



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA
Instituto de Astronomía

Rotación Estelar en Estrellas Jóvenes

Avances del Proyecto Doctoral

Javier Serna Quiñones

TUTOR:

Dr. Jesús Omar Hernández Alarcón

Instituto de Astronomía - UNAM

Junio 2021.

Resumen

En este trabajo se propone hacer un estudio de la rotación estelar en conexión con las propiedades físicas de las estrellas T Tauri, sus discos protoplanetarios y sus propiedades de ambiente globales. Para esto contamos con el desarrollo de modelos de rotación, herramientas para medir observables de rotación estelar y una enorme base de datos fotométrica y espectroscópica que serán fundamentales para caracterizar el estado evolutivo y rotacional de las estrellas. Es de notar que los productos y herramientas obtenidas como parte de este proyecto, se relacionan parcialmente a otros proyectos doctorales en desarrollo relacionados a la clasificación automática de curvas de luz TESS en estrellas T Tauri usando aprendizaje de máquina y el estudio de la interrelación entre la actividad y rotación estelar en la región de formación estelar de Orión.

Introducción

La rotación estelar es una cantidad fundamental en los procesos de formación, evolución estelar y planetaria. En este contexto, es una pieza clave para entender la evolución del momento angular y su relación con diversos procesos estelares ([Bouvier, 2013](#)).

La fase en la cual las estrellas de baja masa siguen rodeadas por un disco en acreción, sigue siendo un acertijo de la evolución rotacional, ya que éstas estrellas no rotan sustancialmente ([Rebull, 2001](#); [Rebull et al., 2004](#); [Herbst, W. et al., 2002](#); [Jayawardhana et al., 2006](#)). En esta etapa la rotación estelar se encuentra regulada principalmente por tres mecanismos físicos. El primero de estos es el cambio de estructura estelar y la distribución interna de momento angular durante el proceso de contracción estelar en la fase presecuencia principal, y el surgimiento del centro radiativo ([Gallet and Bouvier, 2013](#)). El segundo es la pérdida de masa de la estrella (e.g, vientos estelares, chorros de material, ráfagas estelares; [Cranmer, 2008](#)), y el tercero [3] conocido como interacción estrella-disco, que por un lado conlleva a un aumento de la masa estelar via acreción y por el otro, se espera que el campo magnético estelar se conecte con la región interna del disco protoplanetario, y como resultado produce un frenado en la rotación estelar ([Koenigl, 1991](#); [Matt and Pudritz, 2005](#)). Tradicionalmente la mayoría de modelos suelen suponer que este último efecto mantiene el periodo de rotación constante en la estrella ([Gallet and Bouvier, 2013, 2015](#); [Amard et al., 2019](#)). Sin embargo, esta hipótesis nunca ha sido verificada a profundidad ([Gallet et al., 2019](#)). Algunas alternativas se han desarrollado durante los últimos años, en donde se incluyen vientos estimulados por la acreción estelar como también la conexión estrella-disco ([Matt et al., 2012](#); [Pinzón et al., 2021](#)). En este sentido estos modelos permiten que surja naturalmente una fase en donde la velocidad angular permanece constante o cuasi constante, dependiendo de las condiciones físicas simuladas. En la actualidad, dichos modelos siguen esperando ser confrontados con las observaciones.

Hoy en día, disponemos de una base de datos en el óptico que confirma cerca de 3000 estrellas T Tauri en Orión, de las cuales al menos ~ 600 poseen mediciones simultaneas de $v \sin(i)$,

edad, masa y ancho equivalente para la línea de H_α (Hernández et al., 2014; Briceño et al., 2019, Hernandez et al., en preparación). Adicionalmente, tenemos más de 2000 estrellas candidatas a miembros cinemáticos para regiones jóvenes como Orión, Tauro, UpperSco, entre otros, para los cuales disponemos de espectros en alta resolución ($R \sim 22500$) que nos provee la colaboración APOGEE-2/SDSS-V. Estos datos permiten estimar la rotación estelar, temperatura efectiva y gravedad superficial a través de comparaciones con espectros sintéticos (Cottaar et al., 2014; Kounkel et al., 2018; Olney et al., 2020). Adicionalmente, contamos con astrometría y fotometría de la última liberación de Gaia-EDR3, que en conjunto con modelos evolutivos (Dotter, 2016; Baraffe et al., 2015) es posible estimar masa, edad y radio estelar (Pinzón et al., 2021, Hernandez et al., en preparación). Por otro lado, a través de datos fotométricos de TESS (Ricker et al., 2014), se podrá construir curvas de luz con una cobertura mínima de 27 días, y una cadencia de hasta 10 minutos. Esta información será determinante para la medición de periodos de rotación estelar, como consecuencia de la variabilidad que produce el tránsito de manchas en las superficies estelares. Además de las curvas de luz relacionadas a la rotación estelar, se espera obtener información de otros fenómenos que regulan la variación de brillo, por ejemplo, curvas de luz cuasi periódicas causadas por apantallamiento de la estrella por la parte interna del disco (curvas tipo Dippers), Binarias eclipsantes (curvas tipo Algol), objetos en donde se observan dos o más periodos en su curva de luz (curvas tipos moduladas) e inclusive objetos en donde se aprecian ráfagas (flares) estelares.

Toda esta información nos permitirá hacer un estudio estadístico de la rotación y las inclinaciones estelares, en conexión con las propiedades físicas de las estrellas, y sus discos protoplanetarios. Asimismo estudiar de manera detallada las tendencias observadas para estrellas jóvenes (Serna et al., 2021 Enviado a la revista ApJ), y confrontar las observaciones con modelos de rotación durante los primeros millones de años de vida en las estrellas.

Estado Actual del Proyecto y Estrategias

Este trabajo está estructurado en tres partes. La primera corresponde al desarrollo de herramientas para medir parámetros de rotación (periodos de rotación y velocidad proyectada de rotación; Serna et al, en preparación 1). Estas herramientas fueron completadas y mejoradas, y fueron usadas para mejorar y validar las estimaciones de observables de rotación del artículo relacionado a la tesis de maestría (Serna et al enviado a la revista ApJ). La segunda parte corresponde al desarrollo de modelos de rotación aplicado a estrellas jóvenes durante los primeros millones de años, trabajo que será también publicado (Serna et al en progreso), y la última parte abarca el estudio de la distribución de inclinaciones de polos de rotación, última publicación del doctorado. Además existen otros proyectos vinculados a este trabajo como son el estudio de actividad y rotación de estrellas jóvenes en la era de los grandes censos del firmamento de la estudiante de Doctorado Maria Gracia Batista de la Universidad Nacional de Colombia, y el trabajo de clasificación de curvas de luz a través de aprendizaje de máquina del estudiante de Doctorado Bayron Estivenson Rodriguez de la Universidad de los Andes.

Desarrollo de Herramientas y Mediciones de Rotación

Actualmente se ha diseñado un conjunto de tres herramientas que han permitido explotar la enorme base de datos espectroscópica y fotométrica y así ampliar el banco de información de este proyecto. Estas herramientas son mostradas a continuación:

- **TESSExtractor:** Es una aplicación especialmente diseñada y optimizada para hacer búsquedas de variabilidad y medición de periodos en objetos estelares jóvenes. Esta herramienta usa datos de TESS provenientes del servicio MAST¹, extrae nuestra propia fotometría usando la técnica de la fotometría de apertura (Photutils), construye la curva de luz y determina la periodicidad de la señal usando un periodograma de Lomb-Scargle (Lomb, 1976; Scargle, 1982), opcionalmente se puede intercambiar por la técnica ACF (McQuillan et al., 2014) y por último se despliega la curva de luz doblada en fase (Ver Figura 1).

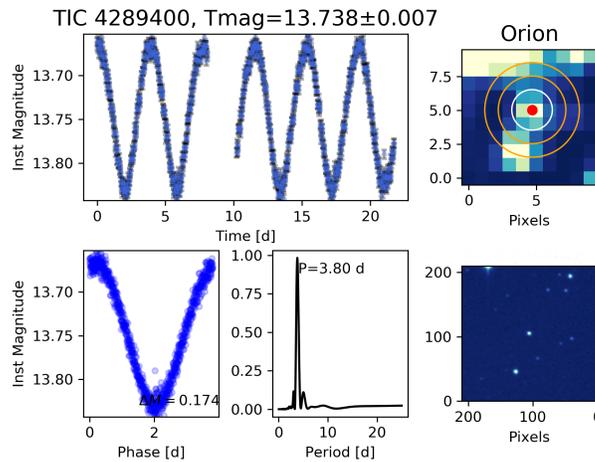


Figura 1: Curva de luz de TESS y el análisis provisto por TESSExtractor. Ver de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha. (A) curva de luz en magnitudes TESS con barras de incertidumbre. El título se refiere a la identificación de la estrella, y el valor promedio de la magnitud TESS. (B) Imagen en miniatura de TESS de 10 x 10 pixeles (210 x 210 arcsegundos cuadrados). El círculo blanco encierra la apertura fotométrica, y los círculos naranja el anillo de cielo. El punto rojo marca el centroide de la estrella. (C) Curva de luz doblada en fase a el mejor periodo encontrado. La leyenda muestra la amplitud. (D) Periodograma de Lomb-Scargle, y el periodo estimado. (E) Imagen miniatura de Digital Sky Survey (DSS2) 210 x 210 pixels, campo de visión similar a (B).

Algo adicional e importante al análisis de las curvas de luz, ha sido el tratamiento de los efectos sistemáticos e implementación de indicadores de contaminación en la fotometría por estrellas cercanas a la apertura. Aunque los comienzos de esta aplicación surgieron al finalizar mi maestría, todo la visualización, implementación de técnica para extraer la fotometría, automatización, mejoras y productos que se entregan, fueron desarrollados mayormente al comenzar el doctorado. En esta nueva versión, se obtienen algunas características de las curvas de luz y del periodograma asociado

¹<https://mast.stsci.edu>

que son base para realizar una clasificación de aprendizaje de máquinas (artículo de Rodríguez-Feliciano en preparación).

Siguiendo la misma metodología de esta herramienta, se hizo una adaptación de este software para el análisis de datos de DDOTI a través del proyecto de variabilidad de estrellas jóvenes (IP C. Román-Zúñiga). DDOTI (Deca-Degree Optical Transient Imager) es un telescopio robótico ubicado en el Observatorio Nacional de San Pedro Martir cuya cobertura en el cielo abarca 70° cuadrados. Este instrumento esta siendo usado para diferentes estudios de variabilidad, especialmente en núcleos activos de galaxias, estrellas jóvenes y estudios de exoplanetas.

Algunos productos ofrecidos por TESSExtractor, están en proceso de ser publicados e.g (Serna et al., Enviado a la Revista ApJ). Otra parte de los productos están siendo usados en la clasificación morfológica de curvas de luz para un trabajo en colaboración (Rodríguez-Feliciano et al., en preparación), propuesto en el apéndice del proyecto ². También se ha usado en un análisis como contribución al artículo "Double-lined spectroscopic binaries in the APOGEE DR16 and DR17 data" (Kounkel et al., enviado a ApJ). Esperamos incluir esta aplicación en un conjunto de herramientas para el primer artículo de doctorado. Por otro lado, los periodos de rotación obtenidos con esta herramienta se usarán para obtener un índice de actividad estelar, y además las curvas de luz serán analizadas para buscar indicios de actividad como la detección y caracterización de ráfagas estelares.

- **$v \sin(i)$ a través del método de Fourier** ³: Es una aplicación interactiva diseñada en Python y Qt para obtener mediciones robustas de $v \sin(i)$. El usuario realiza una selección de líneas espectrales (no mezcladas), con buena señal a ruido. La aplicación automáticamente ajusta el centro, ancho de la línea. Luego usamos el método de Fourier (Carroll, 1933) con la línea seleccionada por el usuario, y finalmente la interfaz gráfica nos entrega la medición de $v \sin(i)$ con su incertidumbre (Ver figura 2).

Esta herramienta ha sido usada en algunos trabajos para el análisis de la rotación estelar como también de referencia a otros estudios y metodologías (Thanathibodee et al., 2020; Pinzón et al., 2021, Serna et al 2021 Enviado a la Revista ApJ; Thanathibodee et al en preparación.)

²El apéndice del proyecto se encuentra en el documento oficial como proyecto doctoral, este viene anexo al correo electrónico en conjunto con estos avances.

³  <https://github.com/javiserna/vsini>

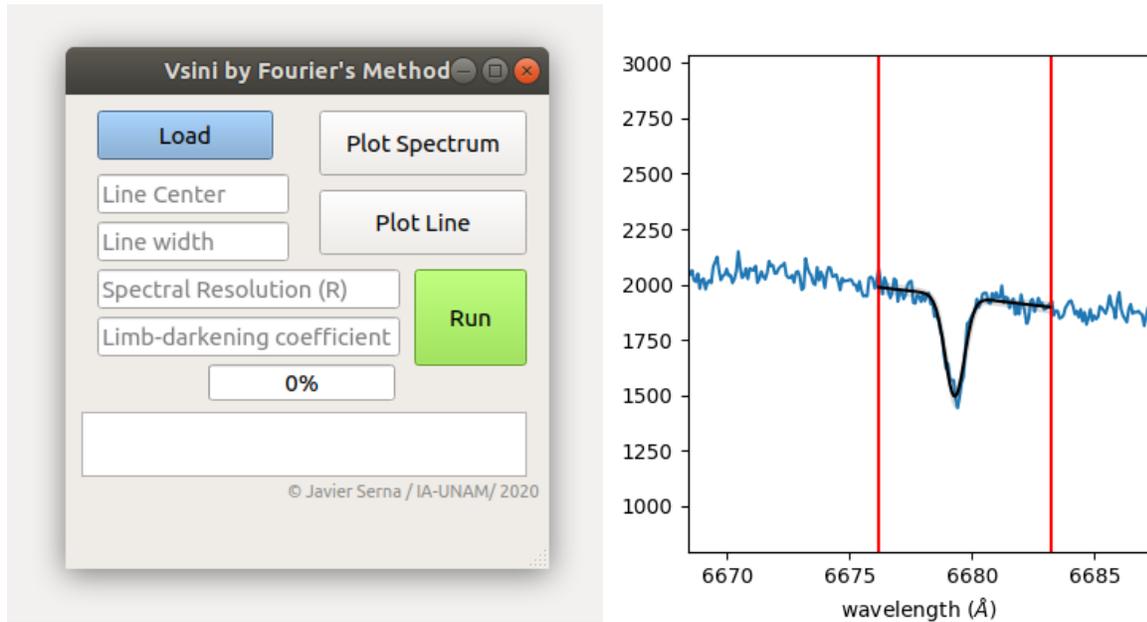


Figura 2: Panel izquierdo: Interfaz gráfica diseñada para la aplicación de Fourier. Panel derecho: Selección de una línea espectral a través del programa.

- **$v \sin(i)$ a través de la función de correlación cruzada (FCC):** Implementamos una nueva herramienta al paquete, basada en la técnica de correlación cruzada de un espectro observado con un espectro sintético (Hartmann and Stauffer, 1989; Pinzón et al., 2021).

Esta nueva herramienta se encuentra en fase de pruebas. Hemos identificado que funciona eficientemente para estrellas con temperaturas inferiores a 7000K. Sin embargo, podría estar afectada cuando consideramos rangos de espectros en donde aparecen líneas dominantes por el efecto Stark. Estamos trabajando en una versión para mitigar estos efectos y estimar las limitaciones de esta herramienta.

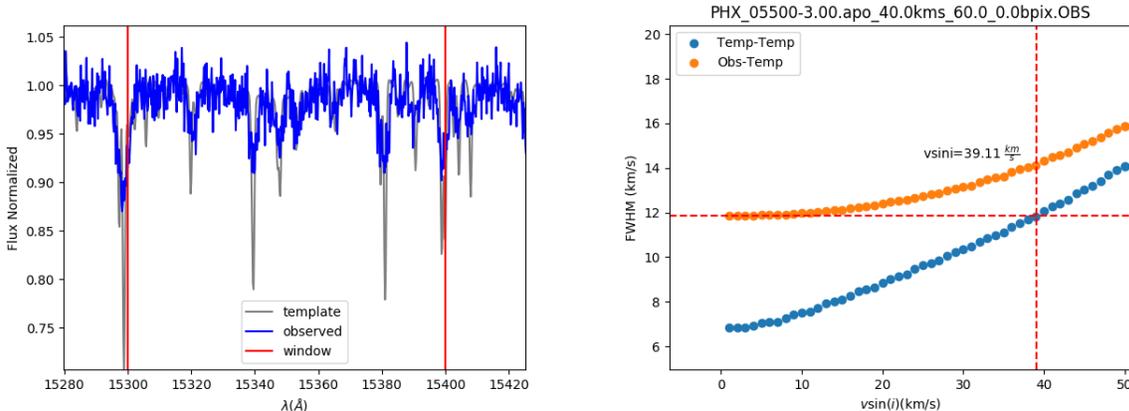


Figura 3: Panel izquierdo: Espectro observado con velocidad de rotación conocida ($v \sin(i) = 40 \text{ km s}^{-1}$) y espectro sintético antes de ser convolucionados por la técnica FCC. Panel derecho: Ancho a media altura para la FCC entre los espectros sintético-sintético, y observado-sintético con la respectiva velocidad de rotación estimada.

Desarrollo de Modelos de Rotación

- Modelos de Rotación para Estrellas T Tauri de Baja Masa ($0.2M_{\odot} < M_{*} < 1.2M_{\odot}$):** Desarrollamos un familia de modelos de rotación para las estrellas T Tauri. En donde, en las estrellas con disco en acreción i.e (CTTS), se considera que su evolución está dominada principalmente por tres procesos. El primero (I) El fenómeno de acreción estelar, se encarga de transportar gas del disco hacia la estrella, este fenómeno puede aumentar de manera sustancial el momento angular de la estrella, (II) El efecto de conexión disco-estrella, originalmente asociado al frenado magnético que produce el campo magnético cuando está acoplado a la parte interna del disco protoplanetario. (III) La pérdida de masa a través de vientos estimulados por acreción. Estos dos últimos efectos contrarrestan el primero y son los causantes de mantener la rotación regulada durante los primeros millones de años en las estrellas CTTS. Para el caso de las estrellas WTTS, los fenómenos asociados a la fase CTTS pierden importancia y surgen otros mecanismos de regulación de momento angular, como es la pérdida de masa a través de vientos estelares originados por actividad estelar (Kawaler, 1988). Independientemente de la fase WTTS o CTTS, la evolución de la estructura estelar tiene un papel importante en los observables de rotación, ya que la conservación del momento angular al contraerse la estrella en su camino hacia la secuencia principal, y la redistribución interna del momento angular, al originarse un núcleo radiativo, debe tomarse en cuenta. Para esto, hacemos uso de los modelos evolutivos disponibles (Baraffe et al., 2015), los cuales toman en cuenta el cambio del radio y momento de inercia estelar con la edad de la estrella. Estos modelos son calibrados con base a miembros de un cúmulo estelar de edad, masa y rotación bien definido, e.g Hyades (edad: ~ 700 Millones de años).

Es posible variar diferentes parametros físicos relacionados a la etapa T Tauri, tiempo de vida del disco (t_{disk}), el campo magnético (B), tasa de acreción estelar inicial (M_{acc}^{in}), tasa de vientos estimulados por acreción (M_{wind}), periodo de rotación inicial (P_{rot}^{in}). También estamos

en capacidad de extender estos modelos a la edad del Sol, a través de la calibración mostrada en la figura 4.

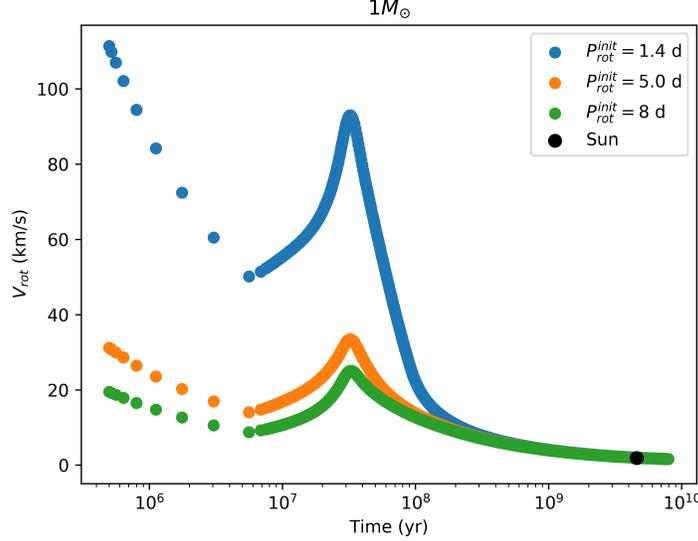


Figura 4: Demostración de los modelos para una estrella de $1M_{\odot}$ extendido hasta la edad del Sol.

De acuerdo con la figura 5, las mediciones $v \sin(i)$ que tenemos para la muestra de estrellas CTTS (Hernández et al., 2014; Briceño et al., 2019) se posicionan relativamente bien en la sobredensidad de modelos para CTTS. Este mapa de densidad se generó tomando modelos compuestos por esta serie de parámetros:

Masa Estelar

$$M_* = [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2] M_{\odot}$$

Tasa de Acreción Inicial

$$M_{acc}^{in} = [0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1, 3, 5, 7, 9, 10] \times 10^{-8} \frac{M_{\odot}}{\text{año}}$$

Campo Magnético

$$B = [500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000] G$$

Vientos

$$\dot{M}_{wind} = [0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.1]$$

Periodo de rotación inicial

$$P_{rot}^{in} = [5, 8] \text{ dias}$$

Siguiendo la metodología descrita en [Manzo-Martínez et al. \(2020\)](#), se está realizando una comparación Bayesiana de los modelos y las observaciones, con el fin de obtener los parámetros físicos más relevantes de evolución de momento angular en la fase CTTS. En conjunto con un análisis similar en la muestra de estrellas WTTS, mostraremos los resultados en el segundo artículo de este programa doctoral.

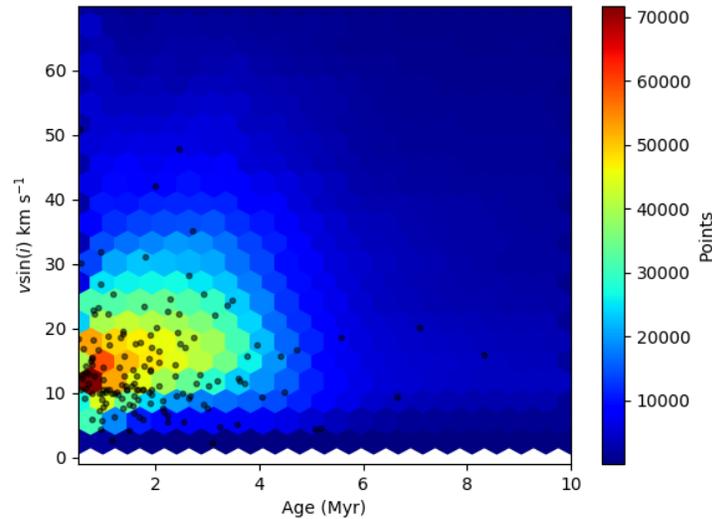


Figura 5: Mapa de densidad de la malla de modelos para estrellas CTTS. Escala de colores representa el número de puntos de la malla encerrados por hexágono. Los puntos negros representan nuestras estrellas CTTS con estimaciones disponibles de $v \sin(i)$, edad y masa.

Estudio de Inclinación de Polos de Rotación

Al momento de este avance, hemos ampliado la base de datos en medidas de periodo de rotación, que son fundamentales para estimar los ángulos de polo de rotación $\sin(i)$. Originalmente, en el proyecto de doctorado este estudio tenía una prioridad mayor al estudio teórico observacional de la evolución de rotación estelar. Sin embargo, debido a los avances en la obtención de observables de rotación y los modelos de evolución de momento angular, decidimos mover este estudio de distribución de inclinaciones (tercer artículo del programa doctoral), una vez que se envíe a publicación los primeros dos (ver cronograma).

Cronograma

- Semestre I, Febrero 2020 - Julio 2020
 - Desarrollo de TESSExtractor
 - Construcción de una base de datos de curvas de luz TESS para cúmulos jóvenes e.g (Orion, IC 348, CrA, γ Vel, Upper Sco)

- Escritura del artículo de maestría
- Semestre II, Agosto 2020 - Enero 2021
 - Ampliación de la base de datos de curvas de luz TESS para cúmulos jóvenes.
 - Desarrollo de interfaz gráfica para la herramienta de Fourier.
 - Implementación de la función de correlación cruzada (CCF) en una herramienta de medición de $v \sin(i)$.
 - Escritura del artículo de maestría.
 - Desarrollo de modelos generales de la rotación estelar para estrellas tipo solar.
- Semestre III, Febrero 2021 - Julio 2021
 - Escritura del primer artículo de doctorado (Serna et al., en preparación).
 - Publicación del artículo de Maestría.
 - Examen de candidatura.
- Semestre IV, Agosto 2021 - Enero 2022
 - Publicación del primer artículo de doctorado (Serna et al., en preparación).
 - Escritura del segundo artículo de doctorado.
- Semestre V, Febrero 2023 - Julio 2023
 - Publicar el segundo artículo de doctorado.
 - Escritura del tercer artículo de doctorado.
- Semestre VI, Agosto 2023 - Enero 2024
 - Publicar tercer artículo de doctorado.
 - Escritura de la tesis.
- Semestre VII, Febrero 2024 - Julio 2024
 - Finalización de la tesis.
 - Tramites para graduación.
- Semestre VIII, Agosto 2024 - Enero 2025
 - Defensa de la tesis de doctorado.

Es importante mencionar que este cronograma se trata de un plan A, el cual puede estar sujeto a cambios de tal manera que pudiera agregarse tópicos a los ya mencionados.

Productos relacionados directamente con este trabajo

- Serna et al., 2021. Artículo enviado a ApJ. (Stellar rotation of T Tauri Stars in the Orion Star-Forming Complex).
- [Pinzón et al. \(2021\)](#) (Understanding the angular momentum evolution of T Tauri and Herbig Ae/Be stars).
- Rodríguez-Feliciano et al., en preparación (TESS Machine Learning morphological Classification of Young Stellar Objects).

Productos relacionados indirectamente con este trabajo

- Kounkel et al., 2021. Artículo enviado a ApJ (Double-lined spectroscopic binaries in the APOGEE DR16 and DR17 data).
- [Thanathibodee et al. \(2020\)](#). (Variable Accretion onto Protoplanet Host Star PDS 70).
- Thanathibodee et al., en preparación.

Referencias

- L. Amard, A. Palacios, C. Charbonnel, F. Gallet, C. Georgy, N. Lagarde, and L. Siess. First grids of low-mass stellar models and isochrones with self-consistent treatment of rotation. From 0.2 to 1.5 M at seven metallicities from PMS to TAMS. , 631:A77, Nov. 2019. doi: 10.1051/0004-6361/201935160.
- I. Baraffe, D. Homeier, F. Allard, and G. Chabrier. New evolutionary models for pre-main sequence and main sequence low-mass stars down to the hydrogen-burning limit. *A&A*, 577:A42, 2015. doi: 10.1051/0004-6361/201425481. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425481>.
- J. Bouvier. Observational studies of stellar rotation. *EAS Publications Series*, 62:143–168, 2013. ISSN 1638-1963. doi: 10.1051/eas/1362005. URL <http://dx.doi.org/10.1051/eas/1362005>.
- C. Briceño, N. Calvet, J. Hernández, A. K. Vivas, C. Mateu, J. J. Downes, J. Loerincs, A. Pérez-Blanco, P. Berlind, C. Espaillat, L. Allen, L. Hartmann, M. Mateo, and J. I. B. III. The CIDA variability survey of orion OB1. II. demographics of the young, low-mass stellar populations. *The Astronomical Journal*, 157(2):85, jan 2019. doi: 10.3847/1538-3881/aaf79b. URL <https://doi.org/10.3847%2F1538-3881%2Faaf79b>.
- J. A. Carroll. The Spectroscopic Determination of Stellar Rotation and its Effect on Line Profiles. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 93(7):478–507, 05 1933. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/93.7.478. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/93.7.478>.
- M. Cottaar, K. R. Covey, M. R. Meyer, D. L. Nidever, K. G. Stassun, J. B. Foster, J. C. Tan, S. D. Chojnowski, N. da Rio, K. M. Flaherty, P. M. Frinchaboy, M. Skrutskie, S. R. Majewski, J. C. Wilson, and G. Zasowski. IN-SYNC i: HOMOGENEOUS STELLAR PARAMETERS FROM

- HIGH-RESOLUTION APOGEE SPECTRA FOR THOUSANDS OF PRE-MAIN SEQUENCE STARS. *The Astrophysical Journal*, 794(2):125, oct 2014. doi: 10.1088/0004-637x/794/2/125. URL <https://doi.org/10.1088/0004-637x/794/2/125>.
- S. R. Cranmer. Turbulence-driven Polar Winds from T Tauri Stars Energized by Magnetospheric Accretion. , 689(1):316–334, Dec. 2008. doi: 10.1086/592566.
- A. Dotter. MESA Isochrones and Stellar Tracks (MIST) 0: Methods for the Construction of Stellar Isochrones. , 222(1):8, Jan. 2016. doi: 10.3847/0067-0049/222/1/8.
- F. Gallet and J. Bouvier. Improved angular momentum evolution model for solar-like stars. *Astron. Astrophys.*, 556:A36, aug 2013. ISSN 0004-6361. doi: 10.1051/0004-6361/201321302. URL <http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201321302>.
- F. Gallet and J. Bouvier. Improved angular momentum evolution model for solar-like stars - ii. exploring the mass dependence. *A&A*, 577:A98, 2015. doi: 10.1051/0004-6361/201525660. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525660>.
- F. Gallet, C. Zanni, and L. Amard. Rotational evolution of solar-type protostars during the star-disk interaction phase. , 632:A6, Dec. 2019. doi: 10.1051/0004-6361/201935432.
- L. Hartmann and J. R. Stauffer. Additional Measurements of Pre-Main-Sequence Stellar Rotation. , 97:873, Mar. 1989. doi: 10.1086/115033.
- Herbst, W., Bailer-Jones, C. A. L., Mundt, R., Meisenheimer, K., and Wackermann, R. Stellar rotation and variability in the orion nebula cluster ***. *A&A*, 396(2):513–532, 2002. doi: 10.1051/0004-6361:20021362. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021362>.
- J. Hernández, N. Calvet, A. Perez, C. Briceño, L. Olguin, M. E. Contreras, L. Hartmann, L. Allen, C. Espaillat, and R. Hernan. A SPECTROSCOPIC CENSUS IN YOUNG STELLAR REGIONS: THE ORIONIS CLUSTER. *The Astrophysical Journal*, 794(1):36, sep 2014. doi: 10.1088/0004-637x/794/1/36. URL <https://doi.org/10.1088/0004-637x/794/1/36>.
- R. Jayawardhana, J. Coffey, A. Scholz, A. Brandeker, and M. H. van Kerkwijk. Accretion disks around young stars: Lifetimes, disk locking, and variability. *The Astrophysical Journal*, 648(2):1206–1218, sep 2006. doi: 10.1086/506171. URL <https://doi.org/10.1086/506171>.
- S. D. Kawaler. Angular momentum loss in low-mass stars. *Astrophys. J.*, 333:236, oct 1988. ISSN 0004-637X. doi: 10.1086/166740. URL <http://adsabs.harvard.edu/doi/10.1086/166740>.
- A. Koenigl. Disk Accretion onto Magnetic T Tauri Stars. , 370:L39, Mar. 1991. doi: 10.1086/185972.
- M. Kounkel, K. Covey, G. Suárez, C. Román-Zúñiga, J. Hernandez, K. Stassun, K. O. Jaehnig, E. D. Feigelson, K. P. Ramírez, A. Roman-Lopes, N. D. Rio, G. S. Stringfellow, J. S. Kim, J. Borissova, J. G. Fernández-Trincado, A. Burgasser, D. A. García-Hernández, O. Zamora, K. Pan, and C. Nitschelm. The APOGEE-2 survey of the orion star-forming complex. II. six-dimensional structure. *The Astronomical Journal*, 156(3):84, aug 2018. doi: 10.3847/1538-3881/aad1f1. URL <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aad1f1>.

- N. R. Lomb. Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data. , 39(2):447–462, Feb. 1976. doi: 10.1007/BF00648343.
- E. Manzo-Martínez, N. Calvet, J. Hernández, S. Lizano, R. F. Hernández, C. J. Miller, K. Maucó, C. Briceño, and P. D’Alessio. The evolution of the inner regions of protoplanetary disks. *The Astrophysical Journal*, 893(1):56, apr 2020. doi: 10.3847/1538-4357/ab7ead. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab7ead>.
- S. Matt and R. E. Pudritz. Accretion-powered stellar winds as a solution to the stellar angular momentum problem. *The Astrophysical Journal*, 632(2):L135–L138, oct 2005. doi: 10.1086/498066. URL <https://doi.org/10.1086%2F498066>.
- S. P. Matt, G. Pinzón, T. P. Greene, and R. E. Pudritz. Spin evolution of accreting young stars. ii. effect of accretion-powered stellar winds. *The Astrophysical Journal*, 745(1):101, Jan 2012. ISSN 1538-4357. doi: 10.1088/0004-637x/745/1/101. URL <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/745/1/101>.
- A. McQuillan, T. Mazeh, and S. Aigrain. Rotation periods of 34,030 kepler main-sequence stars: The full autocorrelation sample. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 211(2):24, Mar 2014. ISSN 1538-4365. doi: 10.1088/0067-0049/211/2/24. URL <http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/211/2/24>.
- R. Olney, M. Kounkel, C. Schillinger, M. T. Scoggins, Y. Yin, E. Howard, K. R. Covey, B. Hutchinson, and K. G. Stassun. APOGEE Net: Improving the Derived Spectral Parameters for Young Stars through Deep Learning. , 159(4):182, Apr. 2020. doi: 10.3847/1538-3881/ab7a97.
- G. Pinzón, J. Hernández, J. Serna, A. García, E. Manzo-Martínez, A. Roman-Lopes, C. G. Román-Zúñiga, M. G. Batista, J. Ramírez-Vélez, Y. Osorio, and R. Avendaño. Understanding the angular momentum evolution of t tauri and herbig ae/be stars, 2021.
- L. M. Rebull. Rotation of young low-mass stars in the orion nebula cluster flanking fields. *The Astronomical Journal*, 121(3):1676–1709, mar 2001. doi: 10.1086/319393. URL <https://doi.org/10.1086%2F319393>.
- L. M. Rebull, S. C. Wolff, and S. E. Strom. Stellar rotation in young clusters: The first 4 million years. *The Astronomical Journal*, 127(2):1029–1051, feb 2004. doi: 10.1086/380931. URL <https://doi.org/10.1086%2F380931>.
- G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, D. W. Latham, G. Bakos, J. L. Bean, Z. K. Bert-Thompson, T. M. Brown, L. Buchhave, N. R. Butler, and et al. Transiting exoplanet survey satellite. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1(1):014003, Oct 2014. ISSN 2329-4124. doi: 10.1117/1.jatis.1.1.014003. URL <http://dx.doi.org/10.1117/1.JATIS.1.1.014003>.
- J. D. Scargle. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. , 263:835–853, Dec. 1982. doi: 10.1086/160554.

