

ARTÍCULO CIENTÍFICO

## UNphot.py : Una herramienta para la identificación de estrellas T Tauri en regiones de formación estelar

Sofia Guevara-Montoya <sup>1,\*</sup>, Diego Campos <sup>1</sup>, David Vanegas <sup>1</sup>, Diana Muñoz-Valencia <sup>1</sup>, Grecia Sanchez <sup>1</sup>, Jose Hernandez <sup>1</sup>, Juan Herrera <sup>2</sup>, Nicole Salazar <sup>1</sup>, Samuel Daza <sup>1</sup>, Andrés Felipe Caro <sup>3</sup> y Giovanni Pinzón <sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia

<sup>2</sup>Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España

\* E-mail: [soguevaram@unal.edu.co](mailto:soguevaram@unal.edu.co) (SGM); [gapinzone@unal.edu.co](mailto:gapinzone@unal.edu.co) (GP)

### Resumen

En este trabajo, presentamos UNphot.py, una herramienta computacional que utiliza fotometría obtenida del instrumento IRAC de Spitzer y el catálogo GAIA EDR3. Aplicamos UNphot.py a cinco regiones de formación estelar (NGC2264, B30, IC 348, LDN1588 y B35) para validar el rendimiento del código. Los diagramas de magnitud-color y color-color resultantes revelaron objetos en la región de Clase II, lo cual indica que es probable la existencia de estrellas jóvenes en esta zona. Para confirmar la naturaleza de estos objetos, cruzamos nuestros hallazgos con espectros de la base de datos LAMOST. La identificación de estrellas T Tauri (ETT) se respalda mediante la presencia de líneas de emisión de  $H\alpha$ . Entre las 5 regiones se encontraron en total 25 ETT.

**Palabras clave:** Estrellas T Tauri – Acreción magnetosférica – Fotometría infrarroja.

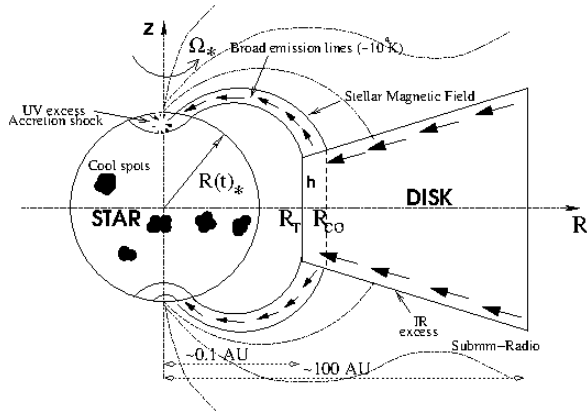
### 1. Introducción

Las estrellas T Tauri (ETT) son objetos jóvenes y de baja masa ( $<1.5M_{\odot}$ ) rodeados por un disco protoplanetario, representativos de los estados más primitivos de la evolución estelar ( $<5 \text{ Myr}^1$ ). Es característico su exceso de infrarojo en comparación a los objetos más evolucionados sobre la secuencia principal (Hartmann, Calvet, Gullbring, y D'Alessio, 1998). Adicionalmente, exhiben emisión prominente de líneas espectrales, principalmente en la Serie de Balmer. Las ETT son extremadamente variables en todos los rangos de longitud de onda, desde los rayos-X hasta el infrarojo lejano y el radio. Producen y amplifican su propio campo magnético, mostrando valores del orden de kG. La mayoría de estas características observacionales se explican a partir del modelo de acreción magnetosférica (AM) y, debido a su importancia en relación con la posibilidad de formación planetaria en el disco, las ETT son objetos de creciente interés astrofísico.

En este modelo, una ETT es considerada como una esfera magnetizada y con baja contracción gravitacional. El campo magnético se asume por simplicidad como dipolar y acoplado con el gas ionizado en la región interna del disco ( $\sim 10000\text{K}$ ). El campo trunca al disco a una distancia  $R_T$  y desde allí el gas del disco, en su mayoría Hidrógeno, se canaliza a través de las columnas de acreción, como se ilustra en la Figura 1. El impacto del material del disco sobre la estrella genera el exceso de energía observado en la región UV. La emisión en rayos-X tiene origen en las regiones activas de la ETT y en general es independiente del disco (Romanova, Ustyugova, Koldoba, y Lovelace, 2005).

Si bien el modelo AM explica satisfactoriamente muchos de los rasgos observados, la identificación de ETT en regiones de formación estelar en la vecindad solar es todavía muy precaria pues se han explorado ampliamente solo algunas decenas de regiones de formación estelar. Se espera que la nueva generación de telescopios en tierra y espaciales, funcionando en el infrarojo y submilimétrico, facilite considerablemente la identificación y caracterización de ETT. En este sentido se requieren herramien-

<sup>1</sup> Unidades correspondientes a Mega años.



**Figura 1.** Vista esquemática del modelo de acreción magnetosférico para estrellas T Tauri. En este modelo se da un truncamiento del campo a una distancia  $R_T$ , este fluye por las columnas de acreción y el impacto que tiene con la estrella genera un exceso de energía.

tas automáticas para la detección de estas estrellas. En esta contribución, presentamos los primeros resultados obtenidos con UNphot.py, una herramienta computacional para la obtención de la fotometría de imágenes FITS, aplicada a regiones de formación estelar cercanas al Sol. Los resultados aquí presentados corresponden a las actividades realizadas en la asignatura de libre elección “Técnicas Observacionales” del Programa de Maestría en Ciencias - Astronomía de la Universidad Nacional de Colombia, durante el segundo semestre de 2023.

## 2. Selección de la muestra

Con el fin de validar nuestro código, hemos obtenido fotometría en el infrarrojo medio para cinco regiones de formación estelar de la vecindad solar con edades similares utilizando cuatro canales (3.6, 4.5, 5.8 y 8.0  $\mu\text{m}$ ) de la cámara IRAC (InfraRed Array Camera) del telescopio espacial Spitzer (Hernández y cols., 2007). Nuestra estrategia para identificar ETT consiste en aplicar una metodología homogénea para todas las asociaciones presentadas en la Tabla 1. Debido a que la duración de la etapa ETT es inferior a 10 Myr, se han considerado regiones jóvenes con una edad media  $\sim 3$  Myr y con posibilidad de acceso a los datos calibrados astrométricamente (i.e. pbcd-Level2) del instrumento IRAC/Spitzer. A continuación describimos brevemente las principales características de las regiones mostradas en la Figura 2.

**Tabla 1.** Regiones de formación estelar seleccionadas. <sup>a</sup>Dahm (2008); <sup>b</sup>Grasser y cols. (2021); <sup>c</sup>Ruiz-Rodríguez y cols. (2018) <sup>d</sup>Williams y Cieza (2011); <sup>e</sup>De Marchi, Panagia, y Beccari (2017); <sup>f</sup>Panagia, Gilmozzi, Macchetto, Adorf, y Kirshner (1991); <sup>g</sup>Zari, Brown, de Bruijne, Manara, y de Zeeuw (2017); <sup>h</sup>Huélamo y cols. (2017).

SFR	d(pc)	Age(My)
NGC2264	760 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
B30	380 <sup>b</sup>	2-5 <sup>b</sup>
IC 348	310 <sup>c</sup>	2-3 <sup>d</sup>
LDN1588	380 <sup>g</sup>	1-3
B35	400 <sup>h</sup>	3

### 2.1. B30, B35 y LDN1588

Hemos considerado tres cúmulos de estrellas en la vecindad del anillo del polvo centrado en la estrella  $\lambda$ -Ori en el complejo molecular de Orión. Estudios previos sugieren que este anillo

es consecuencia de una supernova que explotó hace 1 My, sólo que no se encuentra el objeto compacto que debería estar en el centro (Kounkel et al. 2020). De los tres cúmulos de estrellas, dos se encuentran sobre el anillo (Barnard 30 y LDN1588) mientras que Barnard 35 (B35) se encuentra levemente fuera de este.

### 2.2. NGC2264

Es una región de formación estelar en Monoceros, que contiene miles de estrellas con edad similar y con movimientos propios y velocidades radiales también parecidas. La edad media de este cúmulo es  $3 \text{ Myr} \pm 5 \text{ Myr}$  (Dahm et al. 2008) y se encuentra a 760 pc (Park et al. 2000). En su interior ocurre formación estelar activa muy bien caracterizada. En particular el reciente estudio de Flaccomio et al. 2023 (A&A, 670, A37) sugiere que la formación estelar inició primero alrededor de la estrella masiva S Mon (Tipo espectral O) hace 4 Myr y se extendió progresivamente hacia el sur dirigido a la Nebulosa del Cono cuya población estelar es más joven. Esto debido en parte a que la fracción de estrellas con disco es baja alrededor de S Mon y se incrementa hacia el Sur.

### 2.3. IC348

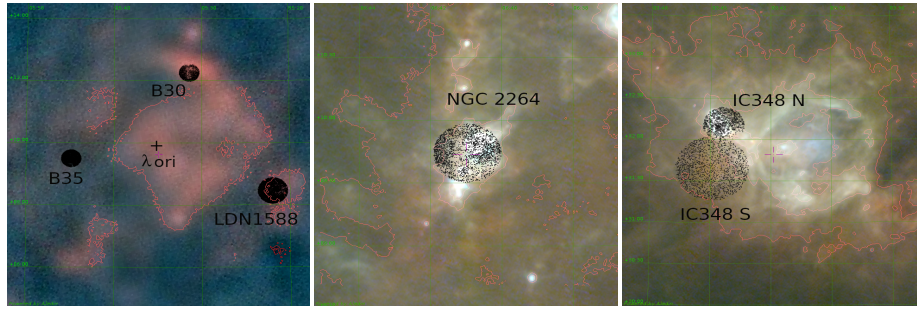
Es una región de formación estelar en Perseo, localizada a 315 pc de distancia en la nube molecular de Perseo. Contiene estrellas ópticamente visibles y un sinnúmero de estrellas aún embebidas en la nube que no se ven sino en infrarrojo con extinción  $A_V$  del orden de 5 Ma. En Stelzer et al. (2012) realizan un completo estudio de este cúmulo utilizando rayos X del telescopio espacial CHANDRA. Los autores detectan cerca de 290 fuentes de rayos X en esta región de formación estelar.

## 3. Fotometría Infrarroja

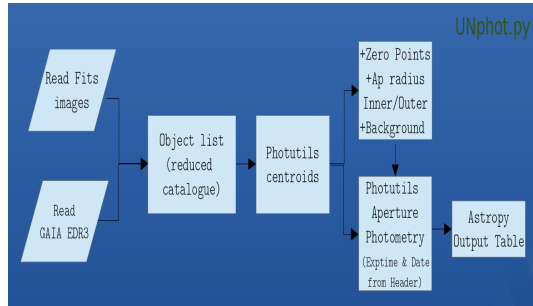
Se realizó la fotometría de apertura sobre cada canal de las imágenes IRAC usando UNphot.py, utilizando el catálogo GAIA EDR3 como indica el esquema de la Figura 3. La mejor S/N se obtuvo para una apertura de radio 6 píxeles y radios internos y externos del anillo del cielo iguales a 6 y 15 píxeles, respectivamente. Las magnitudes del punto cero para las longitudes efectivas de 3.6, 4.5, 5.8 y 8.0  $\mu\text{m}$  fueron respectivamente 18.8027, 18.3177, 17.8331 y 17.2120. El fondo del cielo se obtuvo dentro de una apertura circular de igual área a la apertura que contiene el objeto de interés. Adicionalmente, se aplicó la corrección de apertura sugerida en el manual de IRAC (IRAC Instrument team, 2021). Nos limitamos a fotometría con errores relativos inferiores al 10 % lo cual degrada el número de candidatos fotométricos a cerca de la mitad original. Finalmente, las fuentes extragalácticas se asumen con magnitud absoluta  $[3.6] > 15$  (Winston y cols., 2007). Para una descripción detallada de los datos IRAC sugerimos al lector a Texeira et al. 2006.

### 3.1. Diagramas color-magnitud

Nuestro objetivo es utilizar la información fotométrica para identificar candidatas ETT en las regiones de formación estelar bajo estudio. Nuestra estrategia se basa en el hecho que las ETT aparecen separadas de las estrellas de campo en los diagramas color-color infrarrojos. Debido a que las ETT tienen disco de gas y polvo, estas se detectan a través de sus excesos en infrarrojo con respecto a la emisión fotosférica propia de la estrella. Las partículas de polvo son iluminadas por la estrella joven y debido a su tamaño, estas reemiten en longitudes de onda infrarrojas. A medida que el disco evoluciona, las regiones internas presentan



**Figura 2.** Regiones de formación estelar cercanas al Sol del catálogo GAIA EDR3 utilizados para la calibración fotométrica de las imágenes IRAC/Spitzer. Estas cinco regiones son tres cúmulos ubicados en la vecindad del anillo de polvo centrado en la estrella  $\lambda$ -Ori (izquierda), la región de formación estelar en Monoceros NGC2264 (centro) e IC348 ubicado en Perseo (derecha). Esta última región se divide en la parte norte (IC348 N) y la parte sur (IC348 S).



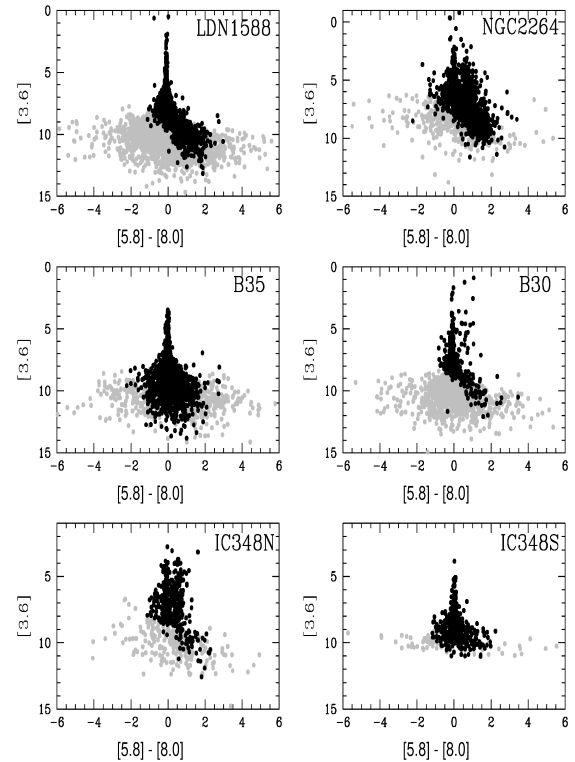
**Figura 3.** Esquema de *UNphot.py*, una herramienta para la obtención de fotometría en imágenes calibradas astrométricamente.

un déficit de polvo trazado a través de los huecos que aparecen en las distribuciones espectrales de energía.

En la Figura 4 presentamos los diagramas color-magnitud para todas las fuentes fotométricas en cada grupo. Se diferencia con color negro la fotometría con precisión de 0.1. Debido a que los errores en la determinación de las magnitudes crece con la longitud de onda, siendo significativamente mayores en el canal  $[8.0] \mu\text{m}$ , se crea un sesgo a la derecha cuando se exige precisión del 10 %. Los objetos muy brillantes en  $[8.0] \mu\text{m}$  y embebidos en todos los grupos excepto en IC348S, contribuyen con un peso mayor cuando se realiza el corte del 10 %. Las estrellas de campo (i.e. de la secuencia principal) se ubican hacia la parte izquierda presentando excesos nulos alrededor de  $[5.8] - [8.0]$ . La dispersión en este diagrama se atribuye a factores diversos tales como : (1) el crecimiento de los granos de polvo a medida que el disco evoluciona, (2) efectos de inclinación del disco respecto al observador y (3) variabilidad en el mecanismo de acreción.

### 3.2. Diagramas color-color

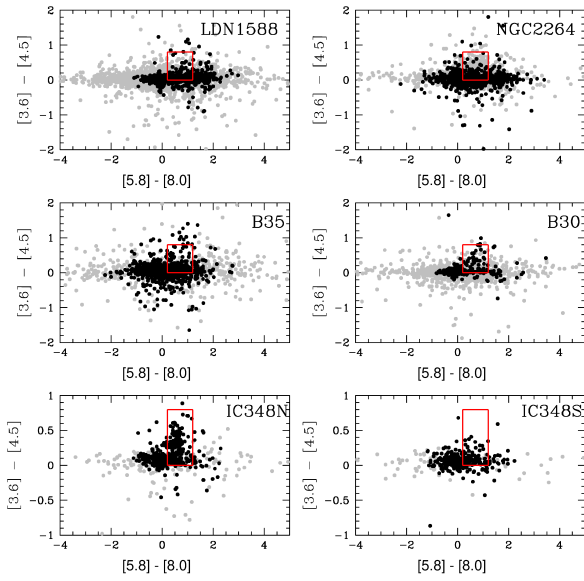
Existe una clasificación dependiendo de la emisión infrarroja. Se define  $\alpha = d \log \lambda F_{\lambda} / d \log \lambda$  en donde  $F_{\lambda}$  es el flujo y  $\lambda$  la longitud de onda la cual por definición se encuentra entre 2.2 y 10  $\mu\text{m}$ . Si  $\alpha > 0$  se dice que la estrella es Clase I, si  $-1.5 < \alpha < 0$  es de Clase II y si  $\alpha < -1.5$  la estrella es clase III. En los diagramas color-color mostrados en la Figura 5, se indican las candidatas en color negro. A partir de los resultados de los modelos estelares antes de la secuencia principal, es claro que la zona esperada para las estrellas Clase II con discos ocurre en la región comprendida entre  $0.0 < [3.6] - [4.5] < 0.8$  y  $0.4 < [5.8] - [8.0] < 1.2$  Allen y cols. (2004) como se indica en el recuadro rojo en la misma Figura. La identificación de estrellas jóvenes con disco de Clase II es importante pues es en esta región del diagrama color-color de IRAC que se encuentran las candidatas a ETT.



**Figura 4.** Diagramas de magnitud-color (CMD) para las cinco SFR seleccionadas. Los símbolos en gris corresponden a todas las fuentes fotométricas, mientras que los puntos negros corresponden a objetos con errores relativos por debajo del 10 %.

### 3.3. Discusión

Realizamos una búsqueda de espectros ópticos obtenidos con LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, Luo2015), localizado en el telescopio Schmidt de 4m en el Observatorio de Xinlong. Descargamos espectros en baja resolución ( $R \sim 1800$ ) para todas las fuentes Clase II, con una cobertura espectral 3650–9000 Å. Nuestra estrategia consiste en buscar la presencia de rasgos típicos de ETT tales como la línea de  $H\alpha$  en emisión y en particular medir su ancho equivalente usando *Py-spectutils*. Debido a las limitaciones de cobertura de objetos de la base de datos LAMOST, encontramos un total de 25 estrellas clase II con este rasgo en emisión en las cinco regiones de formación estelar bajo estudio, distribuidas de la siguiente forma: 16 en IC348N, 0 en IC348S, 7 en NGC2264, 2 en B30, 0 en B35 y 0 en LDN1588. En la Figura 6 se encuentran dos de



**Figura 5.** Diagrama  $[3.6] - [4.5]$  vs  $[5.8] - [8.0]$  para las cinco SFR seleccionadas. El cuadro delimita la región clase II. Los símbolos son los mismos que en la Figura 4.

los perfiles de emisión de  $H\alpha$  encontrados en las regiones que presentaban candidatas a ETT (IC348N, NGC2264 y B30). La Tabla 2 presenta los datos de todas las candidatas encontradas. El valor de magnitud se encuentra corregido por la extinción y apertura usada en el código.

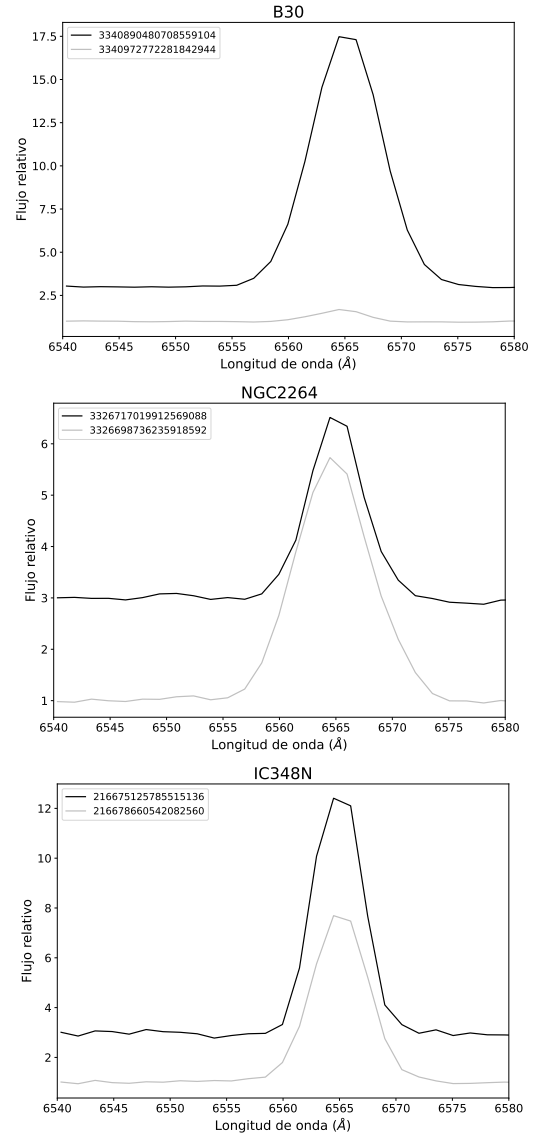
## 4. Conclusiones

En este trabajo se presentan resultados de fotometría infrarroja con imágenes IRAC/Spitzer obtenida con la herramienta computacional UNphot.py. En su primera versión, el código determina las magnitudes y errores en los cuatro canales IRAC utilizando el catálogo GAIA EDR3. A partir de dichos resultados fotométricos, se realiza una selección de candidatas ETT de Clase II en las siguientes regiones de formación estelar: B30, B35, LDN1588, IC348 y NGC2264.

Basados en una búsqueda en la base de espectros LAMOST, se identifican 25 ETT debido a la presencia de la línea de  $H\alpha$  en emisión confirmando resultados de estudios previos para estas regiones ampliamente conocidas. Sin embargo, este estudio se vio limitado debido a que se encuentran más datos en GAIA EDR3 que en LAMOST. Los datos de candidatas se cruzaron con SIMBAD y se reportan 18 catalogadas como ETT del total. Las candidatas encontradas son 16 en IC348N, 7 en NGC2264 y 2 en B30.

## Referencias

- Allen, L. E., Calvet, N., D'Alessio, P., Merin, B., Hartmann, L., Megeath, S. T., ... Fazio, G. G. (2004, septiembre). Infrared Array Camera (IRAC) Colors of Young Stellar Objects. *ApJS*, 154(1), 363-366. doi: [10.1086/422715](https://doi.org/10.1086/422715)
- Dahm, S. E. (2008). The Young Cluster and Star Forming Region NGC 2264. En B. Reipurth (Ed.), *Handbook of star forming regions, volume 1* (Vol. 4, p. 966). doi: [10.48550/arXiv.0808.3835](https://doi.org/10.48550/arXiv.0808.3835)
- De Marchi, G., Panagia, N., y Beccari, G. (2017, septiembre). Photometric Determination of the Mass Accretion Rates of Pre-main-sequence Stars. V. Recent Star Formation in the 30 Dor



**Figura 6.** Perfiles en emisión de  $H\alpha$  de las candidatas a ETT encontradas en las 3 regiones de todas las tratadas los cuales exhiben los mayores excesos IR en la Figura 4. Por cada región se presentan solo dos del mayor excesos IR. Estas están diferenciadas con el ID presentado en Gaia DR2 y el valor del flujo en la primera estrella (negra) se ha desplazado hacia arriba 2 unidades para mayor claridad.

- Nebula. *ApJ*, 846(2), 110. doi: [10.3847/1538-4357/aa85e9](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa85e9)
- Grasser, N., Ratzenböck, S., Alves, J., Großschedl, J., Meingast, S., Zucker, C., ... Möller, T. (2021, agosto). The  $\rho$  Ophiuchi region revisited with Gaia EDR3. Two young populations, new members, and old impostors. *A&A*, 652, A2. doi: [10.1051/0004-6361/202140438](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140438)
- Hartmann, L., Calvet, N., Gullbring, E., y D'Alessio, P. (1998, mar). Accretion and the evolution of t tauri disks. *The Astrophysical Journal*, 495(1), 385-400. doi: [10.1086/305277](https://doi.org/10.1086/305277)
- Hernández, J., Hartmann, L., Megeath, T., Gutermuth, R., Muzerolle, J., Calvet, N., ... Fazio, G. (2007, junio). A Spitzer Space Telescope Study of Disks in the Young  $\sigma$  Orionis Cluster. *ApJ*, 662(2), 1067-1081. doi: [10.1086/513735](https://doi.org/10.1086/513735)
- Huélamo, N., de Gregorio-Monsalvo, I., Palau, A., Barrado, D., Bayo, A., Ruiz, M. T., ... Ménard, F. (2017, enero). A search for pre- and proto-brown dwarfs in the dark cloud Barnard 30 with ALMA. *A&A*, 597, A17. doi: [10.1051/0004-6361/201628510](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628510)
- IRAC Instrument team. (2021). *IRAC Instrument Handbook*. IPAC. doi: [10.26131/IRSA486](https://doi.org/10.26131/IRSA486)

**Tabla 2.** Datos de los candidatos a ETT encontrados por cada región. El valor de magnitud de cada región está corregido por la extinción y la apertura utilizada en el código.

REGION	ID	RA	DEC	[3.6]	[4.5]	[5.8]	[8.0]	EW
B30	3340890480708559104	82.7154	12.1435	12.1435	12.5520	12.2198	11.8484	-98.8664
	3340972772281842944	82.8483	12.1622	12.1622	10.4207	9.9964	9.4759	-3.4812
NGC2264	3326691009590655616	100.1758	9.5604	12.4110	12.1281	11.65493	11.1048	-9.5236
	3326710663360978816	100.2148	9.7234	14.1453	13.7909	13.5692	12.7735	-17.4684
	3326698736235918592	100.4156	9.6744	12.9550	12.7836	12.4966	11.7555	-34.7337
	3326716229638584832	100.2261	9.8224	14.4886	13.9492	13.3497	12.3540	-82.7439
	3326905272623980288	100.1723	9.9039	13.4363	12.8357	12.4386	11.9601	-7.2114
	3326717019912569088	100.1979	9.8247	13.3489	12.8502	12.5296	11.8646	-20.8260
	3326689738279228800	100.2453	9.5160	13.6288	13.3521	13.0794	12.1577	-12.7804
IC348N	216674816547870464	56.1188	31.9983	13.0831	12.8573	12.5491	12.1446	-7.1715
	216675125785515136	56.1242	32.0151	14.2737	13.8945	13.4202	12.8344	-51.8022
	216676775052953216	56.1583	32.0582	12.2694	11.9327	11.5488	10.7758	-14.1919
	216676981211381632	56.1863	32.0673	11.5429	10.9329	10.5106	10.0119	-29.5870
	216678321241170304	56.1606	32.1335	12.5570	12.1095	11.8953	11.4707	-16.9470
	216678493039859328	56.1559	32.1502	12.7175	12.2759	11.7404	10.9113	-2.9183
	216678660542082560	55.9835	32.0370	11.4028	10.8317	10.2563	9.6604	-40.7214
	216679382096866944	55.9995	32.0781	14.9825	14.6950	14.4364	13.8111	-22.9472
	216680863861815680	56.0802	32.1263	13.1386	12.8273	12.5301	12.1038	-6.5861
	216680928285636096	56.1112	32.1390	12.5683	12.2547	12.1632	11.6008	-48.5505
	216682444409767936	56.0930	32.2002	13.1516	12.7130	12.2992	11.6737	-88.5837
	216695256295900672	55.9534	32.2643	13.6548	13.1827	12.6943	11.9916	-12.5903
	216695634253464576	55.9940	32.2910	12.6784	12.3107	12.0239	11.3083	-145.5133
	216701033028221440	56.2339	32.1542	12.0480	11.7191	11.5725	11.1740	-6.2145
	216706290068182016	56.1422	32.2766	14.5438	14.1715	13.9190	13.3826	-92.8557
	216706942903208320	56.1297	32.3134	14.4724	13.9994	13.5912	12.9733	-7.80922

Panagia, N., Gilmozzi, R., Macchetto, F., Adorf, H. M., y Kirshner, R. P. (1991, octubre). Properties of the SN 1987A Circumstellar Ring and the Distance to the Large Magellanic Cloud. *ApJ*, 380, L23. doi: [10.1086/186164](https://doi.org/10.1086/186164)

Romanova, M. M., Ustyugova, G. V., Koldoba, A. V., y Lovelace, R. V. E. (2005, dec). Propeller-driven outflows and disk oscillations. *The Astrophysical Journal*, 635(2), L165–L168. doi: [10.1086/499560](https://doi.org/10.1086/499560)

Ruiz-Rodríguez, D., Cieza, L. A., Williams, J. P., Andrews, S. M., Principe, D. A., Caceres, C., ... Kastner, J. H. (2018, agosto). ALMA survey of circumstellar discs in the young stellar cluster IC 348. *MNRAS*, 478(3), 3674–3692. doi: [10.1093/mnras/sty1351](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1351)

Williams, J. P., y Cieza, L. A. (2011). Protoplanetary disks and their evolution. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49(1), 67–117. doi: [10.1146/annurev-astro-081710-102548](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102548)

Winston, E., Megeath, S. T., Wolk, S. J., Muzerolle, J., Gutermuth, R., Hora, J. L., ... Fazio, G. G. (2007, noviembre). A Combined Spitzer and Chandra Survey of Young Stellar Objects in the Serpens Cloud Core. *ApJ*, 669(1), 493–518. doi: [10.1086/521384](https://doi.org/10.1086/521384)

Zari, E., Brown, A. G. A., de Bruijne, J., Manara, C. F., y de Zeeuw, P. T. (2017, diciembre). Mapping young stellar populations toward Orion with Gaia DR1. *A&A*, 608, A148. doi: [10.1051/0004-6361/201731309](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731309)