

Caracterización de la actividad magnética de un conjunto de estrellas M a partir de la base de datos de *SOPHIE*

C.G. Oviedo¹, A.P. Buccino¹ & R.F. Díaz²

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

² International Center for Advanced Studies, CONICET-UNSAM, Argentina

Contacto / coviedo@iafe.uba.ar

Resumen / Durante las últimas décadas, las estrellas M han cobrado sustancial interés en la búsqueda de exoplanetas debido no solamente a la alta ocurrencia de planetas tipo terrestres sino también a que es mayor la facilidad de detección de planetas de baja masa. Sin embargo, una de las mayores limitaciones en el estudio de sistemas planetarios extrasolares usando el método de la velocidad radial es la presencia de los ciclos de actividad de las estrellas. En este trabajo, presentamos las bases para encarar un estudio único de actividad en aquellas estrellas dM que son blancos en programas de búsquedas de planetas. A partir de la extensa base de datos del espectrógrafo *SOPHIE* instalado en el telescopio de 1,93 m en el Observatorio de Haute-Provence (CNRS), Francia, realizamos la intercalibración entre indicadores estándar de actividad estelar en un conjunto de 14 estrellas M.

Abstract / During the last decades, M stars have gained substantial interest in the search for exoplanets due not only to the high occurrence of terrestrial-type planets but also to the greater ease of detection of low-mass planets. However, one of the major limitations in the study of extrasolar planetary systems using the radial velocity method is the presence of the activity cycles of the stars. In this work, we present the first steps to perform a unique study of activity in those dM stars that are targets in planet search programs. From the extensive database of the *SOPHIE* spectrograph installed on the 1.93 m telescope at the Haute-Provence Observatory (CNRS), France, we performed the intercalibration among standard indicators of stellar activity in a set of 14 M stars.

Keywords / stars: activity — techniques: spectroscopic

1. Introducción

La detección de planetas tipo Tierra es uno de los grandes logros científicos de las últimas décadas. Sin embargo, una de las mayores limitaciones astrofísicas en el estudio de sistemas planetarios extrasolares, usando el método de la velocidad radial, son los fenómenos conocidos como actividad estelar, que incluyen, además de las fulguraciones, la presencia de regiones activas y la granulación que dificultan y limitan la detección de planetas de tipo terrestre y pueden producir falsas detecciones (ej. Dumusque 2018).

Durante las últimas décadas, las estrellas M han cobrado sustancial interés en la búsqueda de exoplanetas debido no solamente a la alta ocurrencia de planetas tipo terrestres sino también a que es mayor la facilidad de detección de planetas de baja masa. Estudiar en general la actividad estelar, y en particular la caracterización de las estrellas con planetas, es fundamental para avanzar en el conocimiento sobre los planetas de tipo terrestre, y para la caracterización de su habitabilidad. Bajo el objetivo final de estudiar la actividad de largo plazo en estrellas Ms con planetas, en primer lugar presentamos la base de datos del espectrógrafo *SOPHIE* instalado en el telescopio de 1,93 m en el Observatorio de Haute-Provence (CNRS). En segundo lugar, intercalibramos los indicadores de actividad obtenidos de los espectros de *SOPHIE* para una muestra de 14 enanas

M0-M3 con indicadores estándar de actividad estelar (índice de Mount Wilson).

2. Observaciones

El espectrógrafo destinado a la observación de los fenómenos de los interiores estelares y de los exoplanetas (*SOPHIE*, por sus siglas en Francés) es un espectrógrafo tipo échelle de dispersión cruzada, de alta resolución ($R=40000-75000$) que se encuentra en el telescopio reflector de 1,93 m en el Observatorio de Haute-Provence situado en el sureste de Francia. Los espectros cubren el rango de longitud de onda 3872-6943 Å. A partir de estos espectros, se pueden obtener velocidades radiales mediante técnicas de correlación cruzada numérica con precisión de hasta 2-3 m/s en estrellas de tipo tardío F, G, K y M, dependiendo de la relación señal/ruido (S/N) del espectro. Por otro lado, su amplia cobertura espectral permite caracterizar los indicadores de actividad desde la baja hasta la alta cromosfera. En la Fig. 1 mostramos un espectro de *SOPHIE* para una estrella de tipo M, donde indicamos las líneas Ca II K y H y la línea H α .

2.1. Muestra

La base de datos de *SOPHIE* provee miles de espectros de alta resolución de cientos de estrellas brillantes. Me-

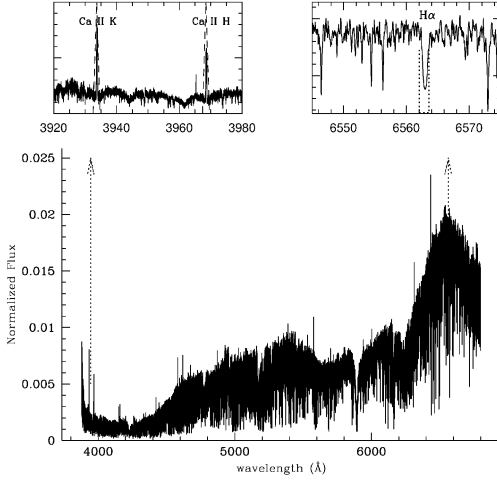


Figura 1: Espectro de la base de datos de *SOPHIE* para estrella dM. En zoom con una línea roja discontinua mostramos las dos líneas Ca II K y Ca II H en emisión y, además, la región H α .

dianete rutinas propias realizadas con la biblioteca **pan-das** del lenguaje de programación **Python**, identificamos 500 estrellas de secuencia principal de tipo M observadas entre los años 2007 y 2019 con el espectrógrafo *SOPHIE*.

Para caracterizar la muestra, en la Fig. 2 presentamos la distribución de las estrellas dM observadas por *SOPHIE* por intervalo de magnitud, podemos observar que la magnitud promedio es de $m_V = 12$. En la Fig. 3 mostramos la distribución según la relación S/N de todos los espectros *SOPHIE* de esta muestra y observamos que la mayoría presenta una relación S/N ~ 50 .

Con el análisis exploratorio de los datos, construimos la matriz de correlación de Pearson para identificar las variables (*timespan*, *n_obs*, *mv*, entre otras) que mejor correlacionaban, la cual podemos ver en la Fig. 4. Obtuvimos que la mejor relación fue entre las variables estadísticas intervalo de muestreo a lo largo del tiempo (*timespan*) y la cantidad de objetos que fueron más observados (*quart_val2*), lo cual nos sugiere que gran parte de los objetos tienen observaciones dentro de un año y la otra gran mayoría de alrededor de 6 años.

3. Índice de Mount Wilson-*SOPHIE*

Las variaciones en el flujo de las líneas Ca II H (3968 Å) y K (3933 Å) son los indicadores de actividad más sensibles y fidedignos para monitorear la actividad de una estrella en el rango visible, ya que la intensidad de la emisión en estas líneas aumenta según al calentamiento producido por las inhomogeneidades magnéticas locales (Baliunas et al., 1995).

A partir de las líneas de Ca II H y K se define el índice *S* adimensional (Wilson, 1978) denominado índice de Mount Wilson:

$$S = \alpha \left(\frac{H + K}{V + R} \right), \quad (1)$$

donde H y K son las cuentas medidas en las líneas Ca II utilizando un filtro pasabanda triangular, V y R son

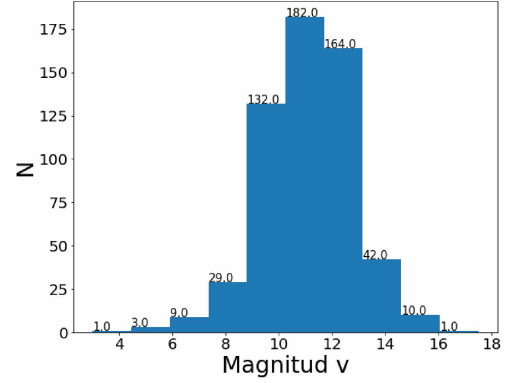


Figura 2: Histograma de la magnitud en el filtro V para las estrellas de la base de datos del espectrógrafo *SOPHIE*.

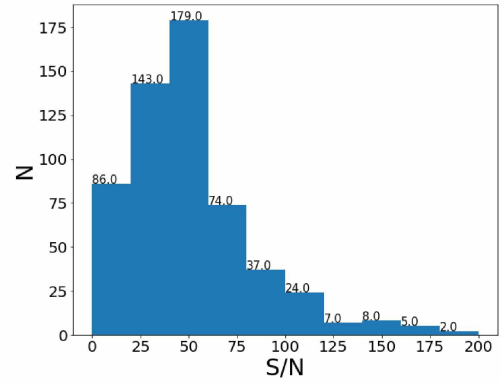


Figura 3: Histograma de la relación S/N para los objetos del dataset del espectrógrafo *SOPHIE*.

las cuentas en las ventanas del continuo adyacente a las líneas de Ca II, α es la razón entre los anchos de las ventanas de integración. El índice de Mount Wilson es una medida standard de actividad estelar, muestra variaciones en todas las escalas de tiempo, incluyendo escalas cortas con respecto al período de rotación y variaciones a largo plazo asociadas con ciclos de actividad. De esta manera, permite detectar ciclos de actividad en estrellas frías (e.j. Ibañez Bustos et al. 2019). A la fecha no se ha determinado un índice de Mount Wilson para los espectros de *SOPHIE*. Con el fin de intercalibrar el índice de actividad de *SOPHIE* en función del índice standard de Mount Wilson, nos basamos en mediciones del índice de Mount Wilson definido en Astudillo-Defru et al. (2017) a partir de los espectros de *HARPS* de las estrellas de nuestra muestra. El espectrógrafo *HARPS* se encuentra instalado en el telescopio de 3.6m de ESO en La Silla, Chile. En primer lugar, identificamos el subconjunto de 62 estrellas que fueron observadas por ambos espectrógrafos *HARPS* y *SOPHIE*. De las 62 estrellas, sólo 14 presentaban espectros *SOPHIE* con $S/N \geq 70$ que permitiera tener una medición confiable de la actividad en las líneas de Ca II. Una vez filtrados los espectros, calculamos un índice medio X a partir de las

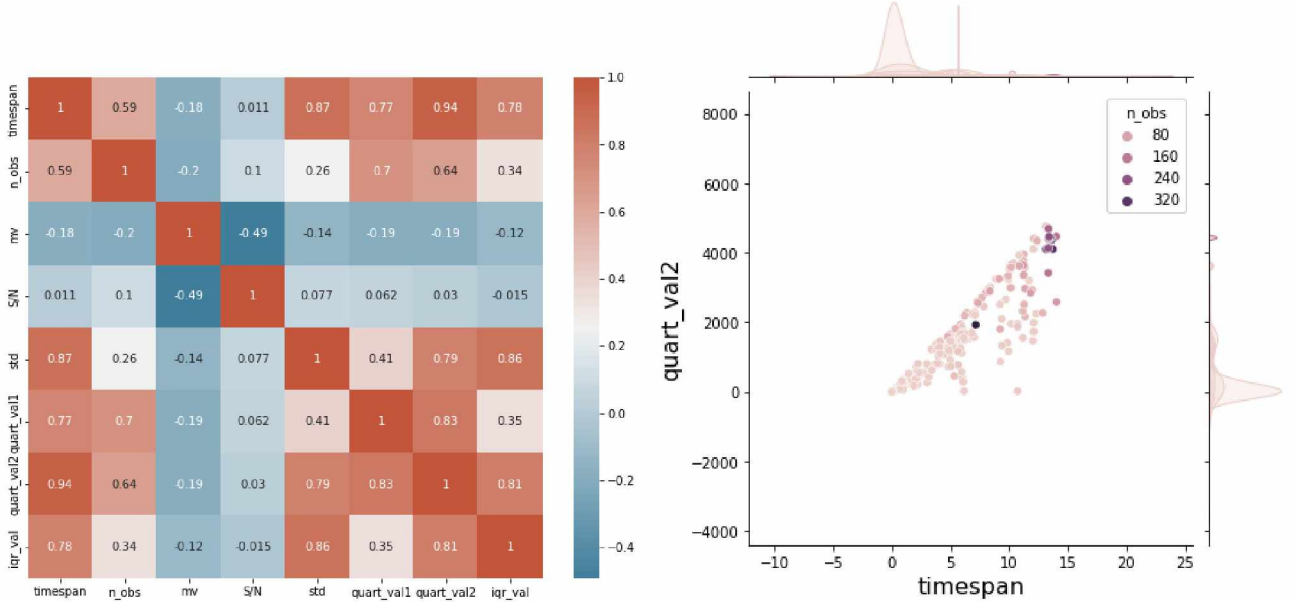


Figura 4: *Panel izquierdo:* la matriz de correlación de Pearson entre las diferentes variables del dataset de *SOPHIE*. *Panel derecho:* Se puede observar una fuerte correlación entre las variables estadísticas *intervalo de tiempo (timespan)* y la cantidad de objetos más observados (*quart_val2*).

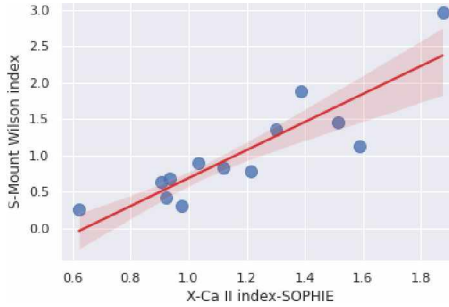


Figura 5: Calibración entre los índices *X* del espectrógrafo *SOPHIE* y el índice de Mount Wilson. El ajuste obtenido por cuadrados mínimos se marca con línea llena, dado por la ecuación: $S = aX + b$, donde $a = (1,20 \pm 0,02)$ y $b = (-0,50 \pm 0,02)$ con coeficiente de Pearson de 0,88. Las áreas sombreadas indican los puntos que se apartan en 1σ del ajuste.

líneas de Ca II para los espectros de *SOPHIE* y obtuvimos un índice medio de Mount Wilson para los espectros de *HARPS*. En la Fig. 5 presentamos el mejor ajuste logrado y la intercalibración entre los índices.

4. Conclusiones

A partir de la extensa base de datos de *SOPHIE* identificamos aquellas estrellas dM que poseen al menos una observación anual que permitirá estudiar los ciclos estelares.

En primer lugar, encontramos que 500 estrellas dM fueron observadas entre 2007 y 2021 por *SOPHIE*. Al

realizar un análisis exploratorio de los datos, encontramos que el 30% de las estrellas de la muestra fueron observadas sostenidamente a lo largo de al menos 10 años. Con el objetivo de comparar los niveles de actividad de la muestra con otras estrellas, así como también unir diferentes bases de datos para realizar un estudio de largo plazo de la actividad de la muestra, en el presente trabajo obtuvimos el índice de Mount Wilson para los espectros de *SOPHIE*. Para un conjunto de 14 estrellas dM de nuestra base de datos intercalibramos el índice medio de Mount Wilson derivado de espectros *HARPS* con el índice de Ca II calculado en espectros *SOPHIE* que presentaban una relación $S/N \geq 70$ para así poder obtener un indicador confiable de actividad. De esta manera, logramos por primera vez obtener un índice standard de actividad estelar para los espectros de *SOPHIE*.

Cabe destacar que a partir de estos resultados preliminares se podrá caracterizar la muestra en actividad, detectar patrones de variabilidad a largo plazo (e.j. ciclos estelares). Finalmente, se planea discriminar en las velocidades radiales las señales asociadas a la actividad estelar de largo plazo y su inferencia para la detección de exoplanetas.

Referencias

- Astudillo-Defru N., et al., 2017, A&A, 605, L11
- Baliunas S.L., et al., 1995, ApJ, 438, 269
- Dumusque X., 2018, A&A, 620, A47
- Ibáñez Bustos R.V., et al., 2019, MNRAS, 483, 1159
- Wilson O.C., 1978, ApJ, 226, 379