

Estudio preliminar de ciclos de actividad en estrellas del tipo solar

P.D. Colombo^{1,2}, A.P. Buccino^{1,2}, C.G. Oviedo¹, R. Ibañez Bustos³, C.F. Martínez¹ & P. Mauas^{1,2}

¹ Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

² Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina

³ Observatoire de la Côte d'Azur, Francia

Received: 09 February 2024 / Accepted: 17 May 2024

©The Authors 2024

Resumen / Los estudios observacionales sistemáticos realizados hasta el momento dedicados principalmente a estrellas de tipo solar, en el rango F a K tempranas, han detectado ciclos de actividad magnética similares al ciclo solar, que se distribuyen de manera discreta en una serie de ramas (inactiva y activa). Sin embargo, el ciclo solar es un caso particular, ya que no pertenece a ninguna de ellas. El objetivo final de este trabajo fue aumentar la estadística de ciclos de actividad en estrellas de tipo solar, haciendo hincapié en aquellas estrellas con períodos de rotación similares a los solares, entre 20 y 30 días, donde hay un vacío de estrellas cíclicas. Del conjunto de 14 estrellas analizadas, se detectaron ciclos de actividad en 5 estrellas, mientras que el resto presentó un patrón de actividad irregular o constante.

Abstract / Systematic observational studies carried out so far, mainly dedicated to solar-type stars, in the F to early K range, have detected cycles of magnetic activity similar to the solar cycle, which are discretely distributed in a series of branches (inactive and active). However, the solar cycle is a particular case, since it does not belong to any of them. The final objective of this work was to increase the statistics of well-defined activity cycle in solar-type stars, focusing on those stars with solar rotation periods, between 20 and 30 days, where there is a lack of cyclic stars. Among the 14 stars analyzed, we detected activity cycles in 5 stars, while the rest of the sample presented irregular or constant activity patterns.

Keywords / stars: activity — stars: rotation — stars: solar-type

1. Introducción

En esta última década, los diagramas que relacionan la longitud de los ciclos de actividad con el período de rotación en estrellas de tipo solar han puesto en discusión una serie de puntos. Por un lado, surge el interrogante de qué tipo de dínamo pudiese estar operando en aquellas estrellas que presentan dos ciclos de actividad coexistentes (Böhm-Vitense, 2007). Por el otro, se plantea que la posición atípica del ciclo solar en estos diagramas podría indicar que el dínamo solar se encuentre en transición (Metcalf et al., 2016). Finalmente, se encontró que estrellas con períodos de rotación entre 23 y 30 días no fueron reportadas como cíclicas.

Con el fin de aportar evidencia observacional a esta discusión, en este trabajo realizamos un estudio preliminar de actividad estelar de largo plazo en una muestra de 14 estrellas del tipo solar del hemisferio sur, con el fin de aumentar la estadística de ciclos estelares en enanas FGK con períodos de rotación similares a los solares. Para ello utilizamos espectros obtenidos del espectrógrafo REOSC en CASLEO en el marco del Proyecto HK α (Mauas, 2016), con observaciones propias y del equipo de trabajo (428 espectros). Estos datos se complementan con mediciones del *índice de Mount Wilson* reportados en Baum et al. (2022) (1256 índices) y espectros de alta resolución obtenidos de la base pública del European

Southern Observatory (ESO) (1140 espectros)*.

2. Selección de la muestra

El Proyecto HK α ha observado sistemáticamente un conjunto de 150 estrellas F5V a M5.5V, donde 118 estrellas son de tipo espectral F5V a K7V. Esta muestra de estrellas presenta un alto rango de períodos de rotación que va desde 7.78 a 71.00 días (ver Tabla 2 en Cincunegui et al. 2007). Además, la tasa de rotación de las estrellas de tipo solar pareciera estar correlacionada con la longitud del ciclo de actividad (Böhm-Vitense 2007; Metcalf et al. 2016). Con el objetivo de analizar la actividad de estrellas de tipo solar con períodos de rotación entre 20 y 50 días, en este trabajo estudiamos una muestra de estrellas con períodos de rotación en este rango y que hubiesen sido observadas repetidamente a lo largo del Proyecto HK α . Por lo tanto, tomando como criterio los parámetros estelares, la cadencia y lapso de observación, acotamos la muestra a 14 estrellas. En la Tabla 1, se lista la muestra de estrellas estudiada, sus parámetros principales, los datos observacionales de CASLEO y los resultados obtenidos a lo largo del trabajo. Los períodos de rotación de las estrellas de esta

*https://archive.eso.org/wdb/wdb/adp/phase3_spectral/form

lista se toman únicamente de la literatura (Cincunegui et al., 2007).

3. Índice de Mount Wilson, series temporales y análisis de largo plazo

En primer lugar, construimos un registro de actividad de largo plazo para la muestra de estrellas de la Tabla 1 a partir de espectros propios, públicos y datos de la literatura. Utilizando el programa desarrollado en el grupo para este cálculo, ya aplicado en una serie de trabajos anteriores (Ibañez Bustos et al., 2019a,b, 2020), obtuvimos el *índice de Mount Wilson (S)* (Vaughan et al., 1978), para cada uno de los espectros observados en CASLEO.

A fin de complementar el análisis se incluyen observaciones de la base de datos de ESO tomadas con los espectrógrafos HARPS y FEROS. Para estos espectros, calculamos el índice de actividad mediante el método ya comentado. Además incluimos compilaciones del índice S , para ciertas estrellas, disponibles en la literatura (Baum et al., 2022).

Luego de obtener los índices correspondientes, calibramos los índices de HARPS al S con la calibración disponible en Lovis et al. (2011), y los espectros FEROS con el procedimiento utilizado en Jenkins et al. (2008). Finalmente, en todas las estrellas intercalibramos los índices de CASLEO con los S de HARPS que se encuentran más cercanos en el tiempo.

A partir de las series temporales construidas se puede determinar si las variaciones de largo plazo tienen un patrón similar al ciclo solar. Para el análisis de las series temporales de datos, calculamos el periodograma *Generalized Lomb-Scargle (GLS)* (Zechmeister & Kürster, 2009) utilizado previamente por el grupo en Ibañez Bustos et al. (2019a,b, 2020).

Una vez obtenidos los periodogramas GLS, se puede clasificar a las estrellas en cíclicas o no cíclicas. Se entiende por estrellas cíclicas aquellas que poseen una variabilidad significativa con una periodicidad pronunciada, que se observa en los periodogramas como un pico con un FAP** menor al 10%. Por otra parte, tomando en cuenta los criterios de Baliunas et al. (1995) y escalándolos con la estrella HD9562, común entre nuestra muestra y la de Baliunas et al. (1995), las estrellas no cíclicas se pueden clasificar en: irregulares, que corresponde a una variabilidad significativa sin periodicidad pronunciada, con $\langle \sigma_S/S \rangle^{***} \geq 7.3\%$ y constantes, para estrellas que no tienen variabilidad significativa donde $\langle \sigma_S/S \rangle < 7.3\%$.

3.1. Estrellas cíclicas

A modo de ejemplo de las estrellas cíclicas se presenta HD26965, clasificada como una estrella K0V con una magnitud visual de $V = 4.43$, cuyo período de rotación

**FAP: False Alarm probability, es una métrica para expresar la significancia de un período.

*** $\langle \sigma_S/S \rangle$: Proporción entre la desviación estándar (σ_S) de los índices calculados y su valor medio $\langle S \rangle$.

es $P_{rot} = 37.1$ días (Cincunegui et al., 2007), de edad (9.23 ± 4.84) Gyr.

En la Fig. 1 se muestra la serie temporal del S calculado mediante las 35 observaciones de CASLEO obtenidas entre 2000 y 2017 y las 209 observaciones de HARPS entre 2008 y 2020, promediadas mensualmente. Además incluimos los 456 índices extraídos del paper de Baum et al. (2022), que también promediamos mensualmente, entre 2001 y 2020. Se puede observar que la forma funcional del ciclo es similar al ciclo solar, con subidas bruscas y bajadas más lentas.

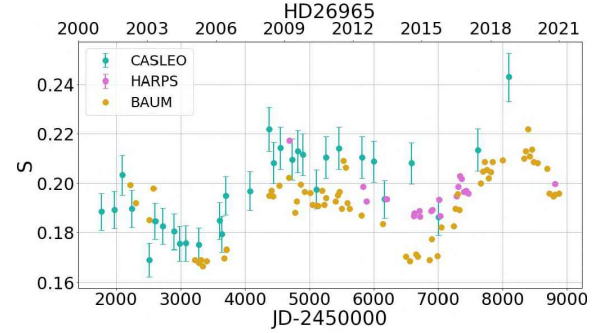


Fig. 1. Índices S de HD26965, entre 2000-2020.

A partir de la Fig. 1 construimos el periodograma GLS que se presenta en la Fig. 2, donde se observa un pico significativo $P=(3414.24 \pm 114.05)$ días $\sim (9.35 \pm 0.31)$ años, con un $FAP = 2.5 \times 10^{-16}$, en concordancia con el ciclo de (9.9 ± 0.1) años detectado en Baum et al. (2022).

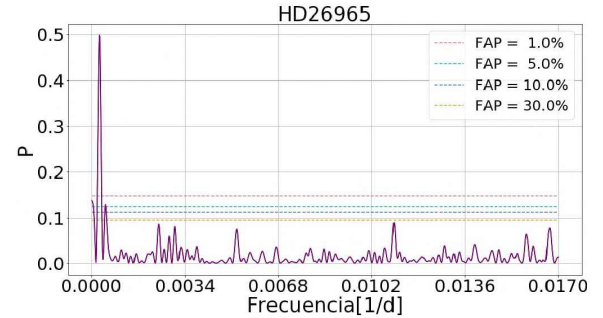


Fig. 2. Periodograma GLS correspondiente a HD26965, que indica un ciclo de actividad de (3414.24 ± 114.05) días.

Detectamos ciclos de actividad en 5 estrellas: HD3443, HD13445, HD26965, HD32147, HD219834.

3.2. Estrellas no cíclicas

3.2.1. Estrellas constantes

En representación de las estrellas no cíclicas clasificadas como constantes observamos HD10700 (τ -Ceti), una estrella de tipo espectral y clase de luminosidad G8V, con un período de rotación de 34.5 días (Cincunegui et al., 2007). Según Tuomi et al. (2013), τ Ceti es un posible

sistema con cinco planetas orbitantes. De acuerdo con Baum et al. (2022) se clasifica como constante, reafirmando el resultado preliminar de Baliunas et al. (1995).

En la Fig. 3 se muestra la serie temporal del S obtenido de las 58 observaciones realizadas entre los años 2000 y 2022 en CASLEO y las 112 observaciones pertenecientes al espectrógrafo HARPS efectuadas entre 2012 y 2021, promediadas mensualmente. Nuevamente, incluimos los índices extraídos del paper de Baum et al. (2022), que fueron promediados mensualmente entre los años 2000 y 2020, 749 índices en este caso.

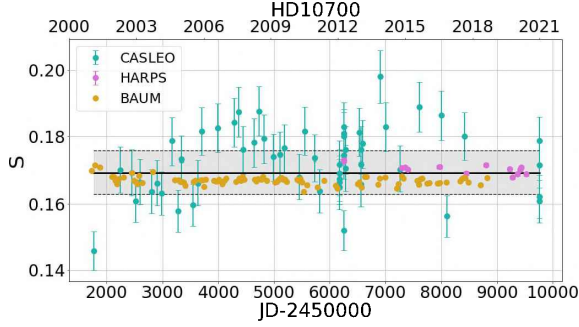


Fig. 3. Índices S de HD10700, entre 2000-2022. La línea sólida indica el valor medio del índice S y las líneas a trazos los niveles $\pm 1\sigma_S$.

A partir de la serie temporal anterior, construimos la Fig. 4 que corresponde al periodograma GLS, donde no se observa un pico significativo, lo que implica que esta estrella no tiene un ciclo definido. Además, $\langle \sigma_S/S \rangle = 3.8\%$, por lo tanto es constante. Esto concuerda con el resultado de Baum et al. (2022).

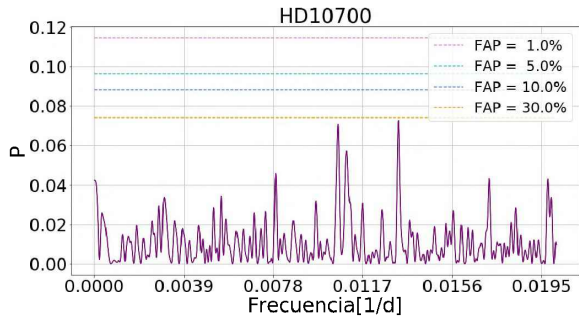


Fig. 4. Periodograma GLS correspondiente a HD10700.

No detectamos variabilidad en 6 estrellas de la muestra: HD3795, HD9562, HD10700, HD43587, HD158614 y HD212330.

3.2.2. Estrellas irregulares

Por último, presentamos a HD131977 como ejemplo de las estrellas no cíclicas clasificadas como irregulares. HD131977 es una estrella con un período de rotación $P_{rot} = 44.6$ días (Cincunegui et al., 2007), con una magnitud aparente $V = 5.72$ y es de tipo espectral y clase de luminosidad K4V.

En la Fig. 5 se muestra la serie temporal del S obtenido a partir de las 21 observaciones de CASLEO adquiridas entre 2000 y 2017 y 8 observaciones de HARPS realizadas entre 2005 y 2006, promediadas mensualmente.

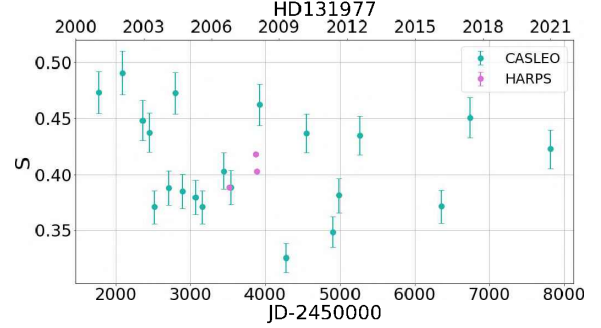


Fig. 5. Índices S de HD131977, entre 2000-2017.

A partir de esta serie temporal, construimos el periodograma GLS que se observa en la Fig. 6, donde no se presenta un pico significativo, lo que indica que esta estrella no tiene un ciclo de actividad existente. Además, $\langle \sigma_S/S \rangle = 10.2\%$ por lo que se puede clasificar como irregular.

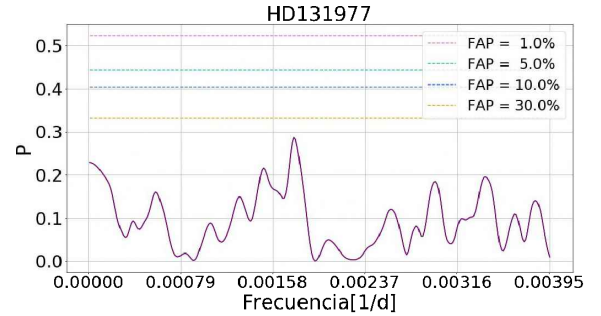


Fig. 6. Periodograma GLS correspondiente a HD131977.

Encontramos actividad irregular en 3 estrellas: HD128620, HD128621, HD131977.

4. Períodos de actividad en función del período de rotación.

A modo de resumen en la Tabla 1 se sintetizan los resultados obtenidos en este trabajo para las estrellas de la muestra estudiada junto a sus principales características.

Una vez determinados los períodos de rotación y actividad confiables del conjunto de estrellas de interés, realizamos una grafica donde se relaciona la longitud del ciclo de actividad con la tasa de rotación de la estrella, incluyendo datos de otros trabajos (Saar & Brandenburg, 1999; Metcalfe et al., 2010, 2013; Hall et al., 2007; Böhm-Vitense, 2007). Particularmente, Böhm-Vitense (2007) encontró que la relación entre ambas cantidades no es unívoca, sino que se distribuye en 2 ramas

ID	Tipo espectral	Time proc	#Obs	P_{rot} (d)	P_{act} (d)	FAP	$\langle S \rangle$	σ_S
HD 3443	K1 V	2001-2022	39	30.00	1042.96 ± 34.81	7×10^{-3}	0.186	0.016
HD 3795	K0 V	2000-2022	37	32.00	-	-	0.158	0.011
HD 9562	G1 V	2000-2022	31	29.00	-	-	0.139	0.007
HD 10700	G8 V	2000-2022	58	34.50	-	-	0.169	0.0006
HD 13445	K1.5 V	2002-2022	28	30.00	6690.46 ± 1593.54	3×10^{-2}	0.261	0.022
HD 26965	K0 V	2000-2017	35	37.10	3414.24 ± 114.05	2×10^{-6}	0.194	0.014
HD 32147	K3+ V	2000-2015	35	47.40	4695.2 ± 1066.3	8.8×10^{-6}	0.274	0.029
HD 43587	G0 V	2002-2014	26	20.00	-	-	0.159	0.008
HD 128620	G2 V	2002-2022	15	29.00	-	-	0.212	0.026
HD 128621	K1 V	2000-2022	18	42.00	-	-	0.195	0.038
HD 131977	K4 V	2000-2022	21	44.60	-	-	0.410	0.041
HD 158614	G9 IV-V	2000-2022	27	34.00	-	-	0.171	0.008
HD 212330	G2 IV-V	2000-2022	28	21.05	-	-	0.150	0.010
HD 219834	G8.5 IV	2000-2022	30	42.50	7381.84 ± 884.84	7×10^{-3}	0.153	0.013

Tabla 1. Selección de estrellas del tipo solar del Proyecto HK α (con 20 días $< P_{rot} < 50$ días) sus parámetros principales, los años de observación en CASLEO, la cantidad de observaciones analizadas y los resultados de este trabajo. Los períodos de rotación fueron tomados únicamente de la literatura (Cincunegui et al., 2007).

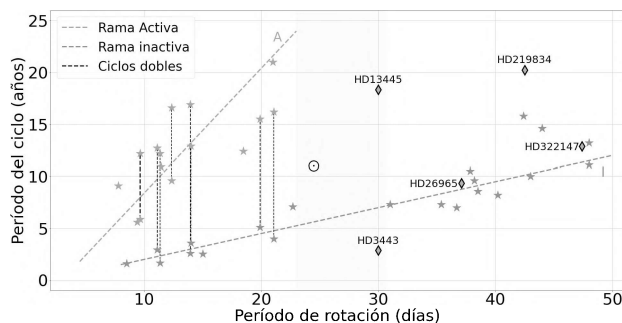


Fig. 7. Gráfico del período de actividad en función del período de rotación. Se muestra en rosa las estrellas pertenecientes a la rama activa (A) y en verde las de la rama inactiva (I). Las líneas punteadas que unen los puntos corresponden a períodos de la misma estrella. La zona sombreada corresponde a los períodos de rotación para los cuales no se reportaron ciclos, mientras que en amarillo son los resultados obtenidos durante este trabajo. Los ciclos y los períodos de rotación se obtuvieron de Saar & Brandenburg (1999); Metcalfe et al. (2010, 2013); Hall et al. (2007); Böhm-Vitense (2007).

diferentes. En la Fig. 7 se muestra en rosa las estrellas pertenecientes a la rama activa (A) y en verde las de la rama inactiva (I). Las rectas rosa y verde punteadas son las obtenidas en Böhm-Vitense (2007), mientras que el Sol está indicado con el símbolo típico. Las líneas punteadas que unen los puntos corresponden a períodos de la misma estrella. La zona sombreada corresponde a los períodos de rotación para los cuales no se reportaron ciclos, mientras que en amarillo son los resultados obtenidos durante este trabajo, para las estrellas que presentaron un ciclo de actividad. Del conjunto de 14 estrellas analizadas, se detectaron ciclos de actividad en 5 estrellas: HD3443, HD13445, HD26965, HD32147, HD219834. En la mayoría de los casos los períodos de actividad detectados pertenecen a la rama inactiva del diagrama $P_{cyc}-P_{rot}$, mientras que algunas estrellas cíclicas se incluyen en la franja donde sólo se había reportado el ciclo solar. En ningún caso pudimos detectar estrellas

con 2 ciclos de actividad.

En coincidencia con Metcalfe et al. (2016), de la muestra estudiada no detectamos ningún ciclo de actividad en la rama activa para estrellas con rotaciones solares o más lentas. No obstante, las estrellas HD3443 y HD13445 muestran evidencia de actividad cíclica no detectada previamente para estrellas con estos períodos de rotación, entre 23 y 31 días. Por otro lado, HD32147 y HD26965 parecieran presentar ciclos de actividad pertenecientes a la rama inactiva, mientras que HD219834 y HD13445 pareciera no pertenecer a ninguna rama.

Finalmente, existen dos posibles interpretaciones de estos resultados. Uno y el más discutido hasta el momento, entiende que el dínamo solar se encuentra en transición generando que tenga un ciclo de actividad atípico (Metcalfe et al., 2016), lo que implicaría que HD13445 y HD3443 podrían encontrarse en una situación similar. Sin embargo, también si se observa con detenimiento la Fig. 7 se puede notar la existencia de una tercera rama entre las estrellas que se encuentran entre ramas (el Sol, HD13445 y HD219834), no reportada hasta el momento.

Referencias

- Baliunas S.L., et al., 1995, ApJL, 438, 269
 Baum A.C., et al., 2022, AJ, 163, 183
 Böhm-Vitense E., 2007, ApJL, 657, 486
 Cincunegui C., Díaz R.F., Mauas P.J.D., 2007, A&A, 461
 Hall J.C., Lockwood G.W., Skiff B.A., 2007, AJ, 133, 862
 Ibañez Bustos R.V., et al., 2019a, MNRAS, 483, 1159
 Ibañez Bustos R.V., et al., 2019b, A&A, 628
 Ibañez Bustos R.V., et al., 2020, A&A, 644
 Jenkins J., et al., 2008, A&A, 458, 571
 Lovis C., et al., 2011, ArXiv e-prints
 Mauas P., 2016, BAAA, 58, 284
 Metcalfe T.S., Egeland R., van Saders J., 2016, ApJL, 826
 Metcalfe T.S., et al., 2010, ApJL, 723, L213
 Metcalfe T.S., et al., 2013, ApJL, 763, L26
 Saar S.H., Brandenburg A., 1999, ApJ, 524, 295
 Tuomi M., et al., 2013, A&A, 551, A79
 Vaughan A., Preston G., Wilson O., 1978, PASP, 90, 267
 Zechmeister M., Kürster M., 2009, A&A, 496, 577