

Congreso Colombiano de Astronomía y Astrofísica

**ASTRO
FEST 24**

BUCARAMANGA

CoCoA2024 (20nov-23nov).

PROPIEDADES ROTACIONALES DE ESTRELLAS T TAURI EN EL COMPLEJO DE FORMACIÓN ESTELAR EN ORIÓN

Por : Giovanni Pinzón

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá



Noviembre 21 de 2024

Colaboradores:

Javier Serna, U. Oklahoma (USA)

Jesús Hernández, UNAM, IA Ensenada (MEX)

Ezequiel Manzo-Martínez, UNAM, IA Ensenada (MEX)

Karina Mauco, European Southern Observatory, (GER)

Carlos Román-Zúñiga, UNAM, IA Ensenada (MEX)

Nuria Calvet, U. Michigan (USA),

César Briceño, Cerro Tololo Inter-American Observatory, La Serena (CHILE)

Marina Kounkel, U. Vanderbilt (USA)

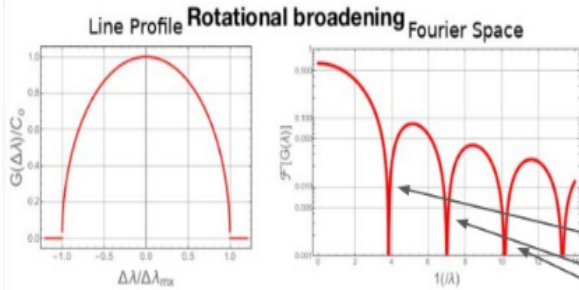
Ricardo López-Valdivia, UNAM, IA Ensenada (MEX)

El problema del momento angular

t (Ma)	Objeto	J / M (cm ² / s)
500	Nubes Moleculares (<1pc)	10 ²²
	Binarias (P<10 a)	10 ²⁰
	Binarias (P<3 a)	10 ¹⁹
<5	Estrellas T Tauri , PMS	10¹⁷
>40	Secuencia Principal (>40 Myr)	3x10 ¹⁶
4572	El Sol hoy	10 ¹⁵

(Hartmann 2016)

¿Cómo medimos la rotación de una estrella T Tauri ?



$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{c} v \sin i$$

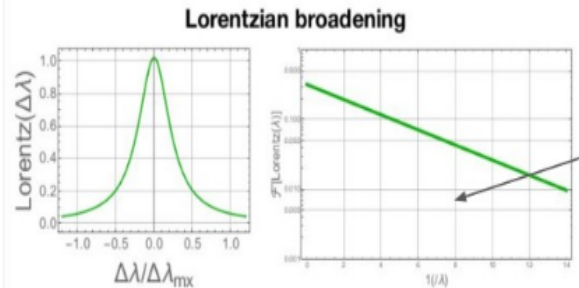
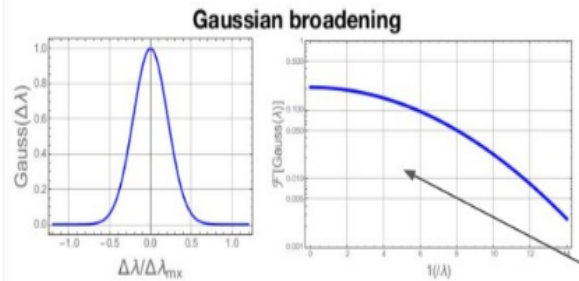
$$\mathcal{F}[G(\Delta\lambda)](\nu) = \frac{J_1(\Delta\lambda\nu)}{\Delta\lambda\nu}$$

$$\nu_1 = 0.660\Delta\lambda$$

$$\nu_2 = 1.162\Delta\lambda$$

$$\nu_3 = 1.661\Delta\lambda$$

(Carroll 1933)



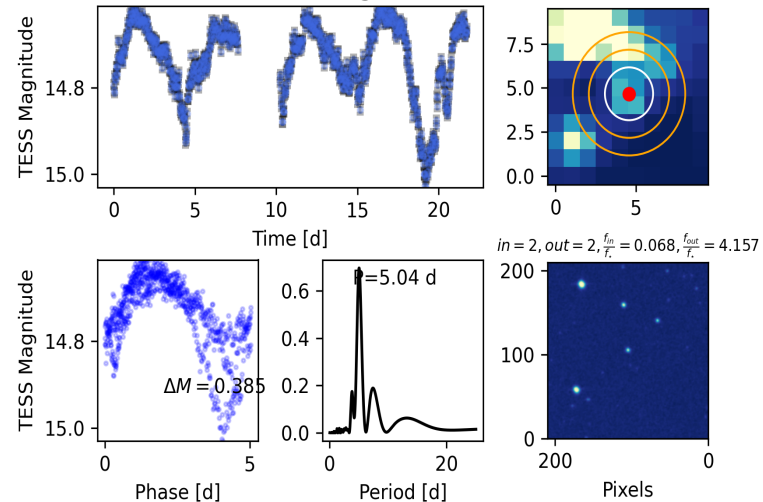
No crean ceros en el espacio de Fourier

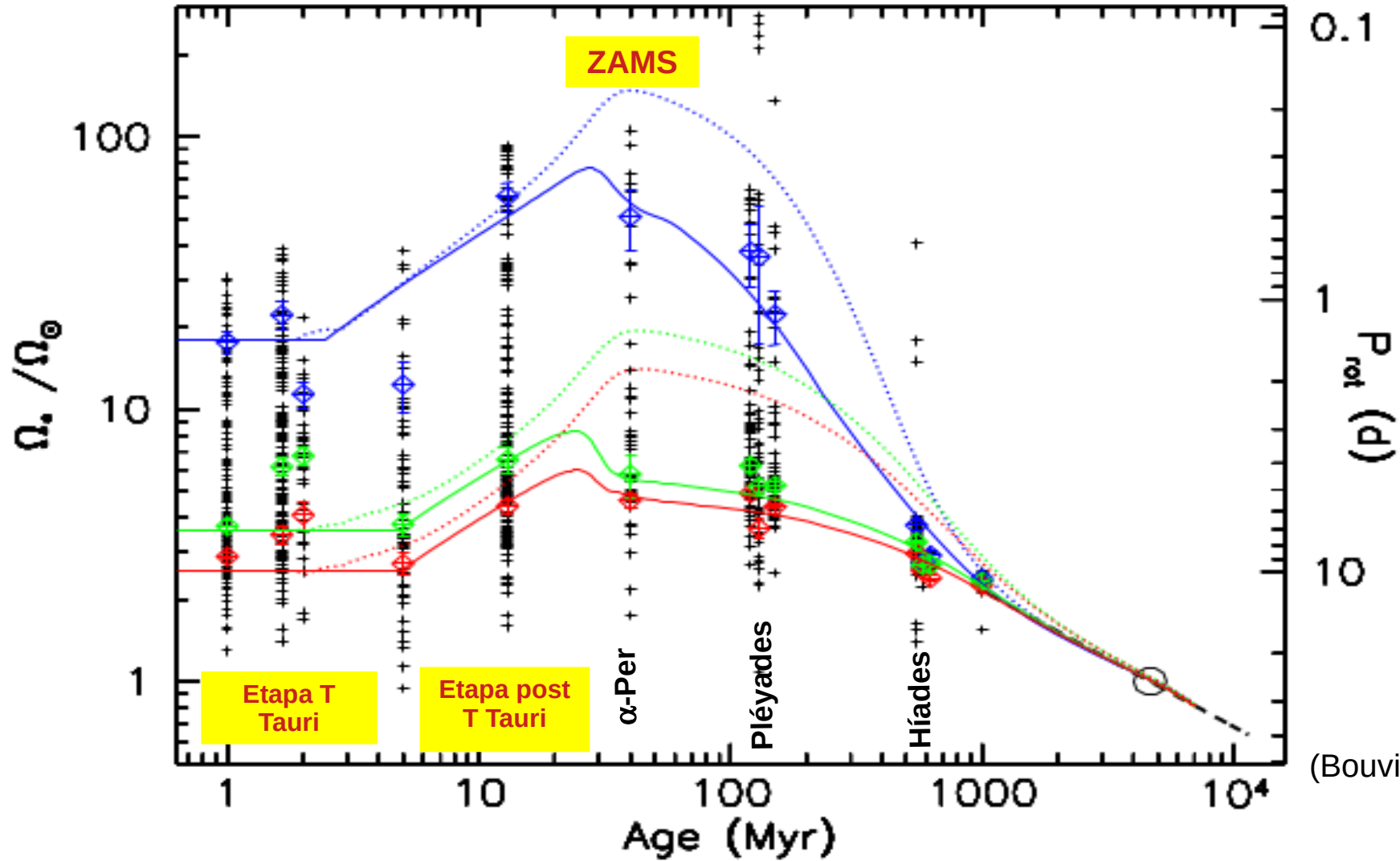
TESSExtractor

<https://www.tessextractor.app/>

(Serna et al. 2021)

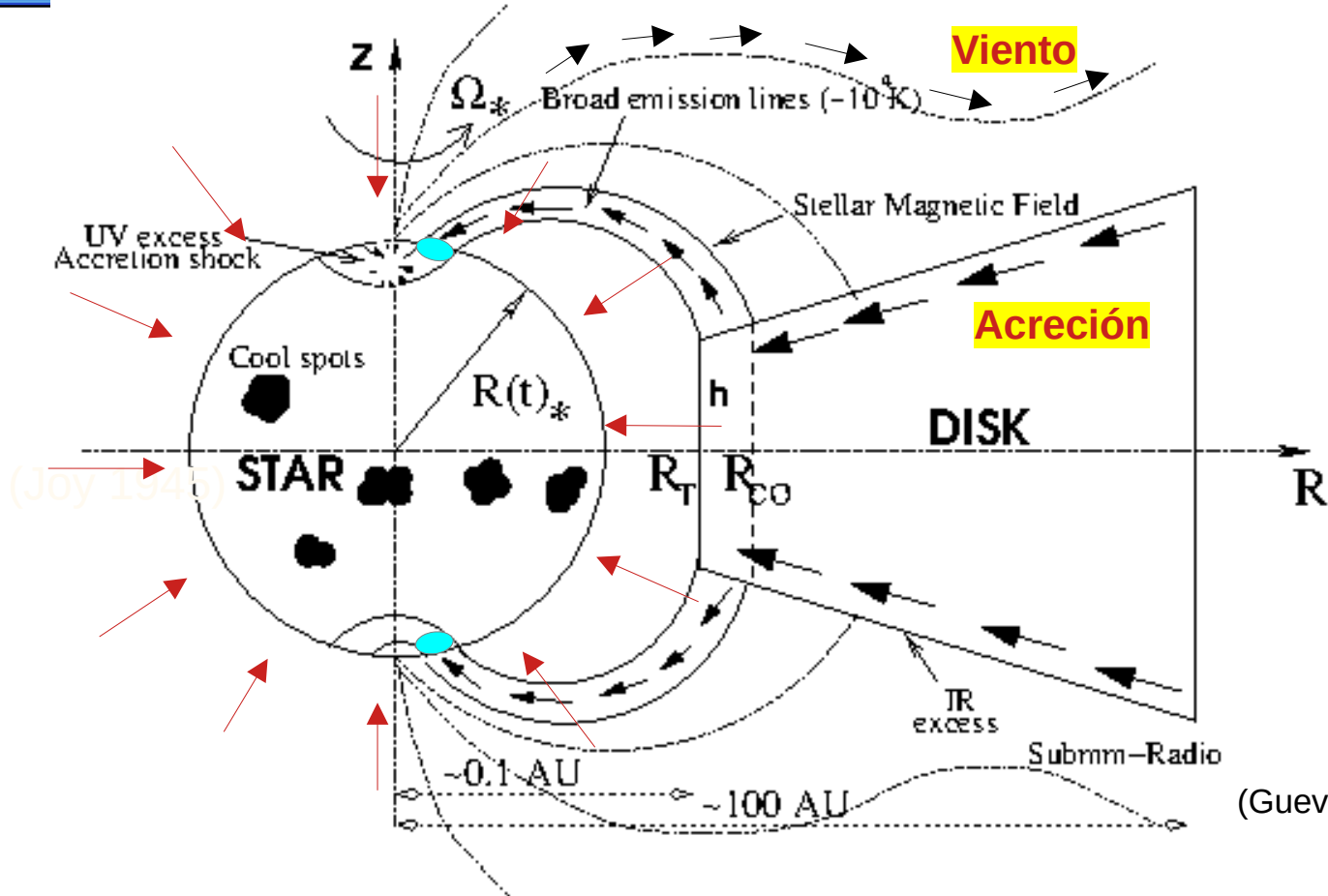
TIC 11291229, Tmag=14.716





(Bouvier et al. 2013)

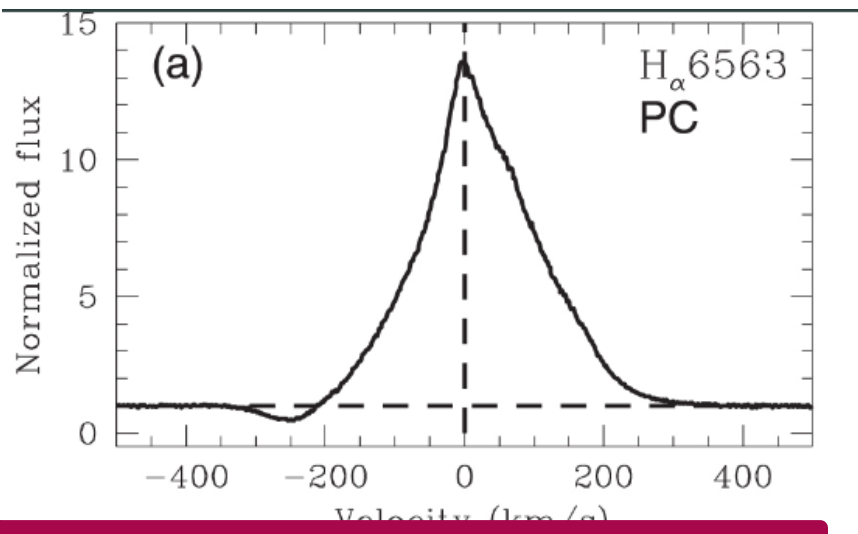
En las **T Tauri** ocurre transferencia de **J** desde el disco (acreción) y hacia el *M.I.* (viento)



(Guevara-Montoya et al. 2024)

Diagnósticos de *Acreción* & *Vientos*

Acreción

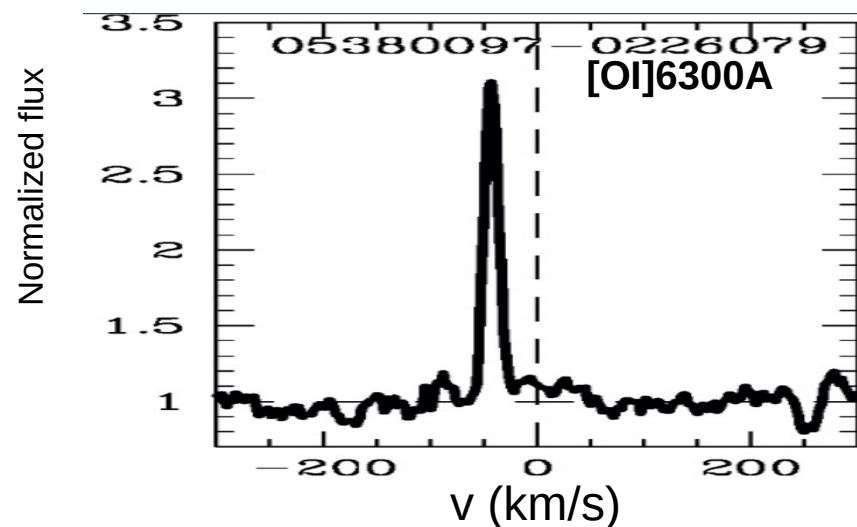


$$\log(L_{\text{acc}}) = 1.0(\pm 0.2)\log(L_{\text{H}\alpha}) + 1.3(\pm 0.7)$$

(Ingleby et al. 2013)

$$\dot{M}_{\text{a}} = L_{\text{acc}} R_{*} / (GM_{*})$$

Viento estelar



$$\log_{10}(\dot{M}_{\text{wind}}) = -4.65 + \log_{10}\left(\frac{L_{\lambda 6300}}{L_{\odot}}\right)$$

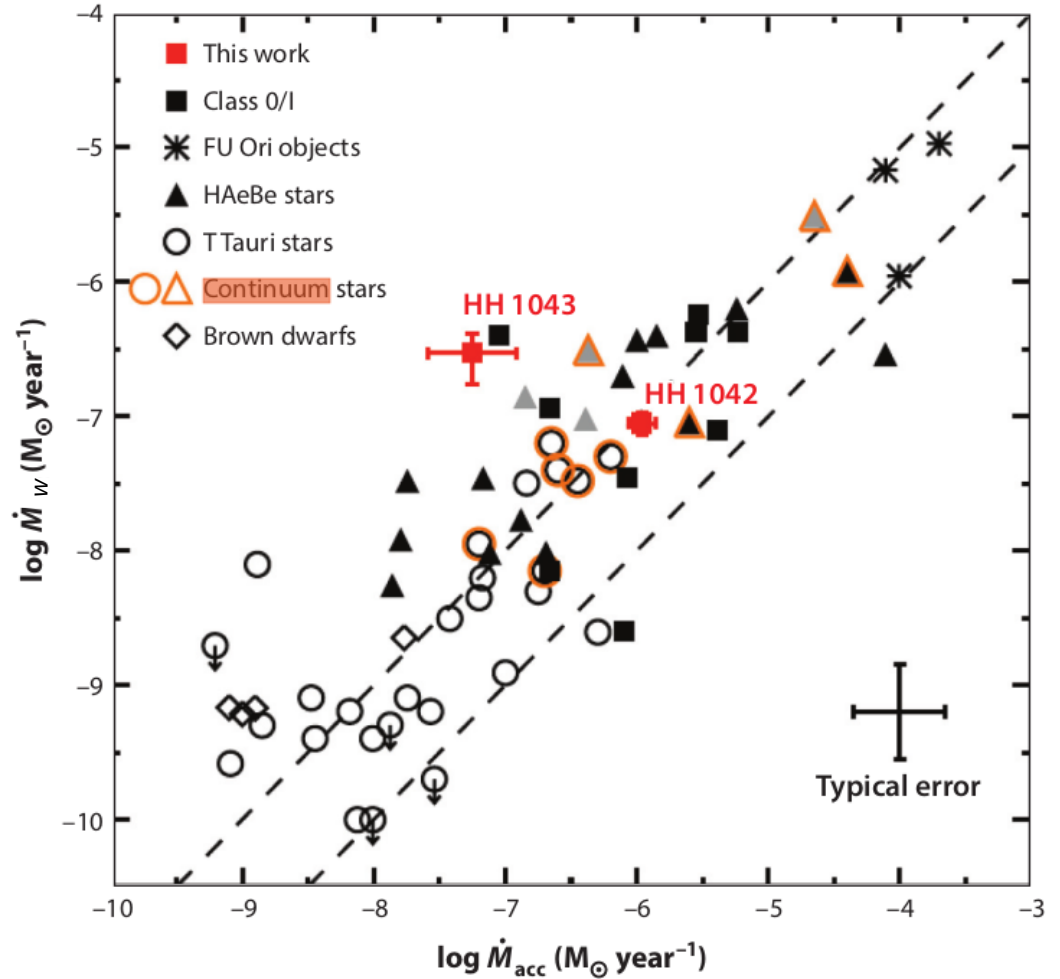
(Hartigan et al. 1995; Serna et al. 2024)

“The branching-ratio (χ)”

$$\chi = \dot{M}_w / \dot{M}_{acc}$$

Factor determinante en la evolución de la rotación estelar

(Ellerbroek et al. 2013)

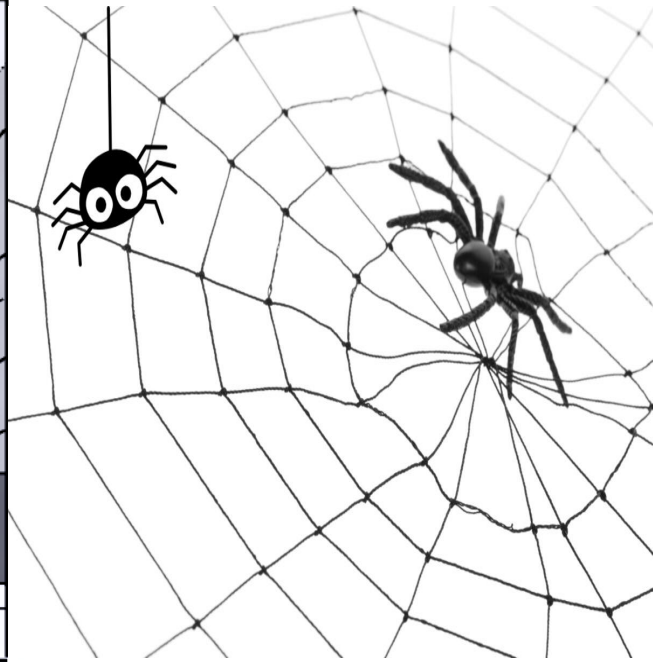
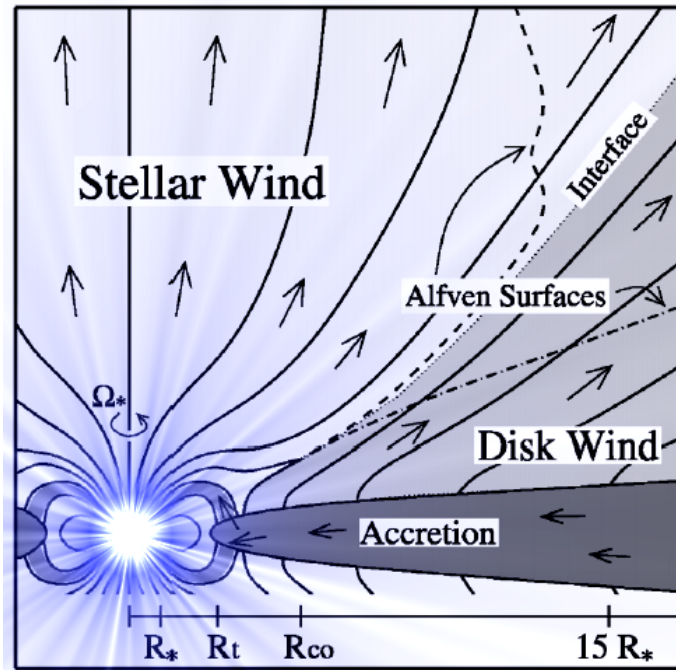


Accretion-powered stellar winds models (APSW)

$$\dot{\mathbf{j}} = -\dot{M}_w \Omega_* r_A^2$$

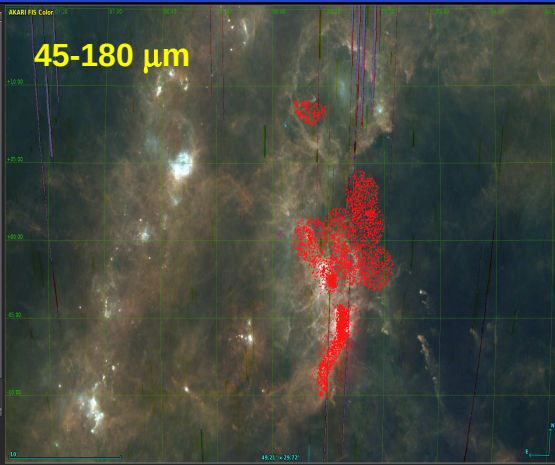
(Weber & Davis 1967)

$$\frac{r_A}{R_*} = K \left(\frac{B_*^2 R_*^2}{\dot{M}_w v_{\text{esc}}} \right)^m$$

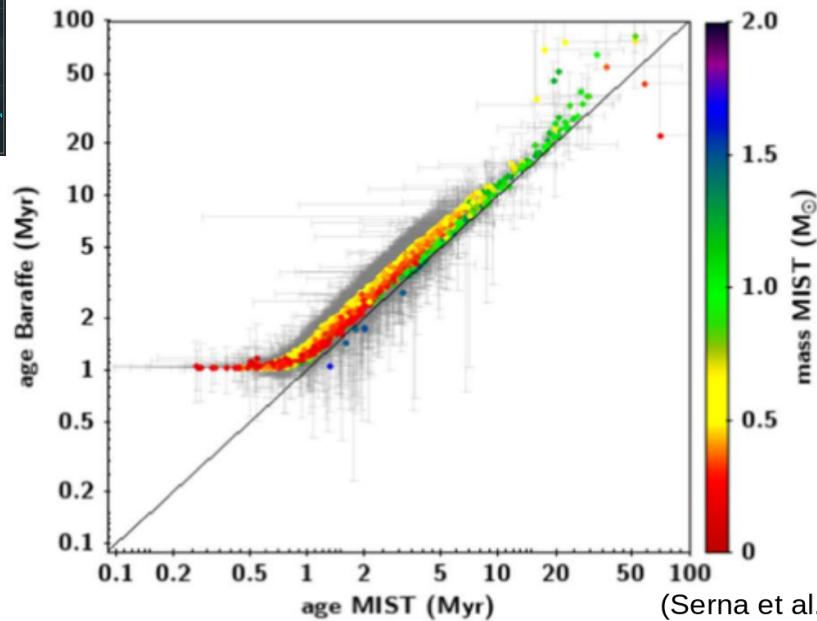
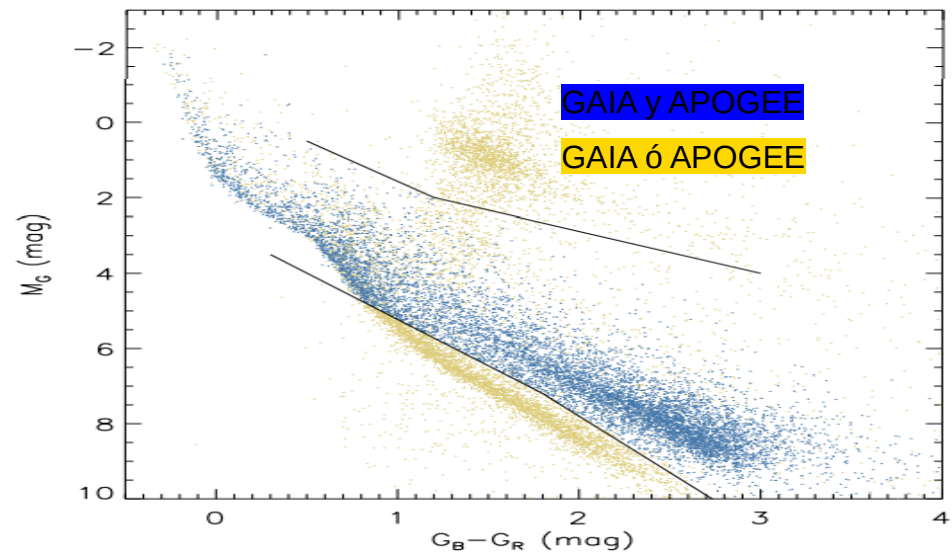


(Matt et al. 2008)
(Pinzón et al. 2021)
(Serna et al. 2024)

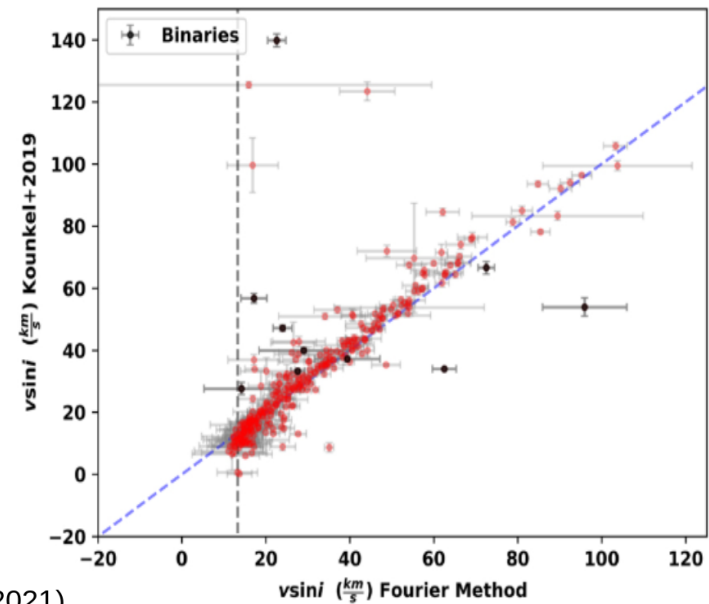
Muestra bona-fide



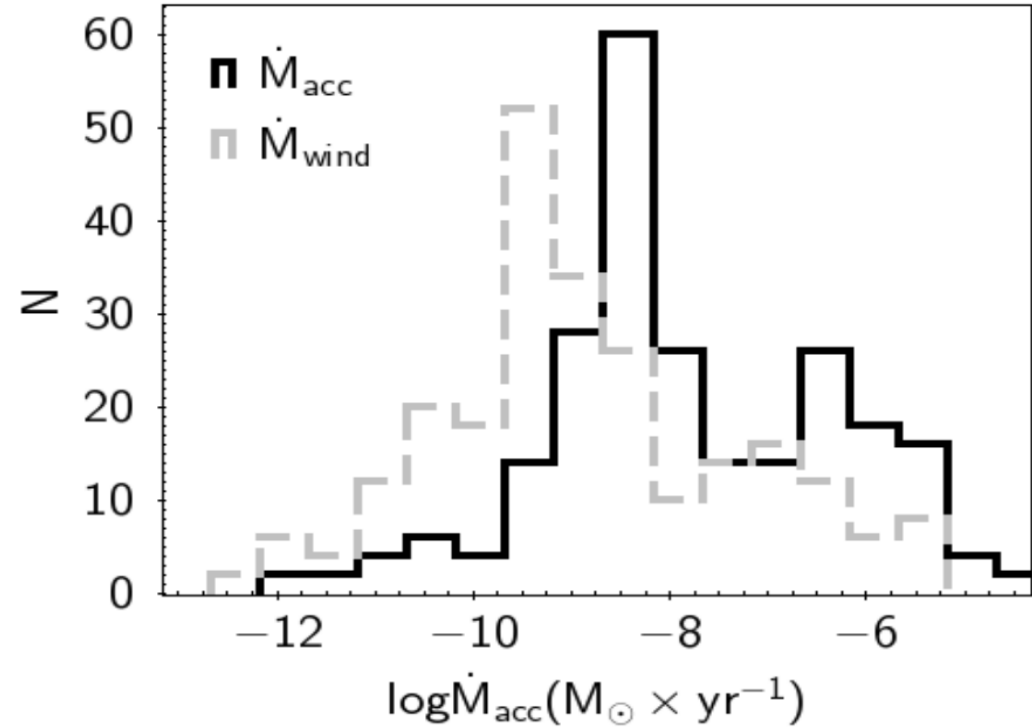
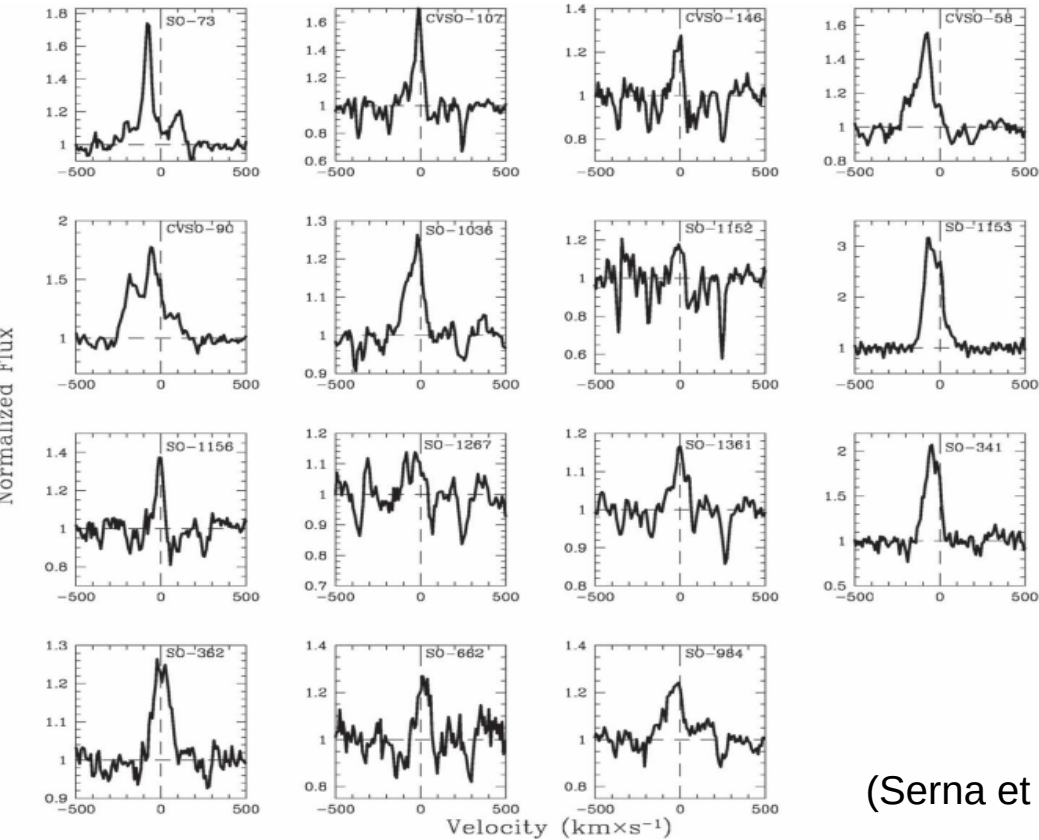
(Kounkel et al. 2018,19)
Espectrógrafo APOGEE
1.5-1.7 μm R22500



(Serna et al. 2021)

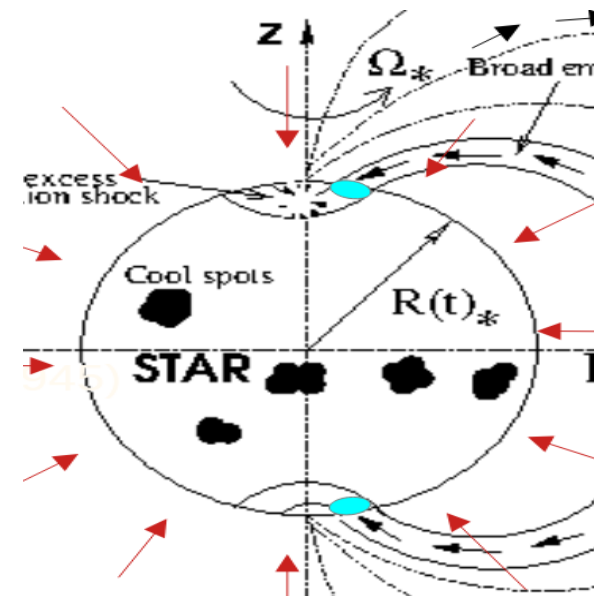
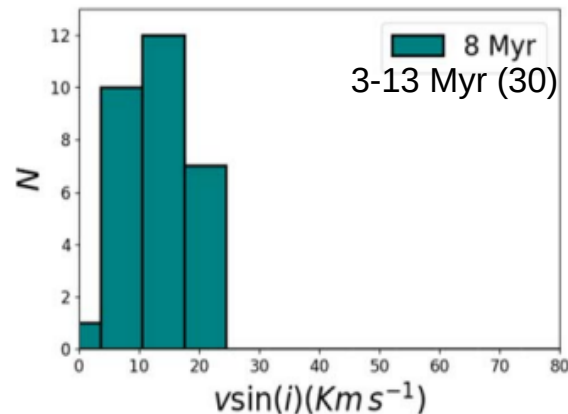
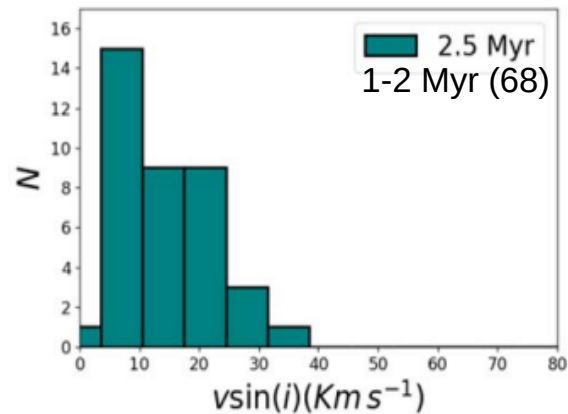
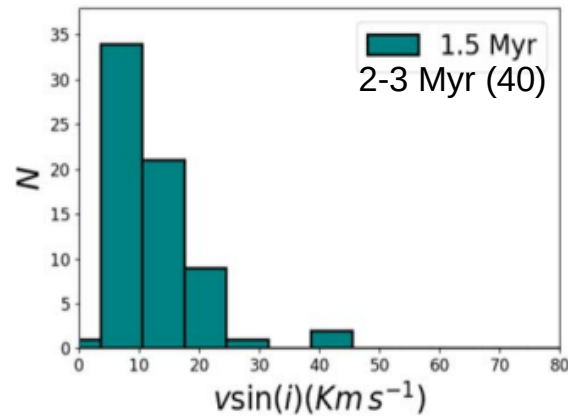
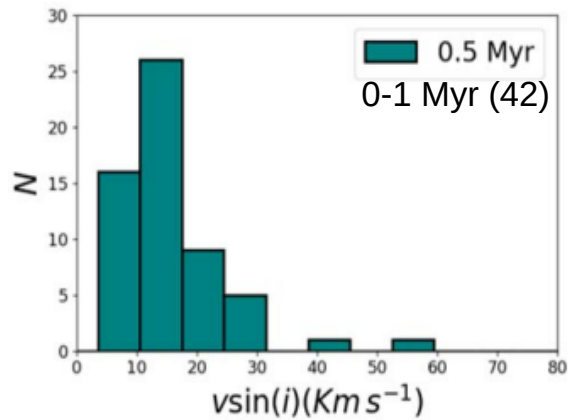


\dot{M}_w y \dot{M}_{acc}



(Serna et al. 2024)

Comparación con un modelo rotacional



$$J_*(t) = I_*(t) \Omega_*(t)$$

La evolución rotacional es multi-paramétrica

$$\dot{M}_a = \dot{M}_{acc}^{in} e^{-\tau/\tau_a}$$

- $\Omega_*(0); M_*$
- B_*
- χ

$$\frac{d\Omega_*}{dt} = \frac{T_*}{I_*} - \Omega_* \left(\frac{\dot{M}_a}{M_*} + \frac{2}{R_*} \frac{dR_*}{dt} \right)$$

Branching-ratio: $\chi = \dot{M}_w / \dot{M}_a$

Modelo estelar (Baraffe +2015)

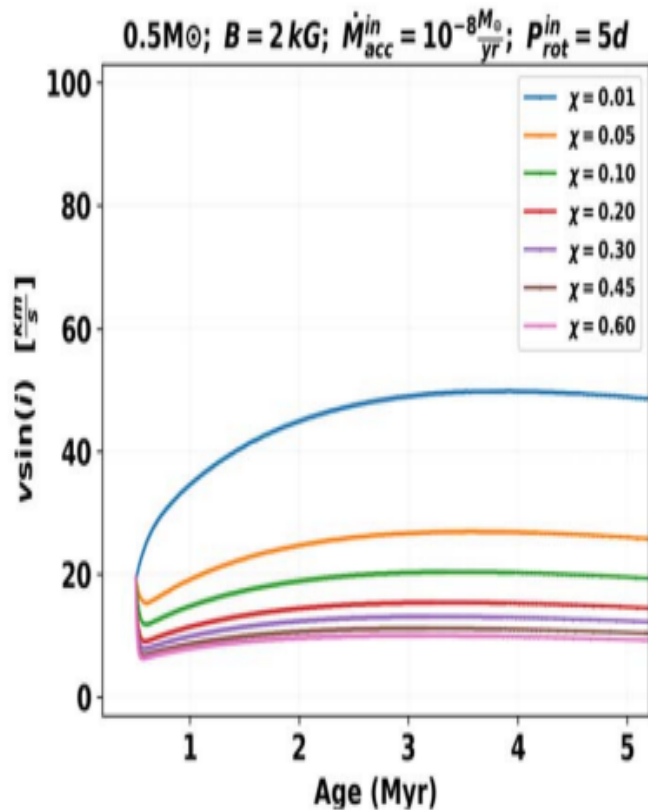
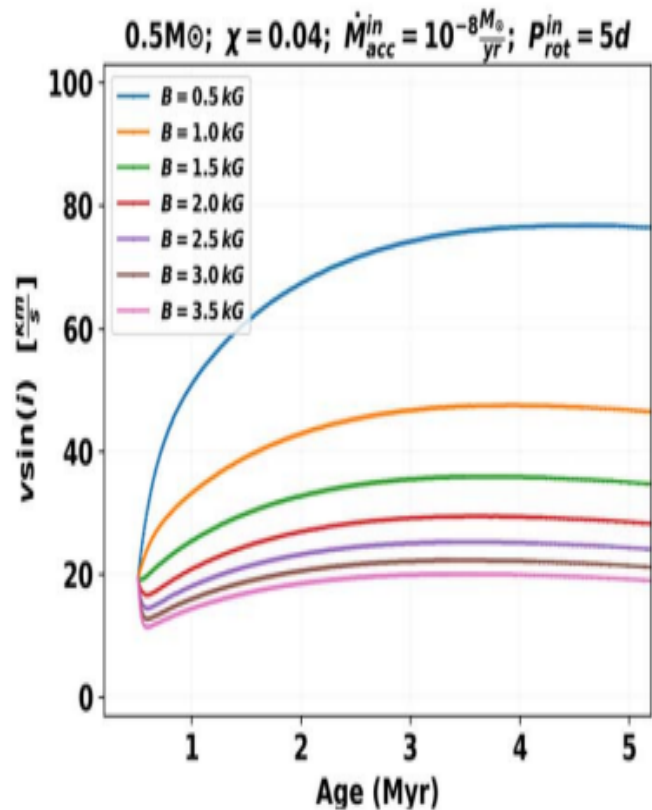
$$T_* = \begin{cases} \dot{M}_a \delta J + \int_{R_T}^{R_{out}} \left[\gamma(R) \frac{\mu^2}{R^4} dR - \dot{M}_w \Omega_* r_A^2 dR \right] & \text{if } t < \tau_D \\ 0 & \text{if } t > \tau_D \end{cases}$$

$$B_\phi / B_z$$

$$\frac{r_A}{R_*} = K \left(\frac{B_*^2 R_*^2}{\dot{M}_w v_{esc}} \right)^m$$

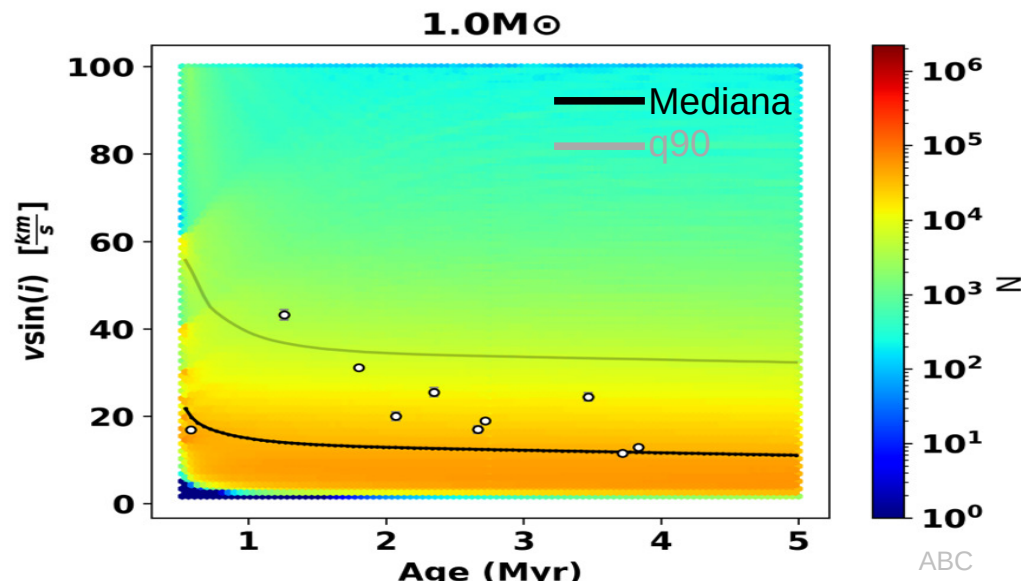
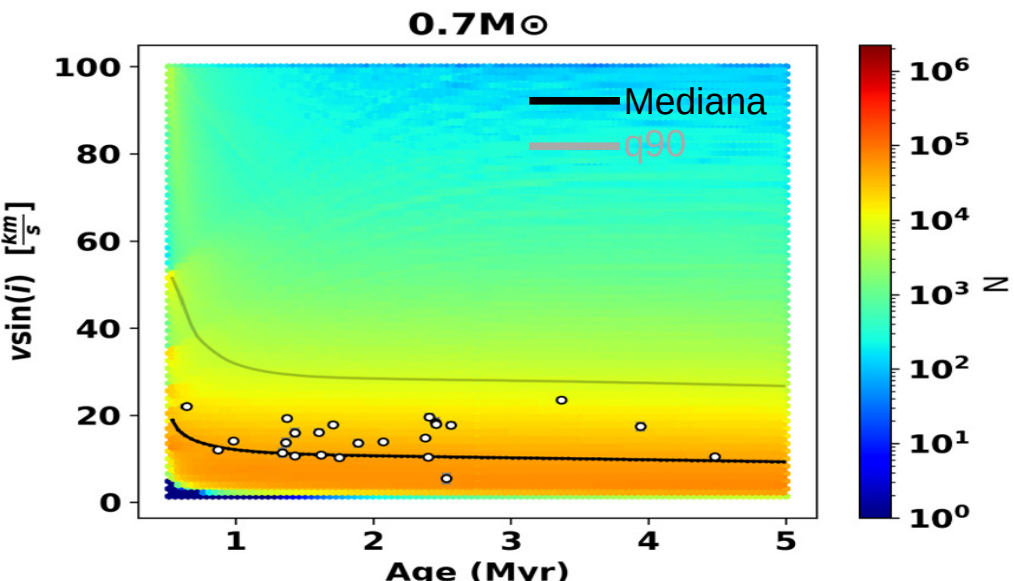
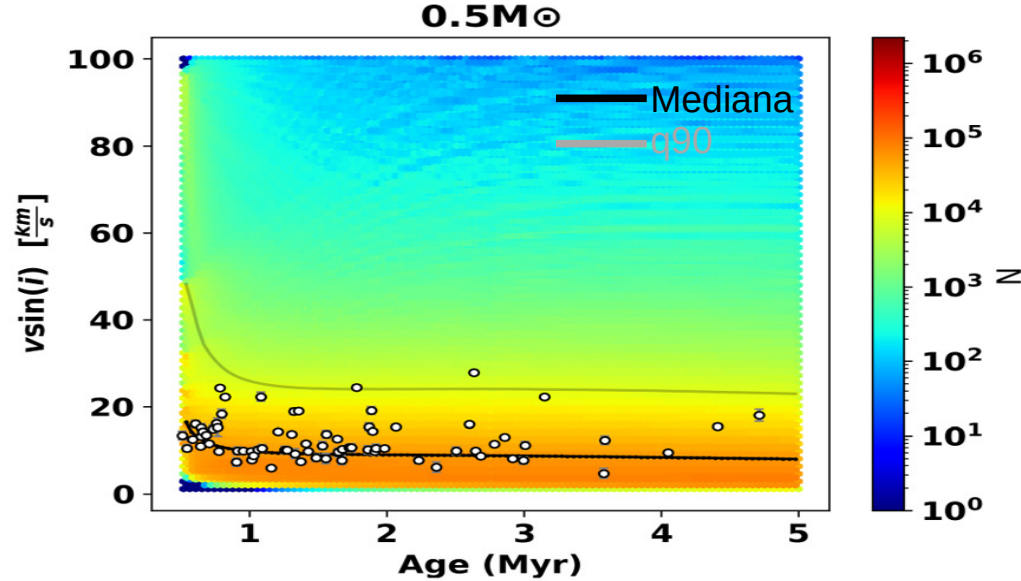
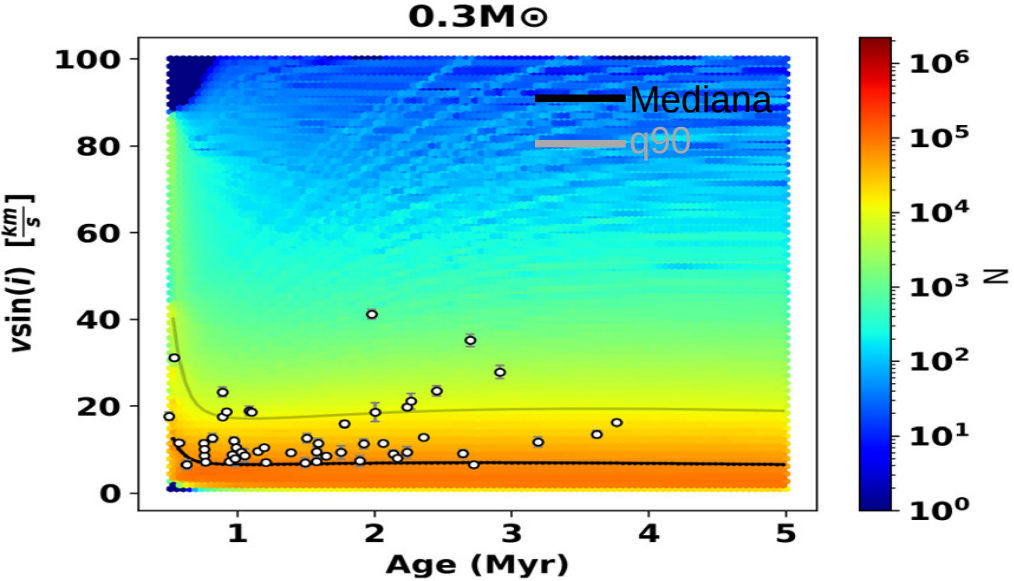
(Matt et al. 2005, 2008)

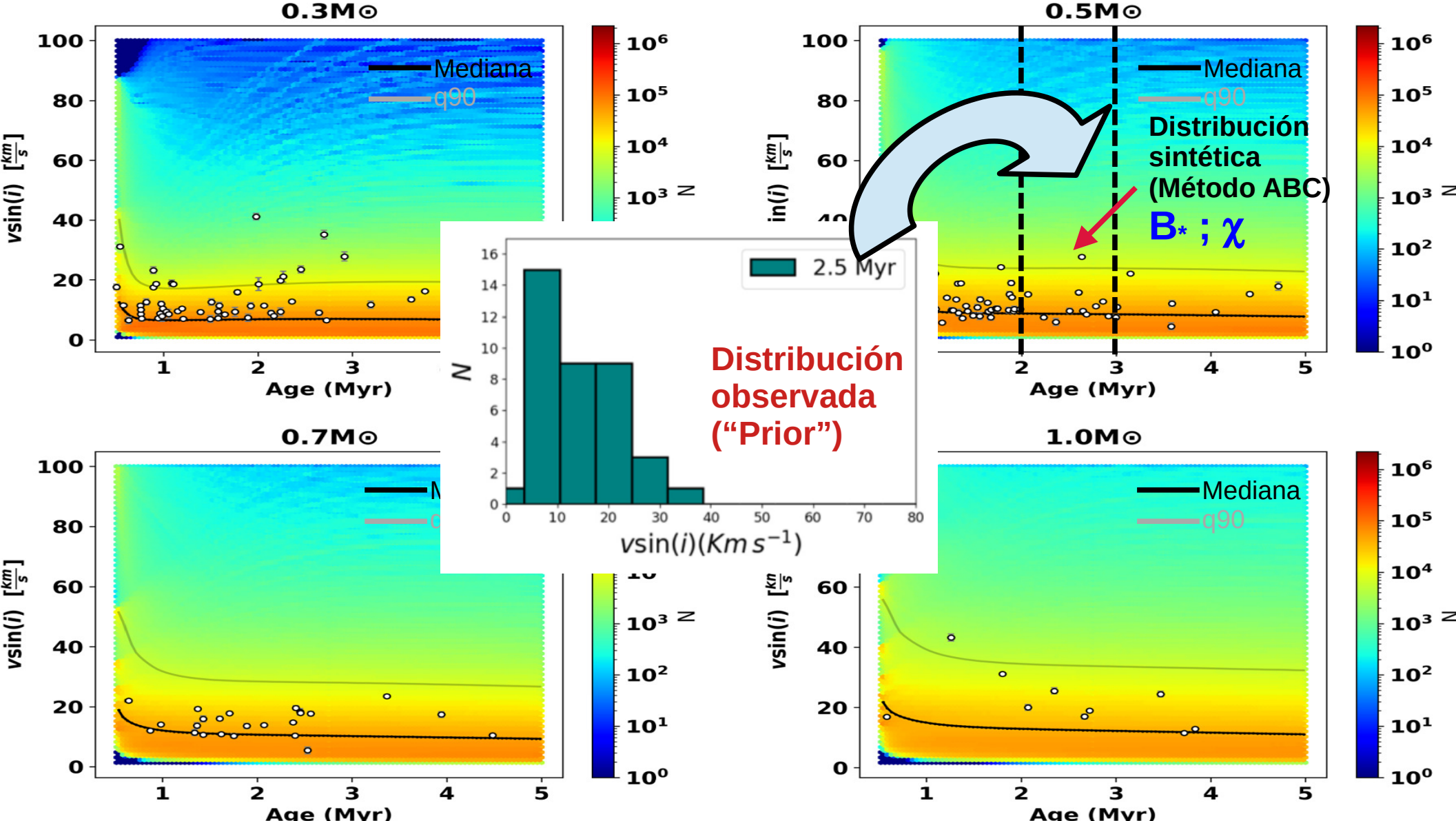
La evolución rotacional es multi-paramétrica

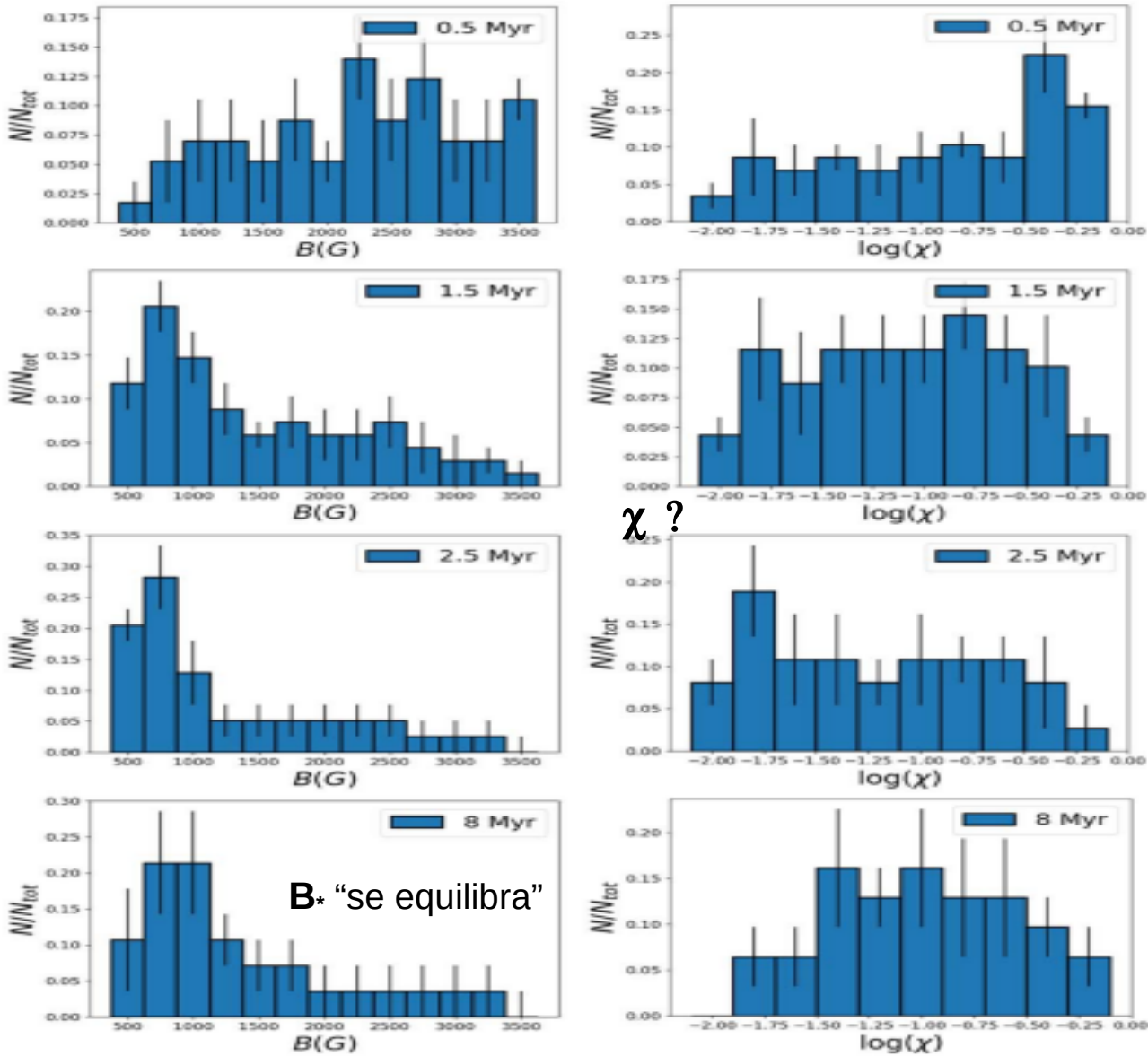


Parameters	Min	Max	Step
P_{rot}^{in} (days)	1	8	1
\dot{M}_{acc}^{in} ($M_{\odot} yr^{-1}$)	10^{-10}	10^{-7}	$10^{-0.2}$
M_{*} (M_{\odot})	0.3	1.2	0.1
B_{*} (G)	500	3500	100
χ	0.01	0.60	0.01

(Serna et al. 2024)

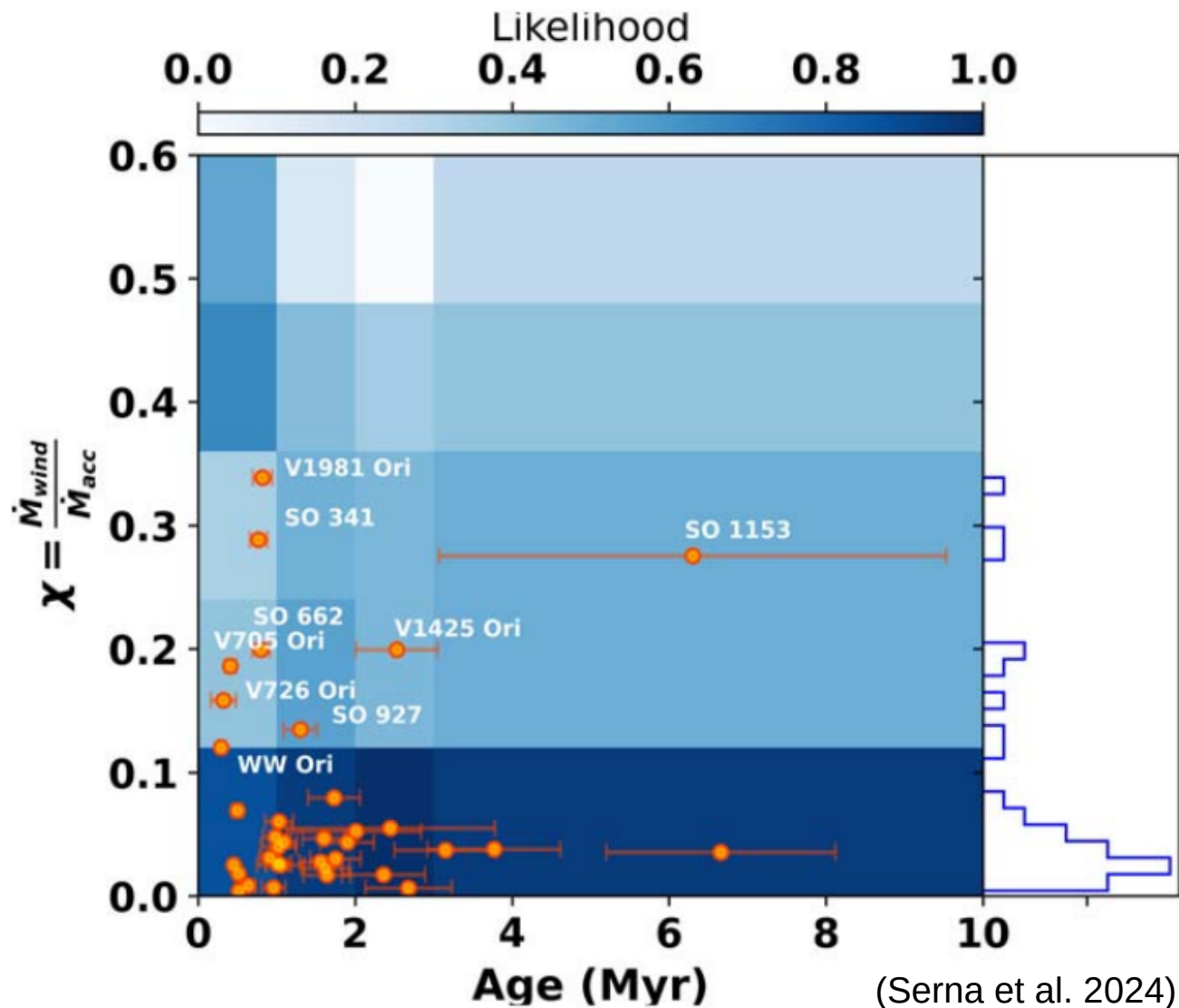






Bin Pairs	Parameter	K-S	p -value
1-2	B_*	0.35	0.0005
	$\log(\chi)$	0.23	0.05
2-3	B_*	0.16	0.45
	$\log(\chi)$	0.13	0.73
3-4	B_*	0.16	0.68
	$\log(\chi)$	0.24	0.20

p -value \ll evolución significativa
 p -value \gg significa poca evolución



Conclusiones

- Se obtuvieron medidas de **masa, edad, rotación, tasa de acreción y pérdida de masa** para una muestra “bona fide” de 208 T Tauris.
- Utilizando un modelo de de evolución rotacional multi-paramétrico se construyen distribuciones sintéticas en 4 bins entre 0.3 y 13 Ma en el contexto APSW.
- Los parámetros del modelo se determinan a partir de un análisis Bayesiano.
- Se confirma una disminución gradual de la componente de campo B_* hasta estabilizarse en $\sim 1\text{kG}$ lo cual es acorde con resultados previos de Vidotto et al. (2014).
- En relación al “branching ratio (χ)”, los resultados sugieren un leve decrecimiento con la edad que podría ser marginal. Medidas con datos de archivo conducen a un valor medio de 0.04.
- Si bien APSW explican las observaciones, el mecanismo físico por el cual parte de la energía del flujo de acreción se transfiere a un viento es aún materia de intenso debate.

Referencias

- Guevara-Montoya, S., Campos, D., Vanegas, D., et al. 2024, *UNphot.py : Una herramienta para la identificación de estrellas T Tauri en regiones de formación estelar*, Revista eSPECTRA, 2, 1
- Hartmann, L., 2016, *Accretion onto PMS stars*, ARA&A, 2016, 54, 135
- Serna, J., Pinzón, G., Hernández, J., et al. 2024, *Rotational Evolution of Classical T Tauri Stars: Models and Observations*, ApJ, 968, 68
- Pinzón, G., Hernández, J., Serna, J., et al. 2021, *Understanding the angular momentum evolution of T Tauri and Herbig Ae/Be stars*, AJ, 162, 90
- Serna, J., Hernández, J., Pinzón, G., et al. 2021 *Stellar Rotation of T Tauri Stars in the Orion Star-forming Complex*, ApJ, 923, 177
- Bouvier, J., *Observational studies of stellar rotation, 2013, Proceedings of the "Role and mechanisms of angular momentum transport during the formation and early evolution of stars"*, 62, 143
- Matt, S. & Pudritz, R., 2008, *Accretion powered stellar winds III. Spin equilibrium solutions*, ApJ, 681, 391