esta alimentación a estructuras de gran escala. Por el contrario, T Tau es un sis-

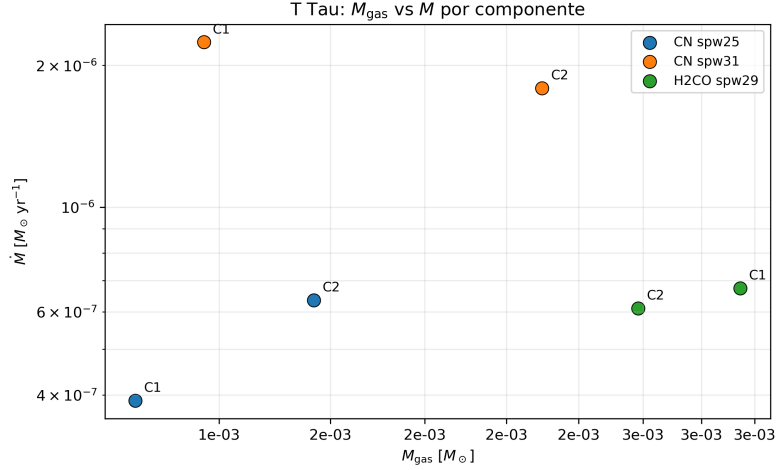


Figure 5.2: Relación entre la masa de gas asociada a cada componente de streamer en T Tau (M_{gas}) y su tasa de infall (\dot{M}), estimadas a partir del modelado balístico. Los puntos están separados por trazador (CN spw25, H₂CO spw29 y CN spw31) y las etiquetas C1-C2 indican cada componente dentro de un mismo trazador.

tema más evolucionado (Clase II), por lo que ya atravesó una fase principal de acreción y por lo tanto, dispone de menor reservorio de material. Esto ayuda a entender por qué las masas obtenidas $\sim 10^{-3} [M_{\odot}]$ podrían ser menores que las inferidas en fuentes fuertemente embebidas. Primero por que reflejan una menor reserva global de gas por ser un sistema evolucionado y otro por estar condicionado por el trazador utilizado y por el criterio de restricción en PPV, ya que capturan únicamente una fracción del material total por componentes.

También las tasas del orden $\sim 10^{-7}$ - $10^{-6} [M_{\odot} \text{ yr}^{-1}]$ son comparables, o incluso superiores, a tasas típicas de acreción estelar medidas anteriormente en estrellas T Tauri clásicas (Hartmann et al., 1998), por lo que aún si las cifras aquí obtenidas son cotas inferiores y promedio, los streamers en T Tau analizados en este trabajo indican que están entregando una cantidad importante de material al sistema protoestrella/disco. Esto puede generar episodios de acreción, especialmente porque en sistemas múltiples, los flujos de acreción pueden canalizarse preferentemente hacia componentes individuales y no necesariamente hacia un único centro geométrico. Un ejemplo observado de este escenario es GG Tau A, donde se detectan streamers que cruzan una cavidad circumbinaria y conectan el reservorio externo con las regiones internas, modulando el suministro de masa hacia el sistema (Keppler et al., 2020).

En esta misma línea, estudios recientes en sistemas binarios embebidos indican evidencia de streamers de infall y señales asociadas a choques de acreción en la interfase envoltura-disco (Artur de la Villarmois et al., 2026). En comparación, T Tau constituye un caso más evolucionado (Clase II) y además triple (Beck et al., 2020), por lo que un potencial no central y la interacción dinámica entre componentes son inevitables. En este contexto, la identificación de estructuras compatibles con streamers a escalas de 10^3 [au] sugiere que el sistema aún puede recibir suministro anisotrópico desde un reservorio remanente, y que parte de ese flujo podría ser redistribuido hacia regiones específicas del sistema múltiple más que hacia un único punto.

Mencionar también que en trabajos basados en ajustes dinámicos con TIPSy, como (Gupta et al., 2024), la extensión tridimensional del streamer no se reporta directamente como una longitud, sino que se infiere a partir de parámetros geométricos del modelo. En este trabajo, en cambio, se calcula explícitamente una longitud L_{3D} a partir de la trayectoria reconstruida. En particular, el parámetro z_0 corresponde a la separación inicial del gas en la dirección de la línea de visión, y no a la longitud total del streamer. Para HL Tau, por ejemplo, se obtiene $z_0 \approx -1400 \pm 570$ [au], reflejando la profundidad inicial del flujo y la degeneración inherente a este tipo de ajuste. Para las componentes cuya cinemática es bien reproducida por un modelo balístico simple (por ejemplo para ambas componentes de CN spw25), se obtienen valores de $|z_0|$ del orden de $\sim 10^3$ [au], comparables a las escalas tridimensionales inferidas a partir del análisis geométrico. En contraste, para trazadores con mayor mezcla morfológica o desviaciones cinemáticas importantes, como H₂CO spw29 y CN spw31 componente 1, los valores de z_0 presentan grandes incertidumbres, reflejando la degeneración geométrica del ajuste y limitando su interpretación física directa.

Un aspecto relevante para interpretar las longitudes medidas de los streamers es su relación con la escala de la envoltura remanente del sistema. En el caso de T Tau, estudios interferométricos tempranos en líneas moleculares muestran en similitud a una cascara de la molécula ¹³CO a $\sim 4.2 \times 10^3$ [au], con evidencia de dispersión más que de una envoltura masiva y bien definida (Momose et al., 1996). El rango de longitudes tridimensionales de los streamers identificados en este trabajo ($L_{3D} \sim 0.8 \times 10^3$ - 2.8×10^3 [au]) el disco con una envoltura remanente en dispersión. Esta situación contrasta con sistemas embebidos como Per-emb-50, donde los streamers alcanzan longitudes de ~ 3000 [au] y se insertan en envolturas más extensas y masivas (Valdivia-Mena et al., 2022), o con otros objetos Clase I estudiados por eDisk, donde los flujos se originan claramente fuera del radio del disco y dentro de una envoltura aún dominante (Flores et al., 2023; Han et al., 2025). En este contexto, las longitudes comparables entre streamers y envoltura en T Tau refuerzan que se trata de un sistema más evolucionado (Clase II), donde el suministro de material ocurre a partir de un reservorio limitado y no desde una envoltura colapsante a gran escala.

Un punto adicional que emerge de este análisis es que las trayectorias reconstruidas abarcan desde escalas externas de $\sim 2.8 \times 10^3$ [au] hasta escalas internas del orden de $\sim 1.5 \times 10^2$ [au], lo que es consistente con un escenario en que parte del material infalling puede acoplarse a un disco de gas circumbinario antes de alimentar estructuras más internas. En este sentido, el extremo interno alcanzado por las trayectorias modeladas impone una cota superior de primer orden para el radio característico del disco de gas asociado al sistema interno.

Adicionalmente, a partir de una inspección directa de la emisión en SO₂ (Dióxido de Azufre) Figure 7.27 hacia el binario Sur, se puede estimar una cota inferior para el tamaño del disco de gas. En particular, el eje mayor medido de la emisión es $\theta_{\text{maj}} = 0.425833''$, que a una distancia de 143.7 [pc] corresponde a un diámetro físico $D_{\text{gas}} \approx 0.425833'' \times 143.7 \simeq 61$ [au]. Este valor debe interpretarse como una cota inferior (limitada por resolución, sensibilidad y por el

criterio de detección), pero sugiere la presencia de un disco de gas compacto en el sistema Sur. Dado que, hasta donde tenemos conocimiento, el tamaño del disco de gas en el binario Sur no había sido reportado explícitamente en la literatura, este trabajo entrega la primera estimación observacional de primer orden para dicha escala.

A escalas de disco, observaciones de alta resolución han mostrado que las subestructuras (anillos, espirales y asimetrías) son comunes en discos protoplanetarios (Andrews, 2020; Andrews et al., 2018). En T Tau N se ha reportado además una brecha en continuo a ~ 12 [au] (Yamaguchi et al., 2021). Si bien el análisis presentado en este trabajo se enfoca en escalas $\sim 10^3$ [au] y no permite trazar directamente la conexión con la morfología interna del disco, la presencia de streamers constituye un mecanismo plausible para inyectar material con momento angular en escalas pequeñas, potencialmente contribuyendo a episodios de acreción y a condiciones iniciales favorables para generar o modificar subestructuras, especialmente en un sistema múltiple (Tobin & Sheehan, 2024). Dicha exploración para esta conexión requiere observaciones y modelamiento que vinculen explícitamente la dinámica a $\sim 10^3$ [au] con las escalas internas del disco, lo que queda fuera del alcance de este análisis de primer orden.

Un resultado clave es que, a partir del análisis desarrollado, se identifican dos flujos dominantes en el entorno de T Tau (componentes 1 y 2), consistentes con la presencia de dos streamers principales a escalas $\sim 10^3$ [au]. Estas dos estructuras se observan en más de un trazador (CN y H₂CO), pero con diferente grado de continuidad espacial y mezcla cinemática, lo que se interpreta como una consecuencia directa de las condiciones físicas y químicas bajo las cuales cada molécula es abundante. En particular, CN tiende a ser más eficiente en regiones más irradiadas y/o de menor densidad (capas superiores), de modo que resalta segmentos más definidos del flujo y puede producir subcubos PPV con cinemática relativamente más limpia para el ajuste balístico. En cambio, H₂CO, al estar fuertemente influenciado por química de granos y procesos de liberación al gas, puede ser abundante en regiones más extendidas del entorno y recuperar una fracción mayor del gas molecular, lo que favorece morfologías más continuas pero también una mayor superposición de estructuras en PPV. En este sentido, la detección consistente de dos componentes en ambos trazadores refuerza que se trata de dos streamers dominantes, mientras que las diferencias entre CN y H₂CO reflejan que cada especie muestrea capas físicas distintas del mismo escenario dinámico.

5.3 Límites del modelo

Este análisis de primer orden, posee las siguientes limitaciones que se deben considerar para el modelamiento de sistemas múltiples:

- **Potencial No-Central:** El modelo de TIPSYS asume un único potencial central fijo, mientras que T Tau es un sistema múltiple (triple). Contar con un potencial que considere un sistema binario/triple sería un paso esencial para refinar las trayectorias y tiempos característicos.
- **Selección Subcubos:** La restricción de los subcubos PPV está limitada por la sensibilidad alcanzada, caracterizada por el ruido RMS 3.2.

En la práctica, se realiza imponiendo un umbral de detección que define qué vóxeles se consideran emisión real por sobre el ruido. Umbrales altos reducen la contaminación por ruido y la mezcla entre estructuras, pero pueden eliminar emisión difusa y subestimar la extensión del flujo. Por el contrario, umbrales más bajos preservan mejor la emisión extendida, pero incrementan la probabilidad de incluir vóxeles contaminados (ruido o superposición de estructuras), dificultando la separación entre componentes. Como consecuencia, esta elección afecta las magnitudes derivadas (flujo integrado, masa del gas y tasa de infall), dado que todas dependen del conjunto de vóxeles recuperados.

- **Múltiples flujos superpuestos:** Aún con el aislamiento en dos componentes en el diagrama PPV, existe la mezcla de trayectorias de forma interna en cada subcubo. Esto genera que la calidad del ajuste y propiedades derivadas se vean afectadas.
- **Parámetros químicos:** M_{gas} depende de abundancias adoptadas, LTE, entre otras asunciones. Mejorar estos valores requiere modelos químicos que no obvien variaciones reales para cada molécula en el sistema de estudio.
- **Resolución angular:** La resolución finita implica la mezcla de la emisión dentro del beam, generando superposición de cinemáticas distintas dentro de un mismo pixel (específicamente en regiones más centrales e interacción entre diferentes flujos). Limitando así la separación de las componentes en el diagrama PPV.
- **Cobertura limitada de trazadores:** El trabajo se centró únicamente en CN y H₂CO en ventanas específicas (25, 29 y 31). Incluir trazadores complementarios como CS, SO, SO₂, CH₃OH, entre otros, permitiría mapear distintas capas físicas del gas e identificar mejor las regiones donde están los streamers.

Chapter 6

Conclusiones

A partir de los trazadores CN (spw25), H₂CO (spw29) y CN (spw31), se identificaron dos componentes principales (1 y 2) asociadas a los flujos dominantes en el entorno del sistema múltiple T Tau. En términos físicos, estas dos componentes pueden interpretarse como dos streamers principales, recuperados de forma consistente en CN y H₂CO, aunque con distinta continuidad y grado de mezcla, ya que ambos trazadores muestrean capas físicas/químicas diferentes del gas.

Para CN (spw25), ambas componentes presentan longitudes tridimensionales comparables, $L_{3D} \sim 2.8 \times 10^3$ [au], pero longitudes proyectadas significativamente distintas, $L_{proj} \sim (0.6-1.1) \times 10^3$ [au]. Los flujos integrados se encuentran en el rango $F_{CN25} \sim (2.6-4.3) \times 10^{-21}$ [W m⁻²], con masas de gas $M_{gas} \sim (1.09-1.46) \times 10^{-3}$ [M_{\odot}] y tasas características de infall $\dot{M} \sim (3.89-6.35) \times 10^{-7}$ [M_{\odot} yr⁻¹].

En el caso de H₂CO (spw29), las estructuras son más compactas y muestran asimetrías entre componentes, con longitudes $L_{3D} \sim (0.9-1.7) \times 10^3$ [au] y $L_{proj} \sim (0.7-1.1) \times 10^3$ [au]. Los flujos integrados se encuentran en el rango $F_{H_2CO} \sim (1.6-1.9) \times 10^{-20}$ [W m⁻²], con masas $M_{gas} \sim (2.5-3.0) \times 10^{-3}$ [M_{\odot}] y tasas de infall $\dot{M} \sim (6.1-6.7) \times 10^{-7}$ [M_{\odot} yr⁻¹].

Finalmente, para CN (spw31) se identifican estructuras más cortas, con longitudes tridimensionales $L_{3D} \sim (8-9) \times 10^2$ [au] y longitudes proyectadas $L_{proj} \sim (7.3-8.7) \times 10^2$ [au]. Los flujos integrados se sitúan en $F_{CN31} \sim (5.6-9.7) \times 10^{-21}$ [W m⁻²], con masas de gas $M_{gas} \sim (1.22-2.12) \times 10^{-3}$ [M_{\odot}] y tasas de infall $\dot{M} \sim (1.79-2.24) \times 10^{-6}$ [M_{\odot} yr⁻¹].

Como resultado adicional, las trayectorias reconstruidas abarcan desde escalas externas de $\sim 2.8 \times 10^3$ [au] hasta escalas internas del orden de $\sim 1.5 \times 10^2$ [au], consistente con un escenario en el que parte del material infalling puede acoplarse primero a una estructura de gas circumbinaria antes de alimentar regiones más internas. En este marco, el extremo interno alcanzado por las trayectorias impone una cota superior de primer orden para la escala radial del disco de gas asociado al sistema interno.

Además, mediante una inspección directa de la emisión en SO₂ hacia el binario Sur (Fig. 7.27), se obtuvo una cota inferior para el tamaño del disco de gas: el eje mayor $\theta_{maj} = 0.425833''$ corresponde, a 143.7 [pc], a un diámetro $D_{gas} \gtrsim 61$ [au]. Este valor, limitado por resolución y sensibilidad, sugiere un

disco de gas compacto en el sistema Sur y constituye una primera estimación observacional de primer orden para su escala.

En conjunto, estos rangos de valores, interpretados como cotas inferiores de primer orden, son consistentes con un escenario en el que los streamers actúan como canales anisótropos de entrega de masa desde escalas de $\sim 10^3$ [au] hacia la región disco–protoestrella, incluso en un sistema múltiple y dinámicamente complejo como T Tau. De este modo, este trabajo establece un primer punto de referencia cuantitativo para el sistema T Tau al estimar por primera vez longitudes, masas y tasas de infall asociadas a estructuras compatibles con streamers moleculares, y sienta las bases para futuros estudios que incorporen potenciales no centrales, modelado dinámico más complejo y un tratamiento astroquímico más detallado.

Chapter 7

Trabajo futuro

Un paso natural a futuro, dada la complejidad dinámica del sistema T Tau, es abordar su modelamiento considerando un potencial gravitacional adecuado para un sistema triple. En este contexto, resulta particularmente relevante explorar enfoques de tipo N-cuerpos, en los que se acoplen esquemas dinámicos con condiciones iniciales derivadas directamente del espacio PPV, permitiendo describir de forma más realista las trayectorias del gas en un potencial no central.

Los valores derivados en este trabajo dependen de manera significativa de la capacidad de aislar las estructuras asociadas a los streamers, lo cual está limitado por la sensibilidad y la resolución angular y espectral de los cubos observacionales. Observaciones futuras con mayor relación señal-ruido, mejor muestreo espectral y resolución angular más fina permitirían imponer restricciones más robustas sobre la geometría, cinemática y extensión de estas estructuras, reduciendo así las incertidumbres sistemáticas en las propiedades derivadas.

Otra línea concreta a desarrollar consiste en incorporar trazadores moleculares adicionales, en particular especies ricas en azufre como CS, SO, SO₂, H₂S, OCS y H₂CS (Artur de la Villarmois et al., 2026). Estas moléculas, en general ópticamente más delgadas, pueden ser especialmente útiles para aislar gas denso cercano al disco y regiones asociadas a choques de acreción. La comparación sistemática de estos trazadores en sistemas de distintas edades evolutivas permitiría conectar la presencia y propiedades de los streamers con la evolución del sistema y evaluar su impacto en los procesos de acreción y redistribución de masa.

Bibliography

- S. M. Andrews, “Observations of Protoplanetary Disk Structures and Their Origins,” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **58**, 483–528 (2020). DOI: [10.1146/annurev-astro-031220-010302](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-031220-010302). Preprint: [arXiv:2001.05007](https://arxiv.org/abs/2001.05007).
- J. J. Tobin, P. D. Sheehan, “An Observational View of Structure in Protostellar Systems”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* (2024), to appear. Preprint: [arXiv:2403.15550](https://arxiv.org/abs/2403.15550). DOI (arXiv): [10.48550/arXiv.2403.15550](https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.15550).
- M. T. Valdivia-Mena, J. E. Pineda, D. M. Segura-Cox, P. Caselli, R. Neri, A. López-Sepulcre, N. Cunningham, L. Bouscasse, D. Semenov, Th. Henning, V. Piétu, E. Chapillon, A. Dutrey, A. Fuente, S. Guilloteau, T.-H. Hsieh, I. Jiménez-Serra, S. Marino, M. J. Maureira, G. V. Smirnov-Pinchukov, M. Tafalla, B. Zhao, “PRODIGE—Envelope to disk with NOEMA I. A 3000 au streamer feeding a Class I protostar”, *Astronomy & Astrophysics* **667**, A12 (2022). DOI: [10.1051/0004-6361/202243310](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243310). Preprint: [arXiv:2208.01023](https://arxiv.org/abs/2208.01023).
- M. T. Valdivia-Mena, “Asymmetric infall beyond natal cores to protoplanetary disks: observations and analysis of streamers toward embedded low-mass protostars,” *Dissertation, LMU München: Faculty of Physics*, 192 pp. (2024). DOI: [10.5282/edoc.33453](https://doi.org/10.5282/edoc.33453). Disponible en: edoc.ub.uni-muenchen.de/33453/1/Valdivia_Mena_Maria_Teresa.pdf. (Estudio observacional y análisis de *streamers* hacia protoestrellas de baja masa: PRODIGE, Barnard 5 y búsqueda sistemática ProPStar.)
- L. Hartmann, N. Calvet, E. Gullbring & P. D’Alessio, “Accretion and the Evolution of T Tauri Disks,” *The Astrophysical Journal* **495**, 385–400 (1998). DOI: [10.1086/305277](https://doi.org/10.1086/305277). Preprint/registro: [ADS entry](https://ui.adsabs.org/abs/1998ApJ...495..385H).
- M. Montesinos, N. Cuello, J. Olofsson, J. Cuadra, A. Bayo, G. H.-M. Bertrang, C. Perrot, “Radiative scale-height and shadows in protoplanetary disks”, *The Astrophysical Journal* (2021), aceptado. DOI: [10.3847/1538-4357/abe3fc](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abe3fc). Preprint: [arXiv:2102.02874](https://arxiv.org/abs/2102.02874).
- K. I. Öberg & E. A. Bergin, “Astrochemistry and Compositions of Planet-Forming Material,” *Physics Reports* **893**, 1–48 (2021). DOI: [10.1016/j.physrep.2020.09.004](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.09.004). Preprint: [arXiv:2010.03529](https://arxiv.org/abs/2010.03529).
- S. M. Andrews, J. Huang, L. M. Pérez, A. Isella, T. Birnstiel, A. Zhu, et al., “The Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP). I. Motivation, Sample, Calibration, and Overview,” *The Astrophysical Journal Letters* **869**, L41 (2018). DOI: [10.3847/2041-8213/aaf741](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf741). Preprint: [arXiv:1812.04040](https://arxiv.org/abs/1812.04040).

- A. Garufi, L. Podio, C. Codella, D. Fedele, E. Bianchi, C. Favre, F. Bacciotti, C. Ceccarelli, S. Mercimek, K. Rygl, R. Teague, L. Testi, “ALMA chemical survey of disk-outflow sources in Taurus (ALMA-DOT) V: Sample, overview, and demography of disk molecular emission”, *Astronomy & Astrophysics* **645**, A145 (2021). DOI: [10.1051/0004-6361/202039483](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039483). Preprint: [arXiv:2012.07667](https://arxiv.org/abs/2012.07667).
- I. Han, W. Kwon, Y. Aso, N. Ohashi, J. J. Tobin, J. K. Jørgensen, S. Takakuwa, L. W. Looney, Y. Aikawa, C. Flores, I. de Gregorio-Monsalvo, P. M. Koch, C. W. Lee, J.-E. Lee, Z.-Y. Li, Z.-Y. D. Lin, J. Sai, T. J. Thieme, J. P. Williams, S. Gavino, M. Kido, S.-P. Lai, N. T. Phuong, A. Santamaría-Miranda, H.-W. Yen, “Early Planet Formation in Embedded Disks (eDisk) XVII: A Compact but Structured Keplerian Disk and Large-scale Streamers Revealed in the Class I Protostellar System IRAS 04169+2702”, *The Astrophysical Journal* (2025), aceptado. Preprint: [arXiv:2506.16569](https://arxiv.org/abs/2506.16569). DOI (arXiv): [10.48550/arXiv.2506.16569](https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.16569).
- ALMA Science Operations, “ALMA Pipeline & QA2 Documentation,” *ALMA Science Portal* (consulta: 18 Nov 2025). Disponible en: alma-science.org/processing. (Secuencia de *flagging*, *bandpass*, *gains*, *flux scale*, *WVR*, T_{sys} ; buenas prácticas y límites típicos.)
- CASA Team (NRAO/ALMA/NAOJ/ESO), “CASA Documentation (Tasks: TCLEAN, MS-MFS, *uvcontsub*, W-projection; máscaras, *threshold_niter*),” *CASA Docs / Read the Docs* (consulta: 18 Nov 2025). Disponible en: casadocs.readthedocs.io. (Parámetros de imagenado, deconvolución y sustracción de continuo.)
- M. Yamaguchi, T. Tsukagoshi, T. Muto, H. Nomura, T. Nakazato, S. Ikeda, M. Tamura & R. Kawabe, “ALMA Super-resolution Imaging of T Tau: r = 12 au Gap in the Compact Dust Disk around T Tau N,” *The Astrophysical Journal* **923**, 121 (2021). DOI: [10.3847/1538-4357/ac2bfd](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2bfd). Disponible en: astroexplorer.org/pdf/apjac2bfd3. (Continuo Band 6 en T Tau; detección de un gap ~12 au en el disco de T Tau N.)
- ALMA Partnership (ESO/NAOJ/NRAO), “ALMA Technical Handbook (Bandas, sensibilidades, configuración espectral y condiciones de observación),” *ALMA Science Portal* (consulta: 01 Dic 2025). Disponible en: almascience.eso.org/proposing/technical-handbook. (Referencias oficiales para rangos de Band 6/7, requisitos de *weather*/PWV, resoluciones angulares y espectrales, y parámetros instrumentales.)
- T. L. Beck, G. H. Schaefer, S. Guilloteau, M. Simon, A. Dutrey, E. Di Folco & E. Chapillon, “On the Nature of the T Tauri Triple System,” *The Astrophysical Journal* **902**(2), 132 (2020). DOI: [10.3847/1538-4357/abb5f5](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abb5f5). Preprint: [arXiv:2009.03861](https://arxiv.org/abs/2009.03861). (Geometría del sistema triple T Tau, discos/circumbinario, variabilidad y outflows.)
- L. Testi, T. Birnstiel, L. Ricci, S. M. Andrews, *et al.*, “Dust Evolution in Protoplanetary Disks,” en *Protostars and Planets VI* (Univ. of Arizona Press, 2014). Preprint: [arXiv:1402.1354](https://arxiv.org/abs/1402.1354). (Discute escalas de tiempo de evolución del polvo en los primeros Myr y su relación con la vida del disco.)
- B. Lefloch, A. Gusdorf, C. Codella, J. Eislöffel, R. Neri, A. I. Gómez-Ruiz, R. Güsten, S. Leurini, C. Risacher, M. Benedettini, “The structure

- of the Cepheus E protostellar outflow: The jet, the bowshock, and the cavity,” *Astronomy & Astrophysics* **581**, A4 (2015). DOI: [10.1051/0004-6361/201425521](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425521). (Figura de referencia para distinguir emisión de paredes de cavidad, *jet* y *bow shock* en Cep E usando CO(2–1) y *Spitzer*/IRAC 4.5 μm .)
- M. T. Valdivia-Mena, J. E. Pineda, P. Caselli, D. M. Segura-Cox, A. Schmiedeke, S. Spezzano, S. Offner, A. V. Ivlev, M. Küffmeier, N. Cunningham, R. Neri, M. J. Maureira, “Probing the Physics of Star-Formation (ProPStar). II. The first systematic search for streamers toward protostars,” *Astronomy & Astrophysics* **687**, A71 (2024). DOI: [10.1051/0004-6361/202449395](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202449395). Preprint: [arXiv:2404.02144](https://arxiv.org/abs/2404.02144). (Incidencia: $\sim 40\%$ del total y $\sim 60\%$ en protoestrellas embebidas; streamers detectados en HC₃N; conexión desde material fuera de las fibras hacia escalas de disco.)
- R. Teague & D. Foreman-Mackey, “bettermoments: Line-of-sight velocity calculation,” *Astrophysics Source Code Library*, record **ascl:1901.009** (2019). Disponible en: ascl.net/1901.009.
- A. Gupta, L. M. Macias, P. Miotello, J. P. Williams, T. Birnstiel, M. Küffmeier, H.-W. Yen, *et al.*, “TIPSY: Trajectory of Infalling Particles in Streamers around Young stars. Dynamical analysis of the streamers around S CrA and HL Tau,” *Astronomy & Astrophysics* **683**, A133 (2024). DOI: [10.1051/0004-6361/202348007](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348007). Preprint: [arXiv:2401.10403](https://arxiv.org/abs/2401.10403). (Metodología y validación de TIPSY para ajustar trayectorias de infall a streamers observados.)
- A. Gupta, “TIPSY: Trajectory of Infalling Particles in Streamers around Young stars (software),” *GitHub repository* (consulta: 18 Nov 2025). Disponible en: github.com/aasgpta/TIPSY. (Repositorio público del código TIPSY.)
- S. Mendoza, E. Tejada, E. Nagel, “Analytic solutions to the accretion of a rotating finite cloud towards a central object – I. Newtonian approach,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **393**, 579–586 (2009). DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.14210.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.14210.x). Preprint: [arXiv:0803.1020](https://arxiv.org/abs/0803.1020). (Soluciones analíticas de infall balístico con momento angular; base del modelo de trayectorias.)
- LAMDA Team (Leiden Observatory), “The Leiden Atomic and Molecular Database (LAMDA),” *Leiden Observatory* (consulta: 05 Ene 2026). Disponible en: home.strw.leidenuniv.nl/~moldata/.
- P. Rivière-Marichalar, R. le Gal, A. Fuente, D. Semenov, G. Esplugues, D. Navarro-Almáida y S. Facchini, “Observations of sulfuretted species in HL Tau,” *Astronomy & Astrophysics*, **703**, A282 (2025), 10 pp. DOI: [10.1051/0004-6361/202555440](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202555440). Disponible en: aanda.org/articles/aa/abs/2025/11/aa55440-25/aa55440-25.html.
- M. Momose, N. Ohashi, R. Kawabe, M. Hayashi y T. Nakano, “The Dispersing Cloud Core around T Tauri,” *The Astrophysical Journal*, **470**, 1001–1014 (1996). Disponible en: articles.adsabs.harvard.edu/full/1996ApJ...470.1001M/0001001.000.html. (Estudio interferométrico del núcleo/envoltura alrededor de T Tauri y su dispersión.)

- J. E. Pineda, D. Arzoumanian, P. André, R. K. Friesen, A. Zavagno, S. D. Clarke, T. Inoue, C.-Y. Chen, Y.-N. Lee, J. D. Soler & M. Kuffmeier, “From Bubbles and Filaments to Cores and Disks: Gas Gathering and Growth of Structure Leading to the Formation of Stellar Systems,” en *Protostars and Planets VII*, eds. S.-i. Inutsuka, Y. Aikawa, T. Muto, K. Tomida & M. Tamura, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 534, p. 233 (2023). DOI: [10.48550/arXiv.2205.03935](https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.03935). Disponible en: [arXiv:2205.03935](https://arxiv.org/abs/2205.03935). (Revisión multiescala del crecimiento anisotrópico de estructura en el ISM: burbujas, filamentos, núcleos densos y discos, integrando observaciones (sub-)mm, polvo/polarización y simulaciones MHD/HD modernas.)
- C. Flores, N. Ohashi, J. J. Tobin, J. K. Jørgensen, S. Takakuwa, Z.-Y. Li, Z.-Y. D. Lin, M. L. R. van 't Hoff, A. L. Plunkett, Y. Yamato, et al., “Early Planet Formation in Embedded Disks (eDisk). XII. Accretion Streamers, Protoplanetary Disk, and Outflow in the Class I Source Oph IRS 63”, *The Astrophysical Journal* **958**(1), 98 (2023). DOI: [10.3847/1538-4357/acf7c1](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acf7c1). Preprint: [arXiv:2310.14617](https://arxiv.org/abs/2310.14617).
- M. Keppler, A. Boccaletti, T. Henning, M. Benisty, A. Isella, R. Teague, S. Pérez, J. Milli, C. Ginski, J. de Boer, et al., “Gap, shadows, spirals, and streamers: SPHERE observations of binary-disk interactions in GG Tauri A,” *Astronomy & Astrophysics* **639**, A35 (2020). DOI: [10.1051/0004-6361/202037706](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037706). Preprint: [arXiv:2003.13186](https://arxiv.org/abs/2003.13186). (Observaciones de alta resolución de un sistema binario joven que revelan *streams* de gas cruzando la cavidad circumbinaria y canalizando material hacia las componentes, con implicancias para acreción modulada o episódica.)
- E. Artur de la Villarmois, V. V. Guzmán, M. L. van Gelder, E. F. van Dishoeck, E. A. Bergin, D. Harsono, N. Sakai y J. K. Jørgensen, “Characterizing the physical and chemical properties of the Class I protostellar system Oph-IRS 44. Binaridad, infalling streamers, and accretion shocks,” *arXiv e-prints* (2026). DOI (arXiv): [10.48550/arXiv.2601.04108](https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.04108). Preprint: [arXiv:2601.04108](https://arxiv.org/abs/2601.04108). (Observaciones ALMA de Oph-IRS 44 (Clase I): detección de binaridad y evidencia de *streamers* de infall y choques de acreción en la interfase envoltura–disco.)
- M. Yamaguchi, T. Muto, T. Tsukagoshi, H. Nomura, N. Hirano, T. Nakazato, S. Ikeda, M. Tamura y R. Kawabe, “ALMA 2D Super-resolution Imaging of Taurus-Auriga Protoplanetary Disks: Probing Statistical Properties of Disk Substructures,” *arXiv e-prints* (2024). DOI (arXiv): [10.48550/arXiv.2404.13570](https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.13570). Preprint: [arXiv:2404.13570](https://arxiv.org/abs/2404.13570). (Estudio estadístico de subestructuras en discos protoplanetarios de Taurus–Auriga mediante una técnica de super–resolución 2D aplicada a observaciones ALMA.)

Appendix A

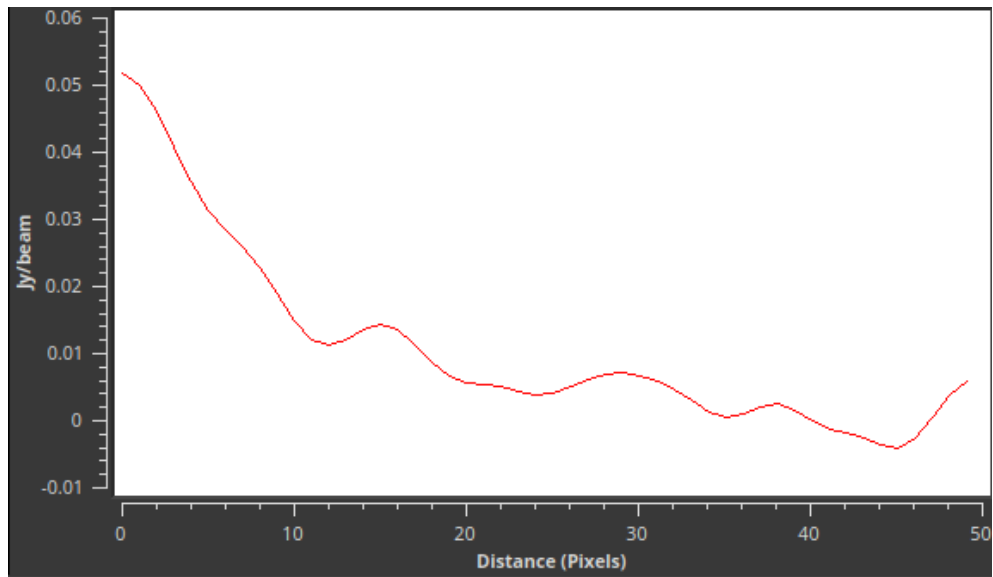


Figure 7.1: Gráfica de distancia entre punto de máx emisión de la molécula H_2CO (spw29) y la ubicación de T Tau N.

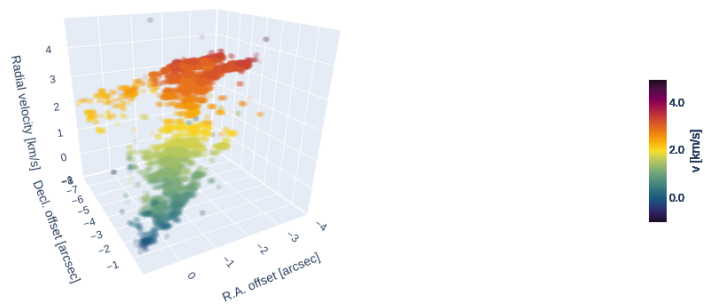


Figure 7.2: Diagrama PPV del subcubo de la componente 1 de la molécula CN spw25 previo proceso de clustering.



Figure 7.3: Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados.

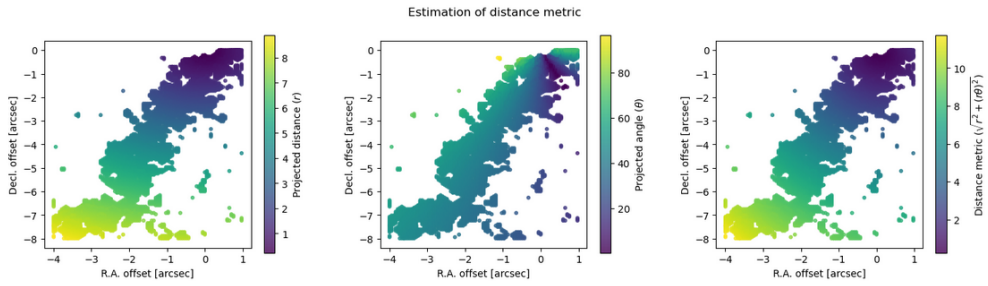


Figure 7.4: Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (CN spw25 componente 1) en TIPSy. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: (**izquierda**) distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, (**centro**) ángulo proyectado θ (en [grados]), y (**derecha**) la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSy para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (*means*) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.

Table 7.1: Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSy para el streamer CN (spw25) componente 1.

Parámetro	Valor	Incertidumbre (\pm)
$v_{xy,0}$ [km s^{-1}]	1.779112	0.161737
$v_{xy,ang,0}$ [rad]	1.093073	0.087200
z_0 [au]	2600.0	100.0
final.time [yr]	2722.9684143810014	109.409284
$v_{x,0}$ [km s^{-1}]	0.817962	0.156557
$v_{y,0}$ [km s^{-1}]	1.579930	0.160365
x_0 [au]	-517.116866	29.277162
y_0 [au]	-1086.780268	37.185208
$v_{z,0}$ [km s^{-1}]	-4.196783	0.303330
KE	10.389113	1.304281
PE	-0.637854	0.020480
TE	9.751259	1.304442
$v_{r,0}$ [km s^{-1}]	-4.555474	0.351586
$v_{t,0}$ [km s^{-1}]	0.160869	12.839792
ℓ_0 [au km s^{-1}]	460.898392	587.786018

Los valores corresponden al resumen de salida de TIPSy para el mejor ajuste y su dispersión estimada a partir del conjunto de soluciones aceptables. Aquí x_0, y_0, z_0 y $v_{x,0}, v_{y,0}, v_{z,0}$ son las condiciones iniciales del modelo balístico (posiciones en [au] y velocidades en [km s^{-1}] en el sistema adoptado por el código). KE, PE y TE son las energías específica cinética, potencial y total del modelo (en las unidades internas del código). $v_{r,0}$ y $v_{t,0}$ corresponden a las componentes radial y tangencial iniciales, y ℓ_0 al momento angular específico inicial.

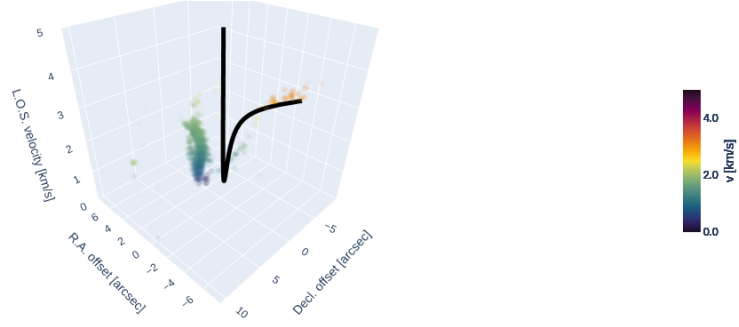


Figure 7.5: La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSy en el cubo completo de datos para CN spw25 previo criterio de corte por congruencia física.

Table 7.2: Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSy para el streamer CN (spw25) componente 2.

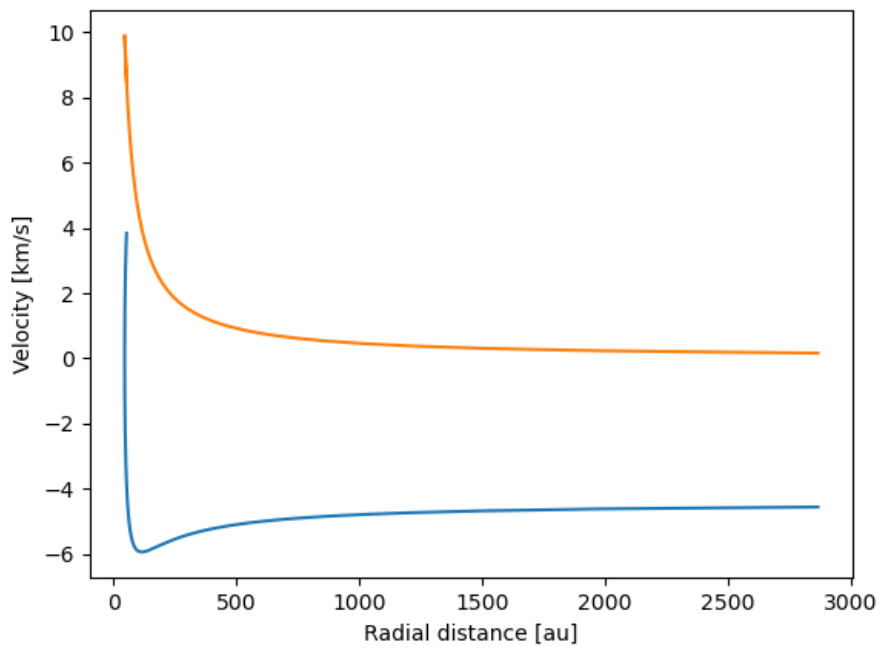
Parámetro	Valor	Incertidumbre (\pm)
$v_{xy,0}$ [km s^{-1}]	1.132162	0.596452
$v_{xy,ang,0}$ [rad]	2.458187	0.087200
z_0 [au]	2650.0	667.732904
final.time [yr]	2307.864164	559.903221
$v_{x,0}$ [km s^{-1}]	-0.877909	0.466687
$v_{y,0}$ [km s^{-1}]	0.714890	0.384324
x_0 [au]	755.166303	36.910305
y_0 [au]	-253.079209	46.839540
$v_{z,0}$ [km s^{-1}]	-5.419158	0.120121
KE	15.324530	0.816757
PE	-0.660433	0.152649
TE	14.664096	0.830899
$v_{r,0}$ [km s^{-1}]	-5.494805	1.831409
$v_{t,0}$ [km s^{-1}]	0.675408	14.948490
ℓ_0 [au km s^{-1}]	1868.918923	1323.167694

Los valores corresponden al resumen de salida de TIPSy para el mejor ajuste y su dispersión estimada a partir del conjunto de soluciones aceptables. Aquí x_0, y_0, z_0 y $v_{x,0}, v_{y,0}, v_{z,0}$ son las condiciones iniciales del modelo balístico (posiciones en [au] y velocidades en [km s^{-1}] en el sistema adoptado por el código). KE, PE y TE son las energías específica cinética, potencial y total del modelo (en las unidades internas del código). $v_{r,0}$ y $v_{t,0}$ corresponden a las componentes radial y tangencial iniciales, y ℓ_0 al momento angular específico inicial.

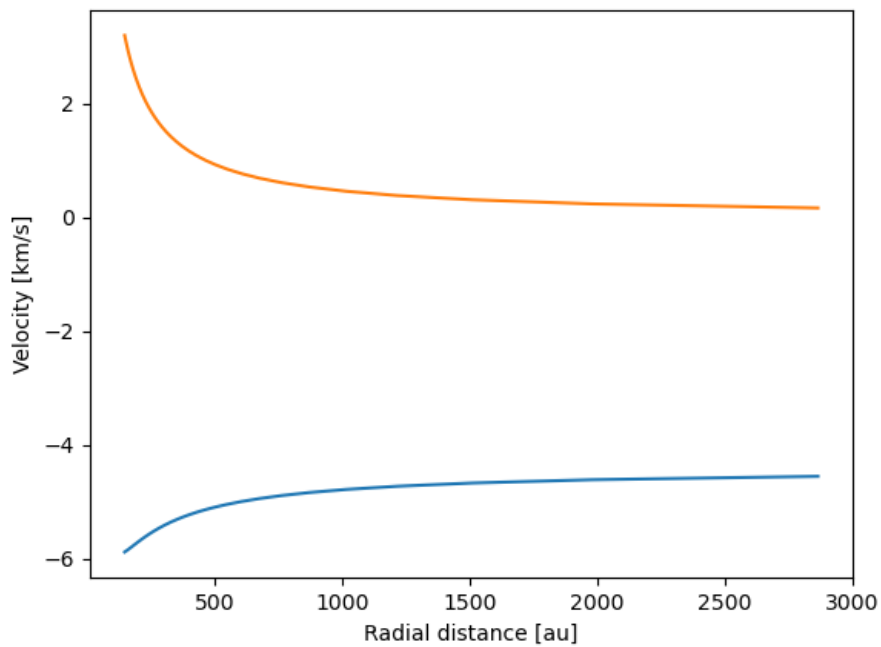
Table 7.3: Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSy para el streamer H_2CO (spw29) componente 1.

Parámetro	Valor	Incertidumbre (\pm)
$v_{xy,0}$ [km s^{-1}]	0.649689	0.162422
$v_{xy,ang,0}$ [rad]	0.909802	0.087200
z_0 [au]	-400.0	100.0
final.time [yr]	4347.812179	2.691973
$v_{x,0}$ [km s^{-1}]	0.398845	0.109281
$v_{y,0}$ [km s^{-1}]	0.512853	0.132847
x_0 [au]	-457.245802	78.463574
y_0 [au]	-1336.803415	73.978554
$v_{z,0}$ [km s^{-1}]	1.366831	0.117424
KE	1.145162	0.179726
PE	-1.244564	0.064966
TE	-0.099402	0.191107
$v_{r,0}$ [km s^{-1}]	-0.963438	0.170659
$v_{t,0}$ [km s^{-1}]	1.167095	0.208713
ℓ_0 [au km s^{-1}]	1713.729377	211.415097

Los valores corresponden al resumen de salida de TIPSy para el mejor ajuste y su dispersión estimada a partir del conjunto de soluciones aceptables. Aquí x_0, y_0, z_0 y $v_{x,0}, v_{y,0}, v_{z,0}$ son las condiciones iniciales del modelo balístico (posiciones en [au] y velocidades en [km s^{-1}] en el sistema adoptado por el código). KE, PE y TE son las energías específica cinética, potencial y total del modelo (en las unidades internas del código). $v_{r,0}$ y $v_{t,0}$ corresponden a las componentes radial y tangencial iniciales, y ℓ_0 al momento angular específico inicial.



(a) Previo a realizar el criterio de corte en el modelo.



(b) Posterior a realizar el criterio de corte en el modelo.

Figure 7.6: Las gráficas muestran el cambio de la velocidad radial y velocidad tangencial durante el recorrido del ajuste del modelo para la molécula CN spw25 componente 1.

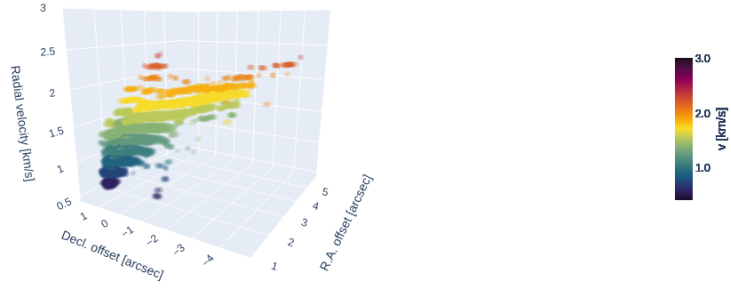


Figure 7.7: Diagrama PPV del subcubo de la componente 2 de la molécula CN spw25 previo proceso de clustering.



Figure 7.8: Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados.

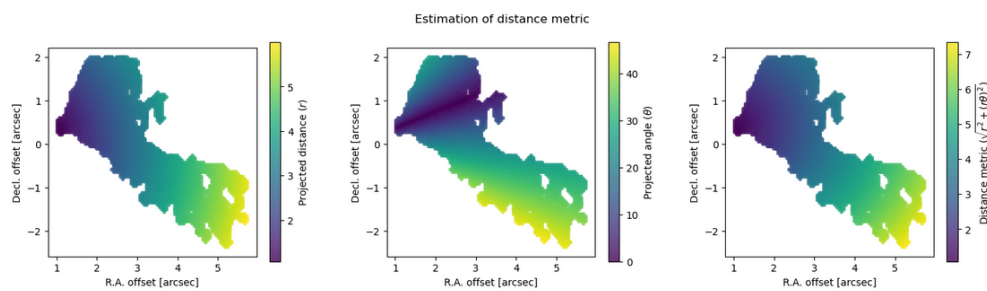


Figure 7.9: Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (CN spw25 componente 2) en TIPSy. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: **(izquierda)** distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, **(centro)** ángulo proyectado θ (en [grados]), y **(derecha)** la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSy para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (*means*) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.

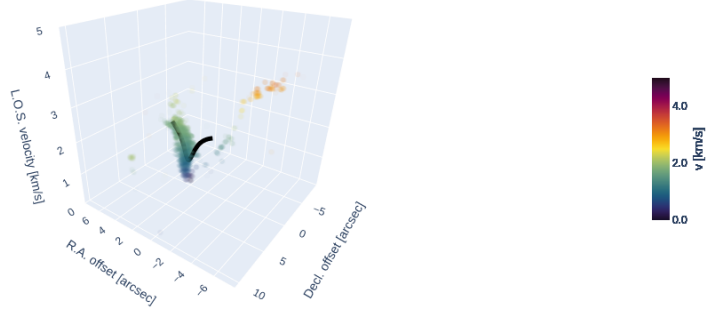


Figure 7.10: La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSY en el cubo completo de datos para CN spw25 previo criterio de corte por congruencia física.

Table 7.4: Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSY para el *streamer* H₂CO (spw29) componente 2.

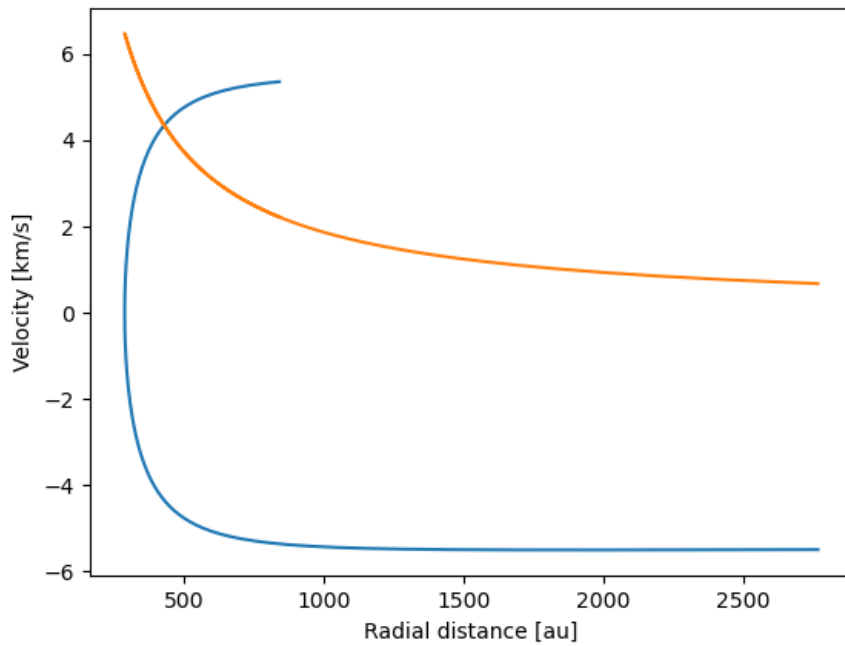
Parámetro	Valor	Incertidumbre (\pm)
$v_{xy,0}$ [km s ⁻¹]	0.197511	0.659945
$v_{xy,ang,0}$ [rad]	2.431656	0.398135
z_0 [au]	0.0	388.448380
final.time [yr]	4062.087335	3962.684367
$v_{x,0}$ [km s ⁻¹]	-0.149793	0.503122
$v_{y,0}$ [km s ⁻¹]	0.128735	0.434257
x_0 [au]	834.131880	81.255139
y_0 [au]	-382.015247	132.281638
$v_{z,0}$ [km s ⁻¹]	0.855933	0.213850
KE	0.385816	0.205692
PE	-1.991919	0.200071
TE	-1.606103	0.286945
$v_{r,0}$ [km s ⁻¹]	-0.189793	0.611686
$v_{t,0}$ [km s ⁻¹]	0.857678	0.275386
ℓ_0 [au km s ⁻¹]	786.875084	224.936009

Los valores corresponden al resumen de salida de TIPSY para el mejor ajuste y su dispersión estimada a partir del conjunto de soluciones aceptables. Aquí x_0, y_0, z_0 y $v_{x,0}, v_{y,0}, v_{z,0}$ son las condiciones iniciales del modelo balístico (posiciones en [au] y velocidades en [km s⁻¹] en el sistema adoptado por el código). KE, PE y TE son las energías específica cinética, potencial y total del modelo (en las unidades internas del código). $v_{r,0}$ y $v_{t,0}$ corresponden a las componentes radial y tangencial iniciales, y ℓ_0 al momento angular específico inicial.

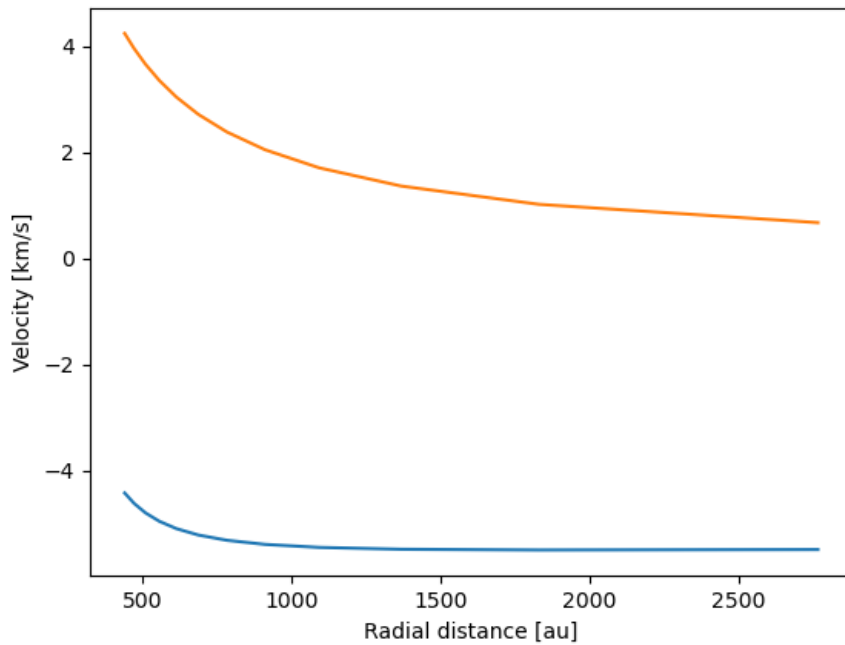
Table 7.5: Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSY para el *streamer* CN (spw31) componente 1.

Parámetro	Valor	Incertidumbre (\pm)
$v_{xy,0}$ [km s ⁻¹]	7.554782	0.161581
$v_{xy,ang,0}$ [rad]	0.916880	0.087200
z_0 [au]	-150.0	50.0
final.time [yr]	545.907730	26.699045
$v_{x,0}$ [km s ⁻¹]	4.595569	0.532034
$v_{y,0}$ [km s ⁻¹]	5.996289	0.420755
x_0 [au]	-535.856559	27.903971
y_0 [au]	-755.683880	46.552203
$v_{z,0}$ [km s ⁻¹]	2.083548	0.114707
KE	30.707955	3.521438
PE	-1.947329	0.086131
TE	28.760626	3.522491
$v_{r,0}$ [km s ⁻¹]	-7.785548	0.667433
$v_{t,0}$ [km s ⁻¹]	0.895073	7.012984
ℓ_0 [au km s ⁻¹]	839.986748	425.387901

Los valores corresponden al resumen de salida de TIPSY para el mejor ajuste y su dispersión estimada a partir del conjunto de soluciones aceptables. Aquí x_0, y_0, z_0 y $v_{x,0}, v_{y,0}, v_{z,0}$ son las condiciones iniciales del modelo balístico (posiciones en [au] y velocidades en [km s⁻¹] en el sistema adoptado por el código). KE, PE y TE son las energías específica cinética, potencial y total del modelo (en las unidades internas del código). $v_{r,0}$ y $v_{t,0}$ corresponden a las componentes radial y tangencial iniciales, y ℓ_0 al momento angular específico inicial.



(a) Previo a realizar el criterio de corte en el modelo.



(b) Posterior a realizar el criterio de corte en el modelo.

Figure 7.11: Las gráficas muestran el cambio de la velocidad radial y velocidad tangencial durante el recorrido del ajuste del modelo para la molécula CN spw25 componente 2.

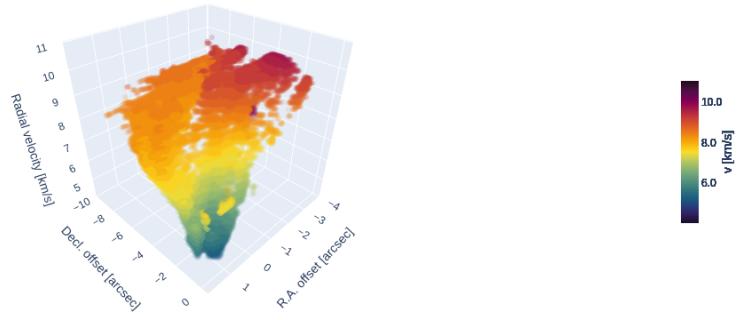


Figure 7.12: Diagrama PPV del subcubo de la componente 1 de la molécula H_2CO spw29 previo proceso de clustering.



Figure 7.13: Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados.

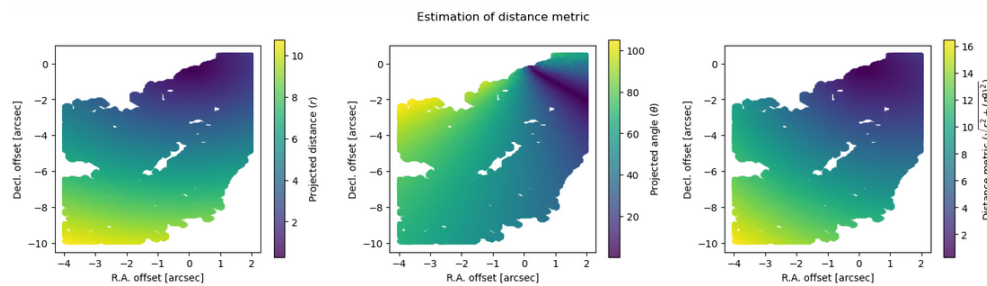


Figure 7.14: Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (H_2CO spw29 componente 1) en TIPSy. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: **(izquierda)** distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, **(centro)** ángulo proyectado θ (en [grados]), y **(derecha)** la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSy para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (*means*) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.

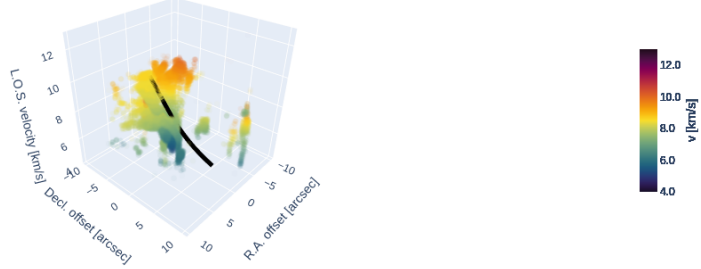
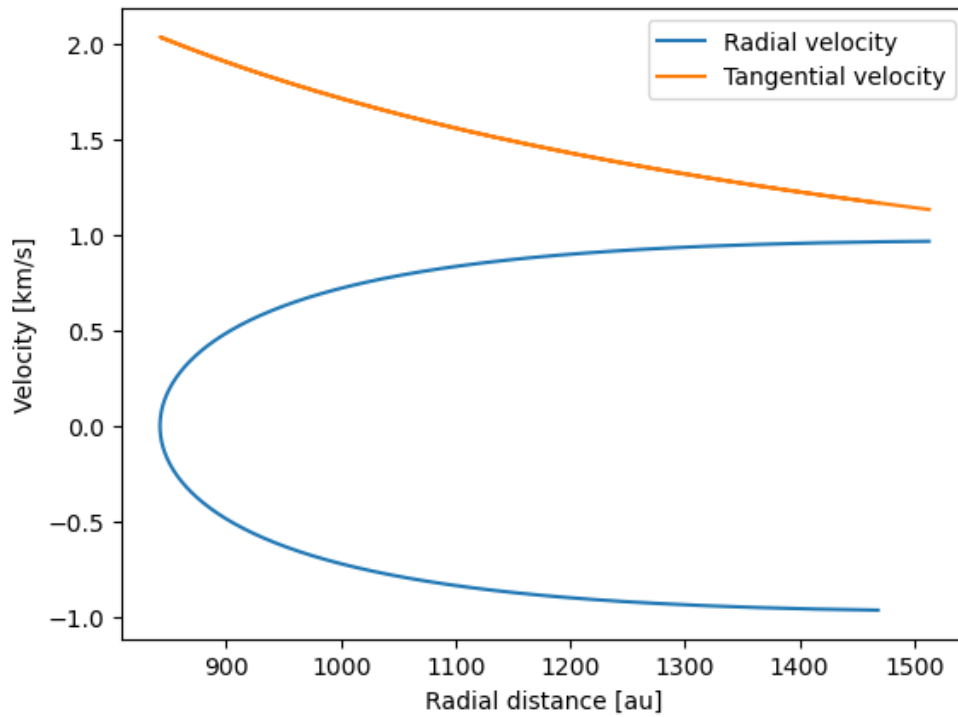


Figure 7.15: La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSY en el cubo completo de datos para H₂CO spw29 previo criterio de corte por congruencia física.

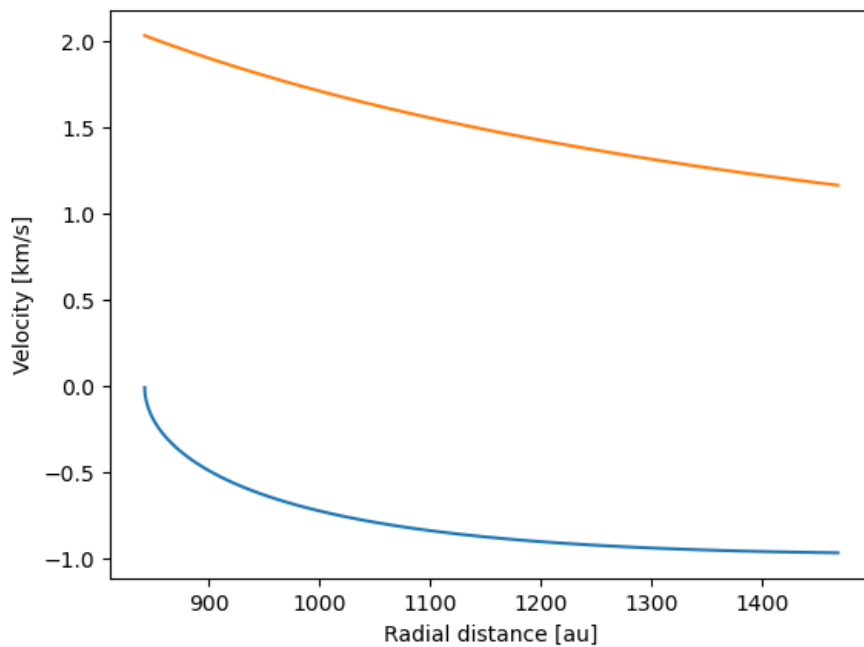
Table 7.6: Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSY para el streamer CN (spw31) componente 2.

Parámetro	Valor	Incertidumbre (\pm)
$v_{xy,0}$ [km s ⁻¹]	2.432727	3.387498
$v_{xy,ang,0}$ [rad]	2.508506	0.087200
z_0 [au]	-50.0	1228.854833
final_time [yr]	1182.912657	28501.186777
$v_{x,0}$ [km s ⁻¹]	-1.961278	2.733902
$v_{y,0}$ [km s ⁻¹]	1.439288	2.011449
x_0 [au]	713.020222	41.879479
y_0 [au]	-201.460642	63.032343
$v_{z,0}$ [km s ⁻¹]	0.576716	0.127904
KE	3.125381	6.094029
PE	-2.460860	0.310058
TE	0.664521	6.101911
$v_{r,0}$ [km s ⁻¹]	-2.312389	2.865464
$v_{t,0}$ [km s ⁻¹]	0.950588	9.470281
ℓ_0 [au km s ⁻¹]	705.925276	1828.585631

Los valores corresponden al resumen de salida de TIPSY para el mejor ajuste y su dispersión estimada a partir del conjunto de soluciones aceptables. Aquí x_0, y_0, z_0 y $v_{x,0}, v_{y,0}, v_{z,0}$ son las condiciones iniciales del modelo balístico (posiciones en [au] y velocidades en [km s⁻¹]) en el sistema adoptado por el código). KE, PE y TE son las energías específica cinética, potencial y total del modelo (en las unidades internas del código). $v_{r,0}$ y $v_{t,0}$ corresponden a las componentes radial y tangencial iniciales, y ℓ_0 al momento angular específico inicial.



(a) Previo a realizar el criterio de corte en el modelo.



(b) Posterior a realizar el criterio de corte en el modelo.

Figure 7.16: Las gráficas muestran el cambio de la velocidad radial y velocidad tangencial durante el recorrido del ajuste del modelo para la molécula H_2CO spw29 componente 1.

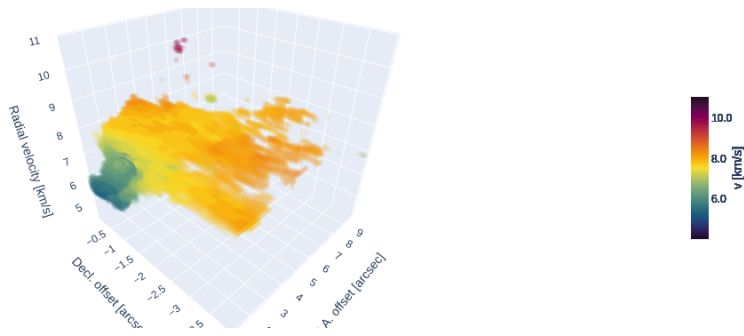


Figure 7.17: Diagrama PPV del subcubo de la componente 2 de la molécula H_2CO spw29 previo proceso de clustering.



Figure 7.18: Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados.

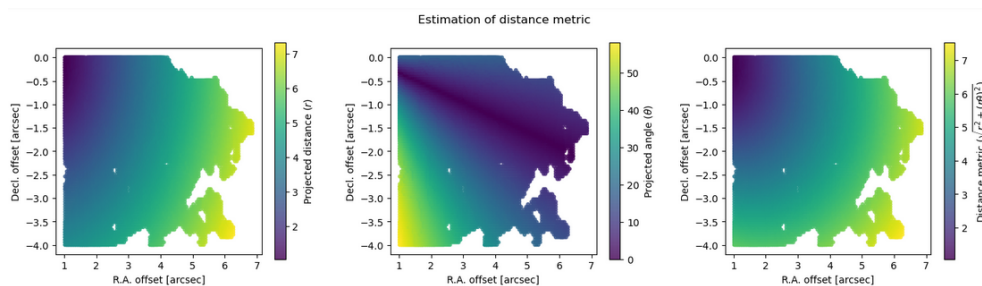


Figure 7.19: Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (H_2CO spw29 componente 2) en TIPSy. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: **(izquierda)** distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, **(centro)** ángulo proyectado θ (en [grados]), y **(derecha)** la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSy para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (*means*) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.

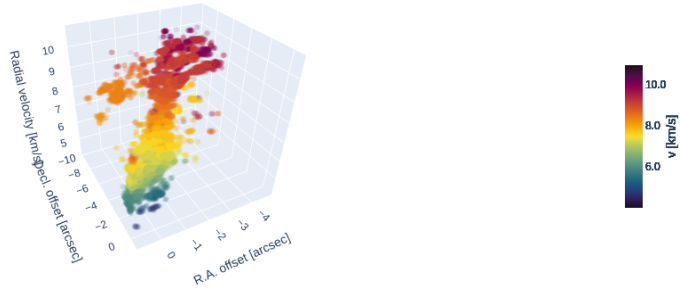


Figure 7.20: Diagrama PPV del subcubo de la componente 1 de la molécula CN spw31 previo proceso de clustering.



Figure 7.21: Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados.

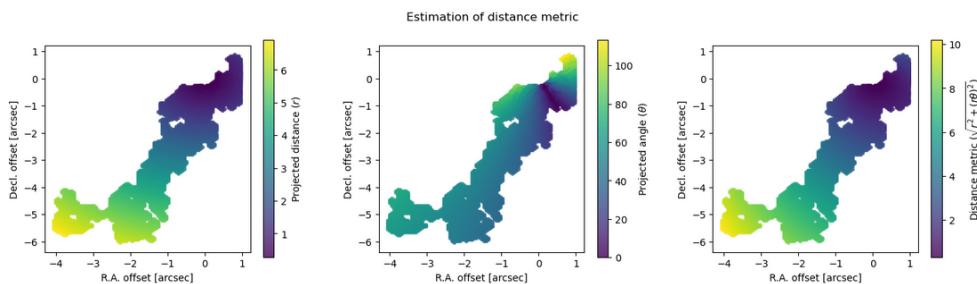


Figure 7.22: Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (CN spw31 componente 1) en TIPSy. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: **(izquierda)** distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, **(centro)** ángulo proyectado θ (en [grados]), y **(derecha)** la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSy para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (*means*) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.

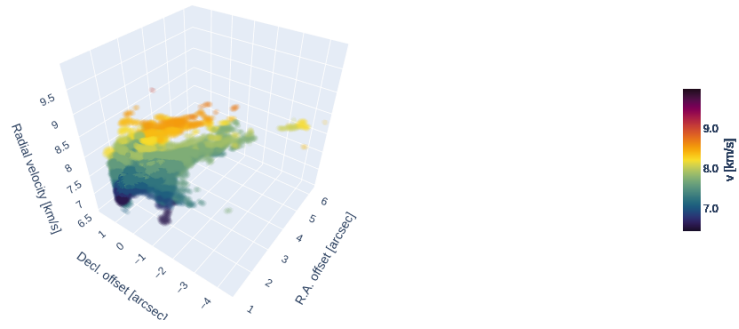


Figure 7.23: Diagrama PPV del subcubo de la componente 2 de la molécula CN spw31 previo proceso de clustering.



Figure 7.24: Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados.

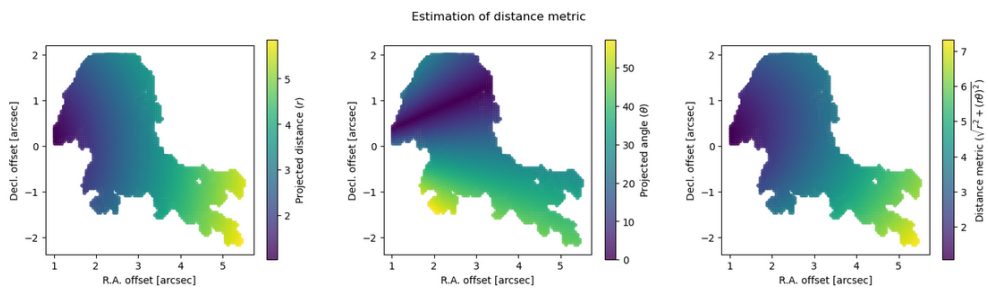
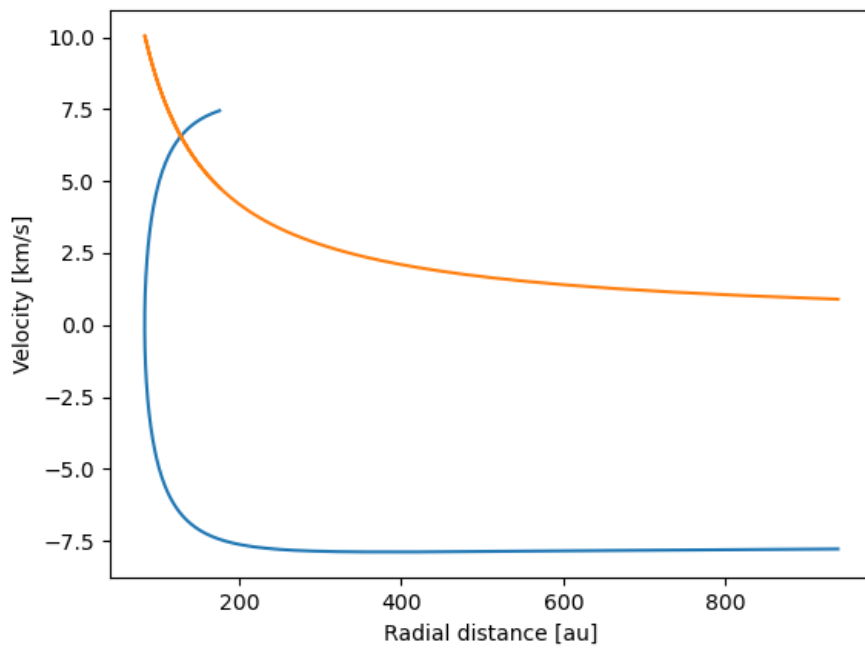
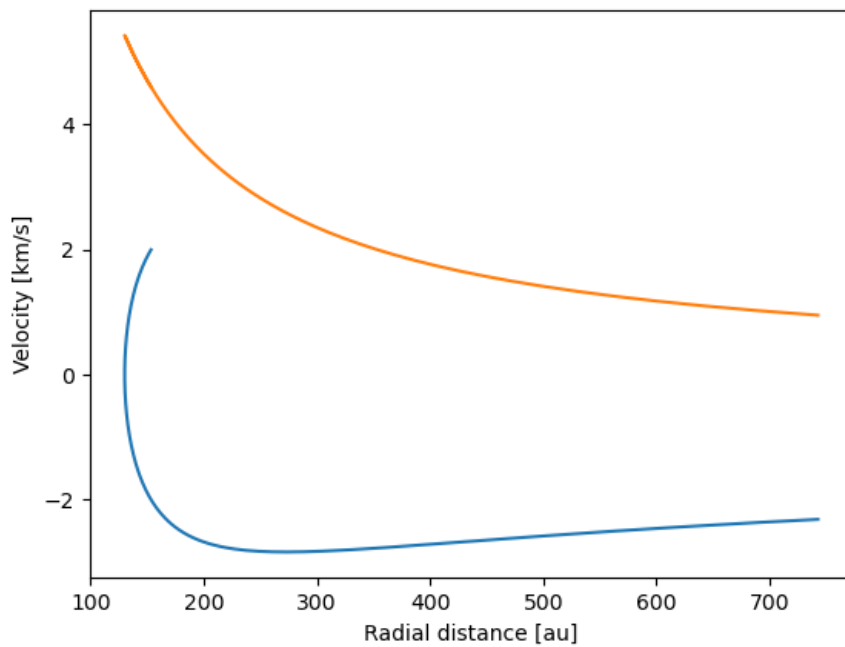


Figure 7.25: Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (CN spw31 componente 2) en TIPSy. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: **(izquierda)** distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, **(centro)** ángulo proyectado θ (en [grados]), y **(derecha)** la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSy para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (*means*) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.



(a) Gráfica velocidades para componente 1.



(b) Gráfica velocidades para componente 2.

Figure 7.26: Las gráficas muestran el cambio de la velocidad radial y velocidad tangencial durante el recorrido del ajuste del modelo para la molécula CN spw31.

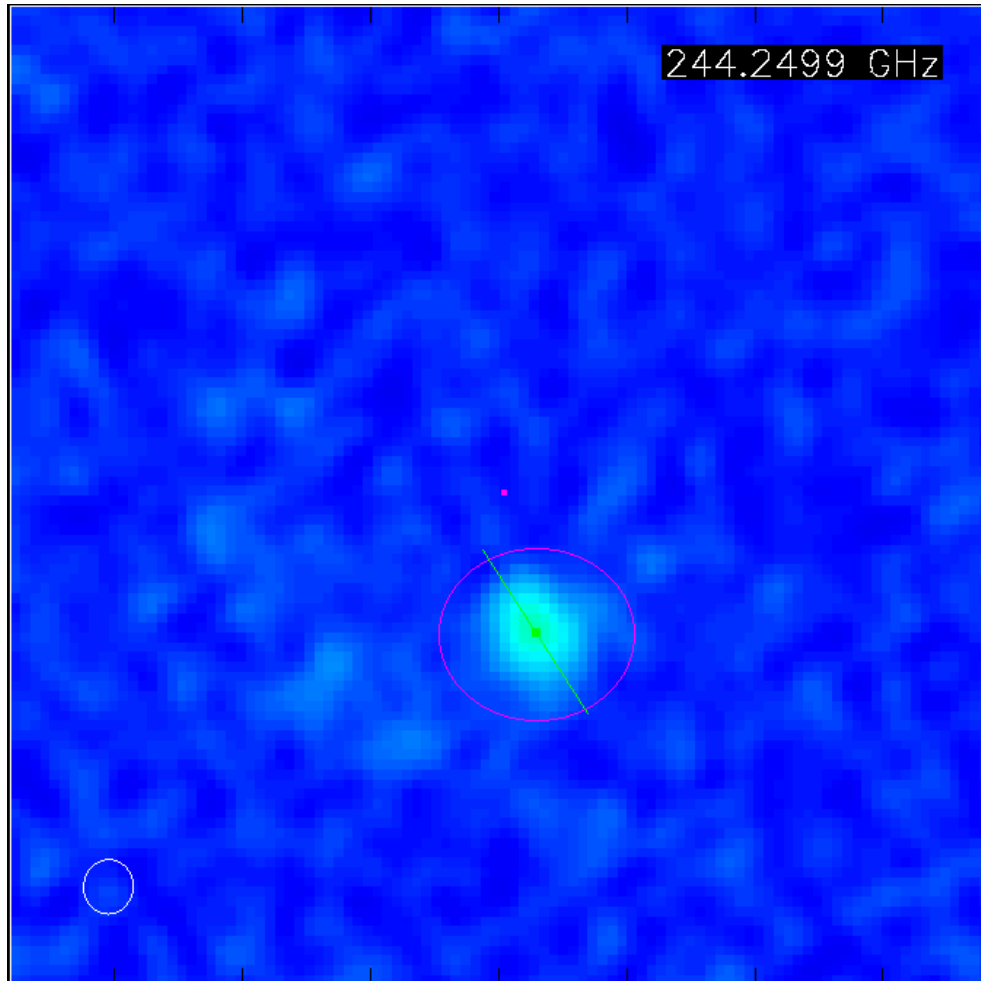


Figure 7.27: Inspección visual de la molecular SO_2 en CASA. Se aprecia su majoraxe como $0.425833''$.

Appendix B

$$E = \frac{1}{2}v_r^2 + \frac{1}{2}\frac{h^2}{r^2} - \frac{GM}{r} = \frac{1}{2}v_{r0}^2 + \frac{1}{2}\frac{h_0^2 \sin^2 \theta_0}{r_0^2} - \frac{GM}{r_0}, \quad (7.1)$$

$$r_u := \frac{h_0^2}{GM}, \quad E_0 := \frac{GM}{r_u}, \quad v_k := \sqrt{E_0}, \quad (7.2)$$

$$\mu^2 := \frac{h_0^2}{r_0^2 E_0} = \frac{r_u^2}{r_0^2}, \quad \nu^2 := \frac{v_{r0}^2}{E_0}, \quad (7.3)$$

$$\varepsilon := \frac{2E}{E_0} = \nu^2 + \mu^2 \sin^2 \theta_0 - 2\mu, \quad (7.4)$$

$$r(\varphi) = \frac{\sin^2 \theta_0}{1 - e \cos \varphi}, \quad e = \sqrt{1 + \varepsilon \sin^2 \theta_0}, \quad (7.5)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{1}{e} (1 - \mu \sin^2 \theta_0) \quad (\text{evaluado en } r = r_0 = 1/\mu), \quad (7.6)$$

$$\cos(\varphi - \varphi_0) = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_0}, \quad \cos(\phi - \phi_0) = \frac{\tan \theta_0}{\tan \theta}. \quad (7.7)$$

Table 7.7: Parámetros químicos adoptados para el cálculo de masa y tasa de acreción de los streamers observados.

Molécula (spw)	ν [GHz]	A_{ul} [s^{-1}]	E_u [K]	$Q(T=25 [K])$	g_u	f_u
CN (spw25)	226.655	9.47×10^{-5}	11.34	81.36	6	0.0469
H ₂ CO (spw29)	225.698	2.75×10^{-4}	33.0	72.67	21	0.0772
CN (spw31)	226.875	1.20×10^{-4}	16.3	9.56	6	0.3271

Los parámetros corresponden a las transiciones observadas en cada spw. ν es la frecuencia de reposo, A_{ul} el coeficiente de Einstein de emisión espontánea, E_u la energía del nivel superior, $Q(T)$ la función de partición evaluada a $T = 25$ [K], g_u la degeneración del nivel superior y f_u la fracción de moléculas en el nivel superior bajo el supuesto de LTE. Se adopta una abundancia relativa $x_{\text{CN}} = 10^{-9}$ y $x_{\text{H}_2\text{CO}} = 10^{-9}$, y un peso molecular medio $\mu = 2.37$. Los valores moleculares se basan en la base de datos [LAMDA Team \(2026\)](#).

List of Figures

1.1	Esquema del proceso de formación estelar a diversas escalas, destacando el crecimiento anisotrópico de estructuras densas en el isótopo intermedio frío (ISM), que conduce a la formación de estrellas y sistemas planetarios. El esquema también destaca el papel del momento angular y las corrientes no axisimétricas a escala de núcleo/disco; el núcleo denso clásico y estas corrientes coexisten en diferentes etapas evolutivas de la formación del disco protoplanetario. La orientación de las corrientes no está necesariamente alineada con el eje de rotación del núcleo denso, pero sí sigue una trayectoria coherente con la caída libre y la rotación. Figura obtenida de Pineda et al. (2023)	4
1.2	Galería de subestructuras en continuo milimétrico del programa DSHARP (anillos, huecos y asimetrías) a alta resolución angular Andrews et al. (2018) ; síntesis general en Andrews (2020)	6
1.3	Esquema de la estructura y procesos astroquímicos en un disco protoplanetario: capas fotoquímicas irradiadas por UV/X, líneas de nieve de H ₂ O y CO, evolución del polvo (crecimiento, asentamiento y deriva) y mecanismos de sublimación/condensación y fotoquímica (foto-desorción y foto-disociación) Öberg & Bergin (2021)	10
1.4	Estructura del <i>outflow</i> protostelar Cepheus E. Los contornos muestran la emisión en CO($J=2-1$) observada con el Plateau de Bure Interferometer (PdBI) a $\sim 1''$ de resolución, mientras que el mapa en color corresponde a la emisión a $4.5 \mu\text{m}$ (IRAC/ <i>Spitzer</i>), dominada por líneas de H ₂ . De izquierda a derecha se distinguen las paredes de la cavidad del <i>outflow</i> , la componente colimada del <i>jet</i> (altas velocidades) y la emisión asociada al <i>bow shock</i> HH 377. Adaptada de Lefloch et al. (2015)	13
2.1	Comparación de las posiciones de T Tau Sa y Sb entre el pico de emisión en la imagen submilimétrica y el modelo de órbita estelar en la fecha de las observaciones de ALMA (18 de agosto de 2017 UTC). Las posiciones de los picos de emisión submilimétrica están marcadas con estrellas, y las posiciones predichas de T Tau Sa y Sb están marcadas con cruces. Estas posiciones marcadas se superpusieron en la imagen submilimétrica Yamaguchi et al. (2021)	23

2.2	Mapa de continuo del programa Garufi et al. (2021) del sistema T Tau, mostrando la emisión compacta asociada al sistema binario sur y a su componente norte. Se superponen las posiciones de T Tau N y T Tau S (T Tau Sa y T Tau Sb como una sola) adoptadas de la solución reportada por Yamaguchi et al. (2021) . Se aprecia un pequeño desfase (del orden de $\sim 0.3''$, comparable al tamaño del haz), pero consistente con diferencias de época de observación y/o con incertidumbres astrométricas de calibración. Este corrimiento corresponde a un desplazamiento rígido del campo y, por lo tanto, no afecta el análisis y resto de estudio de los streamers.	24
2.3	Mapas de momentos del cubo espectral de T Tau (ventana espectral spw25, molécula CN), calculados en el rango de canales 255–285. La posición del sistema T Tau esta representado por el símbolo de estrella en cada uno de los momentos. El panel (a) muestra la intensidad integrada (Momento 0), (b) el campo de velocidades respecto a la velocidad sistémica adoptada $v_{\text{sys}} = 7.14 [km s^{-1}]$ (Momento 1), (c) el ancho de línea (Momento 2) y (d) la velocidad asociada al máximo de emisión (Momento 9). Los momentos se obtuvieron con bettermoments Teague & Foreman-Mackey (2019)	26
2.4	Mapas de momentos del cubo espectral de T Tau (ventana espectral spw29, molécula H ₂ CO), calculados en el rango de canales 220–250. La posición del sistema T Tau esta representado por el símbolo de estrella en cada uno de los momentos. El panel (a) muestra la intensidad integrada (Momento 0), (b) el campo de velocidades respecto a la velocidad sistémica adoptada $v_{\text{sys}} = 7.14 [km s^{-1}]$ (Momento 1), (c) el ancho de línea (Momento 2) y (d) la velocidad asociada al máximo de emisión (Momento 9). Los momentos se obtuvieron con bettermoments Teague & Foreman-Mackey (2019)	27
2.5	Mapas de momentos del cubo espectral de T Tau (ventana espectral spw31, molécula CN), calculados en el rango de canales 215–255. La posición del sistema T Tau esta representado por el símbolo de estrella en cada uno de los momentos. El panel (a) muestra la intensidad integrada (Momento 0), (b) el campo de velocidades respecto a la velocidad sistémica adoptada $v_{\text{sys}} = 7.14 [km s^{-1}]$ (Momento 1), (c) el ancho de línea (Momento 2) y (d) la velocidad asociada al máximo de emisión (Momento 9). Los momentos se obtuvieron con bettermoments Teague & Foreman-Mackey (2019)	28

2.6	Diagrama esquemático de los ejes de coordenadas usados para calcular las trayectorias teóricas de gas en caída (<i>infall</i>) (nube verde) alrededor de un sistema protoestelar (estrella naranja). \vec{r}_0 y \vec{v}_0 denotan, respectivamente, el vector de posición inicial y el vector de velocidad inicial del gas en caída. \vec{r} representa el vector de posición del gas en un punto futuro de su trayectoria (circunferencia de la elipse azul), con θ y ϕ denotando los ángulos polar y acimutal, respectivamente. Las flechas rojas segmentadas muestran los vectores unitarios \hat{x} , \hat{y} y \hat{z} , definidos usando las direcciones de \vec{r}_0 y \vec{v}_0 . En conjunto, estos establecen el marco de coordenadas en el que TIPSy resuelve las ecuaciones de Mendoza et al. (2009) . El plano gris representa el POS, y las flechas gris oscuro superpuestas denotan el marco de coordenadas de nuestras observaciones. Figura obtenida de Gupta et al. (2024)	31
2.7	Flujo de datos de ^{13}CO (2–1) de S CrA en el <i>pipeline</i> de TIPSy. Panel a: mapa de velocidad ponderada por intensidad (momento 1) en colores, con contornos superpuestos que representan la intensidad integrada (momento 0). Los segmentos rojos en las esquinas inferior izquierda muestran una escala de longitud de 1.000 [au]. Las elipses rosadas en las esquinas inferior derecha indican el tamaño del haz (<i>beam</i>) de los datos. Panel b: proyección isométrica del diagrama 3D PPV de píxeles con intensidad $> 5\sigma$ en todo el campo de visión. Panel c: proyección isométrica del diagrama PPV de un <i>streamer</i> aislado y limpiado. El cuadrado rojo y sus barras de error representan, respectivamente, los promedios ponderados por intensidad y las desviaciones estándar. Panel d: igual que el Panel c, pero con la trayectoria de mejor ajuste, representada por la línea negra. Los círculos negros denotan los valores interpolados de la trayectoria teórica, comparados directamente con los promedios ponderados por intensidad. Panel e: igual que el Panel b, pero con la trayectoria de mejor ajuste, representada por la línea negra. Figura obtenida de Gupta et al. (2024)	32
2.8	Mismo procedimiento descrito en la Figure 2.7 , pero aplicado a HL Tau en lugar de S CrA. Figura obtenida de Gupta et al. (2024)	33
3.1	Visualización en diagrama PPV del cubo de datos de la molécula ^{12}CO en el sistema T Tau, donde se aprecia la complejidad de diferenciar estructuras internas debido a que es una línea ópticamente gruesa.	38
3.2	Desplazamiento entre la posición del máximo de emisión integrado (momento 0) de H_2CO (spw29) y la posición de T Tau N, adoptada como referencia del centro del sistema. El corrimiento angular estimado es de $\sim 2.7''$ (equivalente a ~ 397 [au] para $d \simeq 147$ [pc]), calculado a partir de la escala de píxel del cubo ($ \text{CDELTA2} = 1.5 \times 10^{-5}$ [deg pix $^{-1}$], $\approx 0.054''$ [pix $^{-1}$]) y un desplazamiento de ~ 50 [pix]. Un comportamiento similar se observa en las demás moléculas analizadas (véase Figure 7.1).	39

4.1	Diagramas PPV del trazador molecular CN para el cubo de datos de la spw25. (a) Visualización del cubo completo, utilizada para identificar estructuras elongadas coherentes en velocidad. (b) Subcubo adoptado para aislar la componente 1. (c) Subcubo adoptado para aislar la componente 2.	43
4.2	Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para CN (spw25) componente 1; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSY al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).	44
4.3	Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para CN (spw25) componente 2; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSY al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).	45
4.4	La nube azul corresponde a los píxeles (2D) del subcubo CN (spw25) componente 1 (superior) y componente 2 (inferior) con emisión significativa (tras el umbral de RMS), proyectados en offsets de R.A. y Dec. [arcsec]. Los puntos naranjos representan la trayectoria promedio observacional (<i>means</i>) construida por TIPSY al agrupar la emisión en bins a lo largo de la estructura; las barras indican la dispersión asociada en cada bin. Desde la región de inicio del flujo se ilustran posibles direcciones iniciales en el plano del cielo usadas para explorar el espacio de parámetros del modelo balístico: la flecha negra marca la dirección adoptada por el mejor ajuste dentro del conjunto evaluado. (Gupta et al., 2024).	47
4.5	Se muestra un corte del grid fijando el ángulo inicial $v_{xy,ang,0}$ al valor del mejor ajuste para el streamer CN spw25 componente 1 y 2 respectivamente. Para cada uno: Izquierda fracción de ajuste (<i>fit-fraction</i>), definida como la proporción de bins del <i>streamer</i> cuya diferencia modelo-datos es menor que la dispersión observada. Derecha métrica global de desviación (<i>deviation</i>) según la definición interna del código. La cruz roja marca la solución óptima y las barras indican las incertidumbres estimadas para $v_{xy,0}$ y z_0 a partir del conjunto de soluciones aceptables (Gupta et al., 2024).	48
4.6	La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSY en el cubo completo de datos para CN spw25. (Gupta et al., 2024; Mendoza et al., 2009).	49
4.7	Diagramas PPV del trazador molecular H ₂ CO para el cubo de datos de la spw29. (a) Visualización del cubo completo, utilizada para identificar estructuras elongadas coherentes en velocidad. (b) Subcubo adoptado para aislar la componente 1. (c) Subcubo adoptado para aislar la componente 2.	50

4.8	Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para H ₂ CO (spw29) componente 1; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSY al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).	51
4.9	Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para H ₂ CO (spw29) componente 2; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSY al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).	52
4.10	La nube azul corresponde a los píxeles (2D) del subcubo H ₂ CO (spw29) componente 1 (superior) y componente 2 (inferior) con emisión significativa (tras el umbral de RMS), proyectados en offsets de R.A. y Dec. [arcsec]. Los puntos naranjos representan la trayectoria promedio observacional (<i>means</i>) construida por TIPSY al agrupar la emisión en bins a lo largo de la estructura; las barras indican la dispersión asociada en cada bin. Desde la región de inicio del flujo se ilustran posibles direcciones iniciales en el plano del cielo usadas para explorar el espacio de parámetros del modelo balístico: la flecha negra marca la dirección adoptada por el mejor ajuste dentro del conjunto evaluado. (Gupta et al., 2024).	53
4.11	Se muestra un corte del grid fijando el ángulo inicial $v_{xy,ang,0}$ al valor del mejor ajuste para el streamer H ₂ CO spw29 componente 1 y 2 respectivamente. Para cada uno: Izquierda fracción de ajuste (<i>fit_fraction</i>), definida como la proporción de bins del <i>streamer</i> cuya diferencia modelo-datos es menor que la dispersión observada. Derecha métrica global de desviación (<i>deviation</i>) expresada según la definición interna del código. La cruz roja marca la solución óptima y las barras indican las incertidumbres estimadas para $v_{xy,0}$ y z_0 a partir del conjunto de soluciones aceptables (Gupta et al., 2024).	54
4.12	La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSY en el cubo completo de datos para H ₂ CO spw29. (Gupta et al., 2024; Mendoza et al., 2009).	55
4.13	Diagramas PPV del trazador molecular CN para el cubo de datos de la spw31. (a) Visualización del cubo completo, utilizada para identificar estructuras elongadas coherentes en velocidad. (b) Subcubo adoptado para aislar la componente 1. (c) Subcubo adoptado para aislar la componente 2.	56

4.14	Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para CN (spw31) componente 1; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSY al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).	57
4.15	Los puntos representan los vóxeles con emisión significativa en el subcubo seleccionado para CN (spw31) componente 2; el color representa el flujo/intensidad. Las “medias” corresponden a la trayectoria promedio observacional construida por TIPSY al binnear la emisión a lo largo de la estructura. En (a) se superpone además la trayectoria balística de mejor ajuste proyectada al PPV para evaluar consistencia geométrica y cinemática (Gupta et al., 2024).	58
4.16	La nube azul corresponde a los píxeles (2D) del subcubo CN (spw31) componente 1 (superior) y componente 2 (inferior) con emisión significativa (tras el umbral de RMS), proyectados en offsets de R.A. y Dec. [arcsec]. Los puntos naranjos representan la trayectoria promedio observacional (<i>means</i>) construida por TIPSY al agrupar la emisión en bins a lo largo de la estructura; las barras indican la dispersión asociada en cada bin. Desde la región de inicio del flujo se ilustran posibles direcciones iniciales en el plano del cielo usadas para explorar el espacio de parámetros del modelo balístico: la flecha negra marca la dirección adoptada por el mejor ajuste dentro del conjunto evaluado. (Gupta et al., 2024).	59
4.17	Se muestra un corte del grid fijando el ángulo inicial $v_{xy,ang,0}$ al valor del mejor ajuste para el streamer CN spw31 componente 1 y 2 respectivamente. Para cada uno: Izquierda fracción de ajuste (<i>fit_fraction</i>), definida como la proporción de bins del <i>streamer</i> cuya diferencia modelo-datos es menor que la dispersión observada. Derecha métrica global de desviación (<i>deviation</i>) expresada según la definición interna del código. La cruz roja marca la solución óptima y las barras indican las incertidumbres estimadas para $v_{xy,0}$ y z_0 a partir del conjunto de soluciones aceptables (Gupta et al., 2024).	60
4.18	La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSY en el cubo completo de datos para CN spw31. (Gupta et al., 2024; Mendoza et al., 2009).	61
5.1	Histograma de longitudes de streamers estimadas para distintos sistemas (cada color corresponde a un sistema; ver leyenda). Las longitudes provienen de este trabajo (T Tau; CN y H ₂ CO) y de la literatura HL Tau (HCO ⁺), S CrA (¹³ CO, Oph IRS 63 (C ¹⁸ O/SO, IRAS 04169+270 (C ¹⁸ O,SO,H ₂ CO) y Per-emb-50(H ₂ CO/C ¹⁸ O).	64

5.2	Relación entre la masa de gas asociada a cada componente de streamer en T Tau (M_{gas}) y su tasa de infall (\dot{M}), estimadas a partir del modelado balístico. Los puntos están separados por trazador (CN spw25, H ₂ CO spw29 y CN spw31) y las etiquetas C1-C2 indican cada componente dentro de un mismo trazador.	65
7.1	Gráfica de distancia entre punto de máx emisión de la molécula H ₂ CO (spw29) y la ubicación de T Tau N.	76
7.2	Diagrama PPV del subcubo de la componente 1 de la molécula CN spw25 previo proceso de clustering.	76
7.3	Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados. . . .	77
7.4	Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (CN spw25 componente 1) en TIPSy. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: (izquierda) distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, (centro) ángulo proyectado θ (en [grados]), y (derecha) la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSy para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (<i>means</i>) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.	77
7.5	La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSy en el cubo completo de datos para CN spw25 previo criterio de corte por congruencia física.	78
7.6	Las gráficas muestran el cambio de la velocidad radial y velocidad tangencial durante el recorrido del ajuste del modelo para la molécula CN spw25 componente 1.	79
7.7	Diagrama PPV del subcubo de la componente 2 de la molécula CN spw25 previo proceso de clustering.	80
7.8	Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados. . . .	80
7.9	Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (CN spw25 componente 2) en TIPSy. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: (izquierda) distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, (centro) ángulo proyectado θ (en [grados]), y (derecha) la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSy para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (<i>means</i>) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.	80
7.10	La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSy en el cubo completo de datos para CN spw25 previo criterio de corte por congruencia física.	81

7.11	Las gráficas muestran el cambio de la velocidad radial y velocidad tangencial durante el recorrido del ajuste del modelo para la molécula CN spw25 componente 2.	82
7.12	Diagrama PPV del subcubo de la componente 1 de la molécula H ₂ CO spw29 previo proceso de clustering.	83
7.13	Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados. . . .	83
7.14	Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (H ₂ CO spw29 componente 1) en TIPSY. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: (izquierda) distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, (centro) ángulo proyectado θ (en [grados]), y (derecha) la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSY para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (<i>means</i>) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.	83
7.15	La curva negra muestra la trayectoria del mejor ajuste obtenida con el modelo balístico implementado en TIPSY en el cubo completo de datos para H ₂ CO spw29 previo criterio de corte por congruencia física.	84
7.16	Las gráficas muestran el cambio de la velocidad radial y velocidad tangencial durante el recorrido del ajuste del modelo para la molécula H ₂ CO spw29 componente 1.	85
7.17	Diagrama PPV del subcubo de la componente 2 de la molécula H ₂ CO spw29 previo proceso de clustering.	86
7.18	Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados. . . .	86
7.19	Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (H ₂ CO spw29 componente 2) en TIPSY. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: (izquierda) distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, (centro) ángulo proyectado θ (en [grados]), y (derecha) la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSY para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (<i>means</i>) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.	86
7.20	Diagrama PPV del subcubo de la componente 1 de la molécula CN spw31 previo proceso de clustering.	87
7.21	Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados. . . .	87

7.22	Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (CN spw31 componente 1) en TIPSY. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: (izquierda) distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, (centro) ángulo proyectado θ (en [grados]), y (derecha) la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSY para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (<i>means</i>) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.	87
7.23	Diagrama PPV del subcubo de la componente 2 de la molécula CN spw31 previo proceso de clustering.	88
7.24	Diagrama 3D de los vóxeles eliminados y sobrevivientes al proceso de limpieza de clustering. En color rojo los vóxeles de la nube sobreviviente. En color negro los vóxeles eliminados. . . .	88
7.25	Estimación de la métrica de distancia para la discretización del streamer (CN spw31 componente 2) en TIPSY. Muestra tres mapas calculados en el plano del cielo a partir de los vóxeles con emisión significativa del subcubo: (izquierda) distancia proyectada r (en [arcsec]) respecto al punto de referencia adoptado por el código, (centro) ángulo proyectado θ (en [grados]), y (derecha) la métrica de distancia combinada utilizada por TIPSY para ordenar puntos y definir una coordenada “a lo largo” del streamer. Esta métrica se emplea para estimar límites de partición (bins) y calcular puntos promedio (<i>means</i>) con sus dispersiones antes del ajuste balístico.	88
7.26	Las gráficas muestran el cambio de la velocidad radial y velocidad tangencial durante el recorrido del ajuste del modelo para la molécula CN spw31.	89
7.27	Inspección visual de la molecular SO ₂ en CASA. Se aprecia su majoraxe como 0.425833”.	90

List of Tables

3.1	Rangos adoptados para definir subcubos PPV.	38
3.2	Umbral de selección de emisión y parámetros de limpieza adoptados para cada subcubo.	39
3.3	Criterio adoptado para recortar la trayectoria del mejor ajuste a un tramo físicamente consistente.	39
4.1	Resumen de las transiciones analizadas en Banda 6 y parámetros observacionales.	42
4.2	Parámetros del modelo balístico para CN (spw25) componente 1.	46
4.3	Parámetros del modelo balístico para CN (spw25) componente 2.	46
4.4	Propiedades derivadas para CN (spw25) componente 1.	48
4.5	Propiedades derivadas para CN (spw25) componente 2.	48
4.6	Parámetros del modelo balístico para H ₂ CO (spw29) componente 1.	50
4.7	Parámetros del modelo balístico para H ₂ CO (spw29) componente 2.	51
4.8	Propiedades derivadas para H ₂ CO (spw29) componente 1.	52
4.9	Propiedades derivadas para H ₂ CO (spw29) componente 2.	54
4.10	Parámetros del modelo balístico para CN (spw31) componente 1.	56
4.11	Parámetros del modelo balístico para CN (spw31) componente 2.	57
4.12	Propiedades derivadas para CN (spw31) componente 1.	58
4.13	Propiedades derivadas para CN (spw31) componente 2.	60
5.1	Resumen de propiedades derivadas y calidad del ajuste para todas las componentes modeladas.	62
7.1	Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSy para el streamer CN (spw25) componente 1.	77
7.2	Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSy para el streamer CN (spw25) componente 2.	78
7.3	Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSy para el <i>streamer</i> H ₂ CO (spw29) componente 1.	78
7.4	Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSy para el <i>streamer</i> H ₂ CO (spw29) componente 2.	81
7.5	Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSy para el streamer CN (spw31) componente 1.	81
7.6	Parámetros y magnitudes derivadas del mejor ajuste TIPSy para el streamer CN (spw31) componente 2.	84
7.7	Parámetros químicos adoptados para el cálculo de masa y tasa de acreción de los streamers observados.	91