

X Jornadas de Introducción a la Investigación 2022

# LA METALICIDAD DE LAS ESTRELLAS DE TIPO M: CALIBRACIONES FOTOMÉTRICAS Y ESPECTROSCÓPICAS

Christian Duque-Arribas

Directores: Prof. Dr. David Montes y Dr. Hugo M. Tabernero

Sistemas estelares, espectroscopía y fotometría  
Facultad de CC. Físicas - Universidad Complutense de Madrid



# Las estrellas de tipo espectral M...



... son las estrellas (en la secuencia principal) más pequeñas, frías y numerosas de la Galaxia

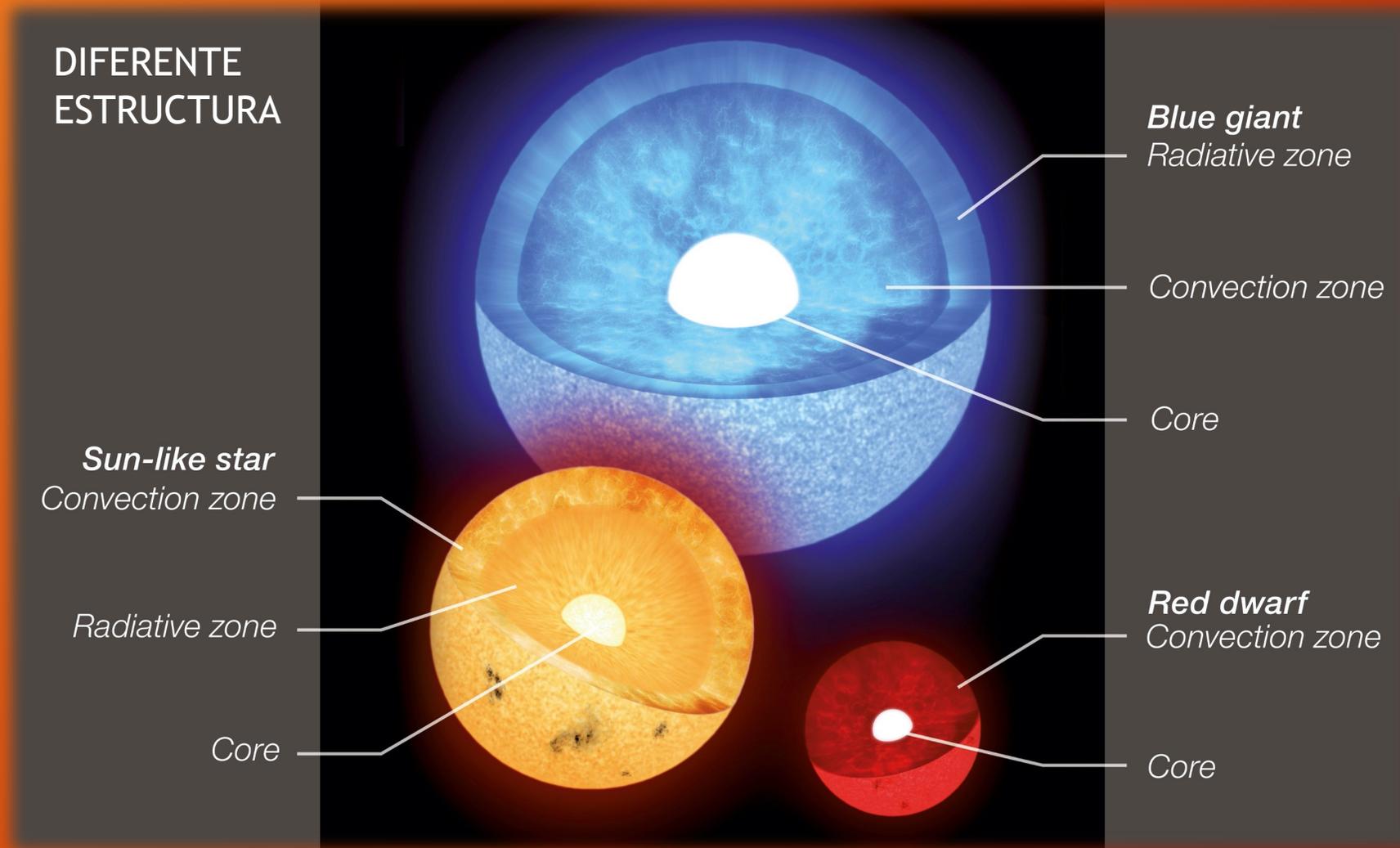
$$0.61 R_{\odot} > R > 0.10 R_{\odot}$$

$$0.62 M_{\odot} > M > 0.08 M_{\odot}$$

$$3900 K > T_{eff} > 2300 K$$

(Delfosse et al. 2000, Cifuentes et al. 2020)

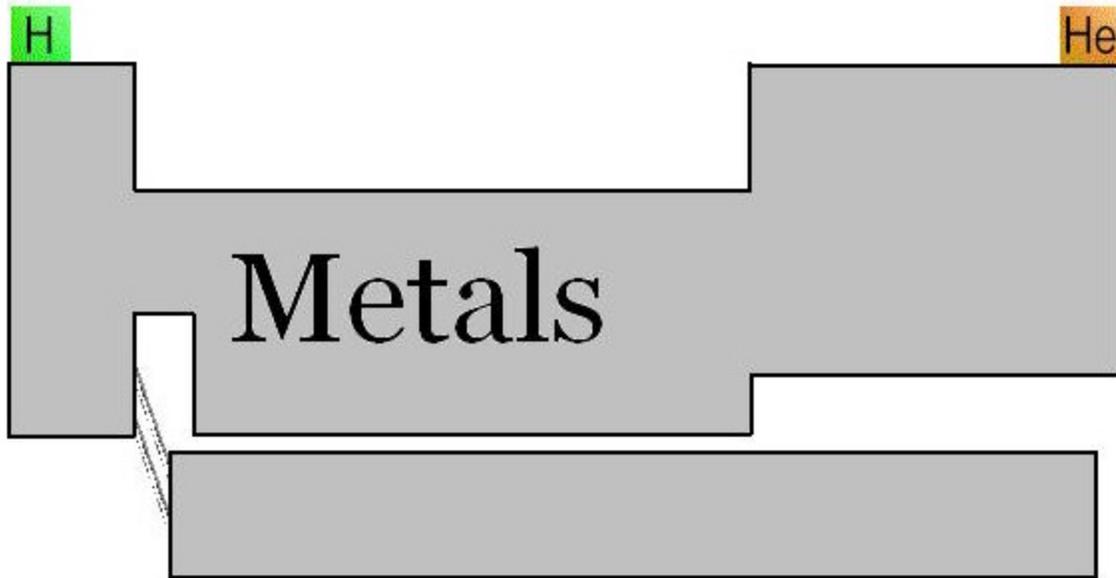
# Las estrellas de tipo espectral M



# La metalicidad estelar

La abundancia relativa de elementos más pesados que el helio, independientemente de su posición en la tabla periódica.

## The Astronomers' Periodic Table of Elements



Para el Sol:

$$X = 0.71 \quad Y = 0.27 \quad Z = 0.02$$

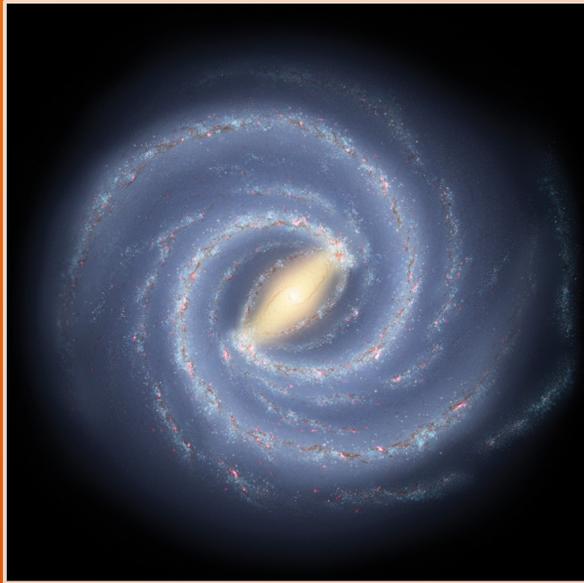
Índice de metalicidad:

Proporción logarítmica entre el número de átomos por unidad de volumen de hierro frente a la de hidrógeno respecto a la abundancia solar

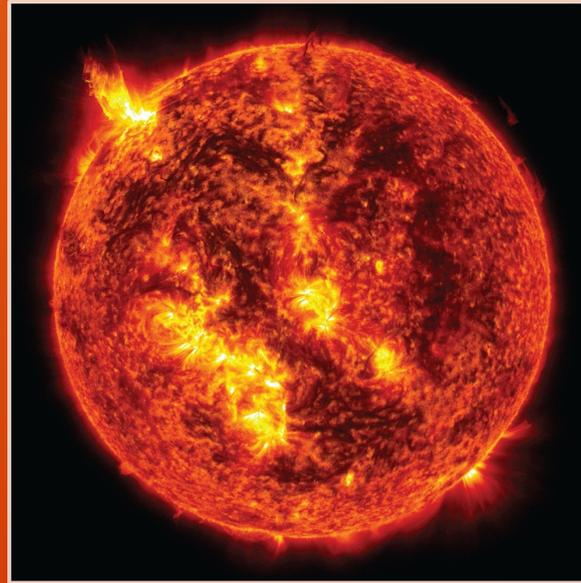
$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log \left( \frac{A(\text{Fe})}{A(\text{H})} \right) - \log \left( \frac{A(\text{Fe})}{A(\text{H})} \right)_{\odot}$$

# La metalicidad estelar

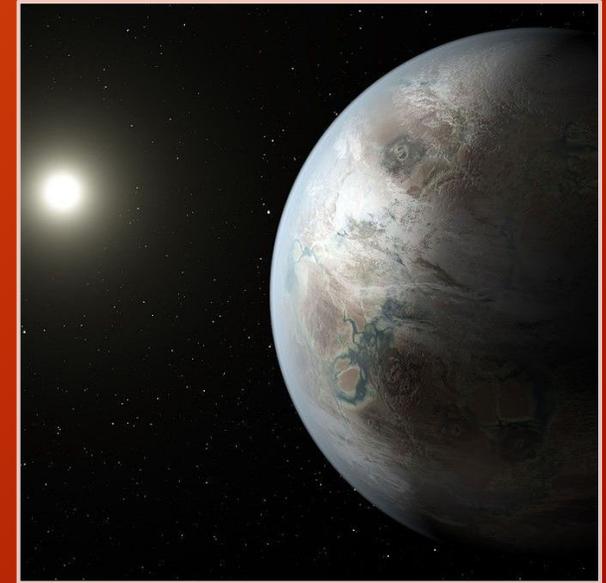
La metalicidad de las estrellas M resulta de gran interés para los astrofísicos en diferentes campos, desde estudios de la Vía Láctea a gran escala hasta la búsqueda de otros mundos más allá de nuestro Sistema Solar.



ASTROFÍSICA GALÁCTICA



ASTROFÍSICA ESTELAR



ASTROFÍSICA EXOPLANETARIA

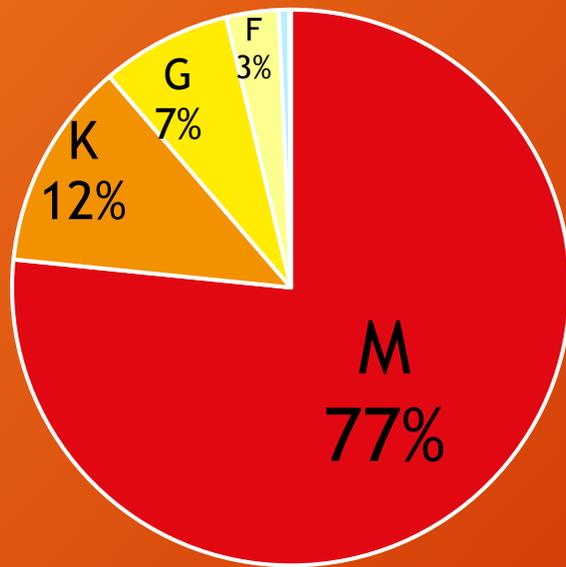


# La metalicidad en... astrofísica galáctica

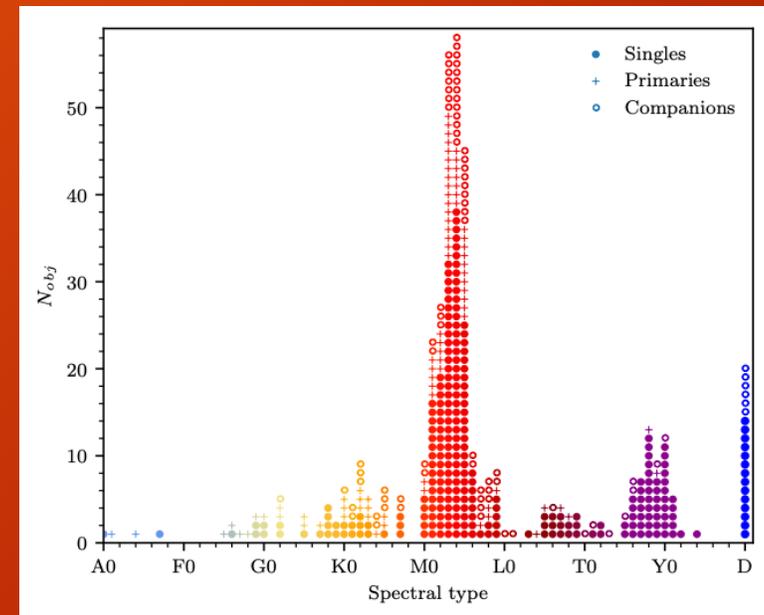
Las estrellas M resultan los objetos idóneos para el estudio tanto de la evolución química como dinámica de la Vía Láctea:

- Tiempos de vida que exceden la edad del Universo.
- Muy abundantes, en torno al 75% de las estrellas.

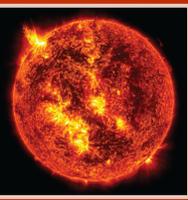
REFERENCIAS: Bahcall & Soneira (1980), Reid et al. (1997), Chabrier (2003), Henry et al. (2006), Winters et al. (2015), Ferguson et al. (2017)



Ledrew et al. (2001)



# La metalicidad en... astrofísica estelar



En las últimas décadas se ha experimentado un increíble avance en el campo de los modelos teóricos estelares.

Sin embargo, todavía hoy se encuentran **discrepancias** entre las características observacionales y los valores predichos por los modelos actuales, por ejemplo:

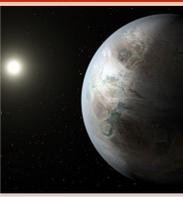
- Temperaturas efectivas de los modelos hasta 200-300 K superiores a los valores observados.
- Radios que difieren de las medidas interferométricas hasta un 25%.

Algunos autores apuntan a que estas diferencias pueden deberse a:

- Efectos causados por el **nivel de actividad** (López-Morales & Ribas, 2005)
- Diferencias en el valor de la **metalicidad** (Berger et al. 2006, López-Morales 2007)

→ Son necesarias medidas más precisas que nos permitan desarrollar nuevos y mejores modelos teóricos a fin de comprender en mayor profundidad las estrellas poco masivas.

# La metalicidad en... astrofísica exoplanetaria



En 1995 fue descubierto 51 Pegasi b (M. Mayor & D. Queloz)

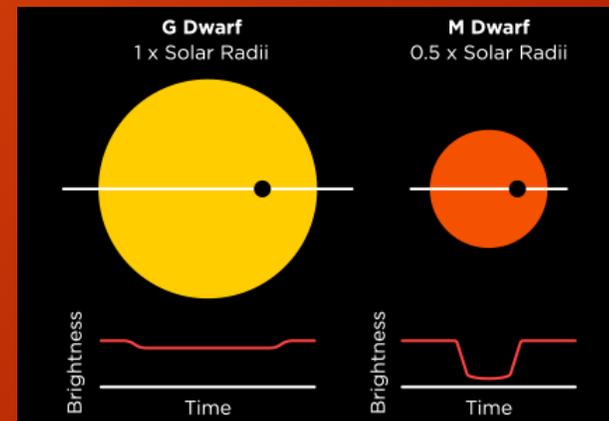
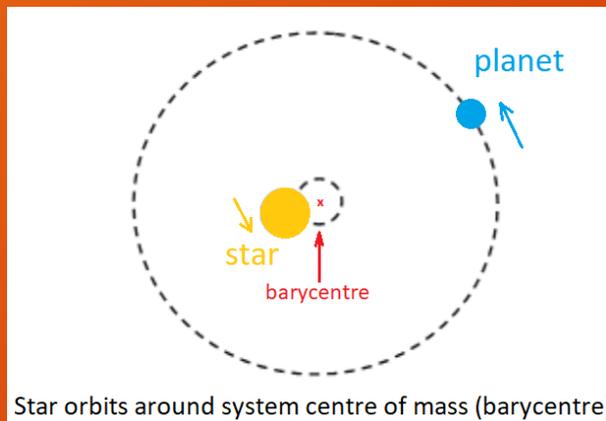


En 1999 se descubrió Gliese 876 b, el primer exoplaneta conocido en orbitar una enana M.

Confirmados: 5035    Candidatos: 8975    Sistemas planetarios: 3775    [exoplanets.nasa.gov](https://exoplanets.nasa.gov) (30 mayo 2022)

Los dos métodos de detección de exoplanetas más fructíferos se ven favorecidos en el caso de las estrellas M:

- **VELOCIDAD RADIAL:** La baja masa de estas estrellas facilitan el desplazamiento de las mismas al orbitar el centro de masas común del sistema estrella-planeta.
- **TRÁNSITOS:** Al ser estrellas tan frías y pequeñas, la zona de habitabilidad se encuentra mucho más cerca de la estrella, con periodos orbitales mucho menores.





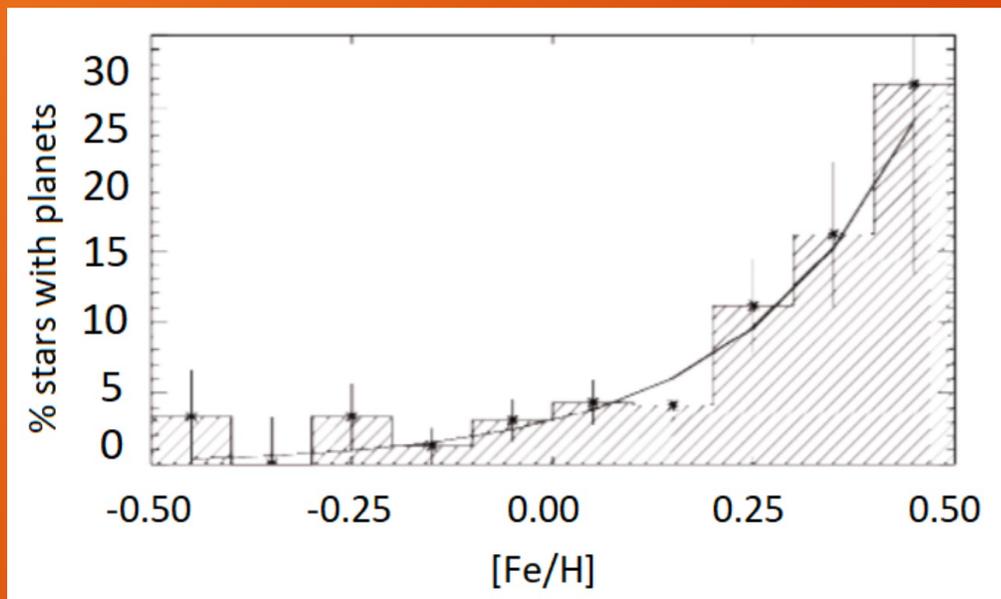
# La metalicidad en... astrofísica exoplanetaria

Se ha observado que la frecuencia de planetas gigantes gaseosos aumenta con la metalicidad estelar en el caso de estrellas de tipo solar

→ **correlación planeta-metalicidad** (González 1997, Fischer & Valenti 2005)

Estudios recientes muestran que las estrellas M siguen la misma tendencia

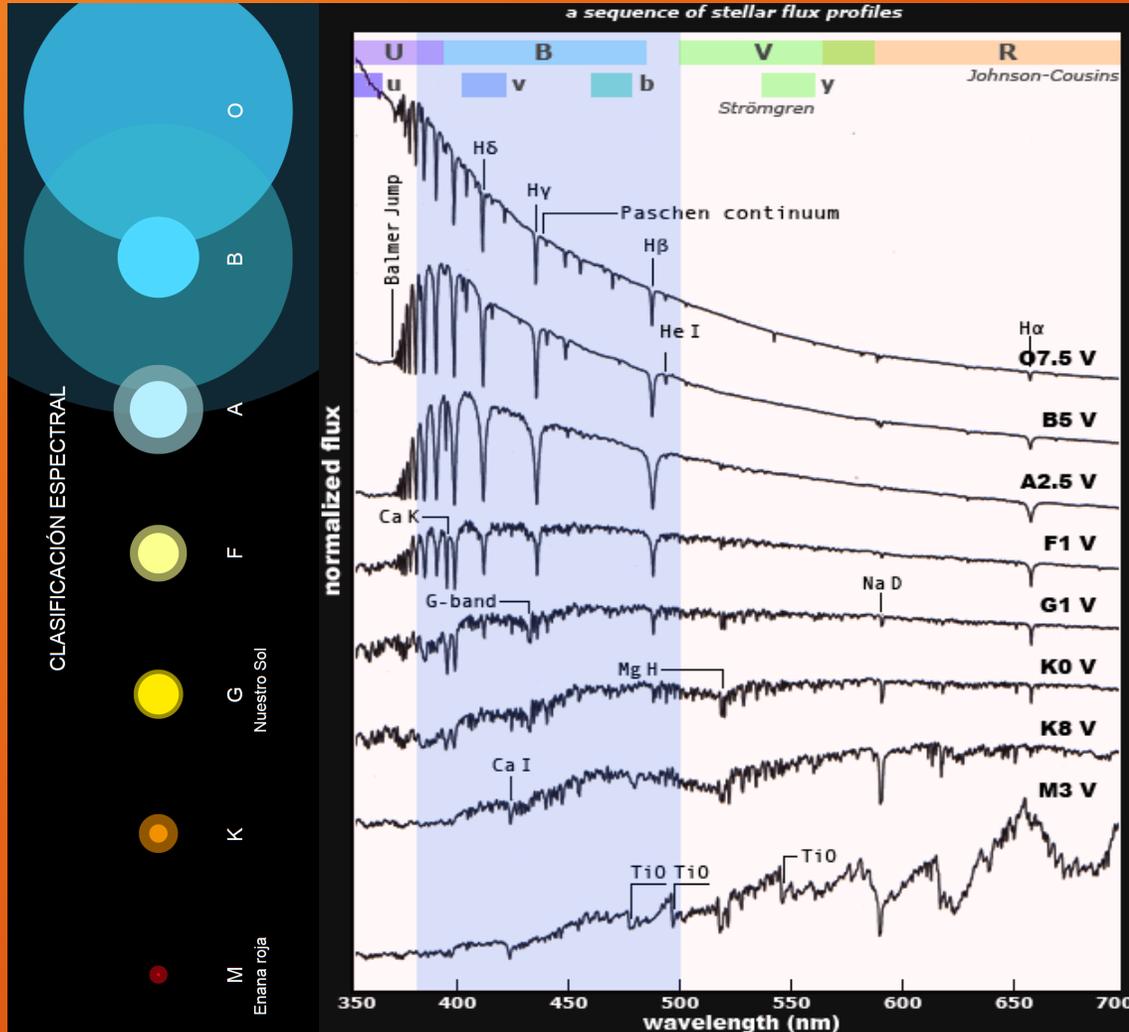
(Johnson & Apps 2009, Rojas-Ayala et al. 2010, Terrien et al. 2012, Hobson et al. 2018)



El estudio de las correlaciones entre los parámetros estelares, como la metalicidad, y la presencia de exoplanetas puede resultar útil en la **selección de objetivos para futuros surveys.**

→ Caracterización de la estrella

# Las estrellas de tipo espectral M



Espectros complejos en comparación con los de estrellas más calientes debido a la presencia de moléculas.

Para determinar abundancias, el método de la anchura equivalente falla debido a la indeterminación del continuo estelar, por lo que se requiere síntesis espectral

**OBJETIVO:**

Desarrollar diferentes calibraciones que nos permitan estimar tanto la metalicidad como las abundancias químicas en este tipo de estrellas a partir de fotometría y espectroscopía de baja resolución.

# Calibraciones fotométricas

La posición de una estrella en un CCD o CMD viene principalmente dada principalmente por su masa inicial, composición química y edad, pero efectos como la rotación, vientos estelares o actividad magnética también están involucrados.

DIAGRAMA COLOR-COLOR

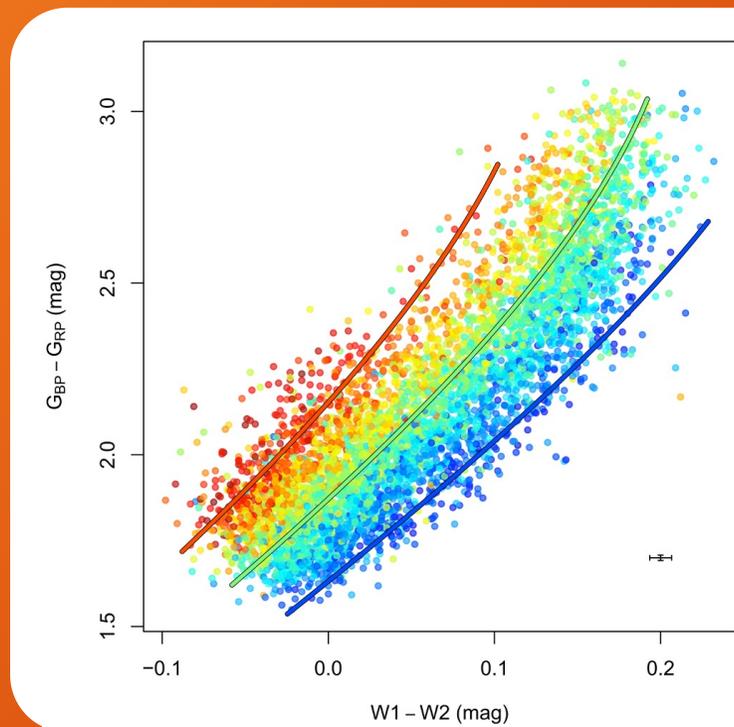
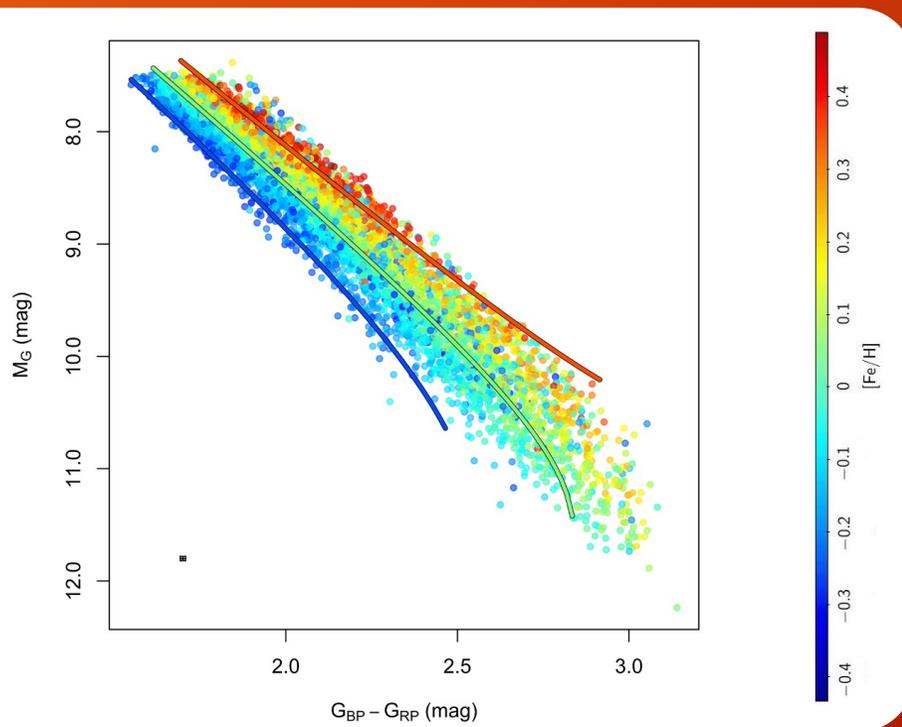


DIAGRAMA COLOR-MAGNITUD



SURVEYS

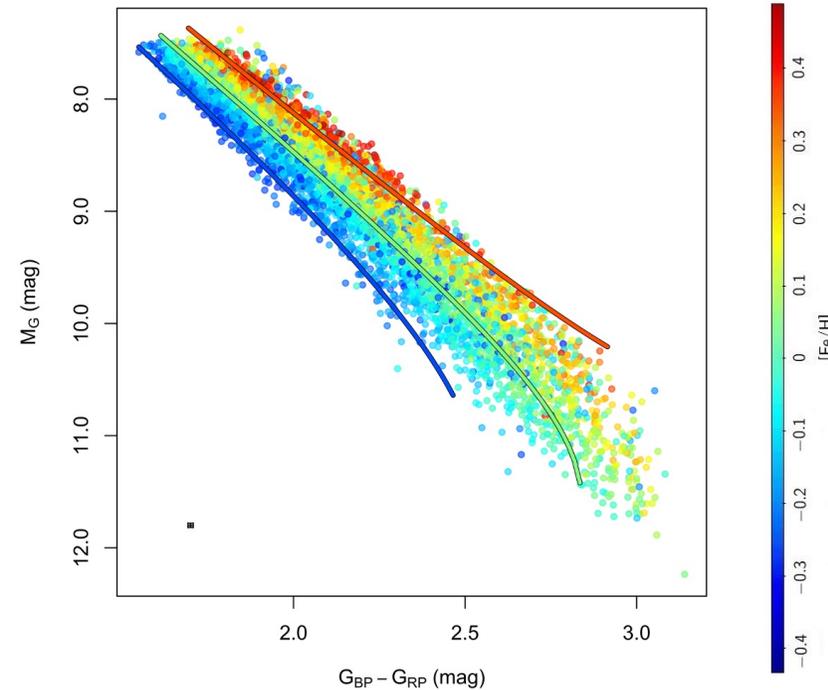
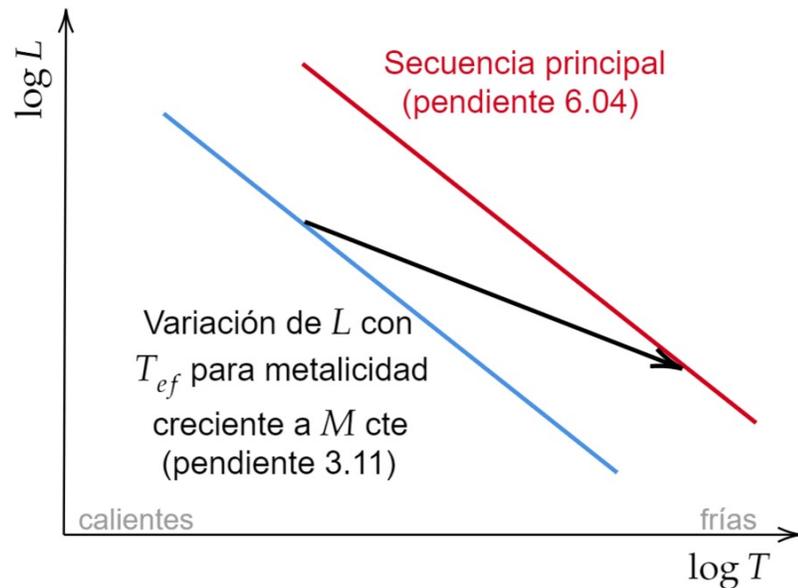


# Calibraciones fotométricas

La materia estelar es muy opaca a la radiación, y la opacidad influye en muchas características de la estrella. Un aumento de la metalicidad conlleva un aumento de la opacidad, volviendo a la estrella más fría y menos luminosa.

↑ Metalicidad  $\Rightarrow$  ↑ Opacidad  $\Rightarrow$  ↓ Temperatura & Luminosidad

DIAGRAMA COLOR-MAGNITUD

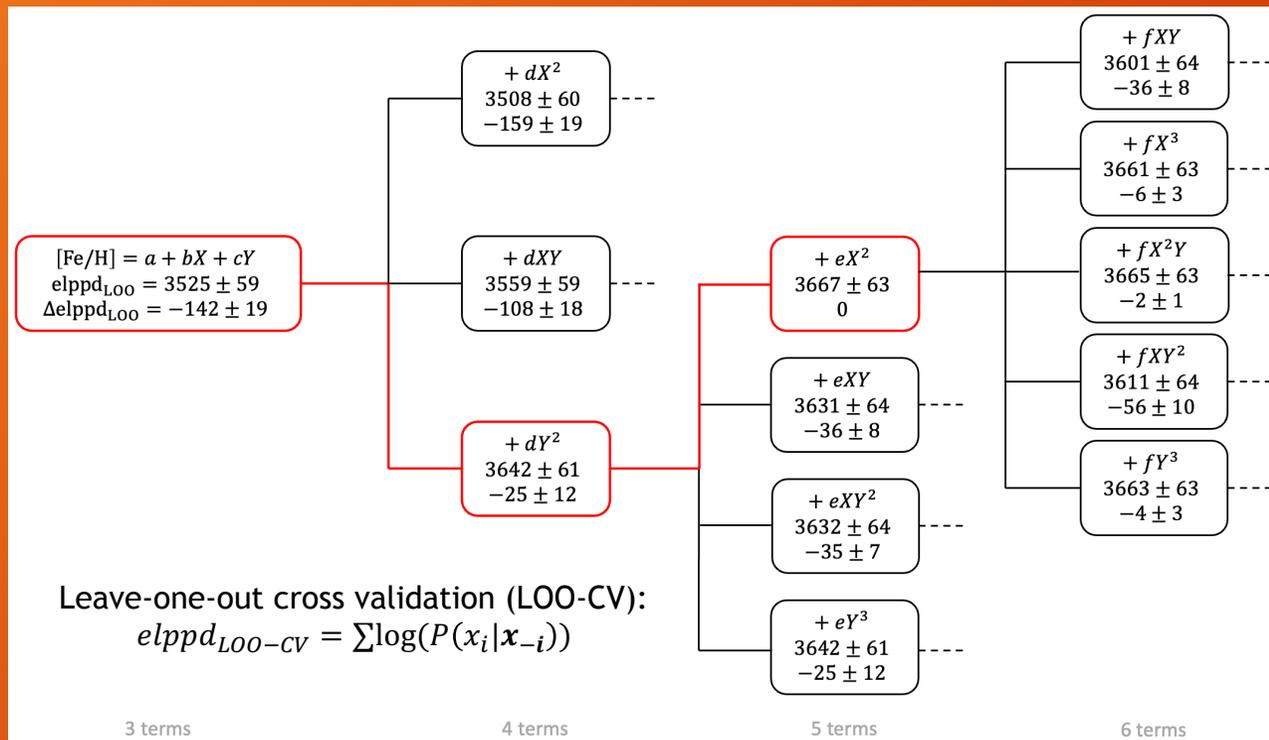


# Calibraciones fotométricas

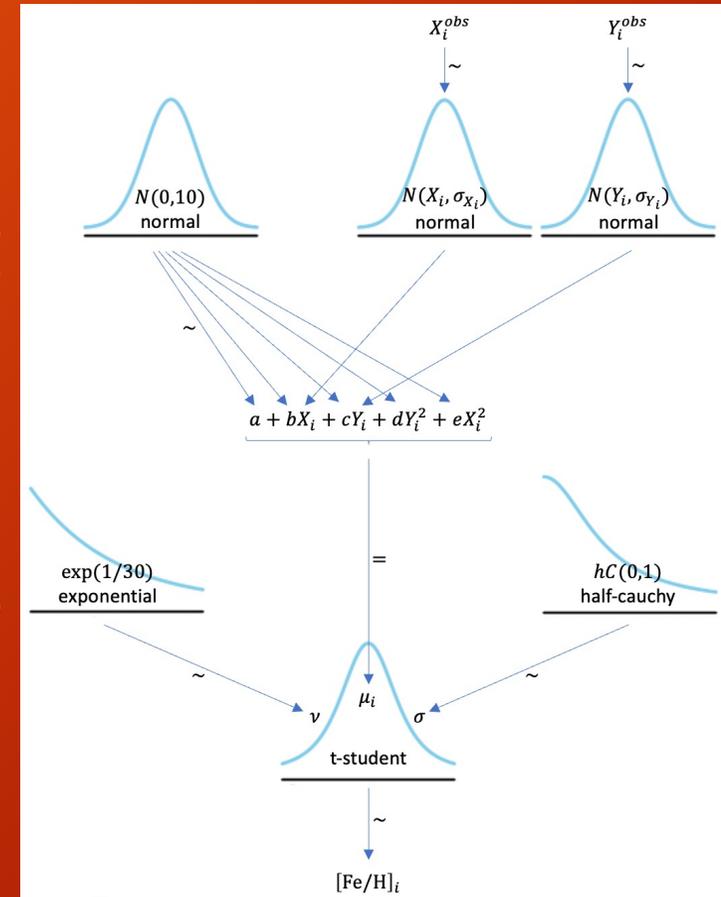


Utilizamos este gradiente de metalicidad para hacer calibraciones empleando estadística Bayesiana y cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) con Stan.

Regresión paso-a-paso para seleccionar el modelo:



Modelo de regresión robusta y priors:

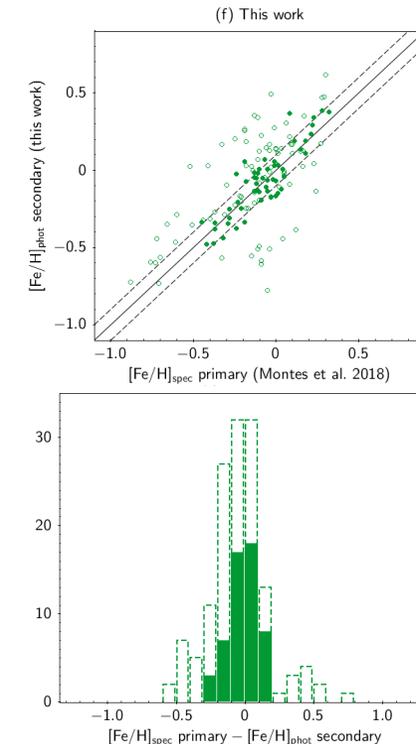
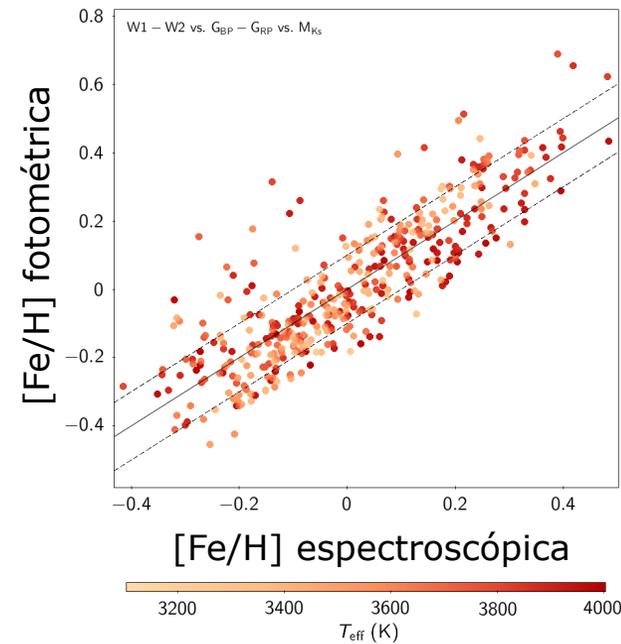
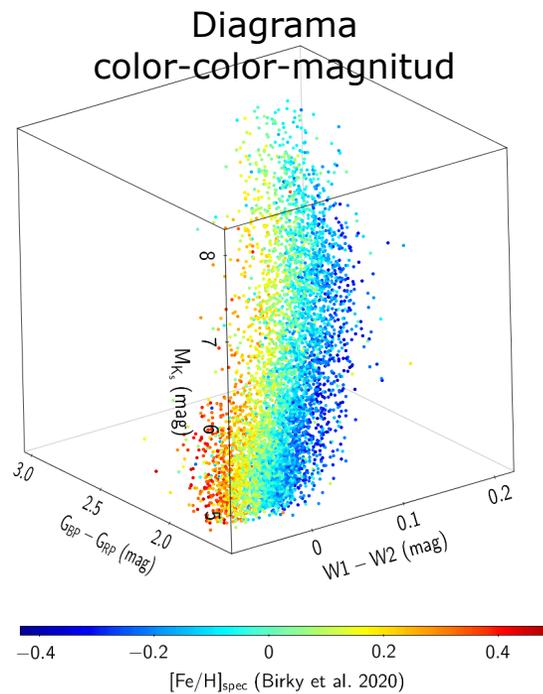


# Calibraciones fotométricas

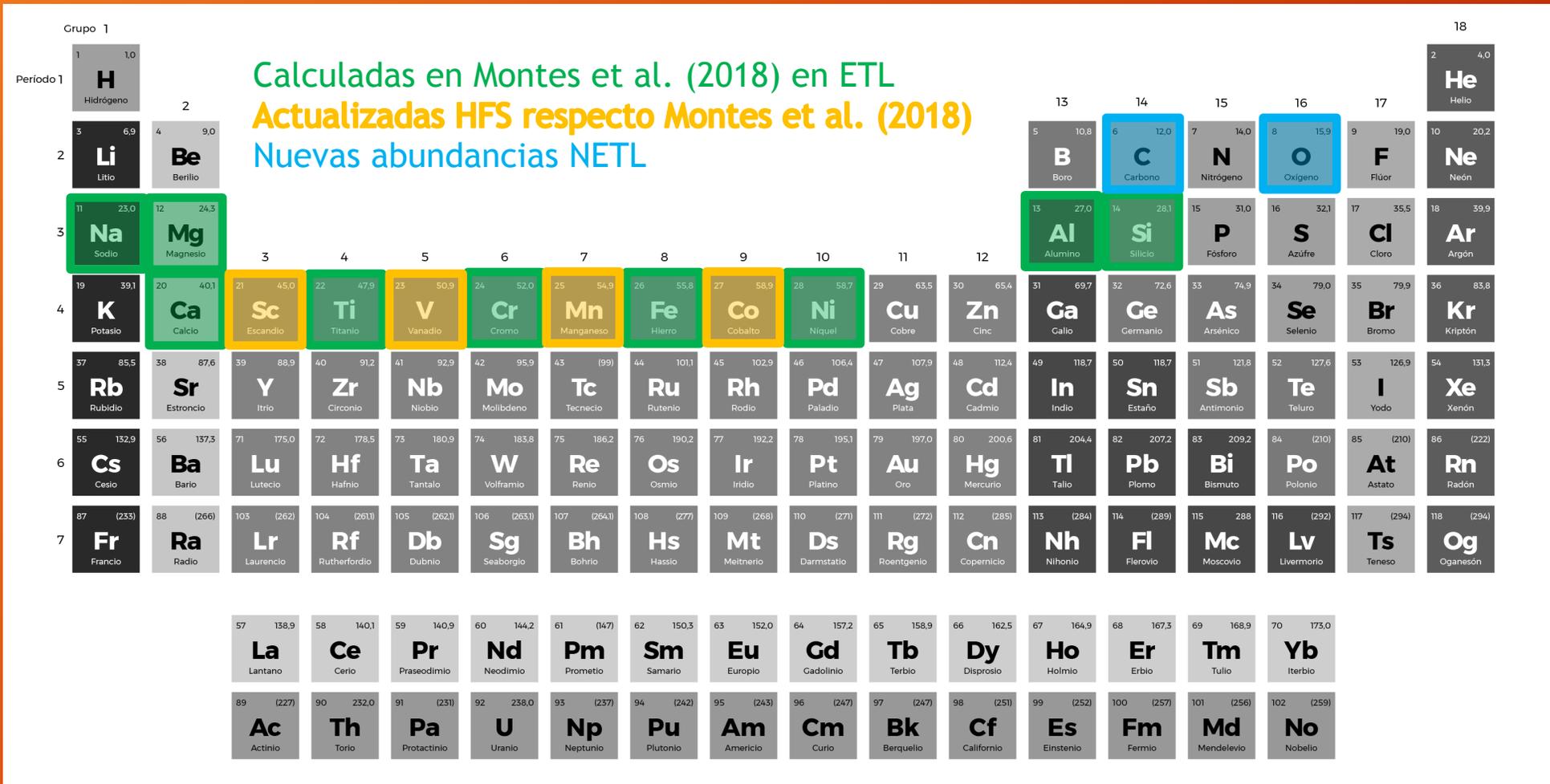
## Photometric calibrations of M dwarf metallicity with Markov chain Monte Carlo and Bayesian inference

C. Duque-Arribas<sup>1</sup>, D. Montes<sup>1</sup>, H. M. Tabernero<sup>2</sup>, J. A. Caballero<sup>3</sup>, J. Gorgas<sup>1</sup> and E. Marfil<sup>1,2</sup>

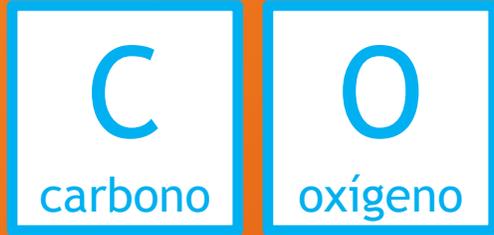
- <sup>1</sup> Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica & IPARCOS-UCM (Instituto de Física de Partículas y del Cosmos de la UCM), Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, Spain  
e-mail: chrduque@ucm.es
- <sup>2</sup> Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), carretera de Ajalvir km 4, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid, Spain
- <sup>3</sup> Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), ESAC, camino bajo del Castillo s/n, 28691 Villanueva de la Cañada, Madrid, Spain



# Abundancias químicas en sistemas FGK+M



# Abundancias químicas en sistemas FGK+M



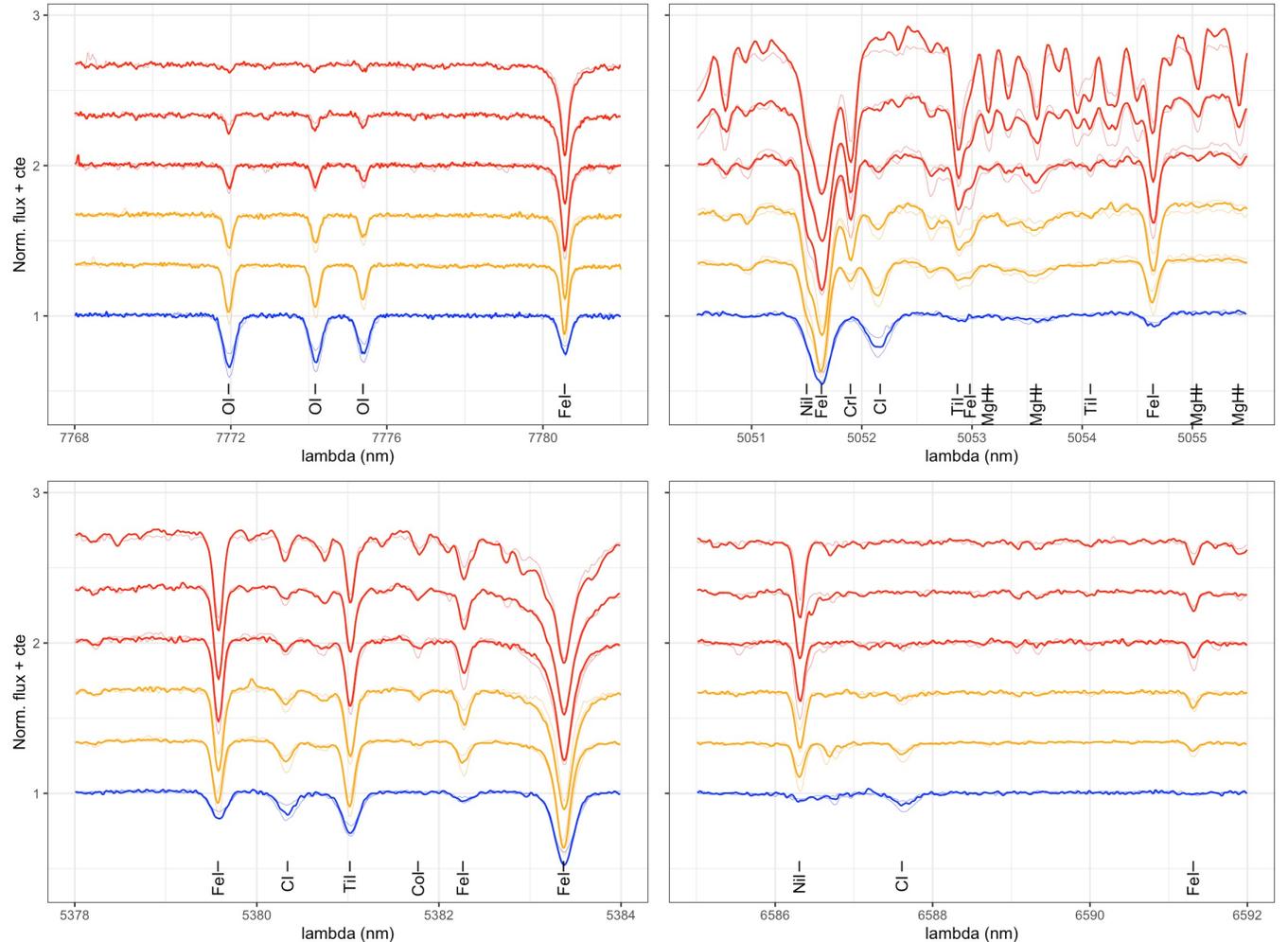
Después del H y He, los elementos más abundantes del Universo.

C: procesos de formación de polvo en el medio interestelar, contribuye a la opacidad estelar y es esencial para la vida

O: trazar el enriquecimiento químico y la historia de formación estelar de poblaciones estelares en la Vía Láctea

C/O (y Mg/Si): estructura y composición de los exoplanetas.

→ NETL : aplicar corrección (Sitnova et al. 2013)



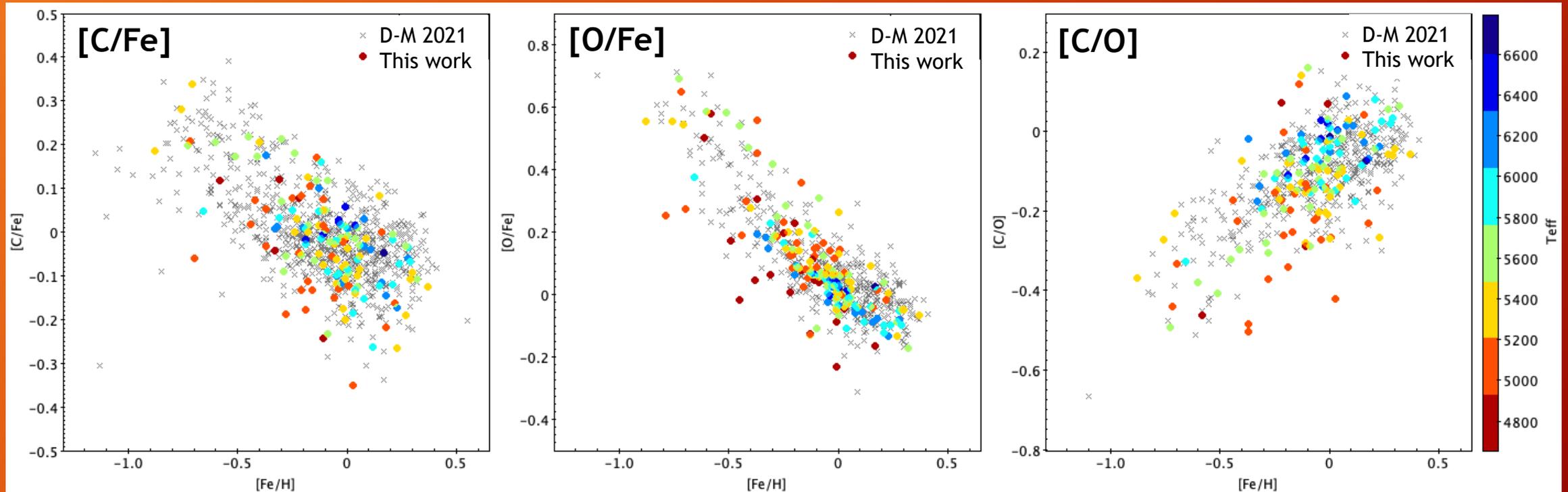
K  
G  
F

# Abundancias químicas en sistemas FGK+M

C  
carbono

O  
oxígeno

Abundancias de C y O que reproducen las tendencias galácticas observadas en trabajos previos (Delgado-Mena et al. 2021)



# Abundancias químicas en sistemas FGK+M



Líneas afectadas por estructura hiperfina (HFS):  
Interacción entre el momento angular del electrón y el momento magnético nuclear, lo que resulta en el desdoblamiento de los niveles de energía del átomo, provocando un ensanchamiento de las líneas (Condon & Shortley 1963; Sobelman 2006)

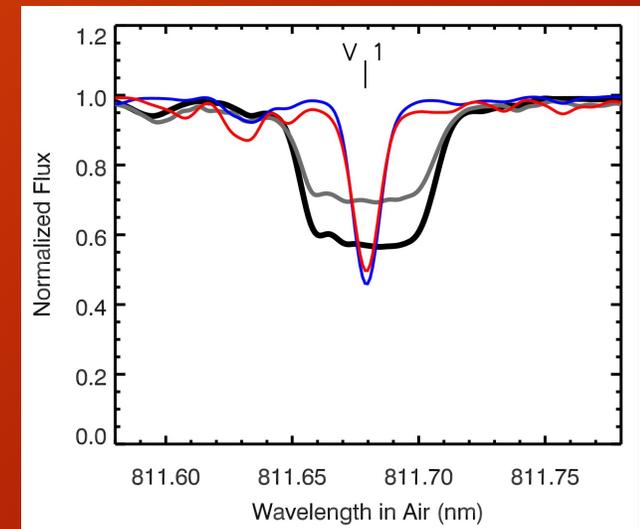
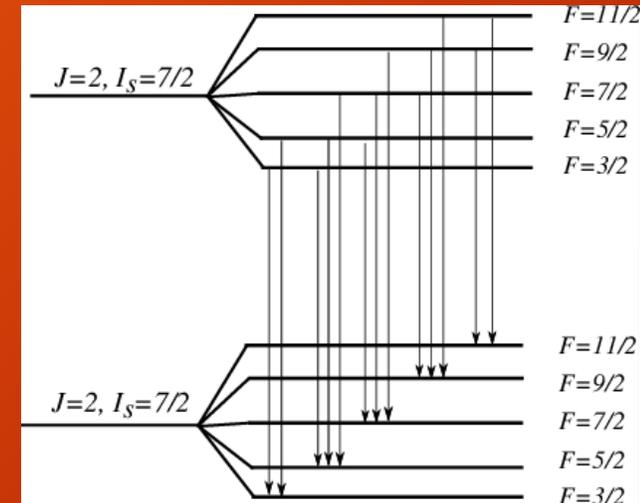
Las desviaciones en estrellas de tipo solar se suelen encontrar dentro de las incertidumbres típicas, pero el efecto es mayor en las estrellas de tipo M.

→ Actualizar las abundancias de Montes et al. (2018):

Medir EW (31 líneas) ✓

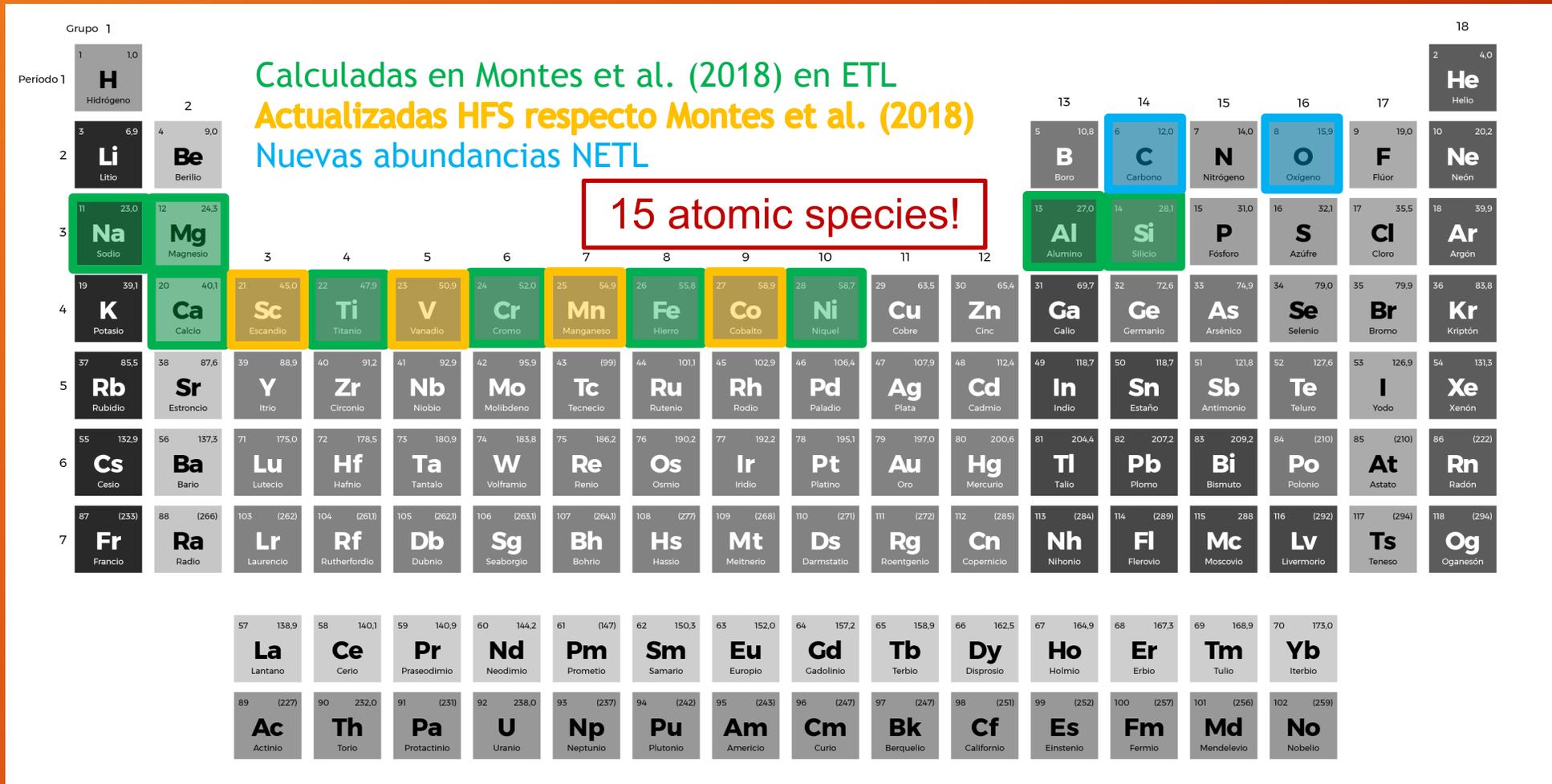
Recopilar datos atómicos ✓

Calcular abundancias ✓



Shan et al. (2021)

# Abundancias químicas en sistemas FGK+M



# Abundancias químicas en sistemas FGK+M

Alonso-Floriano et al. (2015)

Index	$\Delta\lambda_{\text{num}}$ [Å]	$\Delta\lambda_{\text{den}}$ [Å]	Reference
CaOH	6230:6240	6345:6354	Reid et al. (1995)
CaH 1	6380:6390	$\Sigma$ 6345:6355, 6410:6420	Reid et al. (1995)
I2 (CaH)	6510:6540	6370:6400	Martín & Kun (1996)
I3 (TiO)	6510:6540	6660:6690	Martín & Kun (1996)
H $\alpha$	6560:6566	6545:6555	Reid et al. (1995)
TiO 1	6718:6723	6703:6708	Reid et al. (1995)
CaH 2	6814:6846	7042:7046	Reid et al. (1995)
CaH 3	6960:6990	7042:7046	Reid et al. (1995)
TiO-7053	7000:7040	7060:7100	Martín et al. (1999)
Ratio A (CaH)	7020:7050	6960:6990	Kirkpatrick et al. (1991)
TiO-7140	7015:7045	7125:7155	Wilking et al. (2005)
PC1	7030:7050	6525:6550	Martín et al. (1996)
CaH Narr	7044:7049	6972.5:6977.5	Shkolnik et al. (2009)
TiO 2	7058:7061	7043:7046	Reid et al. (1995)
TiO 3	7092:7097	7079:7084	Reid et al. (1995)
TiO 5	7126:7135	7042:7046	Reid et al. (1995)
TiO 4	7130:7135	7115:7120	Reid et al. (1995)
VO-a	$\Sigma$ 7350:7370, 7550:7570	7430:7470	Kirkpatrick et al. (1999)
VO	$\Sigma \alpha$ 7350:7400, $\beta$ 7510:7560 <sup>a</sup>	7420:7470	Kirkpatrick et al. (1995)
Ratio B (Ti I)	7375:7385	7353:7363	Kirkpatrick et al. (1991)
VO-7434	7430:7470	7550:7570	Hawley et al. (2002)
PC2	7540:7580	7030:7050	Martín et al. (1996)
VO 1	7540:7580	7420:7460	Martín et al. (1999)
TiO 6	7550:7570	7745:7765	Lépine et al. (2003)
VO-b	$\Sigma$ 7860:7880, 8080:8100	7960:8000	Kirkpatrick et al. (1999)
VO 2	7920:7960	8130:8150	Lépine et al. (2003)
VO-7912	7990:8030	7900:7940	Martín et al. (1999)
Ratio C (Na I)	8100:8130	8174:8204	Kirkpatrick et al. (1991)
Color-M	8105:8155	6510:6560	Lépine et al. (2003)
Na-8190	8140:8165	8173:8210	Hawley et al. (2002)
PC3	8235:8265	7540:7580	Martín et al. (1996)

## ÍNDICES ESPECTRALES

Calcular el ratio de flujo en determinados rangos de longitud de onda con espectros de baja resolución:

$$I = \frac{F_{\text{num}}}{F_{\text{den}}}$$

→ Tipo espectral (Alonso-Floriano et al. 2015)

→ Para determinar abundancias:

$$[X/H] = \sum_{i=0}^n a_i I_i$$



# CARMENES

Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Echelle Spectrographs



## The CARMENES search for exoplanets around M dwarfs

### Stellar atmospheric parameters of target stars with STEPARSYN

E. Marfil<sup>1,2</sup>, H. M. Tabernero<sup>3,4</sup>, D. Montes<sup>1</sup>, J. A. Caballero<sup>2</sup>, F. J. Lázaro<sup>1</sup>, J. I. González Hernández<sup>5,6</sup>, E. Nagel<sup>7,8</sup>, V. M. Passegger<sup>7,9</sup>, A. Schweitzer<sup>7</sup>, I. Ribas<sup>10,11</sup>, A. Reiners<sup>12</sup>, A. Quirrenbach<sup>13</sup>, P. J. Amado<sup>14</sup>, C. Cifuentes<sup>2</sup>, M. Cortés-Contreras<sup>2</sup>, S. Dreizler<sup>12</sup>, C. Duque-Arribas<sup>1</sup>, D. Galadí-Enríquez<sup>15</sup>, Th. Henning<sup>16</sup>, S. V. Jeffers<sup>17,12</sup>, A. Kaminski<sup>13</sup>, M. Kürster<sup>16</sup>, M. Lafarga<sup>10,11,18</sup>, Á. López-Gallifa<sup>1</sup>, J. C. Morales<sup>10,11</sup>, Y. Shan<sup>12</sup>, and M. Zechmeister<sup>12</sup>

## Metallicities in M dwarfs:

### Investigating different determination techniques

V. M. Passegger<sup>11,2</sup>, A. Bello-García<sup>3</sup>, J. Ordieres-Meré<sup>4</sup>, A. Antoniadis-Karnavas<sup>5,6</sup>, E. Marfil<sup>7,8</sup>, C. Duque-Arribas<sup>7</sup>, P. J. Amado<sup>9</sup>, E. Delgado-Mena<sup>5</sup>, D. Montes<sup>7</sup>, B. Rojas-Ayala<sup>10</sup>, A. Schweitzer<sup>1</sup>, H. M. Tabernero<sup>11</sup>, V. J. S. Béjar<sup>12,13</sup>, J. A. Caballero<sup>8</sup>, A. P. Hatzes<sup>14</sup>, Th. Henning<sup>15</sup>, S. Pedraz<sup>16</sup>, A. Quirrenbach<sup>17</sup>, A. Reiners<sup>18</sup>, and I. Ribas<sup>19,20</sup>



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



Unión Europea

Fondo Europeo de Desarrollo Regional  
"Una manera de hacer Europa"



Calar Alto

