

Artículo original

Análisis espectroscópico de estrellas enanas y gigantes en los cúmulos abiertos IC 2391 y NGC 6475

Spectroscopic analysis of dwarf and giant stars in the open clusters IC 2391 and NGC 6475

Ángela Catalina Franco-Becerra^{1*}, Orlando J. Katime-Santrich², Nelson Vera-Villamizar¹

¹ Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

² Departamento de Ciencias Exatas, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brasil

Resumen

Los cúmulos abiertos son objetos muy útiles en astrofísica; se han utilizado para estudiar la teoría de la formación y la evolución estelar, así como la estructura de la vía láctea. En ese contexto, se analizaron estrellas enanas y gigantes pertenecientes a los cúmulos abiertos IC 2391 y NGC 6475. Los espectros de alta resolución se obtuvieron de la base de datos ESO/Archive. Para obtener los parámetros atmosféricos (T_{eff} , $\log g$, ϵ , [Fe/H]) y las abundancias químicas, se aplicó la hipótesis del equilibrio termodinámico local (*local thermodynamic equilibrium*, LTE). Nuestros resultados corroboraron el comportamiento de las abundancias químicas en el disco galáctico.

Palabras clave: Cúmulos abiertos; Abundancias químicas.

Abstract

Open clusters are very useful objects in astrophysics; they have been used to study the theory of star formation and evolution and the structure of the Milky Way. We analyzed here dwarf and giant stars belonging to the open clusters IC 2391 and NGC 6475. The high-resolution spectra were obtained from the ESO/Archive database. To calculate the atmospheric parameters (T_{eff} , $\log g$, ϵ , [Fe/H]) and chemical abundances we applied the local thermal equilibrium (LTE) hypothesis. Our results confirmed the behavior of the chemical abundances in the galactic disk.

Keywords: Open clusters; Chemical abundances.

Cúmulos abiertos en astrofísica

Los cúmulos abiertos son piezas fundamentales en el estudio de la astrofísica estelar y galáctica. Los análisis detallados de estos objetos arrojan luz sobre importantes campos de la astronomía y son útiles específicamente en el estudio de la dinámica y estructura de la Vía Láctea y de la formación y la evolución de las estrellas.

En el estudio de la dinámica de la Vía Láctea son fundamentales porque ayudan a comprender el movimiento de los brazos espirales y, en general, de grupos de estrellas en movimiento. A partir de su análisis, se obtiene la curva de rotación galáctica con datos precisos de velocidades radiales (V_r), distancias y edades, que ayudan en la determinación de las órbitas estelares. Su dinámica y composición química se utilizan como criterios de pertenencia de las estrellas a un cúmulo o asociación estelar.

En el examen de la estructura galáctica es importante la hipótesis propuesta por **Beers & Carollo** (2009), en el sentido de que nuestra galaxia, de tipo espiral, posee dos discos, uno fino (*thin disc*) y uno grueso (*thick disc*). Esta hipótesis se comprueba a partir de la evolución química y el comportamiento dinámico de los brazos espirales de nuestra galaxia. La evolución de los elementos químicos se estudia a través de gradientes radiales de metalicidad y abundancias químicas. El gradiente radial consiste en la disminución de

Citación: Franco-Becerra ÁC, Katime-Santrich OJ, Vera-Villamizar N. Análisis espectroscópico de estrellas enanas y gigantes en los cúmulos abiertos IC 2391 y NGC 6475. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):259-269, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1891>

Editor: José Gregorio Portilla Barbosa

***Correspondencia:**

Angela Catalina Franco-Becerra;
angela.franco01@uptc.edu.co

Recibido: 18 de marzo de 2023

Aceptado: 30 de mayo de 2023

Publicado en línea: 20 de junio de 2023



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

las abundancias químicas a medida que aumenta la distancia galactocéntrica (R_{gc}), es decir, la distancia entre el centro de nuestra galaxia y el cuerpo celeste analizado. Los resultados hasta hora reportados han venido corroborando la existencia de los dos discos (**Jacobson et al.**, 2016; **Magrini et al.**, 2017; **Magrini et al.**, 2022).

En el caso de la formación y evolución estelar, los cúmulos abiertos son importantes porque permiten verificar una hipótesis fundamental: la formación de estrellas a partir de la misma nube molecular al mismo tiempo. El cálculo de las abundancias químicas es un instrumento necesario para comprobar esta hipótesis, pues asume que las estrellas dentro de una misma nube molecular deben haber evolucionado de manera similar y, por lo tanto, deben tener parámetros estelares y abundancias también similares. La hipótesis de la evolución simultánea debe considerar situaciones adicionales, como el enriquecimiento por efecto de la transferencia de masa en sistemas binarios, situación en la que es posible encontrar estrellas con abundancias muy diferentes a la media del cúmulo (**Santrich et al.**, 2013).

La observación de los gradientes de metalicidad y de las abundancias y el estudio de la evolución estelar, se han beneficiado de la espectroscopia de alta resolución y, más recientemente, de los grandes catálogos (*surveys*), como el Gaia, de la misión de la Agencia Espacial Europea (ESA), que obtiene la distancia, los movimientos propios y las velocidades radiales con notable precisión, aproximadamente de 10^9 estrellas en nuestra galaxia, y como el APOGEE (*Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment*) y el GALAH (*GaLactic Archaeology with HERMES*), los cuales recopilan datos espectroscópicos de estrellas específicas y de la galaxia en general, utilizando el espectrógrafo HERMES (*High-Efficiency and High-Resolution Mercator Echelle Spectrograph*). Estos catálogos han aumentado de manera significativa el número de espectros estudiados, con resultados estadísticamente relevantes para el estudio de la evolución estelar y el disco galáctico.

Los espectros de las estrellas analizadas en el presente estudio corresponden a objetos en fase de secuencia principal (tres estrellas) y en fase gigante RGB (*red giant branch*) (dos estrellas). Los parámetros atmosféricos y las abundancias químicas se calcularon en las cinco estrellas de la muestra para una mejor comprensión de la teoría de la formación y evolución estelar. Con ese fin, se explica el origen de los espectros de alta resolución utilizados en el análisis, y se presenta el proceso de obtención de cada uno de los parámetros atmosféricos y las abundancias químicas.

Datos observacionales

En astrofísica estelar un análisis espectroscópico se entiende como el estudio detallado de las líneas de absorción o emisión de los diferentes elementos químicos presentes en las atmósferas estelares. Dicho análisis se basa en la medición de las anchuras equivalentes, teniendo en cuenta los parámetros electrónicos de las respectivas transiciones atómicas o moleculares. Los espectros pueden ser de baja o alta resolución dependiendo del número de rejillas de difracción del espectrógrafo del telescopio.

El diagrama de color-magnitud (*colour magnitude diagram*, CMD) es la versión observacional del diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R) en el que se relaciona el color con la magnitud de las estrellas pertenecientes al cúmulo. Aquí presentamos el diagrama de color-magnitud de cada uno de los cúmulos analizados (**Figura 1**).

Las estrellas de la muestra se seleccionaron porque de ellas sólo hay estudios fotométricos y astrométricos consistentes, en tanto que su estudio espectroscópico se ha limitado a unos pocos elementos químicos. Se destaca, además, la ausencia de las abundancias de los elementos que se forman vía captura neutrónica y el hecho de que sus resultados se refieren exclusivamente a algunos elementos en algunas estrellas.

Los dos cúmulos estudiados son objetos jóvenes (edades < 1 Gy) y hacen parte del disco interno de la Vía Láctea ($d < 1$ Kpc). Los valores de metalicidad del IC 2391 se obtuvieron vía calibraciones fotométricas. Cabe resaltar, asimismo, que en él la estrella E-44 (**Cantat-Gaudin et al.**, 2020) no está catalogada, por lo que se la ubicó en los respectivos CMD (**Figura 1**).

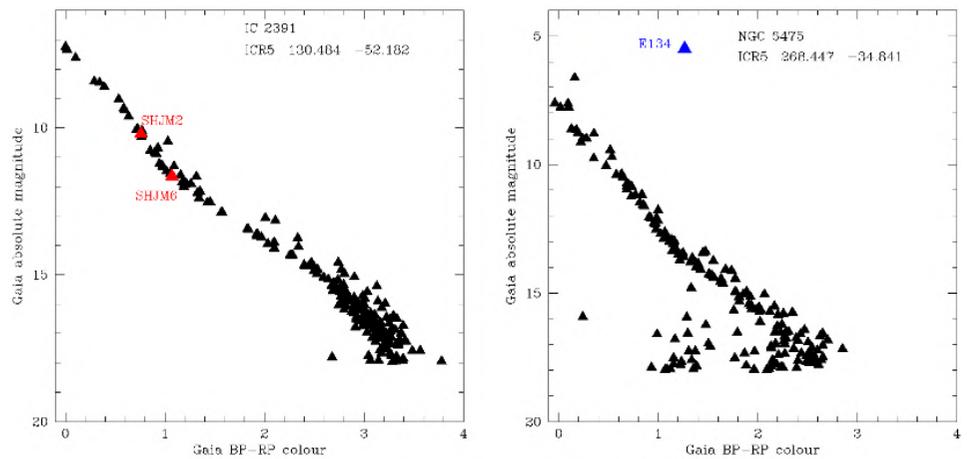


Figura 1. Diagramas de color-magnitud (CMD) de los cúmulos de la muestra. Los triángulos rojos (IC 2391) y azules (NGC 6475) indican las estrellas estudiadas en este trabajo, en tanto que los negros son el resto de las estrellas pertenecientes a cada cúmulo. Fotometría obtenida de la colaboración Gaia (Cantat-Gaudin *et al.*, 2020)

Los espectros de alta resolución se obtuvieron a partir de las bases de datos de *ESO/Archive* (<http://archive.eso.org/cms.html>) (Figura 2), específicamente de los espectrógrafos FEROS, HARPS y UVES, instalados en los telescopios ubicados en el observatorio de La Silla-Paranal. El poder de resolución espectral de los espectrógrafos es de 48.000, 120.000 y 80.000 (región azul) y de 110.000 (región roja), respectivamente. Nuestro grupo ya ha hecho observaciones utilizando esos mismos espectrógrafos. La muestra analizada en este estudio contiene estrellas pertenecientes a los cúmulos IC 2391 y NGC 6475, cuyos parámetros observacionales se obtuvieron del portal WEBDA (<https://webda.physics.muni.cz>) (Tabla 1), en tanto que la información de las estrellas de la muestra proviene de la base de datos SIMBAD (Tabla 2).

En todos los casos la señal ruido (S/N) se mantuvo en ≥ 150 , con el fin de obtener parámetros y abundancias con la mayor precisión posible, es decir, incertidumbres de $\leq 0,05$ dex.

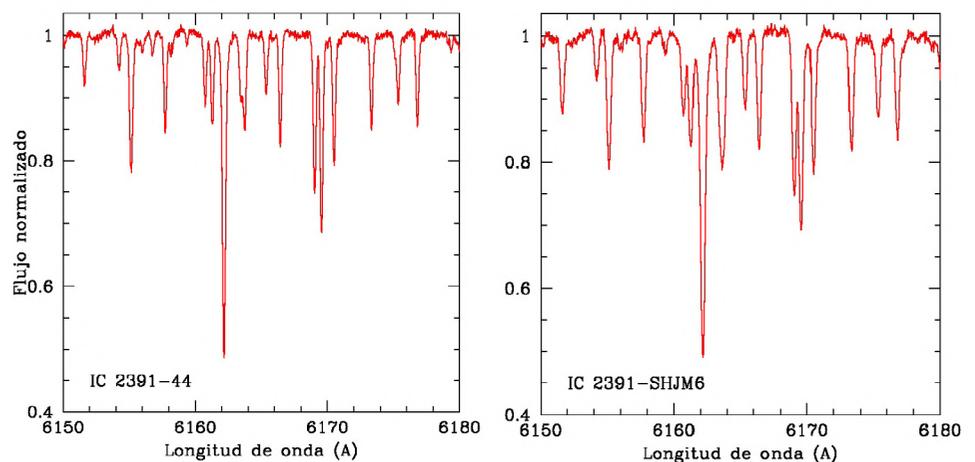


Figura 2. Espectros analizados de algunas estrellas de la muestra en el rango de 6155-6175 Å donde se pueden identificar líneas de CaI(λ 6161,29); NaI(λ 6160,75), y FeI(λ 6157,72)

Tabla 1. Parámetros observacionales de los cúmulos analizados en este trabajo. Donde las variables α y δ representan la ascensión recta y la declinación. d es la distancia heliocéntrica y $E(B - V)$, el enrojecimiento. La edad de cada cúmulo se expresa en Gyrs (10^9 años) y la metalicidad fotométrica como $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{fot}}$.

Cúmulo	IC 2391	NGC 6475
α	084032	175351
δ	-530200	-344736
d [pc]	175	301
$E(B - V)$ [mag]	0,008	0.103
Edad [Gyrs]	0,03	0.30
$[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{fot}}$ [dex]	-0,09	—

Tabla 2. Parámetros observacionales de la muestra de estrellas. Identificación: número Gaia DR3; coordenadas: α y δ ; filtro V e índice de color ($B - V$) de la banda Johnson

Estrella	Gaia DR3	α	δ	V	B-V
IC 2391-44	5318630973868090496	08 45 34,1	-52 25 08,4	9,74	0,46
IC2391-SHJM 6	5318545521198976000	08 39 53,0	-52 57 56,8	12,75	0,86
IC2391-SHJM 2	5318487208427013632	08 41 20,2	-52 50 11,2	10,3	0,4
NGC 6475-58	—	17 53 23,5	-34 53 42,4	5,60	1,09
NGC 6475-134	4041599414270468480	17 52 19,7	-34 25 00,6	5,85	1,1

Metodología

El primer paso en el análisis de cualquier espectro implica la identificación del continuo, el cual se define como un espectro sin líneas de absorción ni emisión, cuyo trazo pasa sobre las alas de las respectivas líneas. El segundo paso es la identificación de las líneas de cada elemento químico a partir de una lista previamente medida en un laboratorio de investigación espectroscópica. El tercer paso consiste en la correcta identificación de la longitud de onda de cada una de esas líneas, teniendo en cuenta el corrimiento Doppler. Por último, debe normalizarse el espectro observado llevando el flujo relativo al valor de 1,0, teniendo como referencia el espectro continuo.

La intensidad de las líneas se analiza a partir del ancho equivalente, el cual es el área rectangular bajo el perfil de la línea. La ecuación que permite calcular las anchuras equivalentes está dada por:

$$\log\left(\frac{\omega}{\lambda}\right) = \log\left(\frac{\pi e^2 N_r / N_E}{mc^2 Z(T)_I} N_H\right) + \log A + \log(gf\lambda) - \left(\frac{5040}{T}\right)x - \log kv \quad (1)$$

donde la fracción (ω/λ) es la anchura equivalente reducida, la cual se utiliza para normalizar el corrimiento Doppler; m_e y e son la masa y la carga del electrón, respectivamente; c es la velocidad de la luz, $Z(T)$ la función de partición, N_r la densidad de átomos en el r -ésimo estado de ionización, N_E la densidad de átomos de una especie determinada E, N_H la densidad de átomos de hidrógeno, A la abundancia del elemento que genera la línea medida, g el peso estadístico, f la fuerza del oscilador de cada línea, λ la longitud de onda del respectivo elemento, T la temperatura de excitación, x el potencial de excitación y kv el coeficiente de absorción del continuo.

Por consiguiente, las anchuras equivalentes dependen del perfil de las líneas, y este, a su vez, de las variables físicas que caracterizan la atmósfera: temperaturas efectivas, gravedades superficiales, abundancias químicas y opacidades. Las medidas de las anchuras equivalentes determinadas en este estudio se obtuvieron mediante el ajuste gaussiano utilizando la tarea `ondespect/plot/pyraf` (Pyraf es la versión en Python del código IRAF desarrollado por NOAO y disponible en <https://pyraf.readthedocs.io/en/latest/>).

Tal como se ve en la ecuación 1, el ancho equivalente aumenta en forma proporcional a la abundancia química, así, para calcular la cantidad de átomos de un elemento en fase neutra se utiliza la ecuación de Boltzman, en tanto que para determinarla en un elemento en estado de ionización se utiliza la ecuación de Saha.

Las atmósferas estelares conectan las observaciones con el resto de la astrofísica estelar, y constituyen la herramienta para comprender las abundancias estelares. Un espectro estelar no está relacionado de forma simple con el estado físico de la atmósfera, existen muchas variables que requieren un modelado cuidadoso. A partir de un modelo atmosférico podemos deducir propiedades de una estrella, como la temperatura, la gravedad superficial, el radio, la composición química, la tasa de rotación, etc., y, por ende, las propiedades termodinámicas de la propia atmósfera.

Los modelos atmosféricos requieren algunas simplificaciones o suposiciones para el análisis de espectros estelares, específicamente: la geometría plano-paralela, que permite que todas las variables físicas sean función de una sola coordenada espacial; el equilibrio hidrostático, sin aceleraciones a gran escala en la fotosfera y comparable con la gravedad de la superficie sin pérdida significativa de masa; la ausencia de estructuras finas como granulaciones o manchas, y la necesidad de no tener en cuenta los campos magnéticos. Aquí utilizamos los modelos atmosféricos de **Kurucz & Peytremann (1975)**, los cuales dividen la atmósfera estelar en 72 capas plano, paralelas bajo condiciones de equilibrio termodinámico local (LTE), utilizando la última versión de esa cuadrícula atmosférica (disponible en <http://kurucz.harvard.edu>).

Hipótesis LTE

Cuando el equilibrio termodinámico se aplica a volúmenes relativamente pequeños de la fotosfera, es decir, con dimensiones de orden 1 en profundidad óptica, se tiene una aproximación local termodinámica que supone que los componentes de un gas (átomos, electrones, fotones) interactúan lo suficiente como para que la energía se distribuya por igual entre todas las formas posibles (cinética, radiante, excitación, etc.). A partir de este concepto y de la física presente en el modelo atmosférico utilizado, los parámetros atmosféricos estelares pueden calcularse de la siguiente forma.

- Temperatura efectiva (T_{eff}), presente en la superficie estelar: bajo condiciones de LTE, la temperatura de excitación en la atmósfera es aproximadamente igual a la temperatura superficial. Su valor se obtiene a partir de la independencia entre las abundancias de FeI y el potencial de excitación de cada línea, tal como lo muestra la ecuación 2:

$$T_{eff} = \frac{d(\delta A_i^{FeI})}{d(x_{exc})} \approx 0.00 \quad (2),$$

donde X_{exc} es el potencial de excitación y δA_i^{FeI} la abundancia diferencial de FeI, es decir, la que se obtiene a partir de:

$$\delta A_i^{FeI} = A_{i,*}^{FeI} - A_{i,\odot}^{FeI} \quad (3),$$

donde $A_{i,*}^{FeI}$ representa la abundancia absoluta de FeI en la línea i en la estrella A^{FeI} , en tanto que $A_{i,\odot}^{FeI}$ representa también la abundancia de FeI en la misma línea pero en el espectro solar de Juno.

- Velocidad microturbulenta (ξ): se define como la velocidad que presenta el gas en la atmósfera estelar; su valor influye en el ensanchamiento de las líneas. Se obtiene a partir de la pendiente 0,00, o independencia entre la abundancia de FeI y las anchuras equivalentes reducidas:

$$\xi = \frac{d(\delta A_i^{FeI})}{d(w/\lambda)} \approx 0.00 \quad (4).$$

- Gravedad superficial ($\log g$): la gravedad en la fotosfera estelar que, bajo la aproximación LTE, está relacionada con la presión electrónica. Sus efectos se notan en el perfil de la línea, específicamente en el alargamiento. El valor se puede determinar fotométricamente a partir del brillo estelar y espectroscópicamente por el equilibrio de ionización entre las abundancias medias de FeII y FeI, es decir:

$$\langle A_i^{FeII} \rangle - \langle A_i^{FeI} \rangle \approx 0.00 \quad (5),$$

donde $\langle A_i^{FeII} \rangle$ y $\langle A_i^{FeI} \rangle$ son las abundancias medias de *FeII* y *FeI*, respectivamente.

• **Metalicidad ($[Fe/H]$):** se define como la proporción de metales presentes en la atmósfera estelar. En astronomía se le da el nombre de metales a todos los elementos distintos al hidrógeno, los cuales se pueden medir espectroscópicamente gracias a las líneas de absorción de *FeI* y *FeII* presentes en el espectro estelar. Matemáticamente se obtiene a partir de la ecuación 6:

$$[Fe/H] = \log\left(\frac{A^{Fe}}{A^H}\right)_* - \log\left(\frac{A^{Fe}}{A^H}\right)_\odot \quad (6),$$

donde $[Fe/H]$ es la metalicidad; A^{Fe} y A^H son las abundancias de hierro e hidrógeno; los símbolos * y \odot representan la estrella de interés y el Sol, respectivamente. La metalicidad, y en general las abundancias solares, se toman como referencia en el análisis. De hecho, la metalicidad solar es $[Fe/H]_\odot = 0,00$ dex. $[Fe/H]$ tiene un valor inicial de entrada en el análisis espectroscópico, siendo este una interpolación en la cuadrícula de modelos atmosféricos de **Kurucz** (1981) bajo condiciones de LTE.

Listas de líneas y modelo solar

En la actualidad el Sol es nuestro referente cuando se estudian las otras estrellas. Para obtener las abundancias solares, se utilizaron las líneas del espectro de Juno (Juno es un asteroide cuyo espectro se obtiene vía reflexión del Sol), el cual se tomó con el espectrógrafo HARPS de ESO. El modelo atmosférico solar usado como referencia en nuestro análisis, se calculó con base en los modelos atmosféricos de Kurucz bajo condiciones de LTE. Ese modelo es el siguiente: $T_{eff} = 5777$ K, $\log g = 4,44$ dex y $\zeta = 0,75$ kms^{-1} . Para más información de los modelos solares y su comparación, así como de las líneas de absorción estudiadas en cada una de las estrellas de la muestra, puede consultarse el artículo de **Katime-Santrich et al.** (2022).

Los parámetros atmosféricos y las abundancias químicas se obtuvieron con la ayuda de la última versión (2019) del *software* espectral Moog (disponible en <https://www.as.utexas.edu/chris/moog.html>). Este programa determina los parámetros y abundancias finales en la estrella a partir de las anchuras equivalentes previamente calculadas y los modelos de Kurucz mediante un proceso iterativo que requiere de un modelo atmosférico inicial hasta que la solución bajo las condiciones LTE se cumpla. El proceso iterativo se hace con el *software* qoyllur-quipu (última versión disponible en <https://github.com/astroChasqui/q2>), el cual recurre al programa Moog para calcular diferentes modelos hasta que las ecuaciones 2 a 6 se cumplan simultáneamente. En todo el proceso se aplicó un análisis línea a línea en relación con el espectro solar de Juno para evitar la dependencia de las abundancias con el $\log gf$ de cada línea.

Resultados y análisis

Los parámetros atmosféricos obtenidos se encuentran en los siguientes intervalos: $T_{eff} = [4435, 5575]K$; $\log g = [1,62, 4,57]$ dex; $\zeta = [1,12, 4,25]$ km/s; $[Fe/H] = [-0,26, 0,14]$ dex.

Los resultados muestran que nuestras estrellas son de los tipos espectrales F, G, K y de metalicidad de tipo solar. Tal como se muestra en la **tabla 3**, las tres estrellas dentro del IC 2391 corresponden a estrellas enanas, pues presentan gravedades superficiales de $\log g > 4,0$ dex. Esto significa que la fase evolutiva de las estrellas del IC 2391 es la secuencia principal, tal como está indicado en el CMD de la **figura 1** (izquierda), en tanto que en el NGC 6475 las estrellas son gigantes RGB porque sus gravedades superficiales son $\log g < 3,0$. Los valores de la gravedad superficial son típicos de las estrellas que están en el primer ascenso de la fase gigante, la llamada RGB. Es decir que las estrellas del NGC 6475 son estrellas más evolucionadas que las del IC 2391 porque ya pasaron la fase de secuencia principal.

Los resultados obtenidos se presentan en dos partes: los elementos formados vía fusión nuclear y aquellos formados vía captura neutrónica lenta (procesos).

Tabla 3. Parámetros atmosféricos para cada estrella de la muestra. T_{eff} en Kelvins, ($\log g$) y $[Fe/H]$ en unidades logarítmicas dex, (ϵ) en km/s. La incertidumbre σ corresponde a la desviación estándar.

Estrella	$T_{eff} \pm \sigma$	$(\log g) \pm \sigma$	$[FeI/H] \pm \sigma$ (#)	$[FeII/H] \pm \sigma$ (#)	$(\zeta) \pm \sigma$
IC 2391-44	6575±52	4,41±0,06	-0,02±0,03 (49)	-0,02±0,03 (11)	2,00±0,09
IC 2391-SHJM6	5426±71	4,02±0,15	-0,05±0,05 (54)	-0,05±0,10 (6)	4,24±0,38
IC 2391-SHJM2	6104±62	4,46±0,13	0,17±0,05 (53)	0,17±0,06 (10)	2,29±0,17
NGC 6475-58	4981±45	2,56±0,11	0,06±0,03 (77)	0,07±0,00 (13)	2,12±0,07
NGC 6475-134	4963±59	2,15±0,17	0,08±0,06 (71)	0,08±0,09 (13)	2,28±0,10

Elementos formados vía fusión nuclear

En las estrellas de la secuencia principal (enanas) y aquellas en la fase RGB (gigantes) los elementos químicos se originan por medio de la fusión nuclear; este proceso se da a partir de tres tipos de reacción: la cadena protón-protón, el ciclo carbono nitrógeno oxígeno y los procesos alfa. Consecuentemente, dada la fase evolutiva de las estrellas analizadas en este trabajo, encontramos abundancias de los siguientes elementos: Al, Mg, Na, Si, Ca, Ti, Cr, Ni.

En la comparación de este trabajo y el de **Luck (2015) (Figura 3)**, se comprobó que las abundancias químicas de los elementos que se forman vía fusión nuclear concuerdan con las abundancias químicas calculadas para las estrellas de campo que se encuentran en el disco galáctico. Este resultado es importante porque el trabajo de **Luck (2015)** analiza

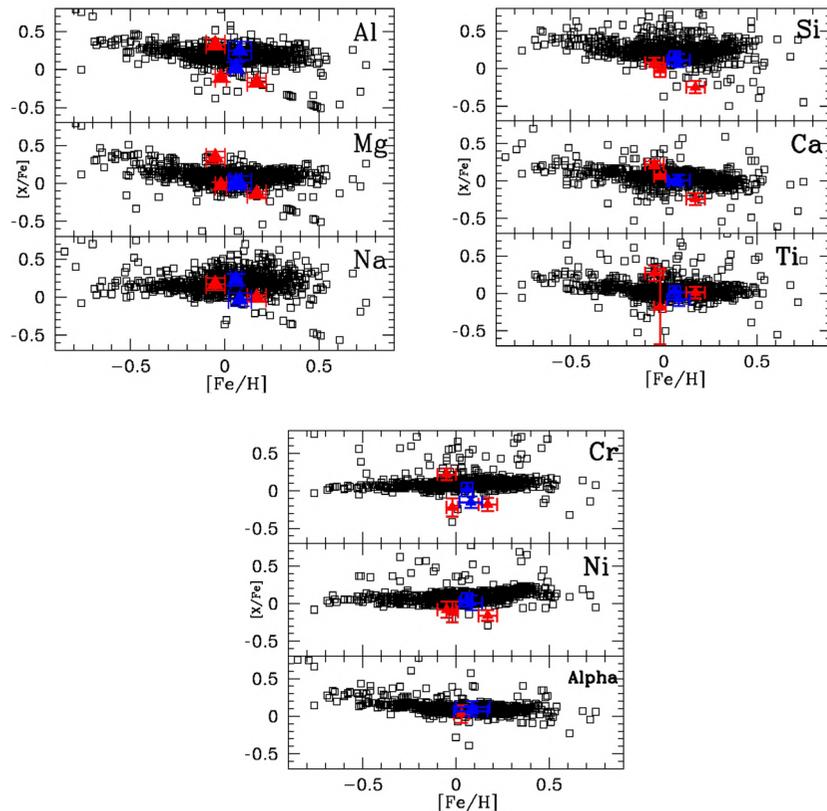


Figura 3. Abundancias químicas de los elementos formados vía fusión nuclear en la muestra. Los triángulos rojos representan las estrellas enanas de IC 2391; los azules, las gigantes de NGC 6475, y los cuadrados son las gigantes de campo de **Luck (2015)**

más de 1.000 estrellas en forma homogénea a partir de la espectroscopia de alta resolución. La muestra de **Luck** (2015) está limitada a estrellas del disco interno o de la denominada región local. Mas recientemente, **Jacobson et al.** (2016) y **Delgado-Mena et al.** (2019) analizaron también alrededor de 1.000 estrellas y encontraron resultados muy similares a los de **Luck** (2015) y, por ende, también muy similares a los obtenidos en nuestro estudio.

Proceso-s

Este es el proceso de formación de elementos a partir de la captura neutrónica y no de la fusión nuclear. El proceso-s se presenta en las estrellas gigantes de la rama asintótica gigante (*asymptotic giant branch, AGB*), y aunque nuestras estrellas no se encuentran en esa fase, los elementos pesados se encuentran en las fotosferas de las estrellas enanas y gigantes RGB debido a que heredan parte de la contaminación inicial de la nube molecular donde se formaron. Los elementos pesados, es decir, los formados en el proceso-s, calculados en este trabajo fueron Y, Zr, La, Cey, Nd.

En la **figura 4** se observa que, de forma similar al proceso alfa, los elementos pesados del cúmulo NGC 6475 también están en la tendencia evolutiva del disco galáctico. La situación es muy diferente en el IC 2391, pues fue mucho más difícil obtener estas abundancias debido a la ausencia de varias líneas de estos elementos. Este hecho se hizo evidente cuando la fracción [s/Fe] se comparó en los dos cúmulos.

Discusión

A partir del análisis hecho por **Cantat-Gaudin et al.** (2020), se encontró que las estrellas IC 2391–SHJM2 e IC 2391–SHJM6 tienen una alta probabilidad ($\approx 1,0$) de pertenecer al cúmulo; sin embargo, el análisis espectroscópico evidenció que las abundancias químicas de las dos estrellas son muy diferentes. Este comportamiento, que en teoría contradice el resultado de **Cantat-Gaudin et al.** (2020), podría explicarse porque se ha propuesto la estrella IC 2391–SHJM2 como candidata a ser una binaria espectroscópica (**Mermilliod et al.**, 2009). No obstante, al analizar las velocidades radiales calculadas por nosotros y las previamente reportadas en la literatura, encontramos que no se han producido diferencias significativas en los últimos 20 años, tal como se aprecia en la **tabla 4**.

Una explicación alternativa de las diferencias entre las abundancias de la IC 2391–SHJM2 y la IC 2391–SHJM6 se fundamentaría en las altas velocidades rotacionales de $V_{\text{seni}} = 10,1$ y $12,6$ km/s, respectivamente, reportadas en la literatura (**Mermilliod et al.**, 2009; **De Silva et al.**, 2013).

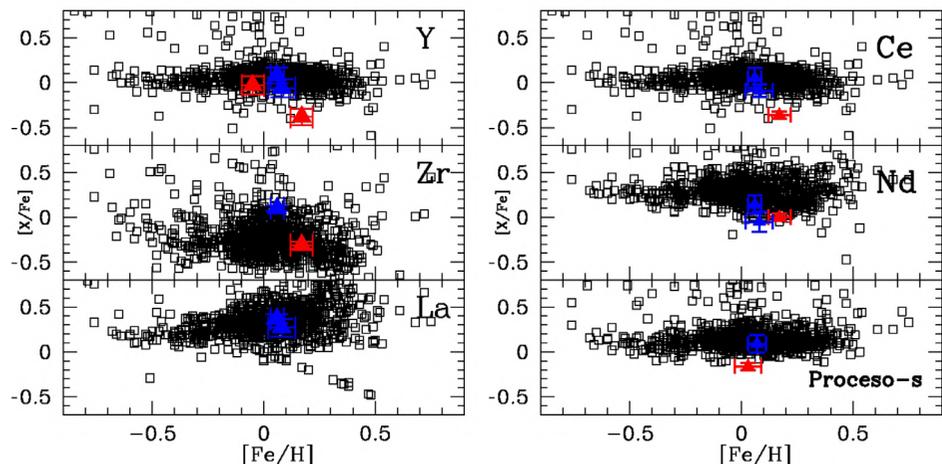


Figura 4. Abundancias químicas de los elementos del proceso-s. Se usan los mismos símbolos de la Figura 3. Proceso-s significa la media de los elementos mencionados

Tabla 4. Velocidades radiales de las estrellas de la muestra (V_{rad}), donde V_{lit1} , V_{lit2} y V_{lit3} son las velocidades radiales reportadas en **Gaia Collaboration** (2018, 2022 y en **Mermilliod et al.** (2009). Todas las velocidades se expresan en km/s.

Estrella	$V_{\text{rad}} \pm \sigma$	V_{lit1}	V_{lit2}	V_{lit3}
IC2391-SHJM2	$12,59 \pm 2,15$	14,33	15,25	-
IC2391-SHJM6	$10,96 \pm 1,25$	14,70	16,85	15,22
IC2391-E44	$29,69 \pm 6,30$	25,48	19,0	-
NGC 6475-E58	$7,83 \pm 1,24$	-7,0	-19,0	-22,90
NGC 6475-E134	$10,02 \pm 1,46$	-15,57	-15,57	-22,50

Estos valores son típicamente altos para estrellas F, G, K de la secuencia principal, tal como lo explican **Santrich et al.** (2013). Los valores típicos para estrellas de la secuencia principal y las de fase gigantes presentan velocidades rotacionales menores a 7 km/s a partir de los 10 km/s. El efecto de la rotación empieza a notarse en el perfil de las líneas, disminuyendo su profundidad y alargando sus alas.

La estrella IC 2391-E44 tiene abundancias de algunos elementos similares a las otras dos integrantes del cúmulo. En otros casos, presenta abundancias similares solamente a las de una de las estrellas integrantes y, en otro caso, completamente diferentes a los otras dos integrantes del cúmulo. Este comportamiento se ilustra en las **figuras 3 y 4**. Según el análisis de **Cantat-Gaudin et al.** (2020), esta estrella no pertenece a este cúmulo, hecho que puede verse reforzado por la ausencia total de líneas de los elementos del proceso-s.

En términos generales, las dos estrellas del cúmulo NGC 6475 presentan abundancias similares, con la excepción del sodio y el aluminio, cuya diferencia es mayor a 0,20 dex. El caso del sodio se explicaría porque en algunas estrellas las líneas de absorción ((5148,84, 5682,63, 6154,23, 6170,75) Å) sufren desvíos del LTE, lo cual ocasiona aumento en la profundidad de las líneas y, por lo tanto, un incremento considerable en el valor de las abundancias. La estrella NGC 6475-134 tiene una probabilidad de $\approx 0,8$ de pertenecer al cúmulo según **Cantat-Gaudin et al.** (2020), pero la estrella NGC 6475-E58 no está catalogada y no se incluyó como miembro de ese cúmulo. Las velocidades radiales medidas en el presente estudio evidenciaron diferencias mayores a 10 Km/s (**Tabla 4**), lo cual podría indicar binariedad o pertenencia a un sistema múltiple, tal como está reportado por **Feinstein** (1961) y **Mermilliod et al.** (2008), aunque esto no se reflejó en nuestro análisis espectroscópico.

Conclusiones

En este trabajo hemos analizado cinco estrellas de tipo espectral FGK pertenecientes a los cúmulos IC 2391 y NGC 6475. Las tres estrellas del primer cúmulo presentan parámetros atmosféricos correspondientes a objetos en fase de secuencia principal, en tanto que los parámetros de las estrellas del segundo cúmulo corresponden a estrellas en fase gigante RGB. Para la obtención de los parámetros y las abundancias utilizamos como metodología de trabajo la hipótesis LTE. Asimismo, discutimos en el contexto de la evolución estelar y la estructura galáctica los resultados obtenidos en las estrellas de la muestra.

- El cúmulo IC 2391 presentó la mayor dispersión entre sus estrellas al analizar las fracciones de abundancia $[X/Fe]$. Además, las abundancias de sus elementos alfa se encontraron en el límite dentro de la tendencia reportada para las gigantes de campo y de los cúmulos abiertos estudiados por **Luck** (2015). También fue evidente que este cúmulo es pobre en elementos del proceso-s, comparado con los otros cúmulos de la muestra, las gigantes de campo y los cúmulos analizados por **Luck** (2015). Estos resultados indican que, muy probablemente, el cúmulo está dentro del disco interno de la Vía Láctea y que su formación ocurrió en un ambiente poco contaminado por las generaciones

previas de estrellas. Sin embargo, esto no es concluyente de manera absoluta, ya que las altas velocidades rotacionales pueden alterar el perfil de las líneas y, por lo tanto, las abundancias de IC 2391–SHJM2 e IC 2391–SHJM6, las cuales tienen una probabilidad de $\approx 1,0$ de estar dentro del cúmulo. Por ello se requiere el estudio de más estrellas F, G, K con alta probabilidad de pertenecer a este cúmulo, para así determinar la veracidad del comportamiento detectado a partir del análisis espectroscópico que hicimos.

- Como ya lo habíamos anotado, en el cúmulo NGC 6475 se registró una dispersión mínima en las abundancias de las estrellas NGC 6475–58 y NGC-6475 – 134, por lo que a partir del análisis espectroscópico puede afirmarse que la estrella NGC 6475–58 debe estar dentro del cúmulo. La binariedad y multiplicidad reportadas deben analizarse más cuidadosamente con base en observaciones en diferentes épocas. De todas maneras, el que realmente tengan compañeras estelares no parece estar afectando sus abundancias químicas. Las abundancias de sus elementos alfa y del proceso-s corroboran que el cúmulo está dentro de la tendencia marcada por el disco galáctico interno.

- Los resultados muestran que deben estudiarse más estrellas por espectroscopia de alta resolución en los dos cúmulos de la muestra, para así despejar estas dudas y contribuir al estudio de los cúmulos en el contexto de la evolución química del disco galáctico. Normalmente, en la literatura se analizan pocas estrellas en cada cúmulo; en algunos pocos trabajos publicados se ha demostrado que cuando más de 10 estrellas por cúmulo se analizan, es posible descubrir todo tipo de objetos. Por ejemplo, en su estudio, **Sales-Silva et al.** (2014) reportaron la existencia de estrellas de bario y rezagadas amarillas dentro de los cúmulos NGC5822, NGC 3680 y NGC 2360 que, hasta ahora, son las únicas estrellas de esos tipos reportadas en cúmulos abiertos.

Agradecimientos

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por permitir el desarrollo de este trabajo; a las bases de datos internacionales de la ESO, WEBDA y SIMBAD, cuyos datos y permisos de uso fueron fundamentales en esta tesis, y a los evaluadores anónimos, por sus importantes contribuciones para mejorar la calidad del estudio.

Contribución de los autores

ACFB y OKS trabajaron por igual en el análisis espectroscópico y posterior discusión de los resultados obtenidos. NVV participó en las discusiones y colaboró con la elaboración del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener conflicto de intereses por la publicación de este trabajo.

References

- Beers, T.C., Carollo, D.** (2009). Galactic archaeology: Overcoming great barriers. *Nature Physics*, 5(7), 463-464.
- Cantat-Gaudin, T., Anders, F., Castro-Ginard, A., Jordi, C., Romero-Go´mez, M., Soubiran, C., Casamiquela, L., Tarricq, Y., Moitinho, A., Vallenari, A., Bragaglia, A., Krone-Martins, A., Kounkel, M.** (2020). Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters. *Astronomy and Astrophysics*, 640, Article A1, A1. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038192>
- De Silva, G. M., D’Orazi, V., Melo, C., Torres, C. A. O., Gieles, M., Quast, G. R., Sterzik, M.** (2013). Search for associations containing young stars: chemical tagging IC 2391 and the Argus association. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 431(2), 1005-1018. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt153>
- Delgado-Mena, E., Moya, A., Adibekyan, V., Tsantaki, M., González-Hernández, J. I., Israelian, G., Davies, G. R., Chaplin, W. J., Sousa, S. G., Ferreira, A. C. S., Santos, N. C.** (2019). Abundance to age ratios in the HARPS-GTO sample with Gaia DR2. Chemical clocks for a range of [Fe/H]. *Astronomy and Astrophysics*, 624, A78. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834783>

- Feinstein, A.** (1961). Spectroscopic Observations of M 7. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 73(435), 452. <https://doi.org/10.1086/127728>
- Gaia Collaboration.** (2018). VizieR Online Data Catalog: Gaia DR2 (Gaia Collaboration, 2018). *VizieR Online Data Catalog*, Article I/345.
- Gaia Collaboration.** (2022). VizieR Online Data Catalog: Gaia DR3 Part 1. Main source (Gaia Collaboration, 2022). *VizieR Online Data Catalog*, Article I/355.
- Jacobson, H. R., Friel, E. D., Jilková, L., Magrini, L., Bragaglia, A., Vallenari, A., Tosi, M., Randich, S., Donati, P., Cantat-Gaudin, T., Sordo, R., Smiljanic, R., Overbeek, J. C., Carraro, G., Tautvaišienė, G., San Roman, I., Villanova, S., Geisler, D., Muñoz, C., . . . Zaggia, S.** (2016). The Gaia-ESO Survey: Probes of the inner disk abundance gradient. *Astronomy and Astrophysics*, 591, Article A37. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527654>
- Katime-Santrich, O. J., Kerber, L., Abuchaim, Y., Gonçalves, G.** (2022). On the validity of the spectroscopic age indicators [Y/Mg], [Y/Al], [Y/Si], [Y/Ca], and [Y/Ti] for giant stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 514(4), 4816-4827. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1183>
- Katime-Santrich, O.J.K., Pereira, C.B., Drake, N.A.** (2013). Chemical analysis of giant stars in the young open cluster NGC 3114. *Astronomy and Astrophysics*, 554, Article A2, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220252>
- Kurucz, R. L.** (1981). *A table of semiempirical gf values. Pt 1: Wavelengths: 5.2682 NM to 272.3380 nm; Pt 2: Wavelengths: 272.3395 NM to 599.3892 nm; Pt 3: Wave-lengths: 599.4004 NM to 9997.2746 NM Pt 4: FeII.*
- Kurucz, R. L., Peytremann, E.** (1975). A table of semiempirical gf values. Pt 1: Wave-lengths: 5.2682 NM to 272.3380 nm; Pt 2: Wavelengths: 272.3395 NM to 599.3892 nm; Pt 3: Wavelengths: 599.4004 NM to 9997.2746 NM. SAO Special Report.
- Luck, R. E.** (2015). Abundances in the Local Region. I. G and K Giants. *The Astrophysical Journal*, 150(3), Article 88. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/150/3/88>
- Magrini, L., Randich, S., Kordopatis, G., Prantzos, N., Romano, D., Chieffi, A., Limongi, M., François, P., Pancino, E., Friel, E., Bragaglia, A., Tautvaišienė, G., Spina, L., Overbeek, J., Cantat-Gaudin, T., Donati, P., Vallenari, A., Sordo, R., Jiménez-Esteban, F. M., . . . Zaggia, S.** (2017). The Gaia-ESO Survey: radial distribution of abundances in the Galactic disc from open clusters and young-field stars. *Astronomy and Astrophysics*, 603, Article A2. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630294>
- Magrini, L., Viscasillas-Vázquez, C., Spina, L., Randich, S., Romano, D., Franciosini, E., Recio-Blanco, A., Nordlander, T., D’Orazi, V., Baratella, M., Smiljanic, R., Dantas, M. L.L., Pasquini, L., Spitoni, E., Casali, G., Van der Swaelmen, M., Bensby, T., Stonkute, E., Sacco, S.F.G.G., . . . Morbidelli, L.** (2022). The Gaia-ESO survey: mapping the shape and evolution of the radial abundance gradients with open clusters. *arXiv e-prints*, Article arXiv:2210.15525.
- Mermilliod, J. C., Mayor, M., Udry, S.** (2008). Red giants in open clusters. XIV. Mean radial velocities for 1309 stars and 166 open clusters. *Astronomy and Astrophysics*, 485(1), 303-314. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200809664>
- Mermilliod, J., Mayor, M., Udry, S.** (2009). Catalogues of radial and rotational velocities of 1253 F-K dwarfs in 13 nearby open clusters. *Astronomy and Astrophysics*, 498(3), 949-960. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810244>
- Sales-Silva, J.V., Peña-Suárez, V.J., Katime-Santrich, O.J., Pereira, C.B., Drake, N.A., Roig, F.** (2014). High-resolution Spectroscopic Observations of Binary Stars and Yellow Stragglers in Three Open Clusters: NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822. *The Astrophysical Journal*, 148(5), Article 83. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/148/5/83>