

La metalicidad de las enanas M: Calibraciones fotométricas con MCMC

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Ciencias Físicas
Universidad Complutense de Madrid



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE
MADRID



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

Christian Duque Arribas
Supervisor: David Montes Gutiérrez

Curso 2019/2020

Resumen

Las enanas M son objetos de especial interés en múltiples ramas de la Astrofísica, por lo que la determinación de sus parámetros estelares resulta de crucial importancia. El objetivo es por tanto caracterizar este tipo de estrellas, y en particular su metalicidad. Para ello, hacemos uso de fotometría multibanda para construir calibraciones fotométricas de la metalicidad para el caso de enanas M tempranas e intermedias (hasta M5) empleando técnicas de la estadística bayesiana y MCMC. El segundo lanzamiento de datos de la misión *Gaia* (*Gaia* DR2) proporciona astrometría de alta precisión y fotometría en tres bandas; este catálogo, combinado con misiones fotométricas en el infrarrojo (*2MASS* y *AllWISE*) y muestras de estrellas con parámetros adicionales determinados mediante espectroscopía de alta resolución, nos permite estudiar el efecto de la composición química (metalicidad) en los diagramas color-color y color-magnitud. Mediante criterios de información, comparamos nuestras diferentes calibraciones entre sí y con las presentes en la literatura, obteniendo una calibración con una gran capacidad predictiva para las estrellas de estudio.

Palabras clave: bases de datos astronómicas – estrellas: baja masa – estrellas: últimos tipos – estrellas: parámetros fundamentales – estrellas: abundancias

Abstract

M dwarfs are objects of special interest in multiple branches of Astrophysics, so determining their stellar parameters is of the utmost importance. The aim of the present work is therefore to characterize this type of stars, and in particular their metallicity. To do this, we use multi-band photometry to create photometric calibrations of metallicity for early and intermediate M dwarfs (up to M5) using Bayesian statistics and MCMC techniques. The second intermediate *Gaia* data release (*Gaia* DR2) provides high-precision astrometry and three-band photometry; this catalogue, combined with infrared photometric surveys (*2MASS* & *AllWISE*) and star samples with additional parameters determined by high-resolution spectroscopy, allows us to study the effect of the chemical composition (metallity) on color-color and color-magnitude diagrams. Using information criteria, we compare our different calibrations with each other and with those found in the literature, obtaining a calibration with a great predictive performance for the stars of interest.

Key words: astronomical data bases – stars: low-mass – stars: late-type – stars: fundamental parameters – stars: abundances

Índice

1. Introducción.	5
1.1. Las enanas M: características y aplicaciones.	5
1.2. Metalicidad.	7
2. Objetivos.	8
3. Metodología.	9
3.1. Sistemas fotométricos.	9
3.2. Manejo de los datos y criterios de limpieza.	10
3.3. Muestras de estrellas, calibración y comparación de modelos.	11
4. Resultados.	13
4.1. Diagramas color-color.	13
4.2. Diagramas color-magnitud.	16
4.3. Diagramas color-color-magnitud.	21
4.4. Comparación con una muestra externa de la literatura.	22
5. Conclusiones.	25
A. Apéndice: Abundancia de elementos químicos y metalicidad.	29
B. Apéndice: Código.	31
C. Apéndice: Tablas largas.	31
D. Apéndice: Figuras.	34
E. Apéndice: Infografía.	40

1. Introducción.

1.1. Las enanas M: características y aplicaciones.

Las enanas de tipo M, también conocidas como enanas rojas, son las estrellas en la secuencia principal más frías y pequeñas que existen, con temperaturas efectivas de $3800 \text{ K} > T_{ef} > 2300 \text{ K}$, radios en el rango $0,6R_{\odot} > R > 0,08R_{\odot}$ y masas entre $0,6M_{\odot} > M > 0,08M_{\odot}$ (Delfosse et al. 2000), siendo esta última la masa mínima necesaria para la fusión de hidrógeno, es decir, el límite entre las estrellas y los objetos subestelares o enanas marrones (para metalicidad solar). Estas estrellas son tan débiles que, a pesar de dominar en número la vecindad solar, ninguna de las estrellas visibles a simple vista en el cielo nocturno se trata de una enana M (Crowell, 2002), ni siquiera Próxima Centauri (enana M5), la estrella más cercana al Sol. Las enanas M también se caracterizan por tener cromosferas y coronas muy activas (Vilhu & Walter, 1987). En la tabla 1 se recogen los parámetros fundamentales de las enanas M.

T. esp.	T_{ef} [K]	Radio [R/R _⊙]	Masa [M/M _⊙]	Luminosidad [10 ⁻² L/L _⊙]	log g [g cm ⁻² s ⁻¹]
M0	3800	0.62	0.60	7.2	4.65
M1	3600	0.49	0.49	3.5	4.75
M2	3400	0.44	0.44	2.3	4.80
M3	3250	0.39	0.36	1.5	4.80
M4	3100	0.36	0.20	0.55	4.90
M5	2800	0.20	0.14	0.22	5.00
M6	2600	0.15	0.10	0.09	5.10
M7	2500	0.12	~0.09	0.05	5.20
M8	2400	0.11	~0.08	0.03	5.20
M9	2300	0.08	~0.075	0.015	5.40

Tabla 1: Parámetros fundamentales de las enanas M, extraídos de Reid & Hawley (2005).

Las enanas M constituyen un campo de estudio de gran interés con aplicaciones en múltiples ramas de la Astrofísica:

- **Astrofísica galáctica**

Las enanas M resultan excelentes para el estudio de la evolución química y dinámica de la Galaxia. En primer lugar, las enanas M tienen tiempos de vida que exceden la edad del Universo; a diferencia de las estrellas masivas, y aunque éstas posean una mayor cantidad de hidrógeno, los procesos de fusión en los interiores prácticamente convectivos de las enanas M son extremadamente lentos, provocando que estas estrellas permanezcan en la secuencia principal durante miles de millones de años (Adams & Laughlin, 1997). Ninguna de estas estrellas ha evolucionado hasta convertirse en las enanas blancas de He que se espera. Además, las enanas M son las estrellas más abundantes en la Vía Láctea, constituyendo en torno al 70 – 75 % de las mismas (Henry et al. 2006; Winters et al. 2015). Por tanto, la combinación de sus largos tiempos de vida en la secuencia principal y su gran abundancia convierte a las enanas M en las candidatas perfectas en los estudios de la Galaxia, resultando imprescindibles en las investigaciones a gran escala de la misma.

■ Astrofísica estelar

En las últimas décadas se ha experimentado un gran avance en el campo de los modelos teóricos estelares; sin embargo, todavía se encuentran discrepancias entre las características observacionales de las enanas M y los valores predichos por los modelos actuales. Las temperaturas efectivas estimadas por los modelos resultan ser hasta 200 – 300 K superiores a los valores observados, mientras que los radios predichos difieren de las medidas interferométricas hasta un 25 % (Sarmiento et al. 2020). Estas diferencias pueden deberse a efectos causados por el nivel de actividad (López-Morales & Ribas, 2005) o por diferencias en la metalicidad (Berger et al. 2006; López-Morales 2007). Por tanto, son necesarias medidas más precisas que nos permitan desarrollar nuevos y mejores modelos teóricos a fin de estudiar las atmósferas de las enanas M.

Además, la metalicidad juega un papel fundamental en la evolución estelar, afectando desde al tiempo de vida en la secuencia principal hasta a la masa necesaria para fusionar hidrógeno en los núcleos estelares, esto es, el límite entre las enanas M y los objetos subestelares o enanas marrones (Adams & Laughlin, 1997).

■ Astrofísica (exo)planetaria

La popularidad de las enanas M ha aumentado significativamente en los últimos años gracias a las exploraciones de exoplanetas. Recordemos que los dos métodos de detección de planetas más exitosos (velocidad radial y tránsitos) se ven favorecidos en las enanas M. En el primer caso, las menores masas de estas estrellas facilitan el desplazamiento (o *wobble*) de las mismas cuando presentan planetas orbitando alrededor, obteniendo una mayor amplitud en las curvas de velocidad radial. Por otra parte, al ser estrellas tan frías y pequeñas, la zona de habitabilidad se encuentra mucho más cerca, es decir, los periodos orbitales de los planetas serán mucho menores. Este hecho, sumado al tamaño relativo planeta-estrella, potenciará la detección de exoplanetas por el método de tránsitos. De esta manera, la detección de exoplanetas en la zona de habitabilidad es órdenes de magnitud más fácil en las enanas M que en estrellas de tipo solar. Existen diferentes programas centrados principalmente en la búsqueda de planetas en torno a enanas M, como MEarth (Irwin et al. 2015) o CARMENES (Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Echelle Spectrographs; Alonso-Floriano et al. 2015; Quirrenbach et al. 2018).

Por otra parte, se ha observado que la frecuencia de planetas gigantes gaseosos aumenta con la metalicidad estelar en el caso de estrellas FGK, lo que se conoce como la correlación planeta-metalicidad (Gonzalez, 1997; Fischer & Valenti, 2005). Estudiar si esta relación se extiende a las enanas M requiere de estimaciones de la metalicidad estelar para estos objetos. Los primeros estudios apuntaban a que la formación planetaria en torno a enanas M no depende del contenido metálico de la estrella (Bonfils et al. 2005; Bean et al. 2006). No obstante, resultados más recientes (Johnson & Apps, 2009; Rojas-Ayala et al. 2010; Terrien et al. 2012) muestran que las estrellas M sí que siguen la misma tendencia que la encontrada en las estrellas FGK: a mayor metalicidad, mayor probabilidad de poseer planetas orbitando a su alrededor. De esta manera, estudiar las correlaciones entre las propiedades estelares (como la metalicidad) y la presencia de exoplanetas puede resultar útil en la selección de objetivos para futuras búsquedas de exoplanetas y en el entendimiento de los procesos de formación planetaria.

En definitiva, el estudio de las enanas M y en particular de su metalicidad resulta de especial interés en la determinación de la evolución química de la Galaxia, el desarrollo de modelos teóricos y la caracterización de sistemas planetarios, como hemos visto.

1.2. Metalicidad.

Por metalicidad estelar se entiende la abundancia relativa de elementos más pesados que el helio, independientemente de su posición en la tabla periódica. La composición química de las estrellas puede determinarse a partir de sus espectros, ya que cada elemento químico posee unas líneas espectrales características. Como medida de la metalicidad emplearemos el índice de metalicidad, que se define como la proporción (en logaritmo) entre el número de átomos por unidad de volumen de cualquier elemento en una estrella frente a la de hidrógeno respecto a la misma proporción en el Sol, es decir,

$$[Z/H] = \log \left(\frac{A(Z)}{A(H)} \right)_* - \log \left(\frac{A(Z)}{A(H)} \right)_\odot \quad (1)$$

siendo $A(Z)$ y $A(H)$ las abundancias del elemento Z y del hidrógeno, respectivamente. El índice de metalicidad del Sol será entonces $[Z/H]_\odot = 0$. Los objetos más pobres en metales que el Sol tendrán un índice de metalicidad negativo, mientras que los más ricos tendrán un índice positivo. Como la escala es logarítmica, una metalicidad de “-1” equivaldrá a una abundancia diez veces menor a la solar, y un índice “+1” a una abundancia diez veces mayor. Generalmente se suele emplear la metalicidad según el hierro, $[Fe/H]$. Aunque no es el metal más abundante, sí que es uno de los más fáciles de medir en el espectro dada la enorme cantidad de líneas que presenta y además muestra una gran correlación con la metalicidad total, $[M/H]$, esto es, teniendo en cuenta todos los metales. Para más información, véase el Apéndice A.

Determinar la metalicidad es de suma importancia, como hemos visto anteriormente. No obstante, la metalicidad de las enanas M resulta un parámetro esquivo, difícil de determinar. Los espectros de las enanas M son mucho más complejos que aquellos de estrellas de tipo solar o estrellas calientes debido a las bajas temperaturas atmosféricas; las líneas/bandas moleculares (TiO, VO, FeH en el óptico; H₂O, CO en el NIR) dominan el espectro, dificultando la determinación de los parámetros atmosféricos. En la figura 1 podemos observar la comparación de espectros de diferentes tipos de estrellas.

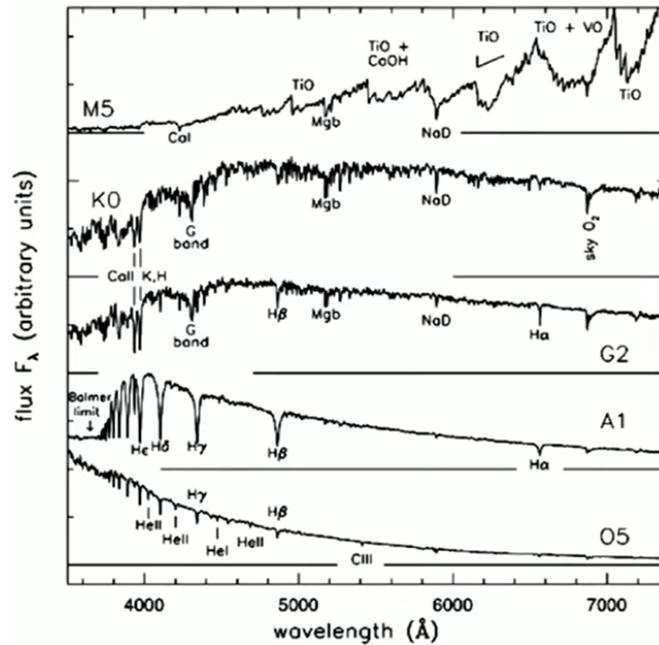


Figura 1: Comparación de espectros ópticos según el tipo espectral (Sparke & Gallagher, 2007).

Por consiguiente, los métodos para determinar la metalicidad de enanas M requieren de datos observacionalmente caros, como espectros de alta resolución, y un complicado análisis posterior. Por esta razón se han utilizado otra serie de técnicas que permiten estimar más fácilmente la metalicidad de estos objetos; por ejemplo, utilizando características espectrales en la banda K (absorción del doblete del NaI y triplete del CaI) en espectros de resolución intermedia (Rojas-Ayala et al. 2010; Rojas-Ayala et al. 2012), empleando sistemas binarios en los que se extrapola la metalicidad de la estrella primaria FGK para la secundaria de tipo M (Montes et al. 2018), o mediante calibraciones fotométricas de diferentes tipos (Bonfils et al. 2005; Schlafman & Laughlin, 2010; Neves et al. 2012; Davenport et al. 2019, entre otros). Sin embargo, debe tenerse presente que diferentes métodos y modelos sintéticos pueden llevar a diferentes resultados, encontrando así en la literatura valores diversos para una misma estrella en ciertas ocasiones.

El presente trabajo se estructura como sigue. En la sección 2 se presentan los problemas encontrados en la literatura referentes a las calibraciones fotométricas de la metalicidad de enanas M y los objetivos del trabajo. En la sección 3 se expone la metodología a seguir, indicando los sistemas fotométricos empleados, el manejo de datos y los criterios de limpieza de los mismos, las muestras de estrellas y las herramientas estadísticas utilizadas. En la sección 4 se representan las calibraciones fotométricas basadas en diagramas color-color, color-magnitud y color-color-magnitud obtenidas con MCMC y su comparación empleando el criterio de información LOO-CV. Finalmente, se recogen las conclusiones en la sección 5.

2. Objetivos.

En el presente trabajo nos centraremos en las diferentes calibraciones fotométricas de la metalicidad para enanas M. En la literatura referente a este campo se han detectado en mayor o menor medida una serie de problemas, que enumeramos a continuación:

1. Para las calibraciones se emplean muestras pequeñas, del orden de 50 estrellas.
2. Para comprobar la bondad del ajuste se utiliza la misma muestra de calibración, en lugar de una muestra externa.
3. Se suele emplear alguna calibración en particular, la cuál según los autores mejor reproduce los valores de metalicidad, sin indicar claramente el criterio para esta elección o basándose en criterios de la estadística convencional.

Los trabajos tienden a presentar al menos uno de estos problemas, provocando en ocasiones que sus calibraciones no resulten del todo globales, esto es, aplicables a cualquier otra muestra de estrellas. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo será realizar diferentes calibraciones fotométricas de la metalicidad basándose en diagramas color-color y color-magnitud empleando herramientas de la estadística bayesiana y cadenas de Markov Monte Carlo (en adelante, MCMC por sus siglas en inglés). Para ello, emplearemos una muestra grande de estrellas, subdividiendo esta muestra en una muestra de calibración o entrenamiento y otra muestra de test para comprobar la bondad, y finalmente emplearemos criterios de información para comparar las diferentes calibraciones.

3. Metodología.

3.1. Sistemas fotométricos.

Para la realización de las calibraciones fotométricas de la metalicidad necesitaremos conocer las magnitudes de estrellas M en diferentes bandas fotométricas, esto es, el brillo o cantidad de energía observada en un determinado rango del espectro electromagnético.

El segundo lanzamiento de datos de la misión *Gaia* de la Agencia Espacial Europea (ESA), conocido como *Gaia* DR2, proporciona la posición y magnitud aparente en la banda *G* (330 – 1050 nm) para 1,7 mil millones de fuentes. Para 1,3 mil millones de estas fuentes se encuentran además disponibles datos de la paralaje y movimientos propios. Asimismo, se ofrece fotometría en las bandas *G_{BP}* (330 – 680 nm) y *G_{RP}* (630 – 1050 nm) para 1,4 mil millones de fuentes ([Gaia Collaboration et al. 2018a](#)). Estos son principalmente los datos que emplearemos durante el presente trabajo, aunque *Gaia* DR2 ofrece mucha más información, como una muestra de estrellas variables, velocidades radiales medias, estimaciones de la temperatura efectiva, extinción, enrojecimiento, radio y luminosidad para algunas fuentes.

La fotometría de *Gaia* se centra aproximadamente en el rango visible del espectro, por lo que puede resultar de interés tener información en otras longitudes de onda. Para ello, vamos a emplear otras misiones en el infrarrojo: *2MASS* y *WISE*.

La misión *2MASS* (Two Micron All Sky Survey; [Skrutskie et al. 2006](#)) realizó observaciones entre 1997 y 2001, cubriendo un 99.998 % de la esfera celeste, y midiendo magnitudes en el infrarrojo cercano en las bandas *J* (1,25 μm), *H* (1,65 μm) y *K_s* (2,16 μm).

Los datos en el IR han resultado ser de gran utilidad, por lo que en 2009 se lanzó la misión *WISE* (Wide-field Infrared Survey Explorer; [Wright et al. 2010](#)) con el fin de escanear el cielo, esta vez en el infrarrojo medio mediante las bandas *W1*, *W2*, *W3* y *W4*, centradas en 3,4, 4,6, 12 y 22 μm , respectivamente. En particular, emplearemos los datos de *AllWISE*, cuya referencia puede encontrarse en [Cutri et al. \(2013\)](#). Un resumen de las bandas fotométricas empleadas se puede encontrar en la tabla 2.

Banda	λ_{eff} (Å)	W_{eff} (Å)	F_{λ}^0 (W m ⁻² Å ⁻¹)	Survey
<i>G_{BP}</i>	5050,0	2347,4	$4,035 \cdot 10^{-12}$	<i>Gaia</i> DR2
<i>G</i>	6230,0	4183,0	$2,495 \cdot 10^{-12}$	<i>Gaia</i> DR2
<i>G_{RP}</i>	7730,0	2756,8	$1,294 \cdot 10^{-12}$	<i>Gaia</i> DR2
<i>J</i>	12350	14068	$3,15 \cdot 10^{-13}$	2MASS
<i>H</i>	16620	18231	$1,14 \cdot 10^{-13}$	2MASS
<i>K_s</i>	21590	23552	$4,31 \cdot 10^{-14}$	2MASS
<i>W1</i>	33526	6626,4	$8,24 \cdot 10^{-15}$	AllWISE
<i>W2</i>	46028	10422,7	$2,43 \cdot 10^{-15}$	AllWISE
<i>W3</i>	115608	55055,7	$6,57 \cdot 10^{-17}$	AllWISE
<i>W4</i>	220883	41016,8	$5,00 \cdot 10^{-18}$	AllWISE

Tabla 2: Bandas fotométricas empleadas, indicando el nombre, longitud de onda efectiva, anchura efectiva, flujo del punto cero y exploración. Tabla adaptada de [Cifuentes et al. \(2020\)](#).

3.2. Manejo de los datos y criterios de limpieza.

Como hemos visto, diferentes exploraciones fotométricas nos ofrecen una considerable cantidad de datos con los que trabajar. El principal problema es el hecho de que estas exploraciones no ofrecen metalicidades. Por lo tanto, el método a seguir será encontrar muestras de estrellas cuya metalicidad ya haya sido determinada por otros métodos, como por ejemplo mediante espectroscopía de alta resolución desde Tierra, y cruzar estos datos con los catálogos de *Gaia*, *2MASS* y *AllWISE*.

Para ello, emplearemos TOPCAT, software de código libre escrito en Java y mantenido por Mark Taylor, astrofísico de la Universidad de Bristol (Taylor, 2005). Este programa ofrece las facilidades que los astrónomos y astrofísicos necesitan para el manejo y análisis de catálogos y grandes bases de datos. De entre sus funcionalidades destacamos el servicio CDS X-Match para el cruzado entre diferentes tablas y con catálogos online.

Una vez tengamos la muestra de estrellas completa, debemos tener en cuenta que no todos los datos tienen la misma calidad; por ejemplo, a pesar de la gran calidad y precisión de los datos de *Gaia* DR2, todavía es un lanzamiento de datos intermedio sin una completa implementación del procesamiento para un uso óptimo de los mismos. Por lo tanto, en lo referente a los datos de *Gaia* DR2, aplicaremos un filtrado o limpieza de datos indicado en Gaia Collaboration et al. (2018b). Para los diagramas color-magnitud haremos uso de la magnitud absoluta, dada por

$$M_G = G + 5 \log_{10}(\pi/100) \quad (2)$$

siendo G la magnitud aparente medida por Gaia y π la paralaje en miliarsegundos (mas). Esto es solo válido cuando el error relativo en la paralaje es menor del 20%. En nuestro caso, al igual que en el artículo anteriormente mencionado, aplicaremos un criterio de precisión del 10%, el cual corresponde a una incertidumbre en la magnitud absoluta M_G menor de 0,22 mag:

```
parallax_over_error>10
```

Del mismo modo, también aplicamos filtros en el error relativo del flujo observado en las bandas de *Gaia*, de manera que las incertidumbres en las magnitudes resultan $\sigma_G < 0,022$ mag y $\sigma_{XP} < 0,054$ mag:

```
photo_g_mean_flux_over_error>50  
photo_bp_mean_flux_over_error>20  
photo_rp_mean_flux_over_error>20
```

A continuación, seleccionamos las fuentes para las que la fotometría en las bandas $W1$ y $W2$ presentan la etiqueta de calidad A (la mayor de la escala). Las bandas $W3$ y $W4$ presentan en general peor calidad, por lo que se evitará su uso. Además, *AllWISE* presenta también una etiqueta de variabilidad, indicando en una escala de 0 a 9 la variación temporal del flujo en las diferentes bandas. Seleccionamos aquellas fuentes con valores entre 0 y 5, eliminando así estrellas variables.

3.3. Muestras de estrellas, calibración y comparación de modelos.

En [Birky et al. \(2020\)](#) se presenta una muestra de 5875 enanas de tipo M tempranas e intermedias (M0V–M6V) extraídas de APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment; [Majewski et al. 2017](#), [Abolfathi et al. 2018](#)). APOGEE es una exploración espectroscópica estelar de la Vía Láctea, perteneciente al SDSS (Sloan Digital Sky Survey; [Blanton et al. 2017](#)), que mapea los patrones dinámicos y químicos de las estrellas de la Galaxia. Para estas estrellas se han inferido parámetros estelares (T_{eff} , $\log g$, $[Fe/H]$) empleando *The Cannon*, un modelo totalmente empírico que no emplea listas de líneas ni modelos de transferencia radiativa ([Ness et al. 2015](#)). Tras aplicar los criterios de limpieza descritos en la sección 3.2, resulta una muestra de 5570 estrellas M, que será la que utilicemos para las calibraciones fotométricas.

Las calibraciones se llevarán a cabo con ajustes de MCMC empleando *Stan* ([Carpenter et al. 2017](#)) a través de su distribución en *R*, *RStan*. *Stan* es un lenguaje de programación especialmente diseñado para modelos estadísticos bayesianos complejos que incorpora, entre otros componentes, el algoritmo HMC (+NUTS). En el apéndice B se puede encontrar más información sobre el código de *Stan* y su uso en *R*.

La muestra de 5570 estrellas se divide de manera aleatoria en dos: 5000 estrellas servirán como muestra de entrenamiento o calibración, y las 570 restantes servirán como muestra de test o de validación cruzada para comprobar la bondad de los ajustes. En la figura 2 se pueden observar histogramas de la metalicidad y el subtipo espectral para estas muestras.

Estas dos muestras servirán como datos de entrada o *inputs* para el modelo de *Stan*. Según sea el caso, se indicará dos variables a ajustar, X e Y (por ejemplo, color-color o color-magnitud), y se empleará la muestra de entrenamiento para inferir los coeficientes que mejor reproducen la metalicidad según la relación

$$[Fe/H] = a + bX + cY + dX^2 + eY^2 + fXY \quad (3)$$

Además, *Stan* también estima un valor del error intrínseco del modelo, σ . A continuación, una vez conocidos estos valores, emplearemos la muestra de test para aplicar el criterio de información LOO-CV (Leave One Out - Cross Validation; [Vehtari et al. 2015](#)), que nos permitirá posterior-

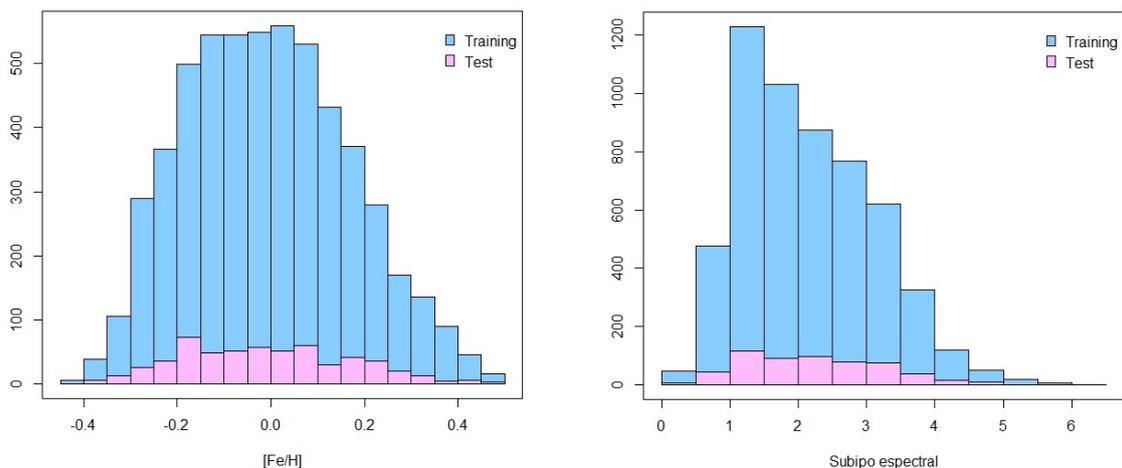


Figura 2: Histogramas de la muestra de 5570 estrellas de [Birky et al. \(2020\)](#) según la metalicidad (izquierda) y subtipo espectral (derecha), indicando en azul las 5000 estrellas de la muestra de entrenamiento y en rosa las 570 restantes de la muestra test.

mente comparar diferentes modelos y elegir el que mejor reproduzca los valores de metalicidad. Este criterio calcula la *expected log pointwise predictive density* (elppd) ajustando el modelo con todos los datos menos uno, comprobando con éste la calidad del ajuste e iterando sobre todos los datos:

$$\text{elppd}_{\text{LOO-CV}} = \sum_{i=1}^N \log(P(x_i|\mathbf{x}_{-i})) \quad (4)$$

El modelo con la mayor elppd será el que tiene el mejor rendimiento predictivo. Con el paquete de R *loo*, que calcula la elppd mediante el método *Pareto Smoothed Importance Sampling* (PSIS), podremos comparar estos valores para diferentes modelos, haciendo la diferencia con el modelo de mayor valor y obteniendo así un criterio cuantitativo para seleccionar el mejor modelo. En la sección 4 compararemos diferentes modelos, empleando por ejemplo diferentes combinaciones de colores y magnitudes, para encontrar la mejor calibración de la metalicidad.

Finalmente, comprobaremos nuevamente la capacidad predictiva de nuestras calibraciones con una muestra completamente externa. Para ello, emplearemos la muestra de estrellas presentada en [Montes et al. \(2018\)](#). En este artículo se estudian 192 sistemas binarios formados por una primaria FGK y secundarias de tipo M, realizando observaciones con HERMES/Mercator y obteniendo espectros de alta resolución para las 192 primarias y 5 secundarias. A partir de estos espectros se derivaron parámetros atmosféricos, tales como la temperatura efectiva, la gravedad superficial o las abundancias químicas usando el código STEPAR ([Taberner et al. 2012](#)), basado en el método de la anchura equivalente (*EW*). La metalicidad de la primaria FGK se extrapola a la secundaria M, apoyándose en la siguiente hipótesis: 1. Las estrellas del sistema se han formado en el mismo instante y a partir de la misma nube molecular ([Desidera et al. 2006](#)), esto es, que las estrellas se han formado a partir de los mismos elementos químicos y, por tanto, el valor de la metalicidad será el mismo para cada una de las estrellas del sistema. 2. Además, se asume que no existieron dragados de elementos químicos ni transferencia de materia capaz de alterar dicha composición ([Rojas-Ayala et al. 2010](#)).

Tras cruzar esta muestra con el catálogo de *AllWISE*, empleando un radio de búsqueda de 15 arcsec y eliminando posteriormente las falsas identificaciones, aplicar los criterios de limpieza de la sección 3.2 y restringirnos a estrellas similares a la muestra de [Birky et al. \(2020\)](#), esto es, enanas M tempranas hasta M5, con $1,85 \leq G - J \leq 3,10$ y $-0,10 \leq W1 - W2 \leq 0,24$, tenemos una muestra de 58 estrellas. Comprobaremos nuestras estimaciones de la metalicidad para estas estrellas con las estimaciones por otros métodos fotométricos ([Davenport et al. 2019](#)) y con la literatura.

4. Resultados.

4.1. Diagramas color-color.

Los diagramas color-color permiten comparar las magnitudes aparentes a diferentes longitudes de onda de las estrellas. En estos diagramas la composición química juega un papel principal, observándose un gradiente de metalicidad, siendo éste más marcado en las estrellas poco masivas. En la literatura se encuentran varias estimaciones fotométricas de la metalicidad haciendo uso de las bandas descritas en la sección 3.1, destacando [Davenport et al. \(2019\)](#), donde se presenta *ingot*, una herramienta que permite estimar la metalicidad de estrellas poco masivas a partir del diagrama $G - J$ vs. $W1 - W2$ de APOGEE mediante una regresión KNN (K-Nearest Neighbors). Como se indica en el propio artículo, el color $G - J$ abarca un amplio rango de longitudes de onda y resulta un buen indicador de la temperatura efectiva (y tipo espectral), mientras que el color $W1 - W2$ muestra gradiente de amplitud que se correlaciona directamente con $[\text{Fe}/\text{H}]$.

En la tabla 3 se muestran las calibraciones para diferentes combinaciones color-color según ajustes lineales y cuadráticos siguiendo la ecuación (3) para la muestra de calibración de 5000 estrellas de [Birky et al. \(2020\)](#), y en la figura 3 se representan algunos de estos diagramas color-color (los diagramas restantes se encuentran en la figura D1). Sobre los diagramas se han representado además varias líneas de isometalicidad teóricas ([Bressan et al. 2012](#)) obtenidas con PARSEC¹. Se

¹<http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>

X	Y	a	b	c	d	e	f	σ
$G - J$	$W1 - W2$	-1,58	0,73	-3,34	...	...	...	0,12
		-5,71	4,27	-12,31	-0,75	-5,13	3,77	0,11
$G - H$	$W1 - W2$	-2,01	0,71	-2,97	...	...	...	0,11
		-9,12	5,48	-14,40	-0,79	-4,32	3,78	0,10
$G - K$	$W1 - W2$	-1,96	0,65	-3,06	...	...	...	0,11
		-8,58	4,83	-14,78	-0,66	-4,43	3,63	0,10
$G_{RP} - J$	$W1 - W2$	-1,29	1,07	-3,14	...	...	...	0,12
		-4,35	5,67	-10,38	-1,71	-4,65	5,35	0,11
$G_{RP} - H$	$W1 - W2$	-1,90	1,02	-2,60	...	...	...	0,12
		-9,27	8,47	-13,18	-1,88	-3,42	5,29	0,11
$G_{RP} - K$	$W1 - W2$	-1,86	0,91	-2,77	...	...	...	0,12
		-8,54	7,09	-14,00	-1,42	-3,69	5,09	0,11
$G_{BP} - G_{RP}$	$W1 - W2$	-1,24	0,66	-3,46	...	...	...	0,12
		-3,98	3,24	-9,79	-0,60	-5,55	2,96	0,10
$G - J$	$J - K$	-1,49	0,01	1,74	...	...	...	0,16
		-4,55	0,15	8,48	-0,05	-4,16	0,14	0,16
$G - H$	$J - K$	-1,52	0,03	1,69	...	...	...	0,16
		-4,87	0,38	8,28	-0,10	-4,46	0,32	0,16
$G - K$	$J - K$	-1,49	0,01	1,73	...	...	...	0,16
		-4,56	0,16	8,35	-0,05	-4,37	0,25	0,16
$G_{BP} - G_{RP}$	$J - K$	-1,48	0,00	1,75	...	...	...	0,16
		-4,33	0,05	8,31	-0,06	-4,16	0,24	0,16

Tabla 3: Coeficientes de la relación $[\text{Fe}/\text{H}] = a + bX + cY + dX^2 + eY^2 + fXY$, siendo X e Y los índices de color indicados y σ el error intrínseco del modelo.

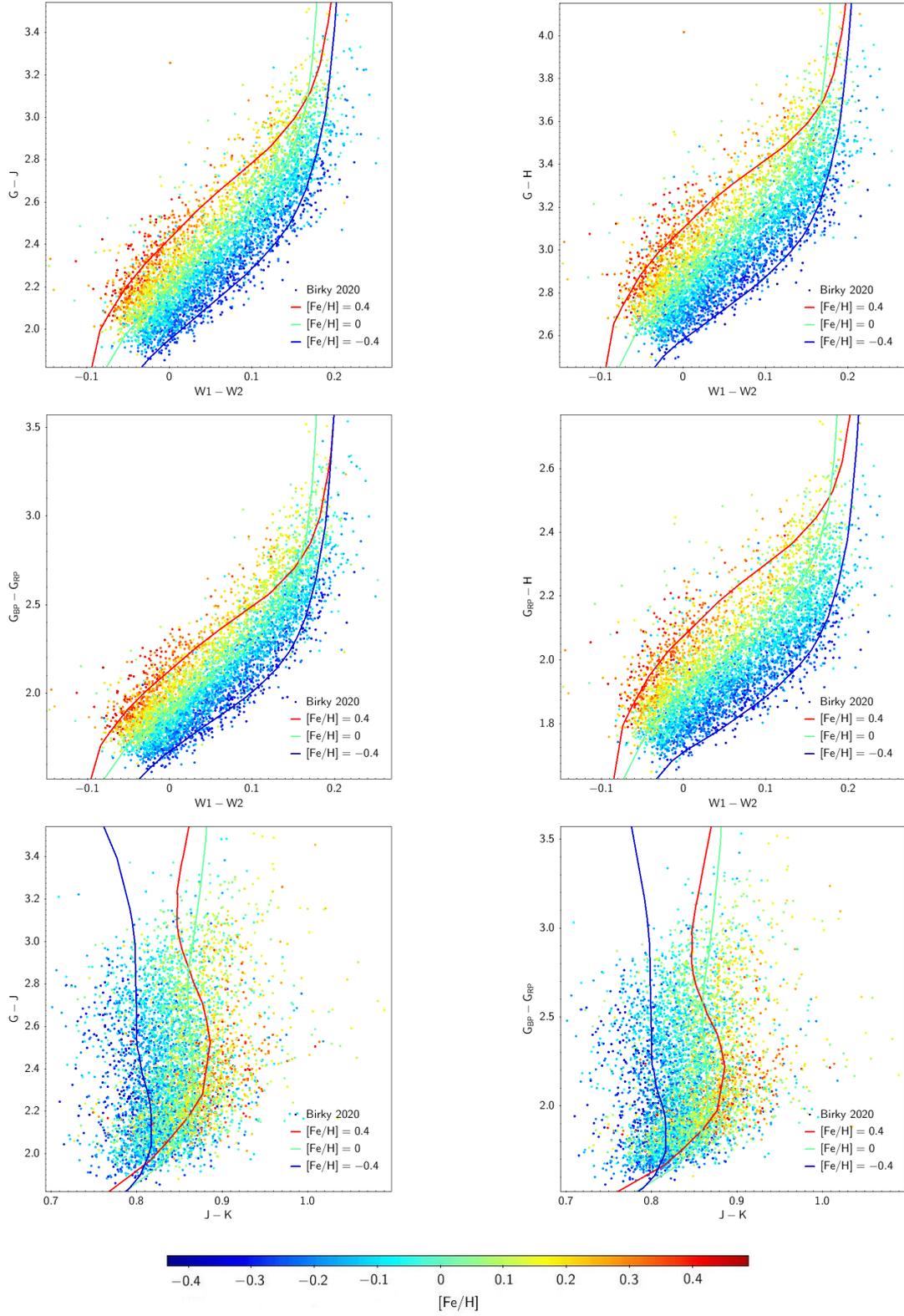


Figura 3: Diagramas color-color con las curvas teóricas de isometalicidad para diferentes valores de $[Fe/H]$.

ha fijado una edad de 9 Gyr; para edades mayores, las isocronas prácticamente coinciden debido a la lenta evolución de las enanas M en su secuencia principal. No se han tenido en cuenta ajustes de orden cúbico y superior ateniéndose al criterio de la *navaja de Occam*; en la tabla 4 se comparan los modelos lineal, cuadrático y cúbico para el diagrama $G - J$ vs. $W1 - W2$ mediante LOO-CV. Se observa que el modelo cúbico no es significativamente mejor que el cuadrático, por lo que la *navaja de Occam* nos lleva a escoger el modelo más sencillo, esto es, el cuadrático.

Diagrama color-color	grado	elppd dif	se diff
	3	0,0	0,0
$G - J$ vs. $W1 - W2$	2	-1,7	2,5
	1	-39,6	8,4

Tabla 4: Comparación de los modelos lineal, cuadrático y cúbico para el diagrama $G - J$ vs. $W1 - W2$ empleando el criterio de información LOO-CV.

Una vez determinadas las diferentes calibraciones, comparamos su capacidad predictiva con LOO-CV en la tabla 5. De esta tabla se extraen varias conclusiones: 1. En primer lugar, y como cabría esperar, los modelos cuadráticos resultan mejores que sus homólogos lineales. 2. Los mejores modelos resultan $G - H$ vs. $W1 - W2$ y $G - K$ vs. $W1 - W2$, indicando que los colores $G - H$ y $G - K$ presentan un mejor rendimiento en la estimación de $[\text{Fe}/\text{H}]$ que $G - J$. 3. Por último, nótese que los mejores modelos emplean el color $W1 - W2$, y cuando éste deja de utilizarse se produce un salto considerable en el valor de elppd; por tanto, como ya se había hecho notar anteriormente, $W1 - W2$ resulta imprescindible en el estudio de la metalicidad en los diagramas color-color.

Diagrama color-color	grado	elppd diff	se diff
$G - H$ vs. $W1 - W2$	2	0,0	0,0
$G - K$ vs. $W1 - W2$	2	-6,2	7,9
$G_{RP} - H$ vs. $W1 - W2$	2	-18,3	5,5
$G_{RP} - K$ vs. $W1 - W2$	2	-20,1	10,9
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. $W1 - W2$	2	-23,0	26,6
$G - J$ vs. $W1 - W2$	2	-27,8	10,4
$G - H$ vs. $W1 - W2$	1	-43,4	8,1
$G - K$ vs. $W1 - W2$	1	-46,7	9,7
$G_{RP} - J$ vs. $W1 - W2$	2	-53,4	11,7
$G_{RP} - H$ vs. $W1 - W2$	1	-58,1	8,8
$G_{RP} - K$ vs. $W1 - W2$	1	-60,1	11,7
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. $W1 - W2$	1	-65,8	17,6
$G - J$ vs. $W1 - W2$	1	-65,8	10,1
$G_{RP} - J$ vs. $W1 - W2$	1	-87,8	11,5
$G - H$ vs. $J - K$	2	-223,1	23,5
$G - K$ vs. $J - K$	2	-224,9	23,6
$G - J$ vs. $J - K$	2	-224,9	23,6
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. $J - K$	2	-225,4	23,6
$G - H$ vs. $J - K$	1	-225,9	23,5
$G - J$ vs. $J - K$	1	-227,0	23,5
$G - K$ vs. $J - K$	1	-227,0	23,5
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. $J - K$	1	-227,2	23,5

Tabla 5: Comparación de los diferentes modelos color-color empleando el criterio LOO-CV.

En la figura 4 representamos los valores de la metalicidad dados por [Birky et al. \(2020\)](#) en comparación a los valores estimados por diferentes calibraciones de la tabla 3 para la muestra de test de 570 estrellas. Se observa que la mayoría de las estrellas siguen la relación 1:1, encontrando un mayor error en las estrellas de mayor metalicidad, con $[\text{Fe}/\text{H}] > 0,2$. Todas nuestras calibraciones infravaloran sistemáticamente la metalicidad de estas estrellas, posiblemente debido al menor número de estrellas en este rango de metalicidad y a la mayor dispersión en los colores. Se representan 3 calibraciones en las que se ha hecho uso del color $W1 - W2$ y una última en la que no ($G - J$ vs. $J - K$), lo que nos permite visualizar gráficamente la necesidad de emplear el gradiente de metalicidad asociado a $W1 - W2$, como ya se había comentado anteriormente haciendo uso de la comparación por LOO-CV.

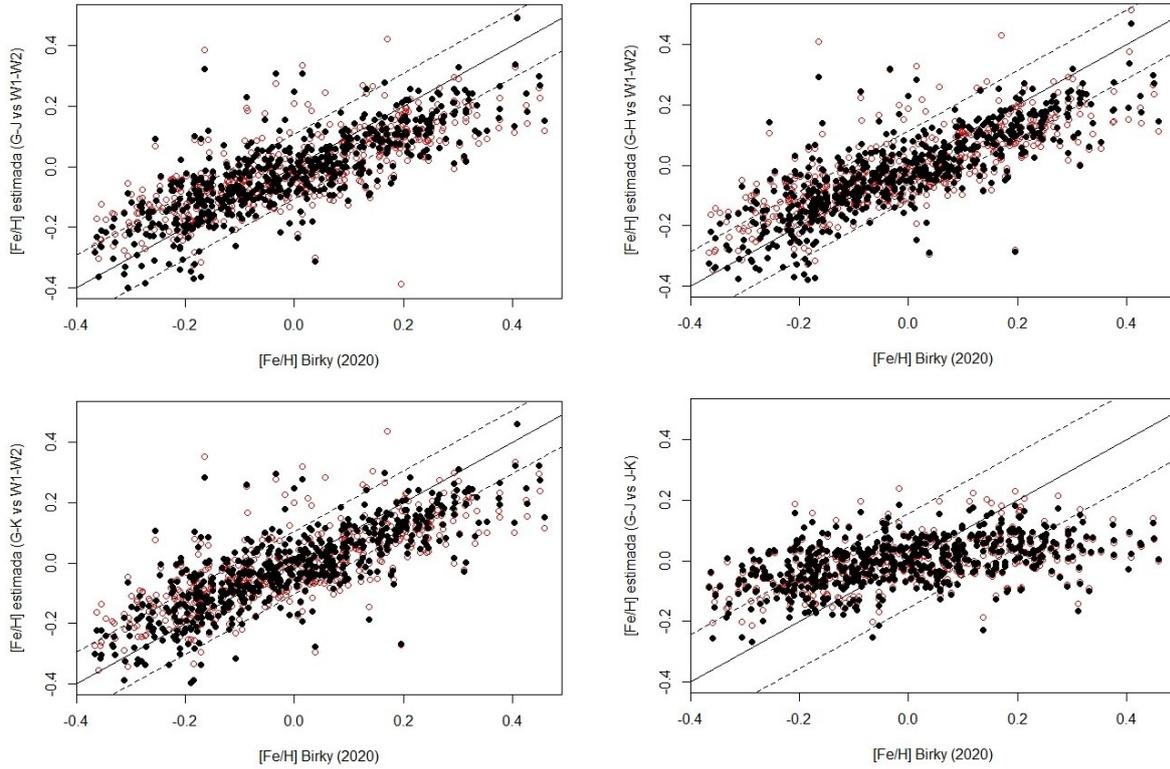


Figura 4: Comparación entre la metalicidad dada en [Birky et al. \(2020\)](#) en el eje horizontal y la metalicidad estimada empleando varias de las calibraciones de la tabla 3 en el eje vertical. Con círculos rojos abiertos se representa el ajuste lineal y con círculos negros llenos el ajuste cuadrático. La línea continua representa la relación 1:1 y las dos líneas discontinuas la incertidumbre σ del modelo cuadrático.

4.2. Diagramas color-magnitud.

Los diagramas color-magnitud, de Hertzsprung-Russell, o simplemente diagramas HR resultan increíblemente útiles en el estudio de las propiedades y evolución de las estrellas, constituyendo una de las herramientas fundamentales en el estudio de la astrofísica estelar. En estos diagramas se representa la magnitud absoluta o luminosidad frente al índice de color, tipo espectral o temperatura efectiva. La posición de una estrella en el diagrama color-magnitud viene dada principalmente por su masa inicial, composición química y edad, pero otros efectos tales como la rotación, el viento estelar o el campo magnético también juegan un papel.

De manera similar a lo observado en los diagramas color-color, los diagramas color-magnitud también presentan un gradiente de metalicidad con una clara interpretación física, ya estudiada como trabajo fin de grado durante el curso anterior: *El efecto de la metalicidad en los diagramas color-magnitud con datos de Gaia DR2*. De forma resumida, debido a las bajas temperaturas de las enanas M, su opacidad es debida principalmente a las transiciones b-f (bound-free o ligado-libre) y f-f (free-free) del ión negativo del hidrógeno, H^- . Para generar este ión son necesarios muchos electrones libres, que son proporcionados por elementos como el hierro, silicio, magnesio y otros metales con potenciales de ionización bajos, de manera que un aumento de la metalicidad conlleva un aumento de la propia opacidad estelar, volviendo a la estrella más fría y menos luminosa.

Procedemos como en la sección anterior; en la tabla 6 se muestran las calibraciones para diferentes diagramas color-magnitud según los ajustes lineales y cuadráticos siguiendo la ecuación (3), desestimando de nuevo los ajustes de orden superior, y en la figura 5 se representan algunos de estos diagramas (el resto en la figura D2).

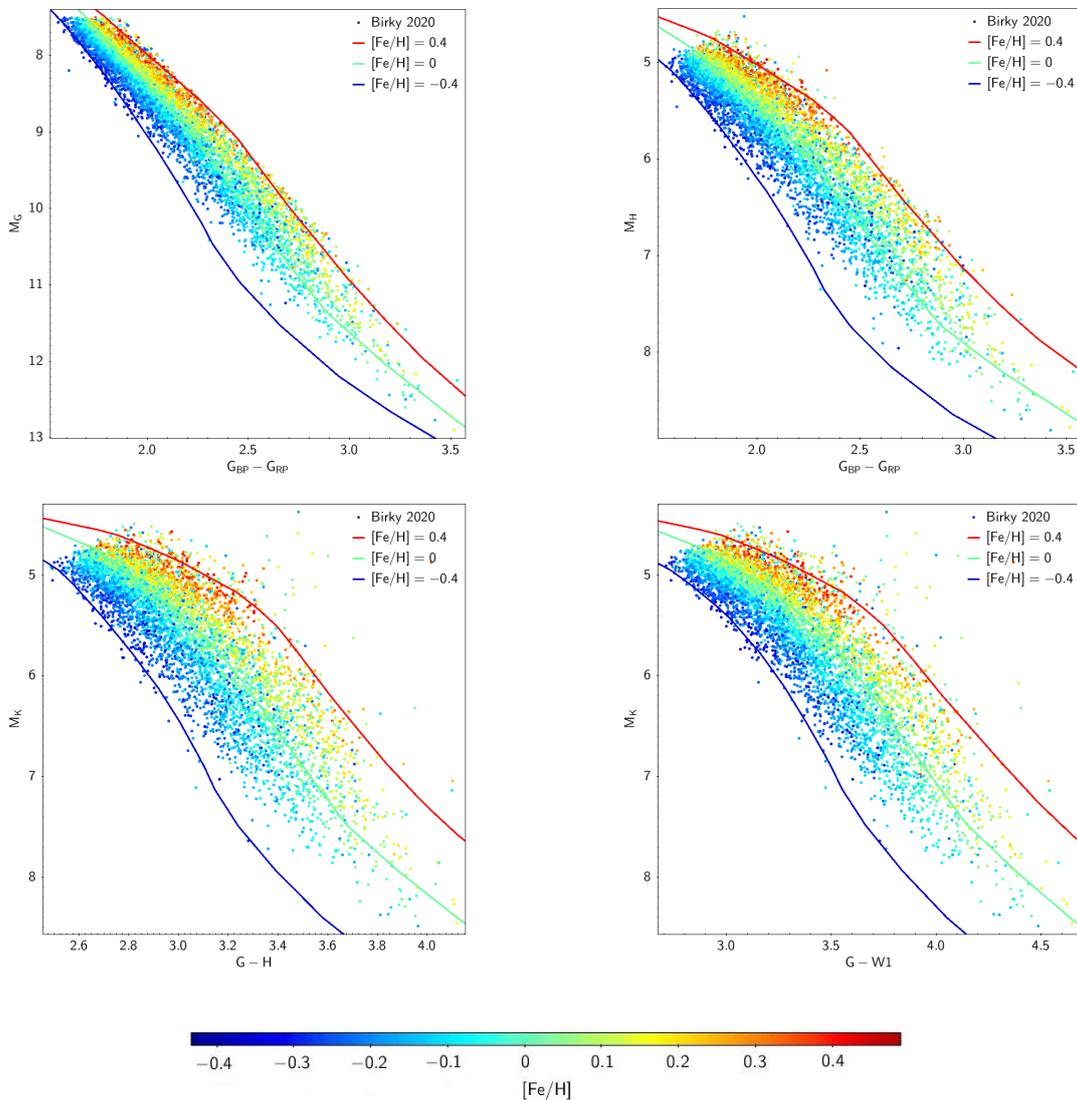


Figura 5: Diagramas color-magnitud con las curvas teóricas de isometalicidad para diferentes valores de $[Fe/H]$.

X	Y	a	b	c	d	e	f	σ
$G_{BP} - G_{RP}$	M_G	1,13	1,28	-0,44	...	...	...	0,13
		6,16	4,14	-2,23	-1,12	0,07	0,25	0,12
$G - J$	M_G	0,24	1,08	-0,32	...	...	...	0,14
		3,34	3,58	-1,66	-1,72	-0,02	0,68	0,13
$G - H$	M_G	-0,67	1,03	-0,28	...	...	...	0,13
		-0,76	5,25	-1,70	-1,21	0,01	0,37	0,12
$G - K$	M_G	-0,54	0,97	-0,30	...	...	...	0,13
		0,35	4,62	-1,82	-1,16	0,00	0,46	0,12
$G - W1$	M_G	-0,39	0,89	-0,29	...	...	...	0,14
		1,20	4,46	-1,99	-1,49	-0,05	0,76	0,12
$G_{BP} - G_{RP}$	M_J	0,83	0,86	-0,42	...	...	...	0,13
		4,44	1,69	-1,76	-0,95	0,01	0,52	0,12
$G - J$	M_J	0,24	0,76	-0,32	...	...	...	0,14
		3,34	1,91	-1,66	-1,06	-0,02	0,64	0,13
$G - H$	M_J	-0,44	0,78	-0,30	...	...	...	0,14
		0,66	3,45	-1,88	-0,89	0,01	0,44	0,13
$G - K$	M_J	-0,34	0,72	-0,31	...	...	...	0,14
		1,53	2,86	-1,93	-0,80	-0,00	0,49	0,12
$G - W1$	M_J	-0,23	0,66	-0,31	...	...	...	0,14
		2,17	2,62	-2,04	-0,89	-0,05	0,65	0,12
$G_{BP} - G_{RP}$	M_H	0,49	0,86	-0,40	...	...	...	0,13
		2,94	2,16	-1,69	-0,77	-0,04	0,36	0,12
$G - J$	M_H	-0,02	0,78	-0,32	...	...	...	0,14
		1,95	2,44	-1,65	-1,03	-0,02	0,59	0,13
$G - H$	M_H	-0,67	0,75	-0,28	...	...	...	0,13
		-0,76	3,55	-1,70	-0,82	0,01	0,40	0,12
$G - K$	M_H	-0,59	0,71	-0,30	...	...	...	0,13
		-0,05	3,16	-1,83	-0,77	0,00	0,45	0,12
$G - W1$	M_H	-0,48	0,66	-0,30	...	...	...	0,14
		0,44	3,05	-1,98	-0,85	-0,04	0,59	0,12
$G_{BP} - G_{RP}$	M_K	0,50	0,83	-0,41	...	...	...	0,13
		3,00	1,87	-1,66	-0,77	-0,02	0,42	0,12
$G - J$	M_K	0,00	0,75	-0,32	...	...	...	0,14
		2,18	2,18	-1,68	-0,99	-0,02	0,61	0,13
$G - H$	M_K	-0,64	0,75	-0,29	...	...	...	0,13
		-0,45	3,44	-1,80	-0,83	0,01	0,44	0,12
$G - K$	M_K	-0,54	0,68	-0,30	...	...	...	0,13
		0,34	2,81	-1,82	-0,71	0,00	0,45	0,12
$G - W1$	M_K	-0,44	0,64	-0,30	...	...	...	0,14
		0,81	2,78	-2,01	-0,80	-0,04	0,61	0,12

Tabla 6: Coeficientes de la relación $[\text{Fe}/\text{H}] = a + bX + cY + dX^2 + eY^2 + fXY$, siendo X e Y el índice de color y la magnitud absoluta indicados, respectivamente, y σ el error intrínseco del modelo.

Diagrama color–magnitud	grado	elppd dif	se dif
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. M_G	2	0,0	0,0
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. M_H	2	-8,7	14,6
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. M_K	2	-13,2	13,4
$G - W1$ vs. M_H	2	-14,5	13,6
$G - W1$ vs. M_K	2	-18,6	12,8
$G - H$ vs. M_K	2	-20,4	15,6
$G - W1$ vs. M_G	2	-22,8	13,3
$G - K$ vs. M_H	2	-23,2	15,6
$G - H$ vs. M_G	2	-26,3	16,8
$G - H$ vs. M_H	2	-26,3	16,8
$G - W1$ vs. M_J	2	-28,0	12,2
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. M_J	2	-28,9	12,6
$G - H$ vs. M_J	2	-31,8	15,7
$G - K$ vs. M_K	2	-31,8	15,0
$G - K$ vs. M_G	2	-31,8	15,0
$G - K$ vs. M_J	2	-37,5	14,7
$G - J$ vs. M_H	2	-43,6	13,4
$G - J$ vs. M_K	2	-44,9	12,4
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. M_H	1	-64,3	12,7
$G - J$ vs. M_J	2	-64,7	12,1
$G - J$ vs. M_G	2	-64,8	12,1
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. M_K	1	-68,7	12,4
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. M_G	1	-72,2	11,6
$G - H$ vs. M_K	1	-84,8	23,4
$G - H$ vs. M_H	1	-85,9	23,6
$G - H$ vs. M_G	1	-85,9	23,6
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. M_J	1	-86,2	12,2
$G - K$ vs. M_H	1	-88,6	22,3
$G - K$ vs. M_G	1	-94,4	21,2
$G - K$ vs. M_K	1	-94,4	21,2
$G - H$ vs. M_J	1	-95,9	23,6
$G - W1$ vs. M_H	1	-100,2	22,4
$G - W1$ vs. M_K	1	-102,9	21,6
$G - K$ vs. M_J	1	-103,0	21,8
$G - W1$ vs. M_G	1	-110,9	21,1
$G - W1$ vs. M_J	1	-115,2	21,7
$G - J$ vs. M_H	1	-119,5	22,3
$G - J$ vs. M_K	1	-121,4	22,3
$G - J$ vs. M_G	1	-138,6	20,8
$G - J$ vs. M_J	1	-138,6	20,8

Tabla 7: Comparación de los diferentes modelos color-magnitud empleando el criterio de información LOO-CV.

Nuevamente, comparamos la capacidad predictiva de estas calibraciones en la tabla 7. En este caso observamos que el color de Gaia $G_{BP} - G_{RP}$ desempeña un buen papel y la clara preferencia a usar las magnitudes absolutas M_G , M_H y M_K sobre M_J . En la figura 6 comparamos la metalicidad dada por Birky et al. (2020) con la estimada por algunas de las calibraciones de la tabla 6. Observamos que, al igual que en el caso de los diagramas color-color, las estimaciones para las estrellas más metálicas fallan, subestimando el valor de la metalicidad.

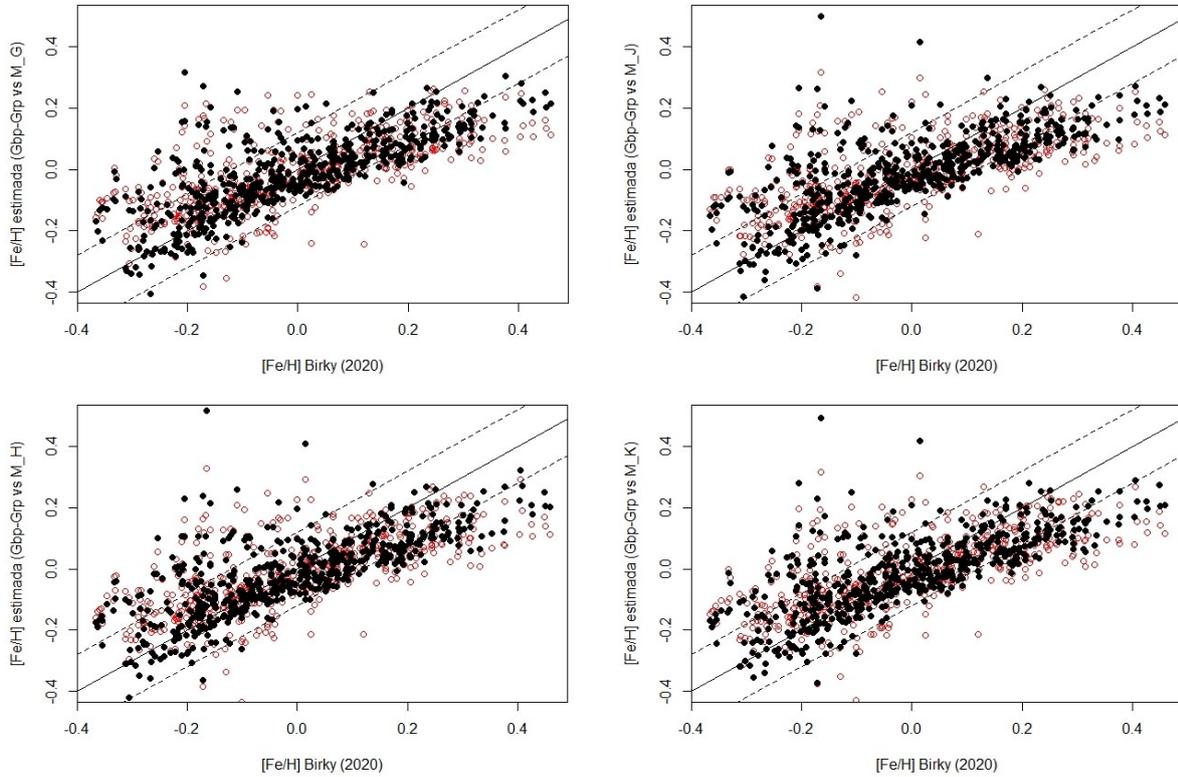


Figura 6: Comparación entre la metalicidad dada en Birky et al. (2020) en el eje horizontal y la metalicidad estimada empleando varias de las calibraciones de la tabla 6 en el eje vertical. Con círculos rojos abiertos se representa el ajuste lineal y con círculos negros llenos el ajuste cuadrático. La línea continua representa la relación 1:1 y las dos líneas discontinuas la incertidumbre σ del modelo cuadrático.

Por último, nótese que, a pesar del efecto de los diferentes parámetros estelares en la posición de una estrella en el diagrama color-magnitud, no se ha incluido la gravedad superficial ($\log g$) como parámetro en las calibraciones. Esto es debido a que en el caso de las enanas M este parámetro resulta redundante con la metalicidad; las propiedades de las enanas M, al contrario que las de estrellas más masivas, no cambian significativamente tras su llegada a las *ZAMS* (*zero age main sequence*). Se tiene por tanto que la abundancia química y la temperatura efectiva de una enana M debería determinar de forma unívoca su gravedad superficial y posición en el diagrama color-magnitud (Birky et al. 2020). Téngase en cuenta que esto es aplicable generalmente para las estrellas más viejas, pero pueden encontrarse mayores diferencias en el caso de estrellas jóvenes.

4.3. Diagramas color-color-magnitud.

Ahora podemos preguntarnos qué calibraciones tienen una mayor capacidad predictiva, las basadas en los diagramas color-color o las basadas en los color-magnitud. Para responder a esta pregunta, seleccionamos las mejores calibraciones de cada tipo según las tablas 5 y 7 y las comparamos con el criterio LOO-CV en la tabla 8.

Diagrama	grado	elppd dif	se dif
$G - H$ vs. $W1 - W2$	2	0,0	0,0
$G - K$ vs. $W1 - W2$	2	-6,2	7,9
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. M_G	2	-56,0	26,2
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. M_H	2	-64,7	23,3
$G_{BP} - G_{RP}$ vs. M_K	2	-69,2	23,8

Tabla 8: Comparación de los mejores modelos color-color y color-magnitud empleando el criterio de información LOO-CV.

Obtenemos que las calibraciones color-color ofrecen mejores resultados. Sin embargo, algunos autores, como es el caso de [Davenport et al. \(2019\)](#), añaden con el fin de mejorar sus estimaciones la magnitud absoluta como una tercera variable a sus ajustes basados en diagramas color-color, lo que podríamos denominar como diagramas color-color-magnitud. Comprobemos si efectivamente se produce una mejora significativa añadiendo la magnitud absoluta M_G a la calibración de la forma

$$[\text{Fe}/\text{H}] = a + bX + cY + dX^2 + eY^2 + fXY + gM_G + hM_G^2 \quad (5)$$

siendo X e Y los colores $G - H$ y $W1 - W2$, respectivamente. Las calibraciones lineal y cuadrática se recogen en la tabla 9 y la comparación de éstas con la calibración color-color “pura” aparece en la tabla 10. Como se puede observar, es suficiente con añadir un término lineal en la magnitud absoluta para obtener una mejora significativa en la calibración.

X	Y	a	b	c	d	e	f	g	h	σ
$G - H$	$W1 - W2$	-8,59	5,41	-14,51	-0,76	-3,47	3,94	-0,07	...	0,10
		-8,09	5,82	-13,25	-0,82	-3,45	3,56	-0,32	0,01	0,10

Tabla 9: Coeficientes de la relación $[\text{Fe}/\text{H}] = a + bX + cY + dX^2 + eY^2 + fXY + gM_G + hM_G^2$, siendo X e Y los colores $G - H$ y $W1 - W2$, respectivamente, y σ el error intrínseco del modelo.

Diagrama color-color	grado	M_G	elpd-diff	se-diff
	2	lineal	0,0	0,0
$G - H$ vs. $W1 - W2$	2	cuadrático	-1,3	2,6
	2	...	-12,8	8,5

Tabla 10: Comparación del mejor modelo color-color con los modelos color-color-magnitud empleando el criterio de información LOO-CV.

4.4. Comparación con una muestra externa de la literatura.

Finalmente, vamos a comparar la estimación de la metalicidad usando nuestro mejor modelo, el diagrama color-color $G - H$ vs. $W1 - W2$ con término lineal en M_G (véase tabla 9), para la muestra de estrellas de Montes et al. (2018) con otras estimaciones fotométricas (Davenport et al. 2019) y con la literatura. En la figura 7 representamos el diagrama color-color $G - H$ vs. $W1 - W2$ de la muestra de Birky et al. (2020) superponiendo las secundarias M de Montes et al. (2018), observando que se adaptan cualitativamente al gradiente de metalicidad.

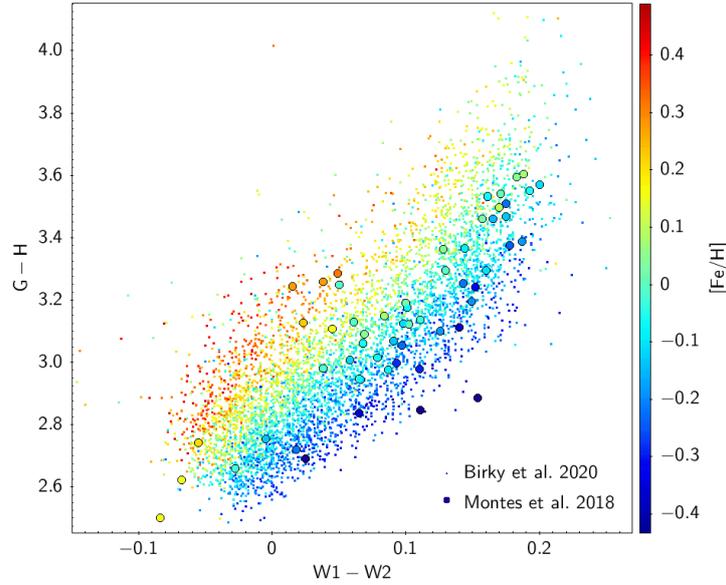


Figura 7: Diagrama color-color de la muestra de Birky et al. (2020) con las secundarias M de Montes et al. (2018) superpuestas.

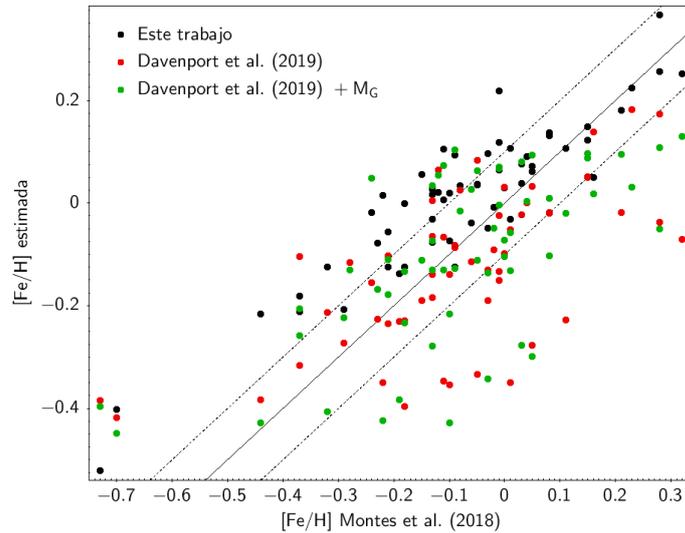


Figura 8: Comparación entre la metalicidad dada por Montes et al. (2018) para las 58 secundarias M y los valores estimados por Davenport et al. (2019) y este trabajo, empleando el término lineal en M_G . La línea continua marca la relación 1:1 y las líneas discontinuas la dispersión del modelo, $\sigma = 0,10$.

En la tabla C1 se puede encontrar la muestra de estas 58 estrellas con la metalicidad dada en Montes et al. (2018), la estimación de Davenport et al. (2019) sin y con el término de la magnitud absoluta, y nuestra estimación. Representamos en la figura 8 la comparación entre las diferentes estimaciones. Se observa que nuestra calibración ofrece valores de la metalicidad iguales o superiores a los indicados en Montes et al. (2018), mientras que las estimaciones de Davenport et al. (2019) presentan una mayor dispersión.

Para comparar las estimaciones de una manera más cuantitativa, estudiamos las distribuciones $Z - Z'$, siendo Z el valor de $[\text{Fe}/\text{H}]$ dado en Montes et al. (2018) y Z' la estimación correspondiente. Representamos estas distribuciones en la figura 9 y su valor medio y desviación típica en la tabla 11. Resulta evidente que, a pesar de que la calibración presentada en este trabajo muestra una menor desviación, resulta sesgada, ofreciendo valores de la metalicidad mayores a los dados en Montes et al. (2018). Este efecto puede deberse a la muestra de calibración escogida. Por ejemplo, diversos autores apuntan a que APOGEE está sistemáticamente sesgado, ofreciendo temperaturas más altas y menores valores de la metalicidad para las enanas M (Birky et al. 2020); de manera análoga, nuestra calibración reporta metalicidades mayores. Como posible trabajo futuro, podría resultar interesante realizar estas calibraciones con MCMC empleando diferentes muestras de calibración y comparar los posibles sesgos en cada caso.

Otro posible factor que contribuya a esta desviación puede ser el modelo escogido para estimar la metalicidad. Para estudiar esta posibilidad, vamos a representar el diagrama color-color $G - H$ vs. $W1 - W2$ con las líneas de isometalicidad teóricas y las correspondientes a la calibración con MCMC en la figura 10. Las calibraciones para las estrellas de metalicidad solar y subsolar aparecen más próximas a las curvas teóricas; sin embargo, se observa un claro problema para la

$Z - Z'$	media	desv.típica
Davenport	0,047	0,156
Davenport + M_G	0,025	0,156
Este trabajo	-0,086	0,092

Tabla 11: Media y desviación típica de las distribuciones $Z - Z'$, siendo Z el valor de $[\text{Fe}/\text{H}]$ dado en Montes et al. (2018) y Z' la estimación correspondiente.

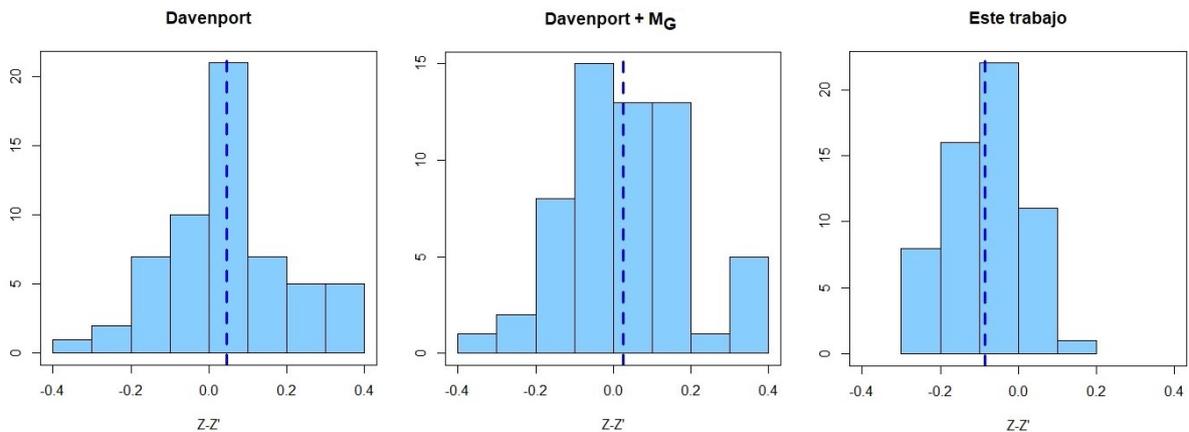


Figura 9: Histogramas las distribuciones $Z - Z'$, siendo Z el valor de $[\text{Fe}/\text{H}]$ dado en Montes et al. (2018) y Z' la estimación correspondiente. La línea vertical discontinua marca el valor medio de cada distribución.

curva de las estrellas más metálicas. Esto explicaría la desviación observada para las estrellas con $[\text{Fe}/\text{H}] > 0,2$, obteniendo valores menores de la metalicidad. Este hecho puede deberse a la geometría de las parametrizaciones empleadas; la ecuación (1) resulta un paraboloide elíptico, es decir, los contornos de isometalicidad conforman elipses. Una posible solución podría consistir en una reparametrización del modelo, tomando por ejemplo calibraciones de la forma $Y = f(X, [\text{Fe}/\text{H}])$ en lugar de $[\text{Fe}/\text{H}] = f(X, Y)$ y comparar estas nuevas calibraciones y las anteriores con el criterio LOO-CV. Futuros trabajos en el campo de las calibraciones fotométricas de la metalicidad para enanas M deberían explorar estas posibilidades.

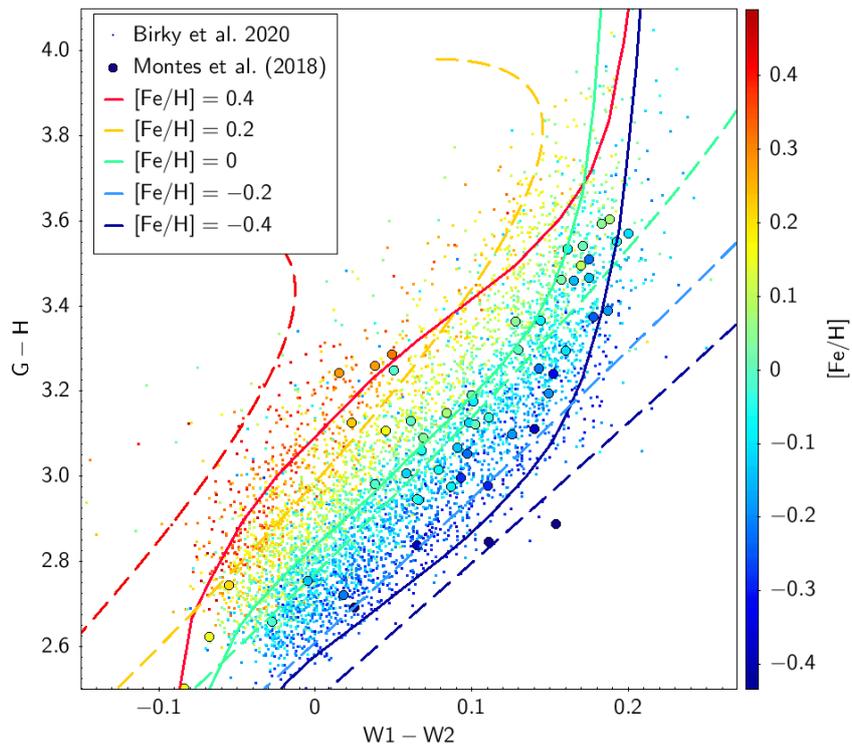


Figura 10: Diagrama color-color $G - H$ vs. $W1 - W2$ con las muestras de Birky et al. (2020) y Montes et al. (2018). Las líneas continuas marcan las curvas teóricas de isometalicidad, y las curvas discontinuas las correspondientes a la calibración con MCMC.

5. Conclusiones.

Las enanas M resultan de especial interés para la Astrofísica, desde en estudios de la Galaxia, modelos téoricos estelares hasta en astrofísica exoplanetaria. Para ello, determinar los parámetros estelares de estos objetos, y en particular su metalicidad, constituye un objetivo clave.

En el presente trabajo nos hemos centrado en las estimaciones fotométricas de la metalicidad. En primer lugar, hemos descrito los diferentes sistemas fotométricos a usar; la precisión y homogeneidad de los datos de *Gaia* DR2 tanto en astrometría como en fotometría, complementados con bandas en el infrarrojo de *2MASS* y *AllWISE*, nos han permitido estudiar diferentes calibraciones de la metalicidad gracias al efecto de ésta en los diagramas color-color y color-magnitud. Para obtener la mejor calidad en estas calibraciones, hemos descrito un filtrado o limpieza de datos, eliminando estrellas variables o con fotometría de baja calidad. A continuación, se han descrito las diferentes muestras de estrellas empleadas.

A partir de la muestra presentada en [Birky et al. \(2020\)](#) hemos realizado diferentes calibraciones fotométricas empleando cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) con la herramienta *Stan*. De esta manera, hemos estudiado el gradiente de metalicidad presente en los diagramas color-color y color-magnitud para poder estimar la metalicidad de enanas M tempranas e intermedias (hasta M5V). La capacidad predictiva de las diferentes calibraciones se ha comparado utilizando el criterio de información LOO-CV. Además, hemos combinado la información en un “diagrama color-color-magnitud”, observando una mejora significativa de las estimaciones.

Finalmente, hemos comparado la mejor de nuestras calibraciones, basada en el diagrama color-color $G - H$ vs. $W1 - W2$ con M_G , con otras calibraciones de la literatura ([Davenport et al. 2019](#)) para una muestra externa ([Montes et al. 2018](#)), obteniendo que nuestra calibración presenta un sesgo hacia valores más metálicos, posiblemente debido a la muestra de calibración escogida.

Se tienen diferentes formas de mejorar nuestros resultados. El siguiente lanzamiento de datos de *Gaia*, el Data Release 3 (DR3), será accesible en dos partes, en Diciembre 2020 (*Gaia* EDR3) y en 2022 (lanzamiento completo), y supondrá un paso más en los estudios de la astrofísica estelar. La mayor cantidad y calidad de los datos, junto con información adicional sobre binariedad y estrellas variables será de gran valor en el estudio de los diagramas color-color y color-magnitud. Además, pueden realizarse calibraciones con MCMC similares a las aquí presentadas empleando diferentes muestras de calibración para estudiar el sesgo encontrado y diferentes parametrizaciones. Finalmente, este trabajo puede ser extendido a las enanas M tardías utilizando diferentes muestras de estrellas para lograr un estudio completo de las estimaciones fotométricas de la metalicidad para este tipo de estrellas.

Agradecimientos

Con este trabajo pongo punto y final a cinco años en la Universidad, cinco años llenos de experiencias. Me gustaría mencionar y agradecer a varias personas. A Juan Carlos, mi profesor de Física de Bachillerato, que logró fascinarme y engancharme a esta ciencia con sus clases. A los profesores con dedicación que durante estos años han logrado transmitir no solo sus conocimientos sino su pasión; en particular al Departamento de Astrofísica y personalmente a David Montes, cuya puerta siempre ha estado abierta y de quien he aprendido considerablemente estos últimos años. A mis amigos, Serre, Adri, Alberto, María, Ana, Álvaro, Izas, Sara y Natalia, quienes a pesar de haber seguido caminos distintos siempre tienen tiempo para que nos pongamos al día. A mi familia, que me ha acompañado (y soportado) durante mis largas horas y horas de estudio. Y a Guillermo, sin el cual mi paso por la Universidad no habría sido el mismo.

Referencias

- Abolfathi, B., Aguado, D. S., Aguilar, G., et al. 2018, *ApJS*, **235**, 42
- Adams, F. C., & Laughlin, G. 1997, *Rev. Mod. Phys.*, **69**, 337
- Alonso-Floriano, F. J., Morales, J. C., Caballero, J. A., et al. 2015, *A&A*, **577**, A128
- Bean, J. L., Benedict, G. F., & Endl, M. 2006, *ApJ*, **653**, L65
- Berger, D. H., Gies, D. R., McAlister, H. A., et al. 2006, *ApJ*, **644**, 475
- Birky, J., Hogg, D. W., Mann, A. W., et al. 2020, *ApJ*, **892**, 31
- Blanton, M. R., Bershady, M. A., Abolfathi, B., et al. 2017, *AJ*, **154**, 28
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., et al. 2012, *MNRAS*, **427**, 127
- Bonfils, X., Delfosse, X., Udry, S., et al. 2005, *A&A*, **442**, 635
- Carpenter, B., Gelman, A., Hoffman, M. D., et al. 2017, *JSS*, **76**, 1
- Cifuentes, C., Caballero, J. A., Cortes-Contreras, M., et al. 2020, *arXiv:2007.15077*
- Croswell, K. 2002, *S&T*, **104**, 38
- Cutri, R. M. & et al. 2013, *VizieR Online Data Cat.*, II/328
- Davenport, J. R. A. & Dorn-Wallenstein, T. Z. 2019, *RNAAS*, **3**, 54
- Delfosse, X., Forveille, T., Ségransan, D., et al. 2000, *A&A*, **364**, 217
- Desidera, S., Gratton, R. G., Lucatello, S., et al. 2006, *A&A*, **454**, 581
- Fischer, D. A., & Valenti, J. 2005, *ApJ*, **622**, 1102
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2018, *A&A*, **616**, A1
- Gaia Collaboration, Babusiaux, C., van Leeuwen, F., et al. 2018, *A&A*, **616**, A10
- Gonzalez, G. 1997, *MNRAS*, **285**, 403
- Henry, T. J., Jao, W.-C., Subasavage, J. P., et al. 2006, *AJ*, **132**, 2360
- Irwin, J. M., Berta-Thompson, Z. K., Charbonneau, D., et al. 2015, *18th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, 767
- Johnson, J. A. & Apps, K. 2009, *ApJ*, **699**, 933
- López-Morales, M., & Ribas, I. 2005, *ApJ*, **631**, 1120
- López-Morales, M. 2007, *AJ*, **660**, 732
- Majewski, S. R., Schiavon, R. P., Frinchaboy, P. M., et al. 2017, *AJ*, **154**, 94
- Montes, D., González-Peinado, R., Taberner, H. M., et al. 2018, *MNRAS*, **479**, 1332
- Ness, M., Hogg, D. W., Rix, H.-W., et al. 2015, *ApJ*, **808**, 16

- Neves, V., Bonfils, X., Santos, N. C., et al. 2012, [A&A](#), **538**, A25
- Quirrenbach, A., Amado, P. J., Ribas, I., et al. 2018, [Proceedings of the SPIE](#), **10702**, 107020W
- Reid, I. N., & Hawley, S. L. 2005, [New Light on Dark Stars Red Dwarfs](#)
- Rojas-Ayala, B., Covey, K. R., Muirhead, P. S., et al. 2010, [ApJ](#), **720**, L113
- Rojas-Ayala, B., Covey, K. R., Muirhead, P. S., et al. 2012, [ApJ](#), **748**, 93
- Sarmiento, P., Delgado Mena, E., Rojas-Ayala, B., et al. 2020, [A&A](#), **636**, A85
- Schlaufman, K. C. & Laughlin, G. 2010, [A&A](#), **519**, A105
- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., et al. 2006, [AJ](#), **131**, 1163
- Sparke, L. S. & Gallagher, J. S. 2007, [Galaxies in the Universe](#), by Linda S. Sparke , John S. Gallagher, III, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007
- Tabernerero, H. M., Montes, D., & González Hernández, J. I. 2012, [A&A](#), **547**, A13
- Taylor, M. B. 2005, [Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV](#), **347**, 29
- Terrien, R. C., Mahadevan, S., Bender, C. F., et al. 2012, [ApJ](#), **747**, L38
- Vehtari, A., Gelman, A., & Gabry, J. 2015, [arXiv:1507.04544](#)
- Vilhu, O. & Walter, F. M. 1987, [ApJ](#), **321**, 958
- Winters, J. G., Henry, T. J., Lurie, J. C., et al. 2015, [AJ](#), **149**, 5
- Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., et al. 2010, [AJ](#), **140**, 1868

Apéndices

A. Apéndice: Abundancia de elementos químicos y metalicidad.

Como hemos visto en la sección 1.2, el índice de metalicidad se puede definir empleando la abundancia de cualquier elemento más pesado que el helio según la ecuación (1). Generalmente, se emplea la abundancia de hierro debido a la gran cantidad de líneas espectrales y a su alta correlación con la abundancia estelar total. A partir de la muestra de 1443 enanas M extraídas de APOGEE (SDSS DR14), empleando el SDSS Science Archive Server (SAS)², representamos en la figura A1 la relación entre la metalicidad total $[M/H]$ y la asociada a varios elementos químicos, $[Z/H]$, y calculamos en cada caso el coeficiente de correlación de Pearson, ρ . Recuérdese que $\rho = 1$ indica una correlación positiva perfecta, $\rho = -1$ una correlación negativa perfecta y $\rho = 0$ indica que no existe correlación.

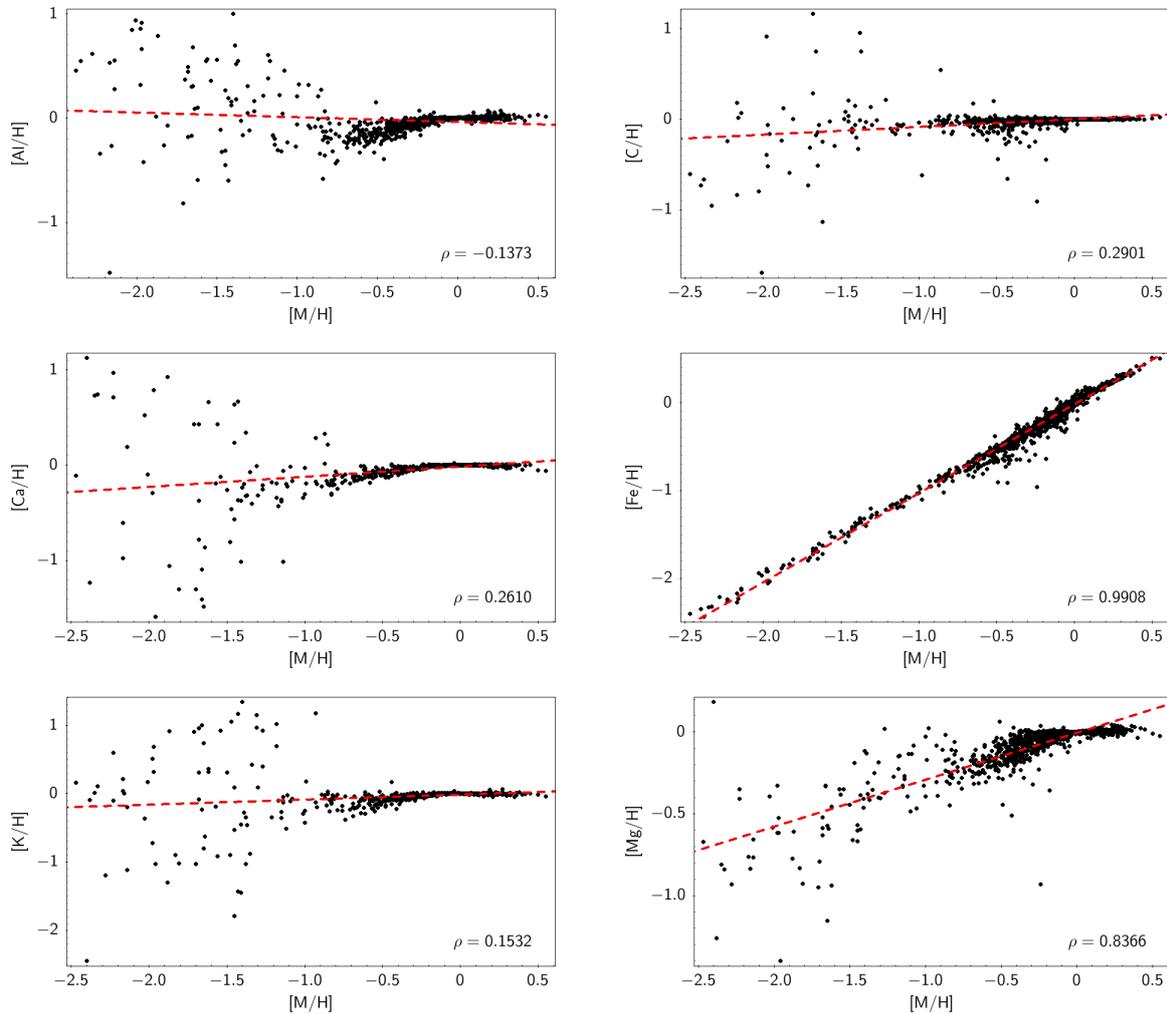


Figura A1: Correlación entre la metalicidad total $[M/H]$ y la abundancia de varios elementos químicos (Al, C, Ca, Fe, K, Mg, Mn, N, Ni, O, P, S, Si, Ti), indicando el coeficiente de correlación de Pearson en cada caso.

²<https://dr14.sdss.org/infrared/spectrum/search>

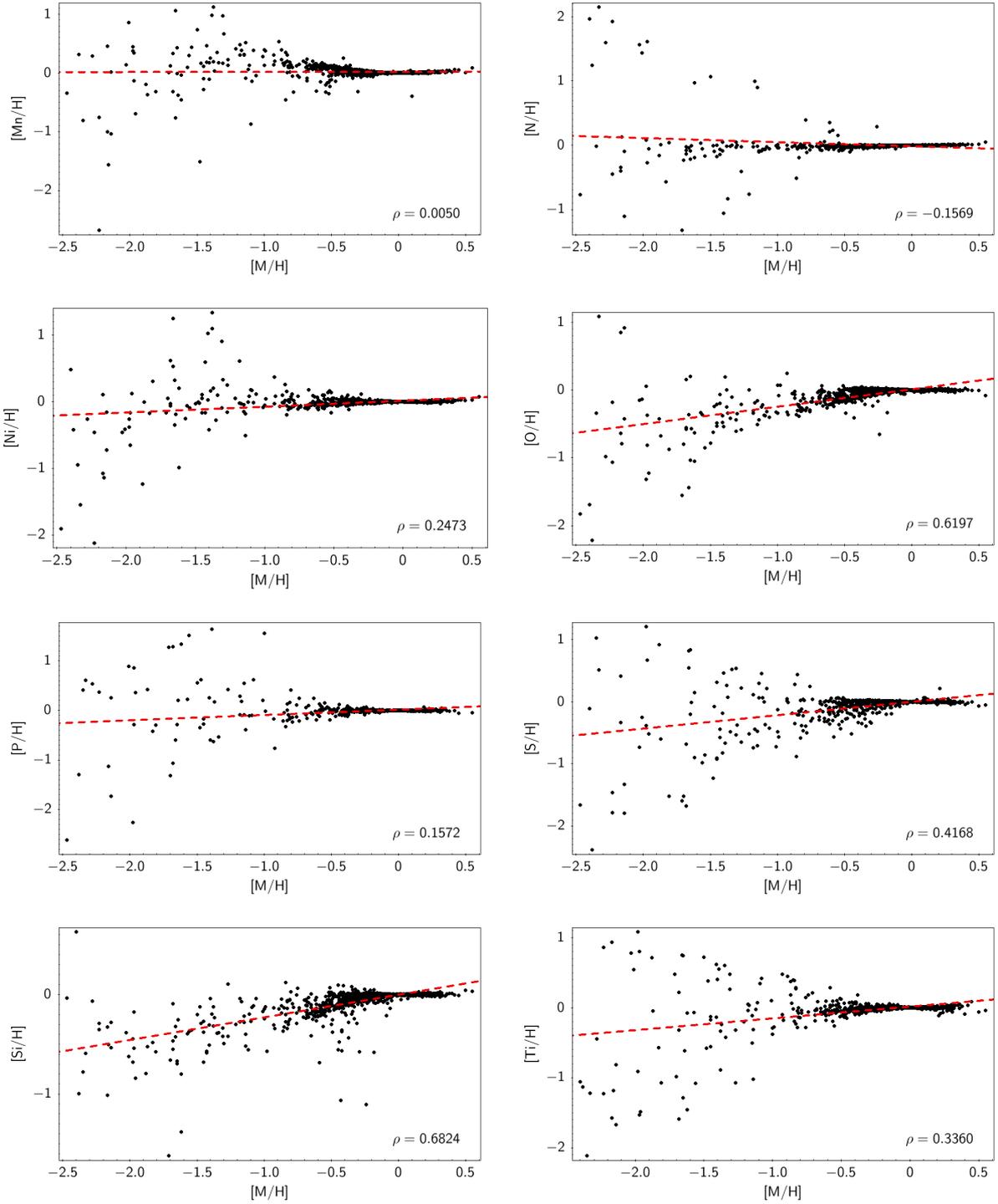


Figura A1: *Continuación* Correlación entre la metalicidad total [M/H] y la abundancia de varios elementos químicos (Al, C, Ca, Fe, K, Mg, Mn, N, Ni, O, P, S, Si, Ti), indicando el coeficiente de correlación de Pearson en cada caso.

B. Apéndice: Código.

El código de *Stan* se muestra a continuación. Consta de cuatro bloques: 1. `data` incluye los datos de entrada. 2. En `parameters` se declaran los parámetros y sus ligaduras; en nuestro caso resultan el vector de coeficientes del ajuste y el error del modelo, σ . 3. En `model` se escribe el modelo, especificando los priors para los parámetros. 4. El bloque de `generated quantities` se ejecuta una vez por cada muestra del posterior y sirve, por ej., para generar datos simulados, hacer predicciones, comparación de modelos, para calcular la capacidad predictiva posterior, etc.

```
data {
  int<lower=1> K; // numero de columnas
  int<lower=0> N; // numero de estrellas de entrada
  matrix[N,K] x; // matriz con los datos
  vector[N] y; // metalicidades
  int<lower=0> Ntest;
  matrix[Ntest,K] xtest;
  vector[Ntest] ytest;
}

parameters {
  vector[K] beta; // coeficientes de la calibracion
  real<lower=0> sigma; // error del modelo
}

model {
  vector[N] FE_H;
  FE_H = x * beta;
  y ~ normal(FE_H, sigma);
  beta ~ normal(0., 10.); // prior de beta
  sigma ~ cauchy(0., 10.); // prior de sigma
}

generated quantities {
  vector[Ntest] logLikelihood;
  vector[Ntest] FE_H;
  FE_H = xtest*beta;
  for (i in 1:Ntest) {
    logLikelihood[i] = normal_lpdf(ytest[i] | FE_H[i], sigma);
  }
}
```

Una vez tenemos el código guardado como `ajuste_tfm.stan`, convertimos el programa a C++ y compilamos. A continuación, especificamos los datos de entrada en una lista y muestreamos (generamos las cadenas), empleando 3 cadenas de 5000 iteraciones, con 500 de warmup.

```
compilado <- stan_model("ajuste_tfm.stan")

set.seed(50358928)
resultado <- sampling(object=compilado, data=datos, chains=3, iter=5000,
                      warmup=500)
print(resultado, pars=c("beta","sigma"))
```

C. Apéndice: Tablas largas.

WDS	Nombre	α [hms]	δ [dms]	SpT	UCM	DAV19	[Fe/H]	DAV19+MG	Este trabajo
J00452+0015	HD 4271B	00:45:13.6	+00:15:51	M4.0V	0,08 ± 0,03	-0,02 ± 0,11	-0,10 ± 0,11	-0,10 ± 0,11	0,14 ± 0,10
J00153+5304	G 217-40	00:15:14.6	+53:04:46	M2.5V	0,03 ± 0,05	-0,02 ± 0,11	0,08 ± 0,11	0,08 ± 0,11	0,08 ± 0,10
J00385+4300	LP 193-345	00:38:33.2	+42:59:30	M0.5V	-0,70 ± 0,08	-0,42 ± 0,12	-0,49 ± 0,12	-0,49 ± 0,12	-0,40 ± 0,10
J01340-0141	LP 588-9	01:34:12.4	-01:34:26	M1.0V	-0,73 ± 0,03	-0,39 ± 0,12	-0,40 ± 0,12	-0,40 ± 0,12	-0,52 ± 0,10
J01450-0104	LP 588-44	01:44:57.0	-01:03:04	M2.0	-0,37 ± 0,03	-0,32 ± 0,12	-0,21 ± 0,11	-0,21 ± 0,11	-0,18 ± 0,10
J03078+2533	HD 19381B	03:07:58.3	+25:32:02	M3.5V	0,11 ± 0,02	-0,23 ± 0,11	-0,02 ± 0,11	-0,02 ± 0,11	0,11 ± 0,10
J03203+0902	HD 20727B	03:20:42.5	+09:02:10	M4.0V	-0,24 ± 0,02	-0,15 ± 0,11	0,05 ± 0,11	0,05 ± 0,11	-0,02 ± 0,10
J03356+4253	Wolf 191	03:35:28.5	+42:53:35	M0.5V	-0,37 ± 0,03	-0,10 ± 0,11	-0,26 ± 0,11	-0,26 ± 0,11	-0,21 ± 0,10
J03480+4032	UCAC4 653-017808	03:48:05.9	+40:32:23	M1.5V	0,28 ± 0,02	0,17 ± 0,11	-0,05 ± 0,11	-0,05 ± 0,11	0,37 ± 0,10
J03520+3947	TYC 2868-639-1	03:51:58.1	+39:46:57	M0.0V	-0,13 ± 0,05	0,00 ± 0,11	0,03 ± 0,11	0,03 ± 0,11	0,02 ± 0,10
J03556+5214	LSPM J0355+5214	03:55:36.9	+52:14:29	M2.5V	-0,32 ± 0,02	-0,21 ± 0,11	-0,41 ± 0,12	-0,41 ± 0,12	-0,12 ± 0,10
J04559+0440	HD 31412B	04:55:54.5	+04:40:16	M2.0V	0,08 ± 0,02	-0,02 ± 0,11	0,01 ± 0,11	0,01 ± 0,11	0,13 ± 0,10
J05003+2508	HD 31867B	05:00:19.5	+25:07:51	M1.0V	-0,01 ± 0,02	-0,13 ± 0,11	0,00 ± 0,11	0,00 ± 0,11	0,06 ± 0,10
J05264+0351	2MASSJ05262029+0351111	05:26:20.3	+03:51:11	M1.5V	0,01 ± 0,03	-0,05 ± 0,11	-0,13 ± 0,11	-0,13 ± 0,11	-0,03 ± 0,10
J05466+0110	HD 38529 B	05:46:19.4	+01:12:47	M2.5V	0,32 ± 0,02	-0,07 ± 0,11	0,13 ± 0,11	0,13 ± 0,11	0,25 ± 0,10
J06173+0506	HD 43587 B	06:17:10.6	+05:07:02	M3.5V	-0,03 ± 0,01	-0,19 ± 0,11	-0,34 ± 0,11	-0,34 ± 0,11	0,10 ± 0,10
J06319+0039	G 106-52	06:31:23.7	+00:36:45	M1.5V	-0,29 ± 0,02	-0,27 ± 0,12	-0,22 ± 0,11	-0,22 ± 0,11	-0,21 ± 0,10
J06332+0528	HD 46375 B	06:33:12.1	+05:27:53	M2.0V	0,23 ± 0,06	0,18 ± 0,10	0,03 ± 0,11	0,03 ± 0,11	0,22 ± 0,10
J07058+8337	LP 4-248	07:03:11.0	+83:38:59	M3.5	-0,15 ± 0,02	-0,19 ± 0,11	-0,11 ± 0,11	-0,11 ± 0,11	0,05 ± 0,10
J08107-1348	18 Pup B	08:10:34.3	-13:48:51	M3.0V	-0,01 ± 0,03	-0,02 ± 0,11	0,07 ± 0,11	0,07 ± 0,11	0,22 ± 0,10
J08138+6306	NLTT 19115	08:14:19.0	+63:04:40	M1.5V	-0,09 ± 0,01	-0,09 ± 0,11	-0,13 ± 0,11	-0,13 ± 0,11	-0,13 ± 0,10
J08484+2042	2MASSJ08482492+2042188	08:48:24.9	+20:42:18	M1.5V	-0,03 ± 0,02	-0,13 ± 0,11	-0,14 ± 0,11	-0,14 ± 0,11	-0,05 ± 0,10
J08492+0329	LEP 33	08:49:02.3	+03:29:47	M4	0,05 ± 0,02	-0,28 ± 0,12	-0,30 ± 0,11	-0,30 ± 0,11	0,06 ± 0,10
J09008+2347	HD 77052 B	09:00:53.2	+23:46:59	M2.5	0,04 ± 0,02	0,00 ± 0,11	0,00 ± 0,11	0,00 ± 0,11	0,09 ± 0,10
J09029+0600	2MASSJ09025320+0602095	09:02:53.2	+06:02:10	M1.5V	-0,12 ± 0,02	0,06 ± 0,11	0,05 ± 0,11	0,05 ± 0,11	0,02 ± 0,10
J09058+5532	NLTT 20915	09:05:51.2	+55:32:18	M3.5V	0,03 ± 0,02	-0,02 ± 0,11	-0,28 ± 0,11	-0,28 ± 0,11	0,04 ± 0,10
J09152+2323	BD+23 2063B	09:15:10.1	+23:21:33	M0.0V	0,21 ± 0,02	-0,02 ± 0,11	0,10 ± 0,11	0,10 ± 0,11	0,18 ± 0,10
J10507+5148	GJ 3628 B	10:50:38.3	+51:45:02	M3.5V	-0,11 ± 0,02	-0,35 ± 0,12	-0,13 ± 0,11	-0,13 ± 0,11	0,10 ± 0,10
J11378+4150	BD+42 2230B	11:37:49.9	+41:50:00	M2.0V	-0,11 ± 0,03	-0,07 ± 0,11	0,07 ± 0,11	0,07 ± 0,11	0,01 ± 0,10

Tabla B1: Secundarias M de [Montes et al. \(2018\)](#) con los valores de metalicidad determinados en el propio artículo (UCM), las estimaciones de [Davenport et al. \(2019\)](#) (DAV19 y DAV19+MG) y muestra estimación usando la calibración lineal de la tabla 9.

WDS	Nombre	α [hms]	δ [dms]	SpT	UCM	DAV19	[Fe/H]	DAV19+MG	Este trabajo
J11403+0931	LP 493-31	11:40:20.8	+09:30:45	M1.5V	-0,28 ± 0,03	-0,12 ± 0,11	-0,13 ± 0,11	-0,13 ± 0,11	-0,13 ± 0,10
J11475+7702	LP 20-89	11:47:12.7	+77:02:36	K7V	0,15 ± 0,02	0,05 ± 0,11	0,10 ± 0,11	0,10 ± 0,11	0,12 ± 0,10
J12049+1729	2MASSJ12045611+1728119	12:04:56.1	+17:28:12	M3.5V	-0,18 ± 0,02	-0,40 ± 0,12	-0,13 ± 0,11	-0,13 ± 0,11	0,00 ± 0,10
J12372+3545	2MASSJ12371547+3549176	12:37:15.5	+35:49:18	M1.5V	-0,05 ± 0,02	0,08 ± 0,11	0,06 ± 0,11	0,06 ± 0,11	0,03 ± 0,10
J12406+4017	2MASS12403633+4017586	12:40:36.3	+40:17:59	M:	0,00 ± 0,04	-0,10 ± 0,11	-0,10 ± 0,11	-0,10 ± 0,11	-0,07 ± 0,10
J13274-2138	LP 797-105	13:27:34.5	-21:39:57	M2.5	-0,09 ± 0,07	-0,08 ± 0,11	0,10 ± 0,11	0,10 ± 0,11	0,09 ± 0,10
J13316+5857	2MASSJ13311250+5857191	13:31:12.5	+58:57:19	M2.5	-0,19 ± 0,02	-0,23 ± 0,11	-0,38 ± 0,12	-0,38 ± 0,12	-0,14 ± 0,10
J13321-1115	TYC 5548-829-1	13:32:06.9	-11:16:41	M0.0V	-0,21 ± 0,02	-0,23 ± 0,11	-0,11 ± 0,11	-0,11 ± 0,11	-0,12 ± 0,10
J14050+0157	NLTT 36190	14:04:55.8	+01:57:23	M2	-0,01 ± 0,02	-0,15 ± 0,11	0,07 ± 0,11	0,07 ± 0,11	0,12 ± 0,10
J14493+4950	2MASS14491476+4949390	14:49:14.8	+49:49:39	M1.5V	0,05 ± 0,02	0,03 ± 0,11	0,09 ± 0,11	0,09 ± 0,11	0,07 ± 0,10
J15123+3939	LP 222-50	15:11:51.5	+39:33:02	M2.5V	-0,21 ± 0,03	-0,10 ± 0,11	-0,18 ± 0,11	-0,18 ± 0,11	-0,06 ± 0,10
J15131+1808	2MASS15125175+1807449	15:13:06.6	+18:08:44	M2.0V	-0,18 ± 0,03	-0,23 ± 0,11	-0,23 ± 0,11	-0,23 ± 0,11	-0,12 ± 0,10
J15204+0015	G 15-18	15:20:28.3	+00:11:27	M0.0V	-0,44 ± 0,03	-0,38 ± 0,12	-0,43 ± 0,12	-0,43 ± 0,12	-0,22 ± 0,10
J15211+2534	HIP 75124	15:21:04.8	+25:33:30	K7V	0,16 ± 0,05	0,14 ± 0,11	0,02 ± 0,11	0,02 ± 0,11	0,05 ± 0,10
J15353+6005	LP 99-392	15:35:25.7	+60:05:08	M3.5V	-0,13 ± 0,06	-0,18 ± 0,11	-0,28 ± 0,11	-0,28 ± 0,11	0,03 ± 0,10
J15431-1303	2MASS15430573-1302525	15:43:05.7	-13:02:53	M1.5V	-0,13 ± 0,03	-0,14 ± 0,11	-0,07 ± 0,11	-0,07 ± 0,11	-0,03 ± 0,10
J15482+0134	HD 141272B	15:48:09.3	+01:34:36	M2.5V	-0,10 ± 0,02	-0,14 ± 0,11	-0,22 ± 0,11	-0,22 ± 0,11	-0,07 ± 0,10
J17178+227	LP 138-36	17:17:38.6	+52:24:22	M3.5V	-0,22 ± 0,03	-0,35 ± 0,12	-0,42 ± 0,12	-0,42 ± 0,12	0,01 ± 0,10
J17428+1646	2MASSJ17425203+1643476	17:42:52.0	+16:43:48	M1.5V	-0,23 ± 0,03	-0,23 ± 0,11	-0,17 ± 0,11	-0,17 ± 0,11	-0,08 ± 0,10
J17477+2748	G 182-27	17:47:44.3	+27:47:07	M1.5V	-0,06 ± 0,02	-0,11 ± 0,11	0,03 ± 0,11	0,03 ± 0,11	-0,04 ± 0,10
J18006+6833	LDS 1460B	18:00:37.0	+68:32:54	K7V	-0,02 ± 0,02	-0,09 ± 0,11	-0,05 ± 0,11	-0,05 ± 0,11	-0,01 ± 0,10
J18006+2934	HD 164595B	18:00:45.4	+29:33:57	M2.0V	-0,08 ± 0,01	0,03 ± 0,11	-0,02 ± 0,11	-0,02 ± 0,11	0,03 ± 0,10
J18090+2409	2MASSJ18090192+2409041	18:09:01.9	+24:09:04	M1.0V	-0,13 ± 0,02	-0,06 ± 0,11	-0,13 ± 0,11	-0,13 ± 0,11	-0,07 ± 0,10
J18131+4129	2MASS18130001+4129198	18:13:00.0	+41:29:20	M3.5V	0,01 ± 0,01	-0,35 ± 0,12	-0,06 ± 0,11	-0,06 ± 0,11	0,11 ± 0,10
J18292+1142	2MASS18291369+1141271	18:29:13.7	+11:41:27	K5.0V	0,28 ± 0,02	-0,04 ± 0,11	0,11 ± 0,11	0,11 ± 0,11	0,26 ± 0,10
J19321-1116	HD 183870B	19:32:08.1	-11:19:57	M3.5V	-0,10 ± 0,06	-0,35 ± 0,12	-0,43 ± 0,12	-0,43 ± 0,12	0,02 ± 0,10
J21575+2856	2MASSJ21572970+2854494	21:57:29.7	+28:54:50	M1.5V	0,15 ± 0,02	0,05 ± 0,11	0,09 ± 0,11	0,09 ± 0,11	0,15 ± 0,10
J22159+5440	HD 211472B	22:16:02.6	+54:40:00	M4.0V	-0,05 ± 0,02	-0,33 ± 0,12	-0,11 ± 0,11	-0,11 ± 0,11	0,04 ± 0,10
J22311+4509	HD 213519B	22:31:06.5	+45:09:44	M3	0,00 ± 0,01	0,03 ± 0,11	-0,07 ± 0,11	-0,07 ± 0,11	0,03 ± 0,10

Tabla B1: *continuación* Secundarias M de Montes et al. (2018) con los valores de metalicidad determinados en el propio artículo (UCM), las estimaciones de Davenport et al. (2019) (DAV19 y DAV19+MG) y nuestra estimación usando la calibración lineal de la tabla 9.

D. Apéndice: Figuras.

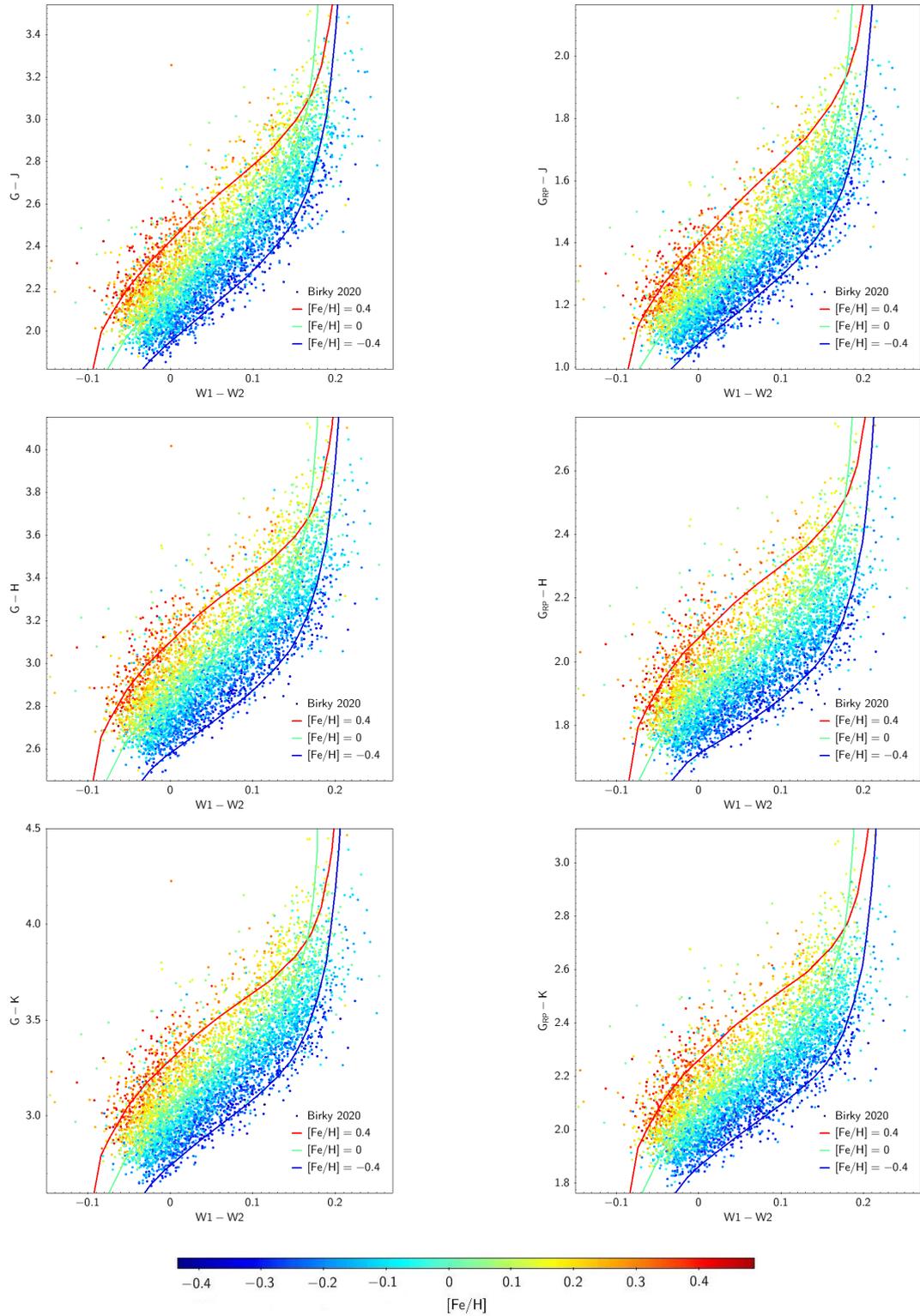


Figura D1: Diagramas color-color con las curvas teóricas de isometalicidad para diferentes valores de $[Fe/H]$.

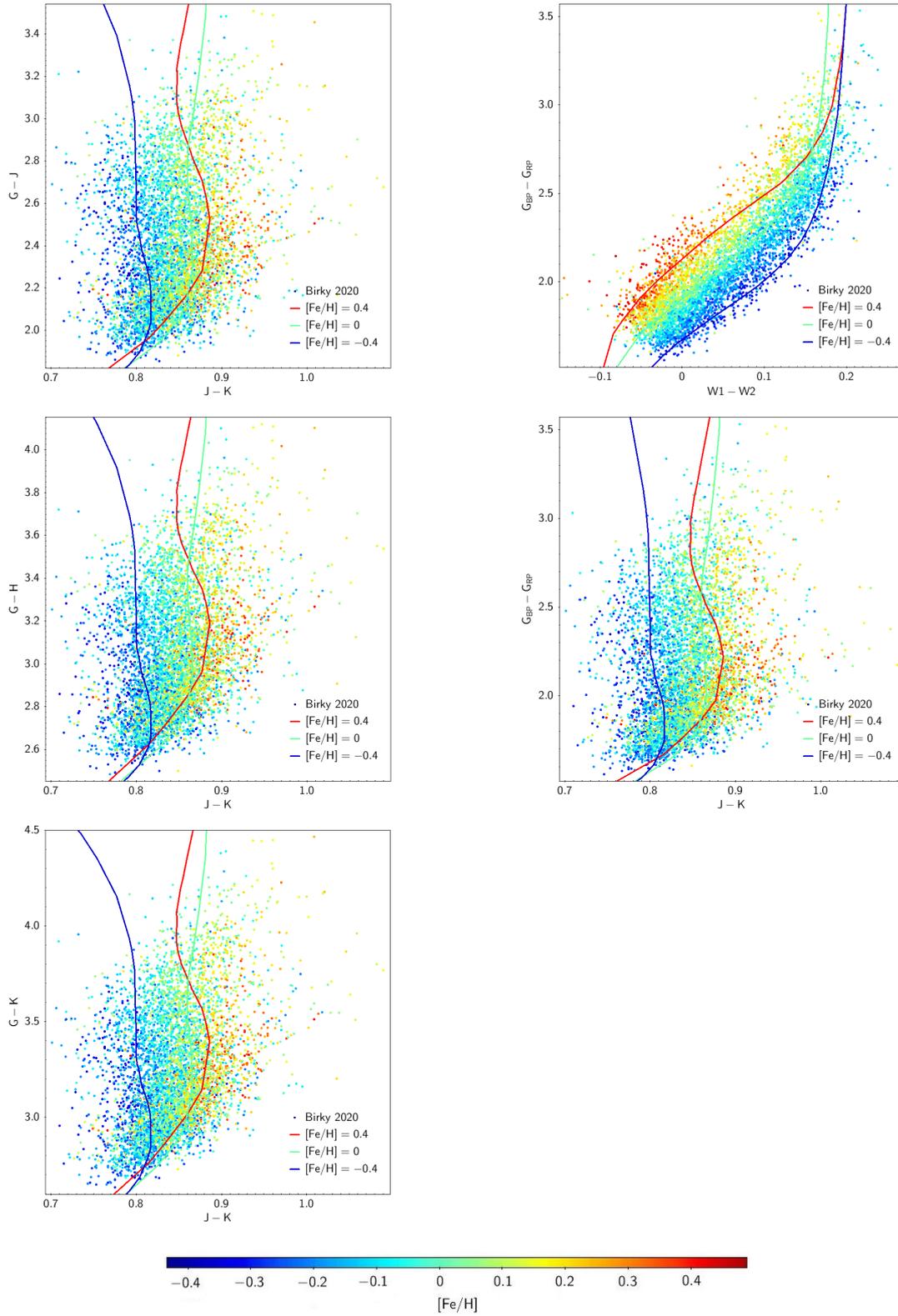


Figura D1: *continuación* Diagramas color-color con las curvas teóricas de isometalicidad para diferentes valores de $[Fe/H]$.

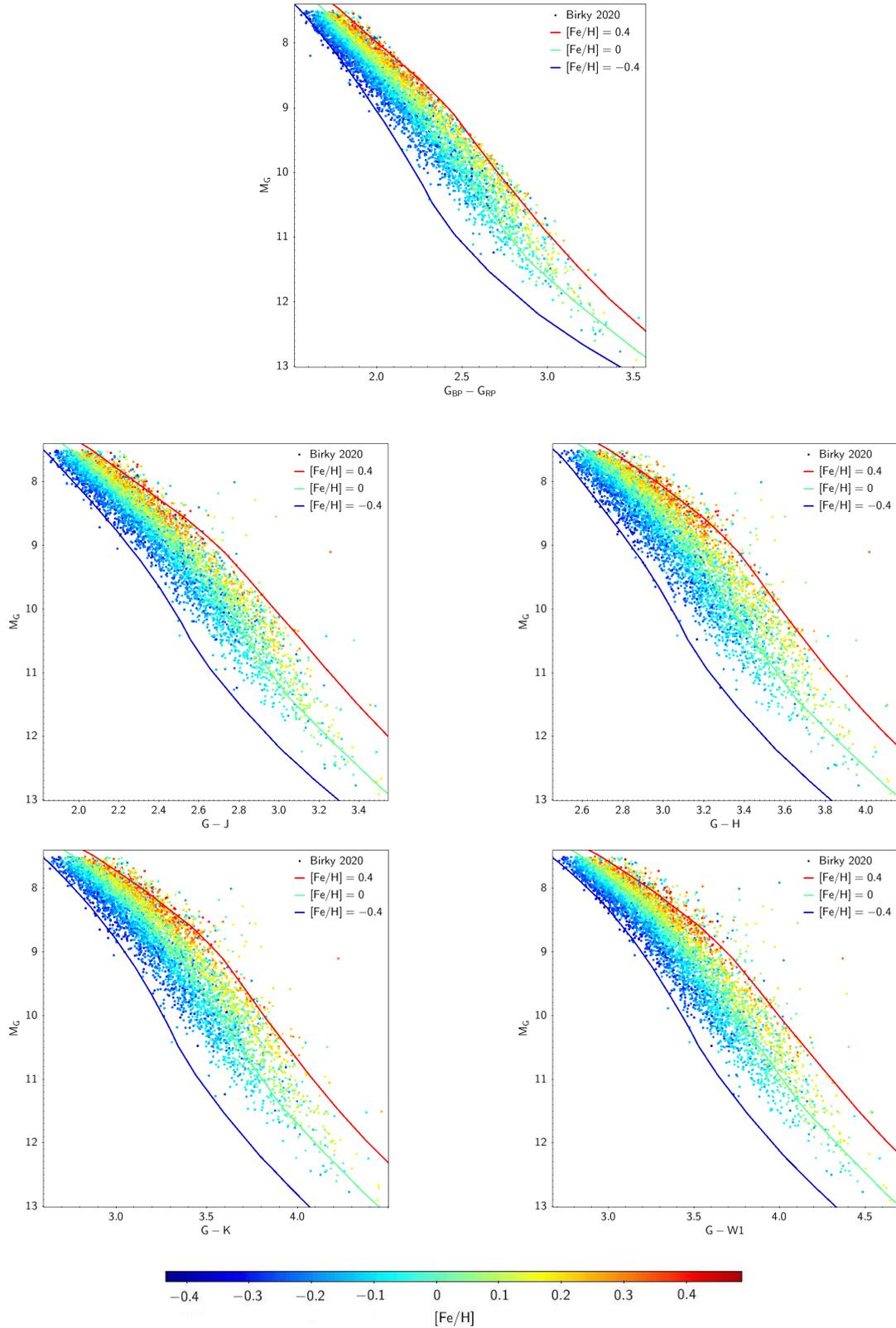


Figura D2: Diagramas color-magnitud con las curvas teóricas de isometalicidad para diferentes valores de $[Fe/H]$.

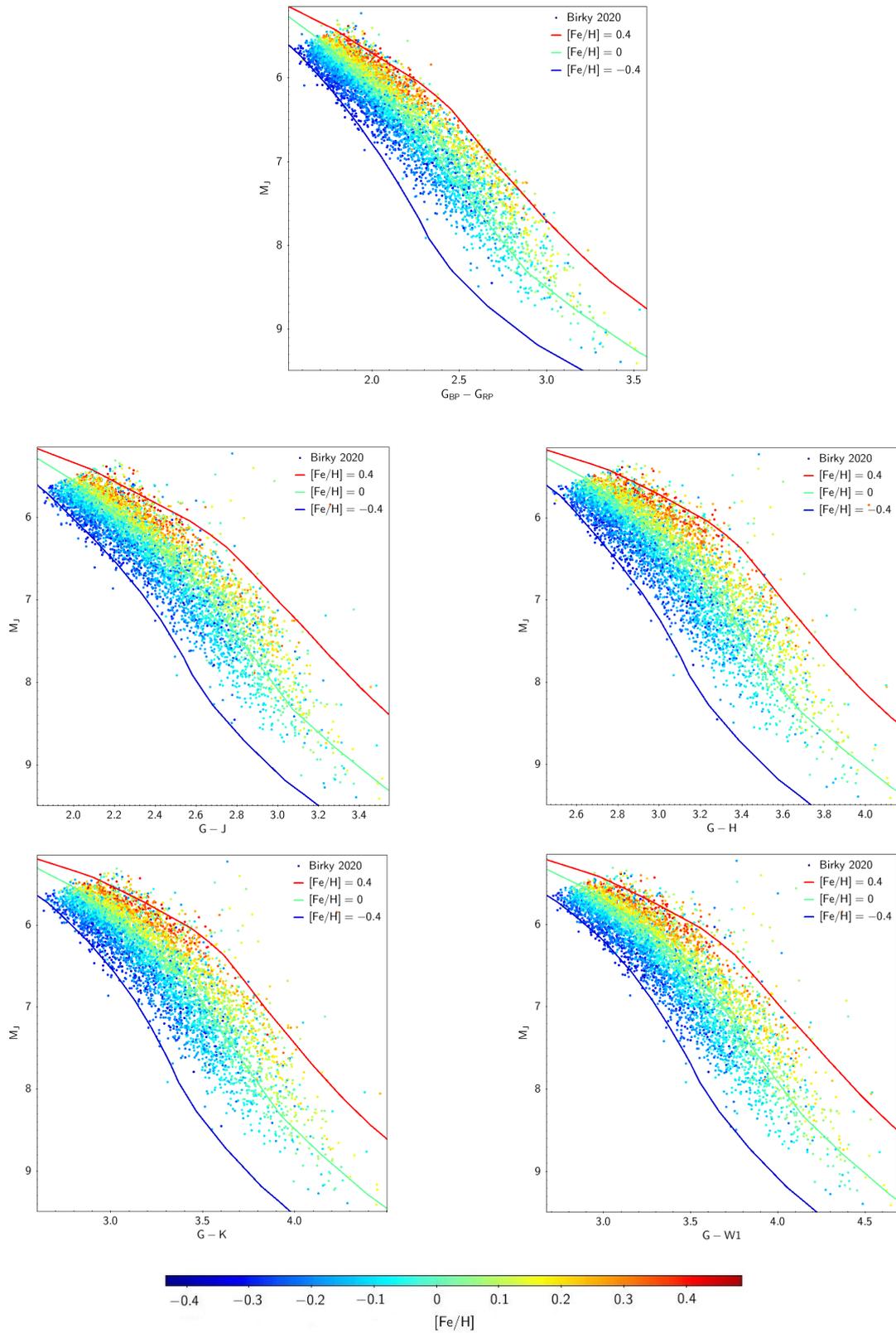


Figura D2: *continuación* Diagramas color-magnitud con las curvas teóricas de isometalicidad para diferentes valores de $[Fe/H]$.

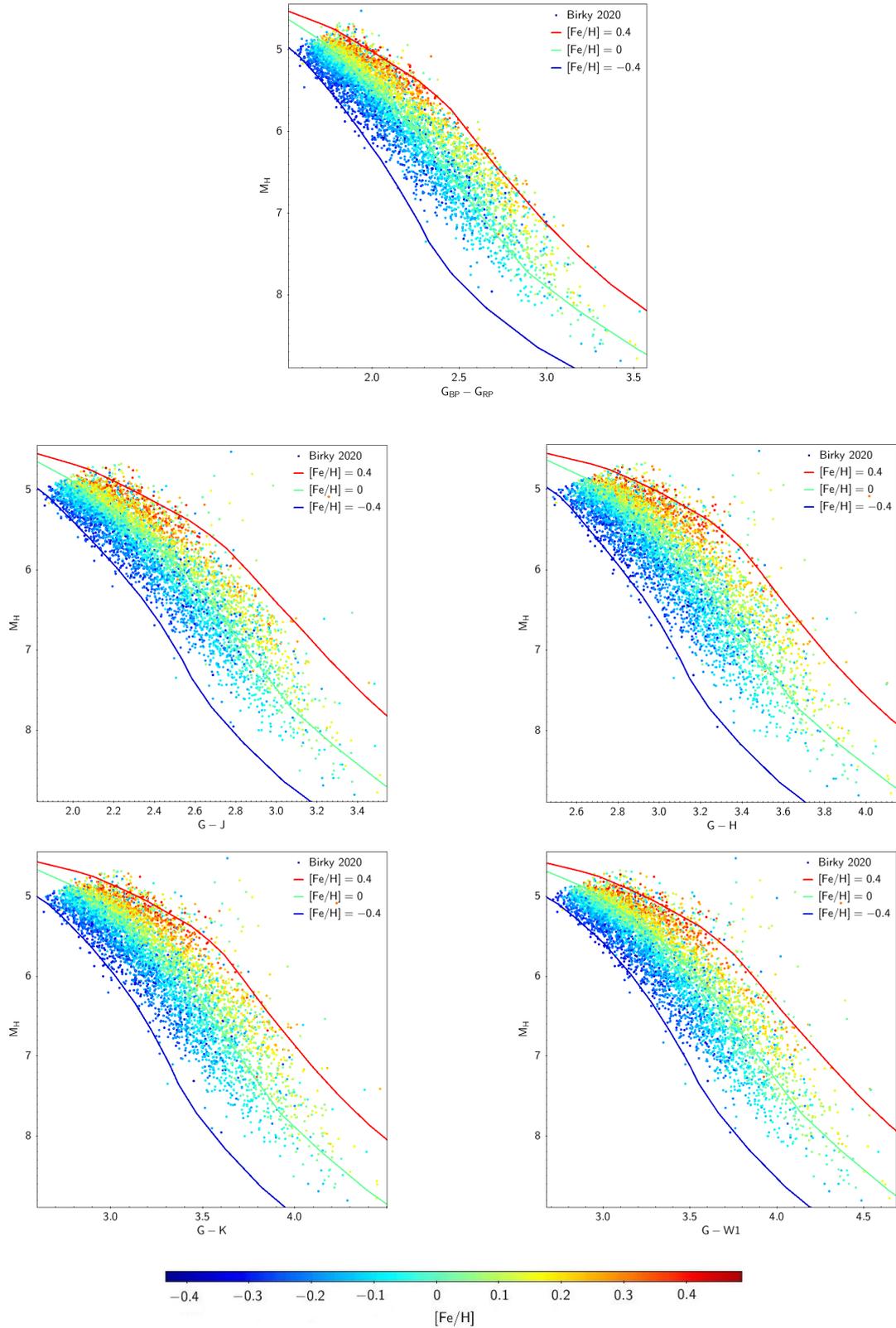


Figura D2: *continuación* Diagramas color-magnitud con las curvas teóricas de isometalicidad para diferentes valores de $[Fe/H]$.

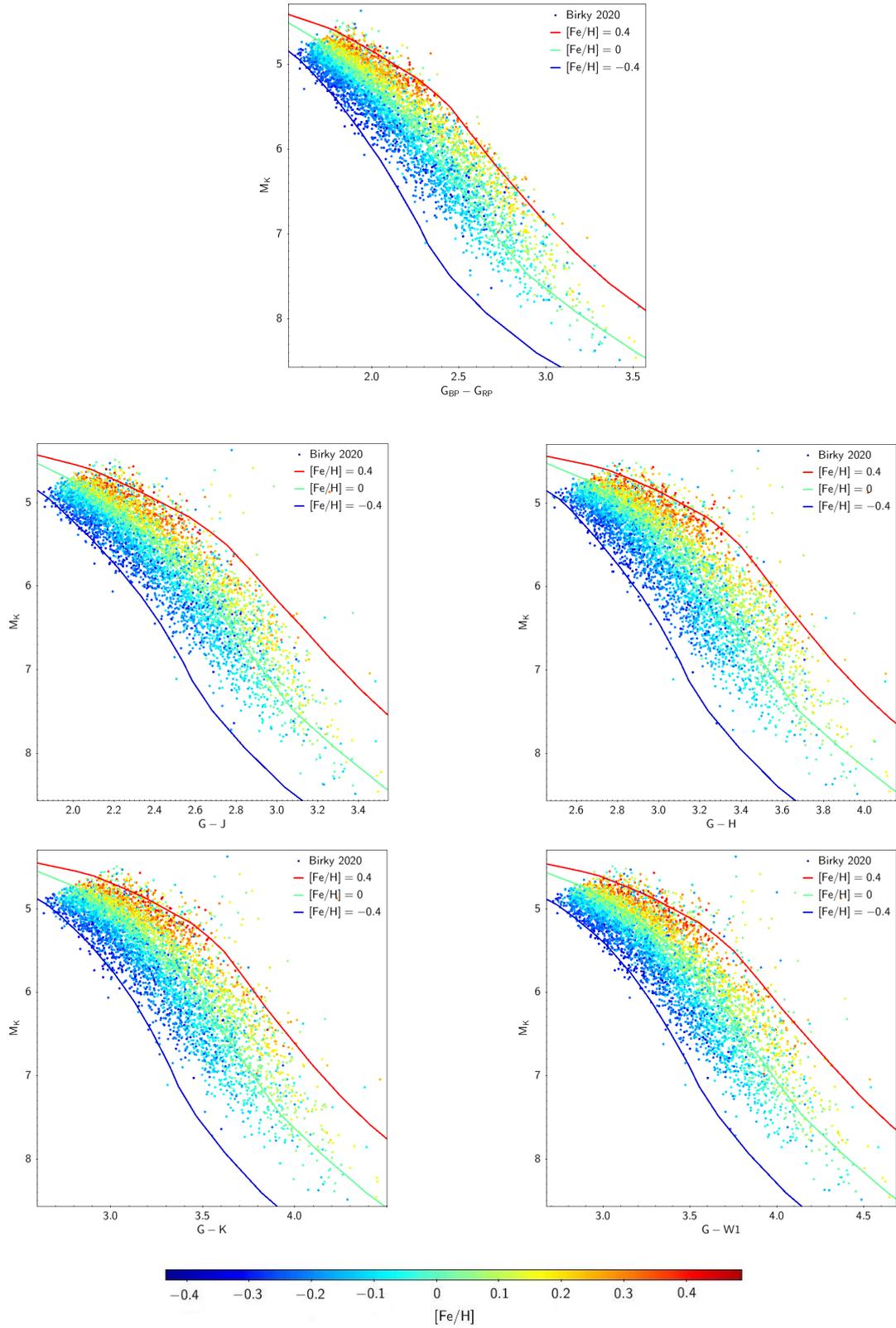


Figura D2: *continuación* Diagramas color-magnitud con las curvas teóricas de isometalicidad para diferentes valores de $[Fe/H]$.

E. Apéndice: Infografía.

Como material complementario, se ha elaborado una infografía interactiva explicando las nociones básicas del tema para un público no especializado: Las enanas M y la clasificación espectral, qué es la metalicidad estelar, los campos de estudio en los que resulta de interés la metalicidad de enanas M, y cómo podemos estimar la metalicidad de estas estrellas. Para la realización de esta infografía se ha hecho uso de la herramienta *genially*, y la versión interactiva puede encontrarse en <https://view.genially.com/5f303595e504170d00f404f4/vertical-infographic-la-metalicidad-de-las-enanas-m>.



Figura E1: Infografía interactiva.