

Caracterización espectroscópica de la componente estelar más deficiente en hierro del cúmulo globular Omega Centauri con APOGEE-2

Paula Fernanda Salazar Torrado

Trabajo de Grado para optar al título de Física

Director

Dr. Luis Alberto Núñez de Villavicencio

Co-director

Dr. José G. Fernández Trincado

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedicado especialmente a mi madre y a todas las personas que me han apoyado y brindado su cariño para cumplir los sueños.

Agradecimientos

Inicio agradeciendo inmensamente a los profesores Luis A. Núñez y José G. Fernández Trincado: al profesor Luis de la Universidad Industrial de Santander, por el apoyo, la gestión y la orientación para poder llevar a cabo este proyecto de pregrado en Física con énfasis en Astrofísica. Al profesor José G. Fernández Trincado de la Universidad Católica del Norte (Antofagasta, Chile), por permitirme la gran oportunidad de trabajar en su área de investigación con este fascinante proyecto del cual he aprendido mucho cómo se estudian las estrellas y la información que se puede obtener de ellas; además, gracias por su tiempo invertido, paciencia e instrucción durante el desarrollo de la investigación.

También a Danilo Gonzáles Díaz, postdoctorante bajo la supervisión del profesor José G. Fernández Trincado. Quien brindó asesoría técnica parcial durante el inicio del proyecto.

Al grupo Halley UIS por sus espacios de investigación y divulgación en Astronomía.

A la Escuela de Física por su disposición, y apoyo brindado.

A la Universidad Industrial de Santander por todas las experiencias para el aprendizaje y la formación profesional.

Agradezco a mis padres, por su inconmensurable apoyo, acompañamiento, motivación, e impulso a trabajar siempre por las metas propuestas.

Tabla de Contenido

Introducción	15
1. Cúmulos globulares	20
1.1. Características del singular NGC 5139	20
1.2. Comparación con otros cúmulos globulares	21
1.2.1. VVV CL001	21
1.2.2. Patchick 125	22
1.2.3. NGC 2298	22
1.2.4. M54	22
1.3. Diferencia entre un Cúmulo Globular y una Galaxia enana	23
1.4. NGC 5139 y su distribución de metalicidad	23
1.5. Posibles orígenes de las estrellas más pobres en metales	24
2. Datos observacionales	26
2.1. Espectros	26
2.1.1. Códigos para análisis espectral	28
2.2. La componente estelar más pobre en metal de NGC 5139	29
2.2.1. Diagrama color-magnitud	30
2.2.2. La rama de las gigantes rojas (RGB)	30

2.2.3. Distribución de posiciones de la muestra más pobre en metal de NGC 5139 en la bóveda celeste	31
2.2.4. Distribución de velocidad radial en función de la metalicidad de la muestra más pobre en metal de NGC 5139	32
3. Análisis espectral línea a línea	33
3.1. Selección línea a línea	33
3.2. Determinación de abundancias	36
3.2.1. Parámetros atmosféricos	37
4. Interpretación de resultados de abundancias elementales	40
4.1. Elementos α (Mg, Si y Ca)	44
4.2. Elemento Z-impar (Al)	44
4.3. Elementos máximo de Ni y Fe	45
4.4. C+N+O	45
4.5. Correlaciones	48
5. Conclusiones	48
Referencias Bibliográficas	49
Apéndices	56

Lista de Figuras

- Figura 1. Distribución de metalicidades para estrellas a la corriente de acreción Phoenix representada en color naranja, y hacia el lado derecho, en azul, los cúmulos globulares de la Vía Láctea. La línea punteada corresponde al valor empírico límite inferior de metalicidad, superado por los cúmulos de la Vía Láctea, del Grupo Local y de otras galaxias aledañas. Tomado de Wan et al. (2020) 18
- Figura 2. Proyección de las principales poblaciones estelares de la Vía Láctea en el espacio de abundancias canónico ($[\alpha/\text{Fe}]$ versus $[\text{Fe}/\text{H}]$). Tomado de: Hawkins and Gilmore (2015). 21
- Figura 3. Histograma de valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ para 180 estrellas gigantes rojas del cúmulo globular NGC 5139. Tomado de: Johnson et al. (2008). 24
- Figura 4. Ilustración artística de la bóveda celeste, la Vía Láctea y la localización desde los dos hemisferios terrestres donde el sondeo astronómico APOGEE-2 ha operado. En el hemisferio norte el espectrógrafo APOGEE-2 estuvo montando en el telescopio Sloan de 2.5 metros, mientras un espectrógrafo gemelo estuvo operando desde el telescopio Irénée du Pont de 2.5 metros en el Observatorio Las Campanas (Chile). Imagen tomada de la página oficial del sondeo APOGEE-2. 26

- Figura 5. Diagrama color-magnitud de nuestra muestra comparado con las estrellas estudiadas por Johnson et al. (2020) (rombos grises). La barra de color indica el enriquecimiento de hierro de nuestras estrellas. 30
- Figura 6. Coordenadas celestes de la muestra de Johnson et al. (2020). Donde nuestra muestra se encuentran diferenciadas por círculos rojos del resto de estrellas representadas por rombos grises. 31
- Figura 7. Distribución de la velocidad radial en función de la metalicidad. En círculos rojos las estrellas de la componente más pobre en metal de este trabajo y en rombos grises datos de Johnson et al. (2020). 32
- Figura 8. Líneas que fueron descartadas se muestran en los paneles (a) para el hierro (Fe) y (b) silicio (Si), y líneas aceptadas para analizar en los paneles (c) magnesio (Mg) y (d) silicio (Si). 35
- Figura 9. Líneas que fueron descartadas se muestran en los paneles a) aluminio (Al), b) carbono (C) y panel c) nitrógeno (N) y d) silicio (Si). 36

Figura 10. Líneas de absorción de las especies químicas Si, Mg, Al, Fe, respectivamente, como se indica en cada panel. Las cuales fueron ajustadas mediante los modelos atmosféricos con el uso del código *BACCHUS* para la determinación de las respectivas abundancias. En cada panel se observa en la parte superior derecha, se observan los valores de abundancias por cada método de ajuste. Hacia la parte izquierda de cada panel el valor del χ^2 , la razón señal ruido y el ancho equivalente de la línea en el espectro observado.

39

Figura 11. Distribución de abundancias químicas individuales de las especies, de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, Si, Mg, Al, Ni, Ca, C, N y O, en el plano $[X/Fe]$ vs. $[Fe/H]$ de la muestra más pobre en metal de NGC 5139. Los puntos grises corresponden a datos de ASPCAP, y los puntos de color violeta a los valores de este trabajo obtenidos con BACCHUS.

43

Figura 12. Correlaciones. En punto grises los datos de ASPCAP y en puntos rojos los datos obtenidos en este trabajo usando BACCHUS.

47

Lista de Tablas

Tabla 1.	Propiedades de NGC 5139 tomadas de Baumgardt and Hilker (2018).	20
Tabla 2.	Datos de posición, magnitudes y parámetros atmosféricos: temperatura efectiva (T_{ef}), logaritmo de la gravedad superficial ($\log g$), metalicidad ($[Fe/H]$) y velocidad de microturbulencia (ϵ_{mic}) de cada estrella deficiente en hierro, respectivamente.	29
Tabla 3.	Número de líneas de absorción para cada especie química examinadas una a una manualmente.	34
Tabla 4.	Referencia solar de Anders and Grevesse (1989) la cual usa Johnson et al. (2020) y referencia solar de Asplund et al. (2005).	38
Tabla 5.	Abundancias elementales determinadas usando el código BACCHUS.	41
Tabla 6.	Abundancias elementales extraídas de la Pipeline ASPCAP.	42
Tabla 7.	Valores de media y desviación estándar de las abundancias y metalicidad determinados con el uso de BACCHUS.	42
Tabla 8.	Líneas seleccionadas de Fe I y Si I.	57
Tabla 9.	Líneas seleccionadas de Mg I y Al I.	58

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Tablas de las líneas espectrales atómicas seleccionadas	56

Glosario

APOGEE: el Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment es uno de los sondeos espectroscópicos que muestrea las poblaciones estelares de la Vía Láctea.

Fuerzas de marea: este fenómeno se presenta cuando un cuerpo extenso se mueve en un campo gravitacional. Debido a su extensión, las partes más distantes del centro de masa adquieren velocidades y trayectorias distintas a este, produciendo más estiramiento del objeto.

Gigaño (Ga): es una unidad de tiempo que corresponde al orden de magnitud de 10^9 . Un ejemplo es la edad del universo $\sim 14.5Ga$.

Población II: hace referencia a estrellas muy antiguas que nacieron a partir de gas primordial (solo H y He) poco procesado por previas generaciones de estrellas y por tanto de baja metalicidad.

RGB: hace referencia a la etapa evolutiva en el que se encuentran estrellas que han quemado todo su hidrógeno y se conocen como gigantes rojas.

Resumen

Título: Caracterización espectroscópica de la componente estelar más deficiente en hierro del cúmulo globular Omega Centauri con APOGEE-2 *

Autor: Paula Fernanda Salazar Torrado **

Palabras Clave: Cúmulo globular (Omega Centauri/NGC 5139), Enriquecimiento químico, Espectroscopía en el infrarrojo cercano.

Descripción: En este proyecto de investigación se presenta por primera vez la determinación de abundancias fotosféricas estelares para especies químicas tales como: Carbono (C), Nitrógeno (N), Oxígeno (O), Magnesio (Mg), Aluminio (Al), Silicio (Si), Calcio (Ca), Hierro (Fe) y Níquel (Ni), la cual fueron obtenidas a partir de líneas atómicas una vez ionizadas y tres moléculas ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, ^{16}OH , $^{12}\text{C}^{14}\text{N}$) que fueron identificadas en la banda infrarroja cercana del espectro electromagnético (banda espectral H comprendida entre 1.5 a 1.7 micras), para una muestra de 14 estrellas gigantes rojas pertenecientes al cúmulo globular NGC 5139. Haciendo uso del código BACCHUS, se realizó un análisis exhaustivo línea a línea asumiendo un Equilibrio Termodinámico Local (siglas en inglés: LTE) en la banda espectral H para cada estrella en nuestra muestra. Se logró identificar un enriquecimiento en aluminio $[\text{Al}/\text{Fe}]>+0.3$ para 4 estrellas de la muestra, característica de estrellas de segunda generación. También se proporcionó por primera vez evidencia de tendencia a una correlación Mg-Si para todas las estrellas de esta muestra.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Dr. Luis A. Núñez, Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia). Co- director: Dr. José G. Fernández Trincado, Universidad Católica del Norte (Antofagasta, Chile)

Abstract

Title: Spectroscopic characterization of the most iron deficient stellar component of the Omega Centauri globular cluster with APOGEE-2 *

Author: Paula Fernanda Salazar Torrado **

Keywords: Globular cluster (Omega Centauri/NGC 5139), Chemical Enrichment, Near Infrared Spectroscopy.

Description: In this work we present for the first time the determination of stellar photospheric abundances for chemical species such as: Carbon (C), Nitrogen (N), Oxygen (O), Magnesium (Mg), Aluminum (Al), Silicon (Si), Calcium (Ca), Iron (Fe) and Nickel (Ni), which were obtained from atomic lines once ionized and three molecules ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, ^{16}OH , $^{12}\text{C}^{14}\text{N}$) that were identified in the near infrared band of the electromagnetic spectrum (spectral band H between 1.5 to 1.7 microns), for a sample of 14 red giant stars belonging to the globular cluster NGC 5139. Using the BACCHUS code, a comprehensive line-by-line analysis was performed assuming a Local Thermodynamic Equilibrium (LTE) in the spectral band H for each star in our sample. It was possible to identify an enrichment in Aluminum $[\text{Al}/\text{Fe}]>+0.3$ for 4 stars in the sample, characteristic of second generation stars. Evidence for a Mg-Si correlation was also provided for the first time for all the stars in the sample.

* Bachelor Thesis

** Science Faculty, School of Physics, Director: Dr. Luis A. Núñez, Industrial University of Santander. Co-director: Dr. José G. Fernández Trincado, Catholic University of the North (Antofagasta, Chile)

Introducción

Omega Centauri (NGC 5139) es el cúmulo estelar más masivo ($3.55 \times 10^6 M_{\odot}$) y luminoso que orbita la Vía Láctea, cuya naturaleza y origen son los más controvertidos de la astrofísica actual.

En las últimas décadas se ha acumulado evidencia que sugiere que NGC 5139 podría ser el núcleo de una galaxia enana desarticulada por las fuerzas de marea de nuestra galaxia.

Algunas de las características relevantes que lo convierten en un sistema estelar muy particular se describen a continuación:

- NGC 5139 posee una órbita retrógrada respecto a la rotación Galáctica, lo que lo convierte en un perfecto candidato ligado a un antiguo evento de acreción (Dinescu et al., 1999).
- Posee una alta dispersión de metalicidades ($-2,2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0,6$) (Johnson and Pilachowski, 2010), a diferencia de otros cúmulos globulares de nuestra galaxia con dispersión de metalicidades inferiores a 0.05 dex, según Carretta et al. (2009).
- Existe evidencia observacional de poblaciones múltiples, pero con un comportamiento más complejo que para los demás cúmulos globulares de la Vía Láctea (Bastian and Lardo, 2018).

Según estos rasgos, la literatura propone que posiblemente NGC 5139 no se formó *in situ*, sino que está vinculado al núcleo de una galaxia enana satélite que fue desarticulada por fuerzas de marea ejercidas por la Vía Láctea. Nuestra galaxia ha atravesado una serie de eventos de acreción a lo largo de su historia evolutiva; aportando cantidades de cúmulos globulares que provienen

de algunas estructuras como, Gaia-Enceladus, Sequoia y Helmi Streams. Un ejemplo de evidencia de estos sucesos, es el de M54 que toma el segundo puesto en ser el cúmulo globular más masivo después de NGC 5139 y que está asociado a la galaxia enana sagitario. Actualmente, se puede observar la acreción que experimentó la galaxia enana Sagitario (Massari et al., 2019; Kruijssen et al., 2020).

Los cúmulos globulares al ser objetos muy antiguos se convierten en verdaderos fósiles que generan gran interés de estudio, ya que sus estrellas albergan información cinemática, dinámica o química sobre sus ambientes de formación y procesos astrofísicos involucrados en su origen y evolución.

Una herramienta de gran utilidad para tales objetivos son los planos de abundancia vs. metalicidad (ver figura 2) (Hawkins and Gilmore, 2015). La metalicidad de una estrella se mide tomando como referencia la metalicidad del Sol $[Fe/H] = 0$, un índice de metalicidad positivo se refiere a estrellas ricas en metales y un índice de metalicidad negativo a estrellas pobres en metales o con deficiencia de hierro. Este índice de metalicidad es posible relacionarlo con la edad y el ambiente de formación de una estrella.

La abundancia química se calcula de igual manera, se refiere a la cantidad de átomos de un determinado elemento que se encuentra presente respecto a la cantidad de Fe, que es el elemento más pesado que se puede fusionar en el núcleo de una estrella.

A partir de una muestra estelar de NGC 5139 estudiada por Johnson and Pilachowski (2010) donde observaron y confirmaron la alta dispersión de metalicidades, posteriormente Johnson et al. (2020), presenta un estudio de una muestra estelar de brillo más débiles donde mediante un análisis

estadístico usando la función de distribución de metalicidades detectan por primera vez que, un pequeño grupo estelar toma valores de hasta el valor empírico límite inferior de metalicidades para los cúmulos globulares conocidos de la Galaxia como se observa en (ver figura 1) que corresponde a la distribución de metalicidad en color azul, una línea discontinua que representa el límite de metalicidad y por debajo de este valor, estrellas de la corriente de acreción Phoenix. Lo que es importante destacar del diagrama es que, NGC 5139, tiene estrellas cercanos a este límite como se observa en Johnson et al. (2020). Siendo así, la componente estelar más deficiente en hierro (Fe) o también llamada la más pobre en metal de NGC 5139 hasta entonces detectada.

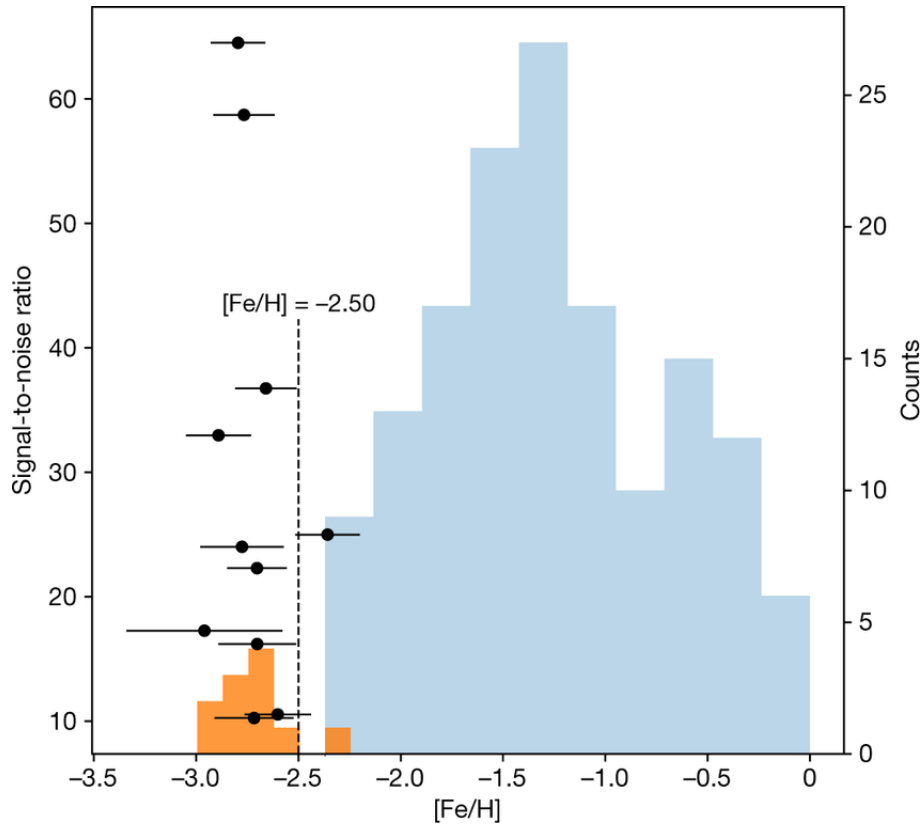


Figura 1. Distribución de metalicidades para estrellas a la corriente de acreción Phoenix representada en color naranja, y hacia el lado derecho, en azul, los cúmulos globulares de la Vía Láctea. La línea punteada corresponde al valor empírico límite inferior de metalicidad, superado por los cúmulos de la Vía Láctea, del Grupo Local y de otras galaxias aledañas. Tomado de Wan et al. (2020)

La presencia de estrellas con valores tan bajos en metalicidad lleva a reafirmar los cuestionamientos ya planteados sobre la complicada naturaleza de NGC 5139. A su vez, son una información clave acerca de la presencia de poblaciones múltiples y de su alta dispersión en metalicidad. Por esto es importante conocer sus firmas químicas mediante la determinación de abundancias elementales.

Este trabajo se basa en la caracterización espectroscópica de datos en el infrarrojo cercano

en la banda H obtenidos del sondeo APOGEE-2, y consiste en la determinación por primera vez de las abundancias de distintas especies químicas: Carbono (C), Nitrógeno (N), Oxígeno (O), Magnesio (Mg), Aluminio (Al), Silicio (Si), Calcio (Ca), Hierro (Fe) y Níquel (Ni); para la muestra de 14 estrellas que corresponden a la componente estelar más pobre en metal de NGC 5139. Lo que permitirá obtener nuevas pistas acerca de aspectos como tendencias entre las abundancias para esta componente, poblaciones múltiples, nucleosíntesis y procesos astrofísicos involucrados.

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera: en el capítulo 1 se expresan ideas sobre la definición de cúmulos globulares y sus características, en especial para ω Centauri; se compara con otros cúmulos globulares, a su vez se discute sobre la diferencia entre un cúmulo globular y una galaxia enana, debido a las evidencias que apuntan a que posiblemente ω Centauri sea un remanente de una galaxia enana satélite de la Vía Láctea. En el capítulo 2 se presenta el tipo de datos para esta componente estelar en el infrarrojo cercano (banda H) recopilados por el sondeo APOGEE-2. En el capítulo 3, se describen los parámetros atmosféricos, el código BACCHUS, y la metodología que se llevó a cabo para la determinación de las abundancias que son de interés. Posteriormente, en el capítulo 4 se analizan los resultados obtenidos y por último en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo desarrollado.

1. Cúmulos globulares

Los cúmulos globulares son sistemas astrofísicos compuestos por cientos de miles de estrellas, que debido a sus interacciones gravitacionales presentan una forma aproximadamente esférica, y albergan estrellas de población II, en su mayoría RGB muy antiguas con edades estelares hasta de ~ 12 Ga. Este trabajo se enfoca en unos de estos objetos, se trata del controversial cúmulo globular NGC 5139. Por esta razón, es necesario describir algunas de sus características más distinguidas.

1.1. Características del singular NGC 5139

Tabla 1

Propiedades de NGC 5139 tomadas de Baumgardt and Hilker (2018).

Parámetros	NGC 5139
Velocidad media $\langle v_r \rangle$ [Km/s]	232.7 ± 0.2
Masa total [M_{\odot}]	$3.55 \pm 0.03 \cdot 10^6$
Distancia al Sol [kpc]	5.20
Dispersión de velocidad σ [Km/s]	17.6
Razón (banda V) M/L [M_{\odot}/L_{\odot}]	2.90 ± 0.27

Además de estas características en la tabla 1, presenta de seis poblaciones de metalicidad con unos valores únicos, pero sus máximos se encuentran en: $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.75, -1.50 -1.20$ y -0.70 (Johnson et al., 2020). Se tiene evidencia observacional de variaciones de abundancia de elementos ligeros dentro de grupos de estrellas a lo largo del ancho rango de metalicidad (Latour et al., 2021).

El cúmulo NGC 5139 se encuentra ubicado en el halo galáctico de la Vía Láctea, una estructura analizada en Hawkins and Gilmore (2015) donde se encuentran estrellas pobres en metal.

Las estrellas de NGC 5139 se clasifican como miembros de un halo acretado, debido a que se diferencian químicamente de las estrellas pertenecientes a las otras estructuras (ver figura 2).

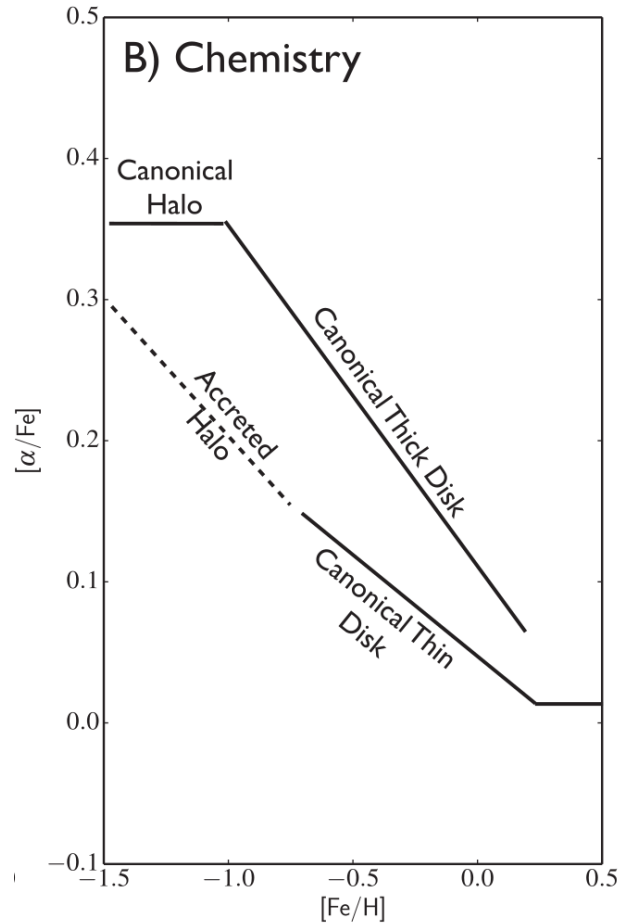


Figura 2. Proyección de las principales poblaciones estelares de la Vía Láctea en el espacio de abundancias canónico ($[\alpha/\text{Fe}]$ versus $[\text{Fe}/\text{H}]$). Tomado de: Hawkins and Gilmore (2015).

1.2. Comparación con otros cúmulos globulares

1.2.1. VVV CL001. El cúmulo globular VVV CL001 es el más deficiente en hierro dentro de la órbita solar. En el trabajo de Fernández-Trincado et al. (2021), evidenciaron que tiene una metalicidad media de $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.45$ con una incertidumbre de 0.24 dex. Después de que analizaran

químicamente estrellas muy pobres en metales que caen cerca al límite empírico de metalicidad de los cúmulos globulares de la Vía Láctea, concuerda con que su procedencia se deba posiblemente a un evento de acreción asociado a una galaxia difunta – Sequoia o Gaia- Enceladus-Sausage; similar a las hipótesis relacionadas con el origen de NGC 5139. Por tal motivo, es importante conocer este tipo de objetos y realizar el análisis de la componente estelar pobre en metal de este estudio, ya que hay investigaciones como la de VVV CL001 que soportan este tipo de eventos astrofísicos.

1.2.2. Patchick 125. El cúmulo globular Patchick 125 o también nombrado como Gran 3, es un cúmulo que alberga estrellas pobres en metal cuyos valores de metalicidad $[Fe/H]$ comprenden un rango entre -1.72 y -1.69 , y que según el estudio realizado por Fernández-Trincado et al. (2022), concluyen que se trata de un cúmulo globular típico pobre en metal, dada la evidencia de un enriquecimiento en $[Al/Fe] > +0.58$.

1.2.3. NGC 2298. Otro integrante del grupo de cúmulos mencionados aquí es el objeto NGC 2298, que también contiene estrellas pobres en metal, que al ser analizadas a través de la determinación de abundancias tales como por ejemplo, Mg y Al, muestra un enriquecimiento de Al que se encuentra anticorrelacionado con el Mg, presentando el fenómeno de poblaciones múltiples. Esta es una característica que también exhibe NGC 5139.

1.2.4. M54. El cúmulo globular M54 es el segundo más masivo después de NGC 5139, en el halo estelar de la Vía Láctea. El origen de M54 está asociado con el evento de acreción de la galaxia satélite Sagitario, la cual está siendo destruída por las fuerzas de marea ejercidas por nuestra galaxia que aún es observable. En distintos trabajos se ha sugerido que NGC 5139 tiene un origen similar. Sin embargo, según Carretta et al. (2009), NGC 5139 supera a M54 en términos

de dispersión de metalicidad, lo que indica que este ha pasado por un proceso de enriquecimiento químico distinto a lo largo de su evolución.

1.3. Diferencia entre un Cúmulo Globular y una Galaxia enana

Las galaxias enanas contienen complejas y variadas poblaciones estelares debido a distintos procesos astrofísicos como la contaminación por supernovas tipo II o Ia dentro de las mismas, a diferencia de los cúmulos globulares típicos donde se sugiere que las estrellas nacen a partir de una misma nube molecular. Las galaxias enanas cuentan con una amplia gama de abundancias químicas que es apreciable en un plano abundancia vs. metalicidad. Por el contrario, los cúmulos globulares presentan una distribución más homogénea.

Adicionalmente, las galaxias enanas cuentan con una componente de materia oscura, mientras que los cúmulos globulares solo tienen la componente de materia bariónica. La masa estelar de una galaxia enana puede ser aproximadamente desde el orden un cúmulo globular típico hasta de $\sim 10^9$ a $10^{10}M_{\odot}$, según presenta Bastian and Lardo (2018).

1.4. NGC 5139 y su distribución de metalicidad

El cúmulo NGC 5139, presenta entre sus características el fenómeno de poblaciones múltiples. Estudios recientes han identificado que NGC 5139 alberga una compleja mezcla de poblaciones de estrellas dentro de un amplio rango de $[Fe/H]$ como ya se mencionó previamente, con al menos cuatro de ellas bien marcadas, cuyas distribuciones máximas están centradas en: $[Fe/H] < -1.6$, entre $[Fe/H] = -1.45$ y $[Fe/H] = -1.05$, $[Fe/H] > -1$ (ver figura 3). Esto brinda evidencia de distintos episodios de formación estelar (Johnson et al., 2008).

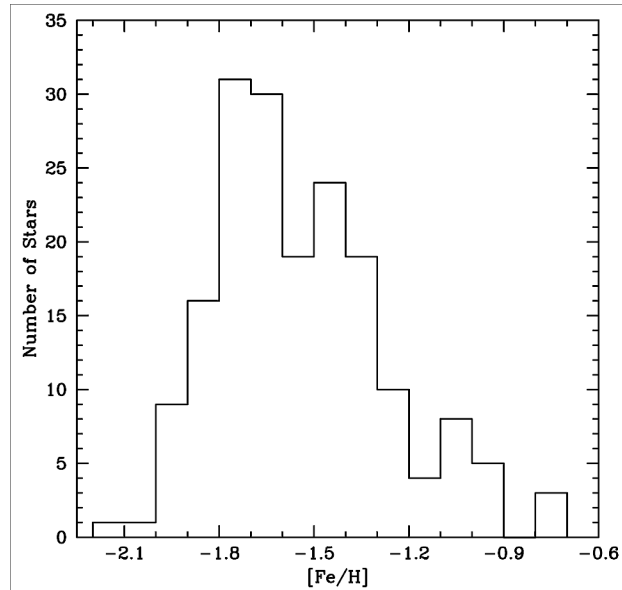


Figura 3. Histograma de valores de [Fe/H] para 180 estrellas gigantes rojas del cúmulo globular NGC 5139. Tomado de: Johnson et al. (2008).

1.5. Posibles orígenes de las estrellas más pobres en metales

Se plantean algunas hipótesis sobre los posibles orígenes de estas estrellas más pobres en metal miembros de NGC 5139, según Johnson et al. (2020). La intención o uno de los objetivos de este trabajo es la aproximación de la naturaleza de estas estrellas a través de la determinación de proporciones para las especies químicas de prioridad e interés, que permita obtener información sobre sus enriquecimientos químicos mas no la comprobación de una de estas hipótesis.

- **Formación estelar primordial.** Referida a formación estelar a partir de una nube molecular prístina no enriquecida con metales.
- **Captura de estrellas de la Vía Láctea.** Consiste en que el conglomerado de estrellas debido a su masa y por tanto al campo gravitatorio que genera, podría haber atraído estrellas no

enriquecidas o muy pobres en metales de alrededor y hacerlas parte del cúmulo.

- **Fusión entre NGC 5139 y una subestructura pobre en metal.** Otro escenario podría ser el de posibles colisiones con sistemas que contienen gas no enriquecido o estrellas muy pobres en metales.

2. Datos observacionales

En este capítulo se describe la fuente y naturaleza de los datos espectroscópicos de la componente más pobre en metal del intrigante cúmulo globular NGC 5139 analizados en el presente trabajo.

2.1. Espectros

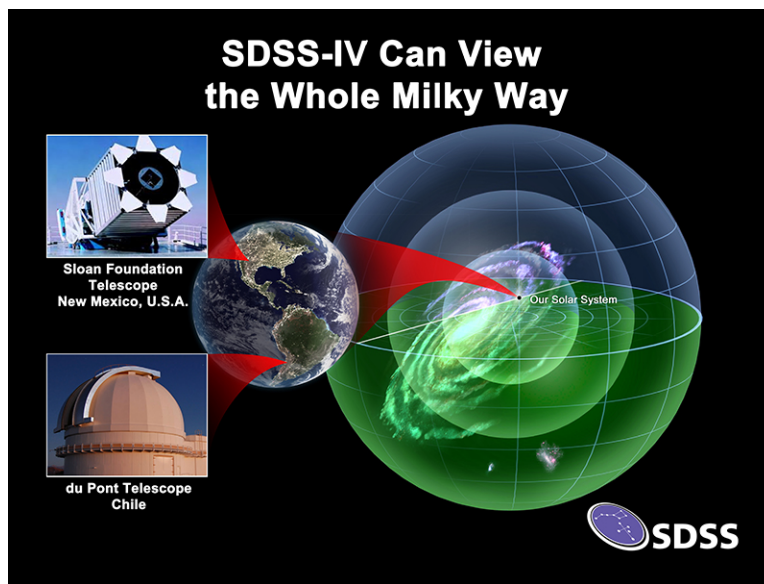


Figura 4. Ilustración artística de la bóveda celeste, la Vía Láctea y la localización desde los dos hemisferios terrestres donde el sondeo astronómico APOGEE-2 ha operado. En el hemisferio norte el espectrógrafo APOGEE-2 estuvo montando en el telescopio Sloan de 2.5 metros, mientras un espectrógrafo gemelo estuvo operando desde el telescopio Irénée du Pont de 2.5 metros en el Observatorio Las Campanas (Chile). Imagen tomada de la página oficial del sondeo APOGEE-2.

El presente trabajo hace uso de datos espectroscópicos del sondeo astronómico a gran escala llamado APOGEE-2 (el acrónimo en inglés de la segunda fase de operación: Apache Point Observatory Galaxy Evolution Experiment 2), que estuvo en operación hasta finales del año 2020. El

principal objetivo de APOGEE-2 fue contribuir en entender los procesos de formación, evolución y enriquecimiento químico de nuestra Vía Láctea, mediante el mapeo cinemático y espectroscópico de 700,000 gigantes rojas en toda la Galaxia.

Este sondeo estuvo conformado de dos telescopios de 2.5m, siendo uno el telescopio Sloan Foundation ubicado en el observatorio Apache Point, EE.UU, y el otro el du Pont en el observatorio Las Campanas, Chile; de tal manera que el primero mapea el hemisferio norte y el segundo el hemisferio sur.

Una de las ventajas de APOGEE-2 es que recolecta datos espectroscópicos en el infrarrojo cercano, en la banda H, entre un rango de longitudes de onda ($1.5- 1.7\mu$ m) y con una alta resolución espectral de ~ 22.500 , lo cual permite observar regiones ocultas por columnas de polvo y gas del medio interestelar. Adicionalmente, cuenta con una alta señal- ruido $S/N \geq 100$ por píxel.

Sondeos de este tipo permiten la obtención de información espacial, cinemática, dinámica y química de las estrellas, que contienen los rastros para develar su origen y por ende la evolución de su galaxia anfitriona; constituyendo así un campo del conocimiento como lo es la arqueología galáctica.

La alta resolución resulta de gran importancia para la obtención de las abundancias químicas y velocidades radiales precisas cuyo objetivo es mejorar los modelos de evolución galácticos. Además, el hecho de que sea en el infrarrojo cercano en la banda H, permite acceder a una mayor cantidad de estrellas que no son de fácil acceso para los sondeos en el óptico.

Por lo tanto, este sondeo brinda datos de propiedades astrofísicas de alta calidad para poder llevar a cabo los objetivos planteados en búsqueda de señales químicas para la caracterización de

las poblaciones estelares.

2.1.1. Códigos para análisis espectral. Los espectros adquiridos por el sondeo APOGEE-2 son procesados y tratados por el software automatizado ASPCAP (por sus siglas en inglés: APOGEE Stellar Parameter Chemical Abundance Pipeline)–Pérez et al. (2016), que permite la determinación de parámetros atmosféricos tales como: temperatura y gravedad superficial, microturbulencia y metalicidad inicial, dentro de una precisión de ± 50 K, ± 0.3 cgs., y 0.05 km s^{-1} , respectivamente, así como también la estimación de velocidades radiales con una precisión ($< 1 \text{ km s}^{-1}$), además de una amplia gama de elementos químicos (> 26 especies químicas) con una precisión mucho mejor que 0.05 dex.

El principio de funcionamiento del código ASPCAP, está basado en la comparación de múltiples parámetros (temperatura y gravedad superficial, microturbulencia, metalicidad, carbono, nitrógeno y oxígeno) entre el espectro observado con una gran malla de modelos de atmósferas con simetría esférica (MARCS) pre-computados asumiendo un equilibrio termodinámico local (LTE). Sin embargo, esta metodología automatizada no es lo suficientemente precisa para estrellas gigantes rojas, muy deficientes en hierro, como las de nuestra muestra, por esta razón, la determinación manual de abundancias químicas para una muestra estelar en este régimen debe proceder en una vía diferente, como se describe más adelante con códigos alternativos.

2.2. La componente estelar más pobre en metal de NGC 5139

Tabla 2

Datos de posición, magnitudes y parámetros atmosféricos: temperatura efectiva (T_{ef}), logaritmo de la gravedad superficial ($\log g$), metalicidad ($[Fe/H]$) y velocidad de microturbulencia (ϵ_{mic}) de cada estrella deficiente en hierro, respectivamente.

APOGEE ID	A.R. (grados)	Dec. (grados)	V(mag)	J (mag)	K_s (mag)	T_{ef} [K]	$\log g$ [cgs]	[Fe/H]	ϵ_{mic} [Km/s]
2M13253523–4726598	201.39691	–47.44988	14.191	12.469	11.890	5165	2.20	–2.01	1.32
2M13255843–4732200	201.49361	–47.53882	14.335	12.886	12.165	5335	2.32	–2.39	1.21
2M13262564–4726228	201.60695	–47.43960	14.347	12.886	12.165	5525	2.40	–2.03	1.09
2M13263794–4727235	201.65817	–47.45646	13.381	11.273	10.329	4414	1.49	–2.50	1.81
2M13265077–4727340	201.68551	–47.48218	13.362	11.275	10.570	4626	1.61	–2.14	1.67
2M13265711–4727091	201.71174	–47.45937	13.304	11.339	10.661	4774	1.66	–2.16	1.58
2M13265800–4730387	201.71949	–47.46918	13.375	11.379	10.617	4659	1.63	–2.14	1.65
2M13264450–4728563	201.73050	–47.52874	14.222	12.698	11.847	5078	2.17	–2.37	1.38
2M13265263–4728092	201.73550	–47.47057	13.752	11.566	10.958	4622	1.76	–2.38	1.67
2M13265528–4731438	201.73811	–47.45247	13.661	11.643	11.015	4770	1.80	–2.50	1.58
2M13265647–4728138	201.74145	–47.48222	13.224	11.215	10.248	4474	1.46	–2.36	1.77
2M13265791–4728562	201.71392	–47.45495	13.821	...	...	4920	1.94	–2.08	1.48
2M13273227–4727298	201.88460	–47.45819	14.176	12.455	11.919	5219	2.21	–2.04	1.29
2M13280680–4726234	202.02845	–47.43972	14.382	12.865	12.387	5570	2.43	–2.14	1.06

2.2.1. Diagrama color-magnitud. Se presenta el diagrama color magnitud para visualizar el estado evolutivo de la componente estelar más deficiente en hierro de NGC 5139, comparadas con el resto de estrellas de la muestra de Johnson et al. (2020).

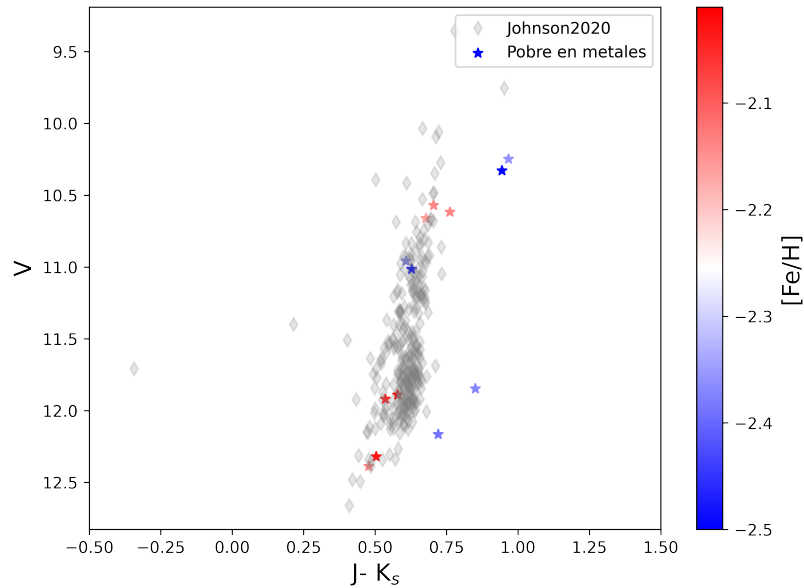


Figura 5. Diagrama color-magnitud de nuestra muestra comparado con las estrellas estudiadas por Johnson et al. (2020) (rombos grises). La barra de color indica el enriquecimiento de hierro de nuestras estrellas.

2.2.2. La rama de las gigantes rojas (RGB). En la figura 5 se observa que la mayoría de las estrellas en nuestra muestra se distribuyen a lo largo de la rama de las gigantes rojas (RGB). En esta región se encuentran las estrellas que agotaron su combustible principal para la fusión nuclear, es decir, el hidrógeno (H), y ahora están quemando como combustible principal el helio (He). Las estrellas en este estado evolutivo disminuyen su temperatura, ya que sus capas se expanden y se caracterizan por tener una apariencia roja.

2.2.3. Distribución de posiciones de la muestra más pobre en metal de NGC 5139 en la bóveda celeste. Las estrellas más pobres en metal de este estudio no se encuentran concentradas alrededor de una misma posición en ascensión recta sino que se extienden en un intervalo entre 202.0-201.4, mientras que en declinación se pueden observar aproximadamente alrededor de un mismo punto.

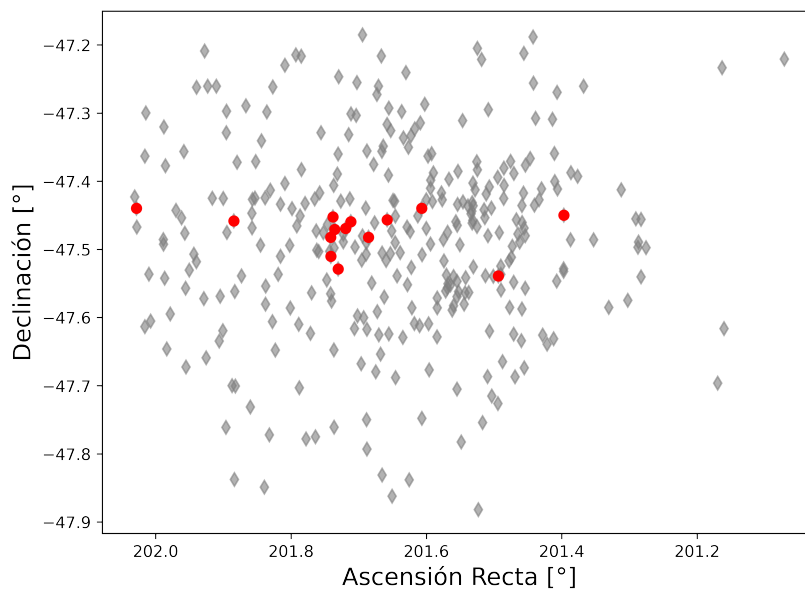


Figura 6. Coordenadas celestes de la muestra de Johnson et al. (2020). Donde nuestra muestra se encuentran diferenciadas por círculos rojos del resto de estrellas representadas por rombos grises.

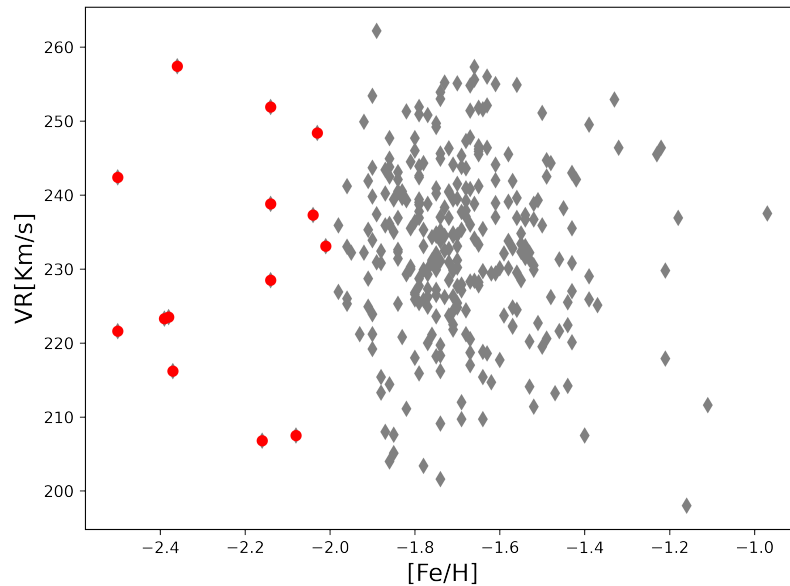


Figura 7. Distribución de la velocidad radial en función de la metalicidad. En círculos rojos las estrellas de la componente más pobre en metal de este trabajo y en rombos grises datos de Johnson et al. (2020).

2.2.4. Distribución de velocidad radial en función de la metalicidad de la muestra más pobre en metal de NGC 5139. A partir de la distribución de velocidad radial en función de la metalicidad de la figura 7, es posible observar que, las estrellas deficientes en hierro (círculos rojos) se distinguen apreciablemente del resto de estrellas miembro de NGC 5139, debido a su baja metalicidad, pero en términos de velocidad radial no existe una diferenciación entre esta componente con el resto de estrellas pertenecientes al cúmulo globular.

3. Análisis espectral línea a línea

En este capítulo se describe la metodología llevada a cabo para la estimación de las abundancias químicas.

3.1. Selección línea a línea

De los espectros registrados por APOGEE-2 para esta muestra estelar, se realizó una exhaustiva revisión línea a línea de ciertos elementos químicos de interés tales como, carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O), magnesio (Mg), aluminio (Al), silicio (Si), calcio (Ca), hierro (Fe), Níquel (Ni); que son representativos por ser trazadores fundamentales para el etiquetado químico de estrellas pertenecientes a distintas estructuras de la Vía Láctea (Hawkins and Gilmore, 2015).

Para hacer eficiente el trabajo de preselección de líneas de cada una de las 14 estrellas se hizo uso de un código escrito en el lenguaje de programación Python, el cual de forma iterativa va mostrando línea por línea de cada especie química en el espectro a medida que se le asigna un número: 1 para indicar que la línea es aceptada y 0 para rechazarla bien sea porque no se observa ninguna línea que corresponda a una determinada especie o porque es demasiado débil para poder extraer propiedades astrofísicas estelares. A manera de muestra del proceso ver las figuras 8 y 9.

Este análisis requirió un trabajo manual exhaustivo por la cantidad de estrellas, elementos y líneas por elemento analizadas visualmente (14 estrellas por 92 líneas = 1288 líneas examinadas, esto para los elementos registrados en la tabla 3. Exceptuando las líneas moleculares para el Carbono, Nitrógeno y Oxígeno).

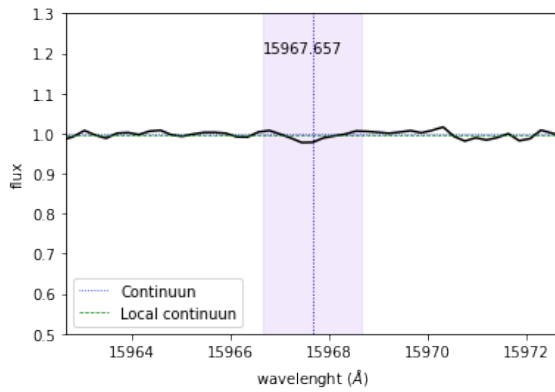
Esta sección fue una parte exhaustiva de trabajo manual, ya que es tener el número de

estrellas, por la cantidad de elementos a estudiar, por el número de líneas de absorción de cada uno. En la sección de anexos (ver aquí 1) se encuentra una pequeña muestra de líneas seleccionadas durante el proceso.

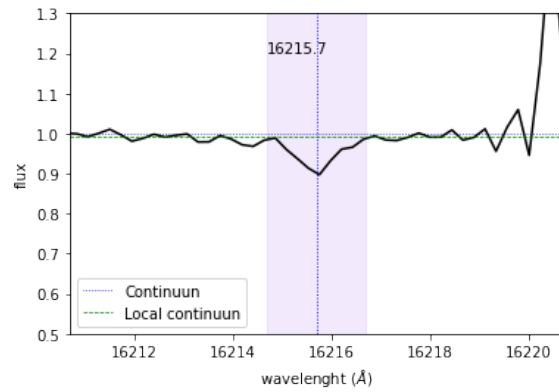
Tabla 3

Número de líneas de absorción para cada especie química examinadas una a una manualmente.

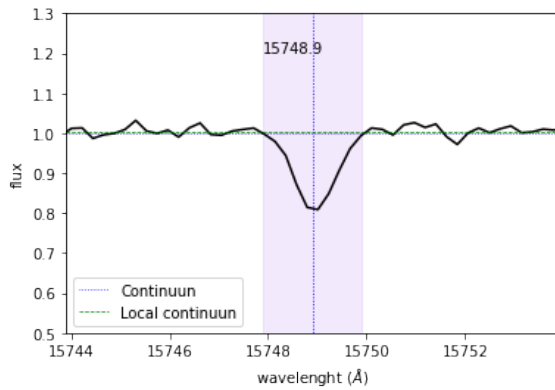
Fe I	Si I	Mg I	Al I	Ca I	Ni I
44	12	3	6	5	22



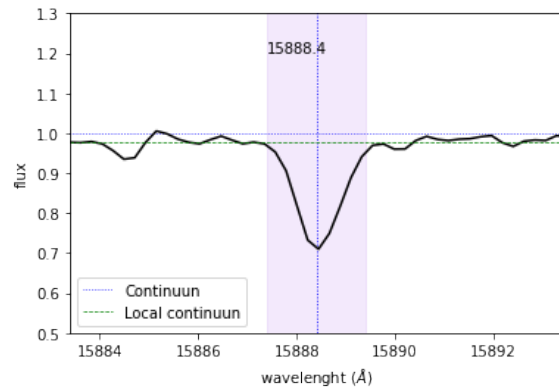
(a) Línea descartada de Fe



(b) Línea descartada de Si

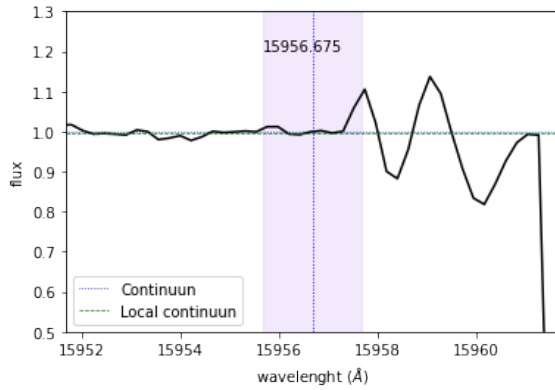


(c) Línea seleccionada de Mg

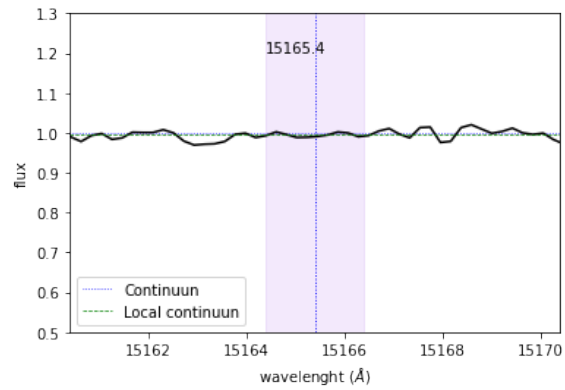


(d) Línea seleccionada de Si

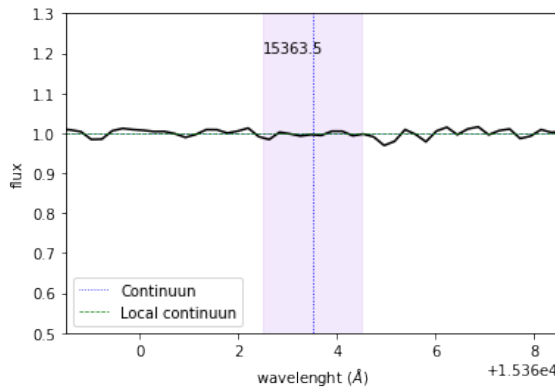
Figura 8. Líneas que fueron descartadas se muestran en los paneles (a) para el hierro (Fe) y (b) silicio (Si), y líneas aceptadas para analizar en los paneles (c) magnesio (Mg) y (d) silicio (Si).



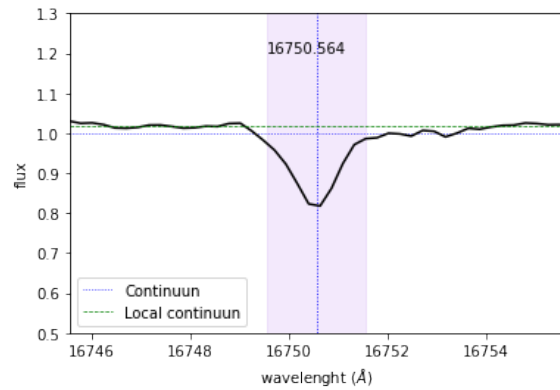
(a) Línea descartada de Al



(b) Línea descartada de C



(c) Línea descartada de N



(d) Línea seleccionada de Al

Figura 9. Líneas que fueron descartadas se muestran en los paneles a) aluminio (Al), b) carbono (C) y panel c) nitrógeno (N) y d) silicio (Si).

3.2. Determinación de abundancias

La determinación de las abundancias de las especies químicas (C, N, O, Al, Si, Mg, Ni, Ca) se llevó a cabo mediante el uso del código BACCHUS por sus siglas en inglés, Brussels Automatic Code for Characterizing High accuracy Spectra (Masseron et al., 2016). Este código es óptimo y de alta precisión para tal objetivo, porque usa cuatro métodos: ajuste (χ^2), ajuste del perfil de

línea (syn), intensidad de línea central (int), ancho equivalente (eqw) según los específica Hayes et al. (2022). Para el cálculo de las abundancias, los valores de $\log(n_X/n_H)_*$ arrojados por cada uno de los métodos deben converger mediante unos indicadores, es decir, deben tomar el valor de 1, si no todos los indicadores de los métodos convergen, entonces se vuelve a realizar un proceso de selección donde se descartan las líneas para las cuales los métodos no convergen a 1, de lo contrario se acepta y se realiza un promedio de los valores determinados por el método de χ^2 debido a su robustez para las líneas aceptadas de cada una de las especies químicas de interés. Asimismo, BACCHUS realiza los análisis de los espectros observados en comparación con espectros sintéticos considerando el equilibrio termodinámico local y transferencia radiativa con los modelos atmosféricos MARCS (Gustafsson et al., 2008).

Para usar BACCHUS como una herramienta computacional esencial para este trabajo, se deben ingresar los espectros de cada estrella, las líneas seleccionadas bien comportadas y los parámetros atmosféricos de entrada, que son importantes para generar los modelos atmosféricos para poder caracterizar los espectros (ver figura 10).

3.2.1. Parámetros atmosféricos. Los parámetros atmosféricos de entrada fueron tomados del sondeo APOGEE DR17 de acuerdo a los que reportó Johnson et al. (2020) sobre las estrellas más pobres en metal, que se pueden visualizar en la tabla 2. Adicionalmente, según Johnson et al. (2020) consideran la fotometría de van Leeuwen et al. (2000) para la obtención de los parámetros atmosféricos, como se explica a continuación:

Temperatura efectiva (T_{eff})

Se obtiene a partir de fotometría. Johnson et al. (2020) considerando la relación color-

temperatura de Alonso et al. (1999).

Gravedad superficial ($\log g$)

Se consideran las temperaturas fotométricas y las magnitudes absolutas bolométricas (M_{bol}), mediante la siguiente expresión:

$$\log(g_{\star}) = 0.40(M_{bol.} - M_{bol.\odot}) + \log(g_{\odot}) + 4 \left[\log \left(\frac{T_{\star}}{T_{\odot}} \right) \right] + \log \left(\frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right).$$

Metalicidad [Fe/H]

Los valores de metalicidad brindados por Johnson et al. (2020) para las estrellas más pobres en metal se utilizarán como parámetro de entrada en el código BACCHUS, pero estos valores son escalados al valor de referencia solar ($\log(n_X/n_H)_{\odot}$) de Asplund et al. (2005), ya que en esta referencia está configurado el código BACCHUS.

Tabla 4

Referencia solar de Anders and Grevesse (1989) la cual usa Johnson et al. (2020) y referencia solar de Asplund et al. (2005).

Anders $\log(n_X/n_H)_{\odot}$	$\log(n_X/n_H)_{\odot}$	Asplund
7.67 ± 0.03		7.45 ± 0.05

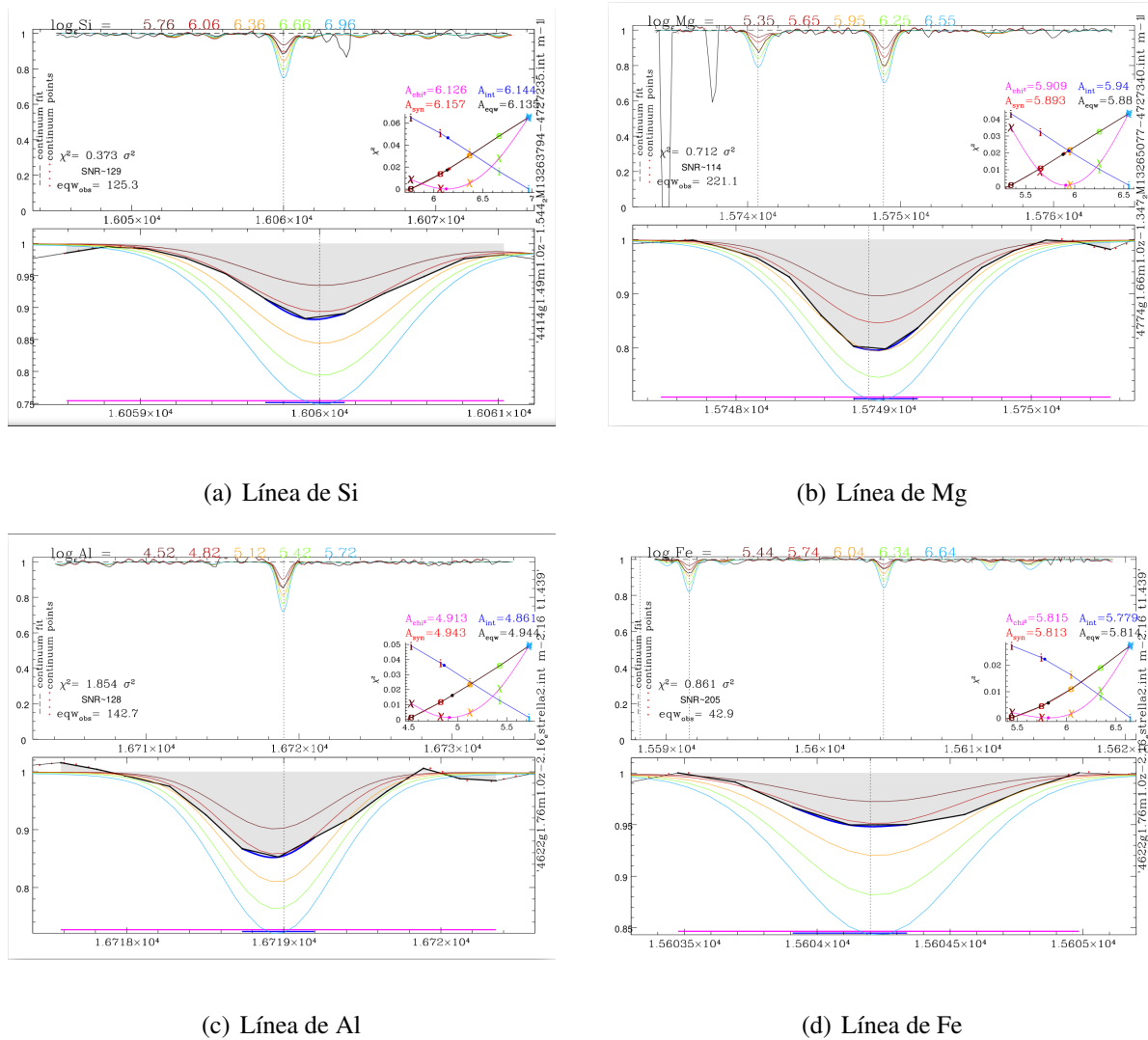


Figura 10. Líneas de absorción de las especies químicas Si, Mg, Al, Fe, respectivamente, como se indica en cada panel. Las cuales fueron ajustadas mediante los modelos atmosféricos con el uso del código *BACCHUS* para la determinación de las respectivas abundancias. En cada panel se observa en la parte superior derecha, se observan los valores de abundancias por cada método de ajuste. Hacia la parte izquierda de cada panel el valor del χ^2 , la razón señal ruido y el ancho equivalente de la línea en el espectro observado.

Finalmente, para el cálculo de las abundancias elementales de cada estrella muy pobre en metal se utilizaron las siguientes expresiones matemáticas, las cuales se pueden revisar en Wilson

et al. (2019)

$$[X/H] = \log(n_X/n_H)_* - \log(n_X/n_H)_\odot.$$

El primer término después de la igualdad son los resultados que se obtienen del cómputo de BACCHUS; y toda la expresión define la abundancia de cada elemento individual X, respecto al hidrógeno (H).

La metalicidad $[M/H]$, donde M corresponde al hierro (Fe), es un índice que toma como referencia al Sol, es decir, $[M/H] = 0$ y si se obtienen valores negativos se habla de pobres en metales y si son positivos se trata de estrellas enriquecidas en metales.

Posteriormente, se determina la desviación de un elemento específico,

$$[X/M] = [X/H] - [M/H],$$

4. Interpretación de resultados de abundancias elementales

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las abundancias químicas que se encuentran sintetizados en las tablas: los resultados obtenidos de este trabajo con BACCHUS (ver tabla 5), valores otorgados por ASPCAP (ver tabla 6) y en la tabla 7, los valores promedio, desviaciones estándar. Asimismo, las gráficas de abundancia $[X/Fe]$ en función de la metalicidad $[Fe/H]$. Es de interés analizar las especies químicas que fueron determinadas en este trabajo, ya que constituyen familias de elementos según su origen debido a distintos procesos nucleosintéticos. Entre esos se tienen:

- Elementos α (Mg, Si, Ca)
- Elementos Z-impar (Al)
- Elementos máximo de Fe (Fe, Ni)

Tabla 5

Abundancias elementales determinadas usando el código BACCHUS.

APOGEE_ID	[C/Fe]	[N/Fe]	[O/Fe]	[Mg/Fe]	[Si/Fe]	[Ca/Fe]	[Al/Fe]	[Fe/H]	[Ni/Fe]
2M13253523–4726598	+0.34 ± 0.09	+0.37 ± 0.05	+0.53 ± 0.10	...	-1.83 ± 0.07	-0.34 ± 0.06
2M13255843–4732200	+0.40 ± 0.15	+0.54 ± 0.14	...	-0.28 ± 0.05	-2.12 ± 0.06	+0.17 ± 0.07
2M13262564–4726228	+0.13 ± 0.12	+0.28 ± 0.05	...	-0.32 ± 0.11	-1.72 ± 0.07	...
2M13263794–4727235	...	+0.48 ± 0.14	+0.10 ± 0.10	+0.25 ± 0.08	+0.33 ± 0.15	+0.29 ± 0.06	+0.44 ± 0.08	-1.91 ± 0.08	...
2M13265077–4727340	+1.14 ± 0.13	+1.11 ± 0.05	+0.52 ± 0.10	+0.32 ± 0.08	+0.47 ± 0.09	...	+0.43 ± 0.13	-1.77 ± 0.06	+0.11 ± 0.11
2M13265711–4727091	+0.28 ± 0.07	+0.19 ± 0.13	+0.26 ± 0.14	+0.25 ± 0.11	-0.14 ± 0.11	-1.88 ± 0.14	...
2M13265800–4730387	+0.80 ± 0.12	+0.10 ± 0.08	+0.40 ± 0.14	+0.29 ± 0.09	+0.55 ± 0.07	-1.66 ± 0.07	...
2M13264450–4728563	-0.04 ± 0.10	+0.33 ± 0.08	...	-0.29 ± 0.15	-1.78 ± 0.08	...
2M13265263–4728092	+0.31 ± 0.14	+0.48 ± 0.06	...	+0.61 ± 0.14	-1.88 ± 0.12	+0.01 ± 0.12
2M13265528–4731438	+0.38 ± 0.06	+0.49 ± 0.08	...	...	-2.14 ± 0.06	...
2M13265647–4728138	+0.07 ± 0.07	+0.29 ± 0.09	...	+0.09 ± 0.11	-1.47 ± 0.10	+0.07 ± 0.15
2M13265791–4728562	+0.35 ± 0.11	+0.44 ± 0.09	...	+0.03 ± 0.13	-1.96 ± 0.05	+0.14 ± 0.07
2M13273227–4727298	+0.21 ± 0.07	+0.37 ± 0.14	...	-0.04 ± 0.09	-1.65 ± 0.10	...
2M13280680–4726234	-0.04 ± 0.07	+0.14 ± 0.13	...	...	-1.63 ± 0.12	...

Tabla 6

Abundancias elementales extraídas de la Pipeline ASPCAP.

APOGEE_ID	[C/Fe]	[N/Fe]	[O/Fe]	[Mg/Fe]	[Si/Fe]	[Ca/Fe]	[Al/Fe]	[Fe/H]	[Ni/Fe]
2M13253523–4726598	+0.25 ± 0.11	+0.80 ± 0.09	+0.28 ± 0.10	+0.32 ± 0.04	+0.26 ± 0.04	+0.48 ± 0.08	–0.46 ± 0.04	–1.96 ± 0.02	–0.20 ± 0.06
2M13255843–4732200	+0.31 ± 0.20	+1.89 ± 0.21	+0.11 ± 0.22	+0.32 ± 0.06	+0.24 ± 0.06	...	–0.38 ± 0.05	–2.05 ± 0.02	+0.31 ± 0.08
2M13262564–4726228	+0.05 ± 0.16	+0.29 ± 2.45	+0.60 ± 0.16	+0.35 ± 0.05	+0.36 ± 0.05	...	–0.20 ± 0.04	–2.06 ± 0.02	+0.48 ± 0.07
2M13263794–4727235	–0.21 ± 0.07	+0.82 ± 0.06	+0.20 ± 0.06	+0.22 ± 0.03	+0.25 ± 0.03	+0.30 ± 0.05	+0.33 ± 0.03	–1.73 ± 0.01	+0.05 ± 0.04
2M13265077–4727340	–0.28 ± 0.08	+1.01 ± 0.07	+0.12 ± 0.08	+0.25 ± 0.04	+0.29 ± 0.04	+0.08 ± 0.06	+0.33 ± 0.04	–1.77 ± 0.02	+0.08 ± 0.05
2M13265711–4727091	+0.75 ± 0.12	+0.42 ± 0.10	+0.35 ± 0.12	+0.22 ± 0.05	+0.26 ± 0.05	+0.38 ± 0.09	–0.23 ± 0.05	–1.84 ± 0.02	...
2M13265800–4730387	–0.03 ± 0.10	+0.51 ± 0.13	+0.02 ± 0.09	+0.21 ± 0.04	+0.34 ± 0.05	...	+0.48 ± 0.05	–1.88 ± 0.02	+0.13 ± 0.06
2M13264450–4728563	–0.52 ± 0.07	+0.33 ± 0.10	+0.31 ± 0.06	+0.05 ± 0.04	+0.25 ± 0.04	–0.38 ± 0.06	–0.32 ± 0.04	–1.78 ± 0.01	–0.13 ± 0.05
2M13265263–4728092	–0.36 ± 0.12	–0.05 ± 0.27	+0.46 ± 0.07	+0.24 ± 0.04	+0.24 ± 0.04	+0.41 ± 0.06	+0.45 ± 0.04	–1.79 ± 0.01	+0.09 ± 0.05
2M13265528–4731438	+0.17 ± 0.16	–0.54 ± 2.15	...	+0.34 ± 0.05	+0.35 ± 0.05	+0.12 ± 0.09	...	–1.92 ± 0.02	...
2M13265647–4728138	+0.24 ± 0.04	+0.24 ± 0.04	+0.54 ± 0.04	+0.36 ± 0.02	+0.32 ± 0.02	+0.36 ± 0.03	–0.03 ± 0.02	–1.42 ± 0.01	+0.03 ± 0.03
2M13265791–4728562	–0.23 ± 0.08	+0.92 ± 0.07	+0.65 ± 0.07	+0.37 ± 0.04	+0.33 ± 0.04	–0.62 ± 0.06	–0.02 ± 0.04	–1.84 ± 0.02	+0.08 ± 0.05
2M13273227–4727298	–0.35 ± 0.23	+1.36 ± 0.11	+0.62 ± 0.12	+0.35 ± 0.04	+0.43 ± 0.04	+0.04 ± 0.08	–0.03 ± 0.04	–1.98 ± 0.02	...
2M13280680–4726234	–0.04 ± 0.19	+0.07 ± 7.78	+0.52 ± 0.20	+0.36 ± 0.06	+0.28 ± 0.06	+0.52 ± 0.11	...	–2.14 ± 0.02	–0.19 ± 0.08

Tabla 7

Valores de media y desviación estándar de las abundancias y metalicidad determinados con el uso de BACCHUS.

Elemento	[C/Fe]	[N/Fe]	[O/Fe]	[Mg/Fe]	[Si/Fe]	[Ca/Fe]	[Al/Fe]	[Ni/Fe]	[Fe/H]
Estrellas	1	2	4	14	14	4	11	6	14
Media	+1.14	+0.79	+0.42	+0.21	+0.37	+0.34	+0.10	+0.03	–1.82
σ	...	0.44	0.30	0.15	0.11	0.13	0.35	0.19	0.19

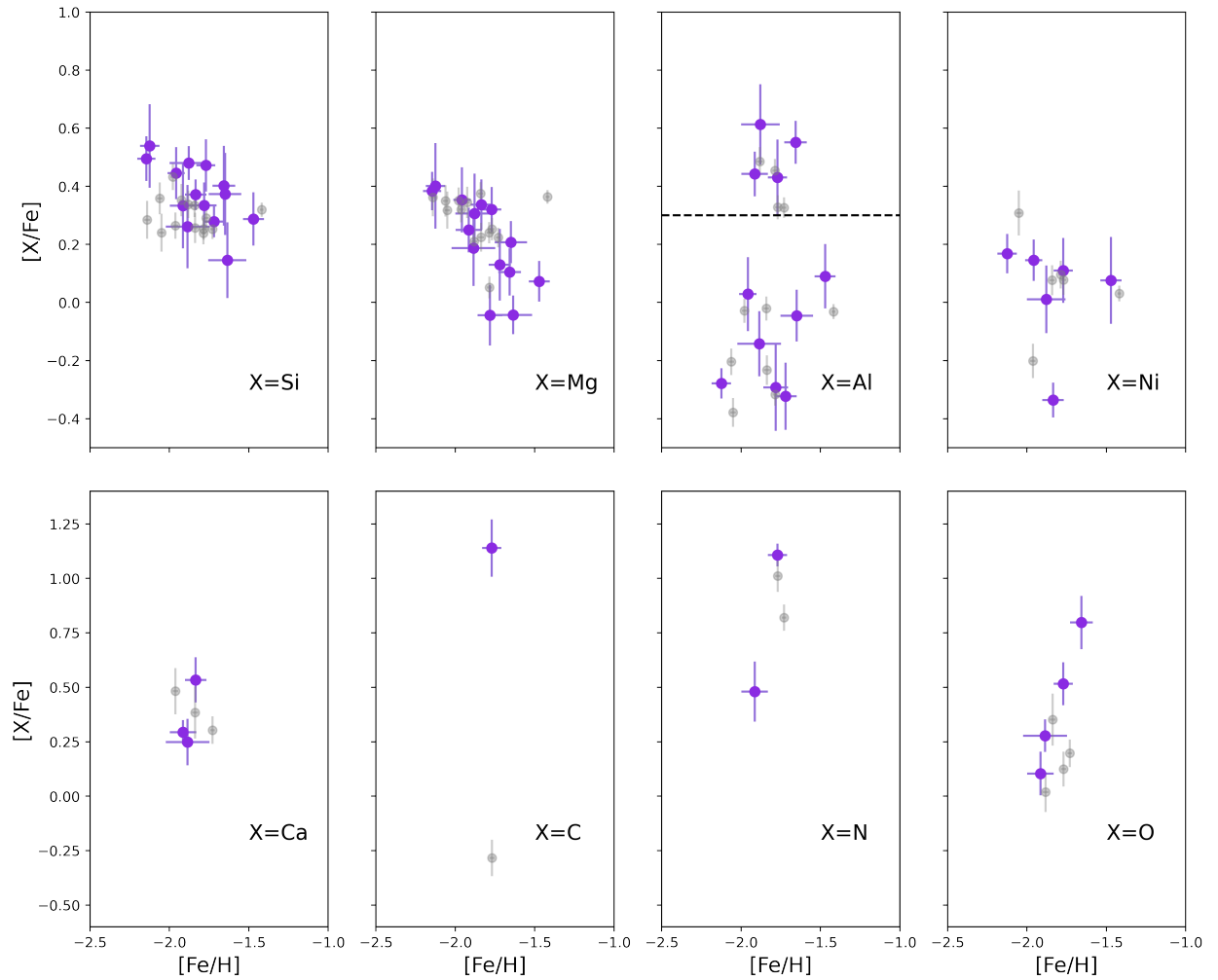


Figura 11. Distribución de abundancias químicas individuales de las especies, de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, Si, Mg, Al, Ni, Ca, C, N y O, en el plano $[X/Fe]$ vs. $[Fe/H]$ de la muestra más pobre en metal de NGC 5139. Los puntos grises corresponden a datos de ASPCAP, y los puntos de color violeta a los valores de este trabajo obtenidos con BACCHUS.

A partir de la figura 11 es posible detectar firmas químicas evolutivas del complejo y par-

particular objeto NGC 5139. Donde se observan ciertas tendencias entre cada abundancia elemental con la metalicidad, lo que indica una dependencia, que involucran procesos de enriquecimiento distintos para cada elemento en función de este rango de valores de metalicidad.

4.1. Elementos α (Mg, Si y Ca)

Los elementos de este grupo se generan a través de capturas de partículas α o núcleos de Helio. Las explosiones de supernova tipo II son causantes de la formación de estos elementos, asimismo, se produce oxígeno.

En la figura 11 se observa una tendencia de anticorrelación entre $[\text{Si}/\text{Fe}]$ y $[\text{Fe}/\text{H}]$ donde las estrellas más enriquecidas en Si son más deficientes en hierro. Asimismo, se observa esta tendencia con $[\text{Mg}/\text{Fe}]$; mientras que para $[\text{Ca}/\text{Fe}]$ no es posible hacer esta afirmación, ya que solo fue posible obtener valores para tres estrellas de la muestra debido a la inspección línea a línea donde no se observaron líneas de absorción de Ca o fueron demasiado débiles. Sin embargo, estas tres estrellas se encuentran mejoradas en este elemento con $[\text{Ca}/\text{Fe}] > +0.25$.

4.2. Elemento Z-impar (Al)

Para la abundancia $[\text{Al}/\text{Fe}]$, se observa una notable división en dos grupos distintos de estrellas, tanto para los datos ASPCAP como los determinados en este trabajo con BACCHUS. Por un lado, se tienen cuatro estrellas que presentan un valor de $[\text{Al}/\text{Fe}]$ por encima de 0.3, y segundo grupo conformado por siete estrellas cuyo valor de $[\text{Al}/\text{Fe}]$ se sitúa por debajo de 0.3. Este patrón muestra una dispersión que sugiere variabilidad en las composiciones estelares, con algunas estrellas más enriquecidas que otras en este elemento.

El estudio de Mészáros et al. (2020), establece que estrellas con valores $[\text{Al}/\text{Fe}] < +0.3$ se

asocian a estrellas de primera generación, mientras que aquellas con valores $[Al/Fe]>+0.3$ se clasifican como estrellas de segunda generación.

La presencia de estos dos grupos de estrellas con diferentes abundancias de Al puede sugerir que hubo diferentes procesos de formación estelar y evolución química en esta componente más deficiente en hierro perteneciente a NGC 5139.

Adicionalmente, el hecho de que existan estrellas con estas proporciones muestra evidencia que están enriquecidas significativamente en comparación con abundancias típicas galácticas $[Al/Fe]<+0.5$, como mencionan en el estudio de Baeza et al. (2022).

4.3. Elementos máximo de Ni y Fe

Estos dos elementos son producidos por supernovas tipo Ia. Para esta componente estelar muy deficiente en hierro se encontró un $\langle [Fe/H] \rangle = -1.82 \pm 0.08$ con una dispersión de 0.19. Cabe mencionar que este valor de metalicidad fue teniendo en cuenta la abundancia solar de Asplund et al. (2005) para la determinación en BACCHUS; por lo que los valores de metalicidad de entrada fueron convertidos de Anders and Grevesse (1989) que son las abundancias solares consideradas por Johnson et al. (2020) a la referencia solar de Asplund et al. (2005) (ver tabla 4).

Respecto al Ni, se observa que las estrellas tienen bajas proporciones en comparación con las abundancias de otros elementos, ya que $[Ni/Fe] < +0.2$. Adicionalmente, la media de Ni muestra que es el elemento de menor proporción.

4.4. C+N+O

Hay una estrella enriquecida en carbono $[C/Fe] = +1.14$ en contraste con lo reportado por ASPCAP para esta misma estrella donde su valor es de -0.28 .

Se determinaron las proporciones $[N/Fe]$ donde se encontraron dos estrellas enriquecidas en N con valores de +0.48 y +1.11.

En el plano $[O/Fe]$ vs. $[Fe/H]$ es posible apreciar una leve correlación en la cual a estrellas con enriquecimiento de oxígeno la metalicidad tiende a aumentar.

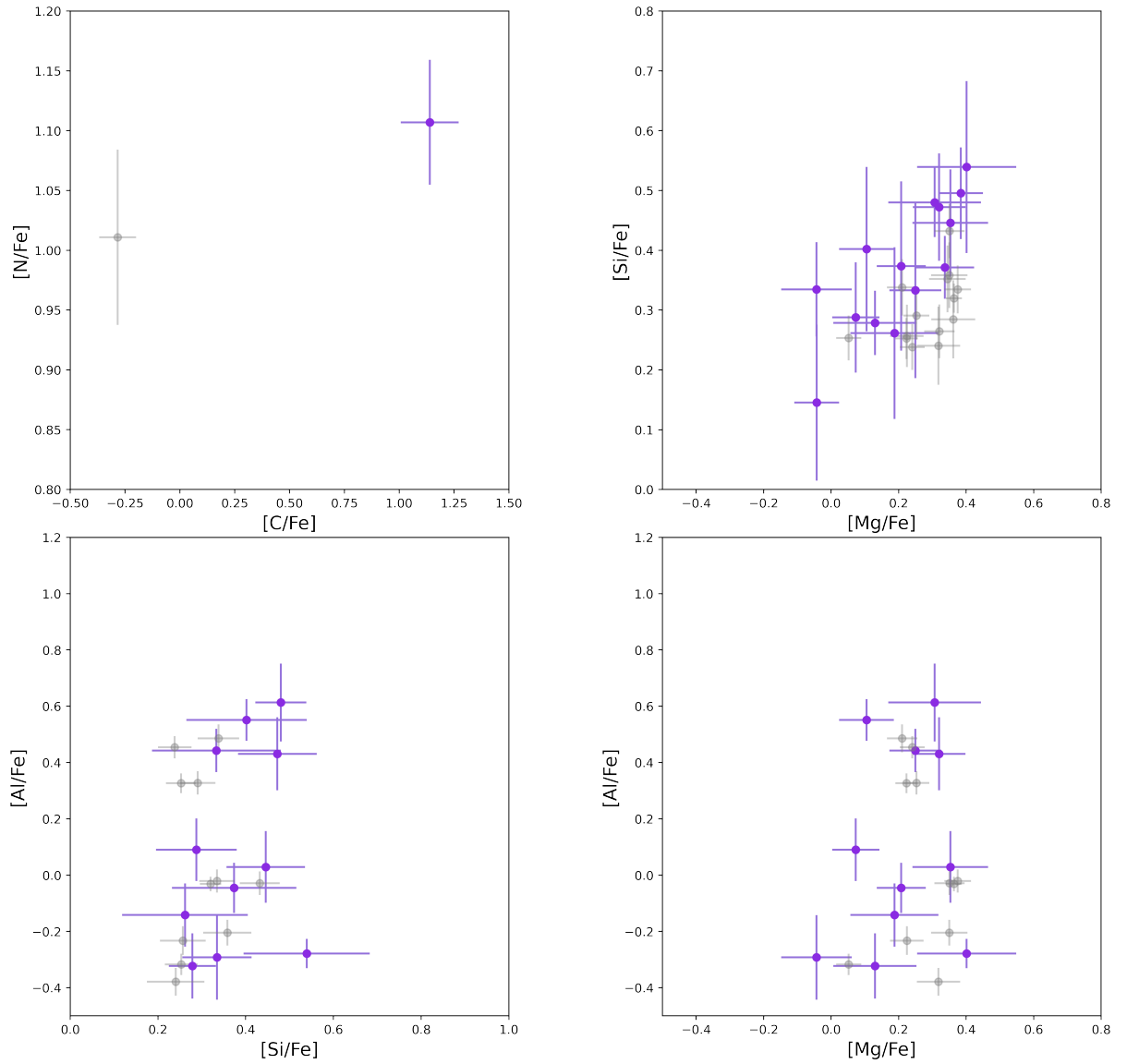


Figura 12. Correlaciones. En punto grises los datos de ASPCAP y en puntos rojos los datos obtenidos en este trabajo usando BACCHUS.

4.5. Correlaciones

Respecto a la figura 12 no es evidente ninguna tendencia bien sea de correlación o anti-correlación para los diagramas [Al/Fe] en función de [Si/Fe] y [Al/Fe] en función de [Mg/Fe]. Según la literatura (ver, por ejemplo Mészáros et al. (2021)), la anti-correlación Al-Mg es típica entre las estrellas de los cúmulos globulares de la Vía Láctea; puesto que estos elementos se forman a través de procesos de nucleosíntesis distintos. Además que permite indicar la prevalencia de poblaciones múltiples como menciona Baeza et al. (2022). Pero, en este caso no es apreciable esa tendencia.

Ahora, si se observa el panel de abundancia de silicio [Si/Fe] en función de la abundancia de magnesio [Mg/Fe], hay una tendencia de correlación lo que es consistente, ya que estos dos elementos se generan a partir del mismo proceso de nucleosíntesis y ambos pertenecen a los elementos α .

5. Conclusiones

- Se ajustaron los modelos atmosféricos línea a línea para C, N, O, Si, Al, Fe, Mg, Ni, Ca de los espectros de alta resolución en infrarrojo cercano (banda H) del sondeo APOGEE-2 DR17, utilizando BACCHUS.
- Se determinaron manualmente por primera vez las abundancias químicas de las 14 estrellas más pobre en metal de NGC 5139 utilizando BACCHUS; garantizando que son valores confiables para [C/Fe], [N/Fe], [O/Fe], [Al/Fe], [Si/Fe], [Mg/Fe], [Fe/H], [Ni/Fe] y [Ca/Fe].
- La evidencia de estrellas enriquecidas significativamente en aluminio en comparación con

las abundancias típicas de la Vía Láctea ($[Al/Fe] < +0.5$) respalda la idea de que ocurrieron eventos de enriquecimiento químicos distintos en esta región particular. En este caso, las estrellas enriquecidas probablemente estén asociadas a una segunda generación.

- Respecto a las determinaciones de abundancias de nitrógeno, carbono y oxígeno no es posible concluir con certeza una tendencia o algún fenómeno, ya que las líneas fueron demasiado débiles y solo se pudieron obtener para unas pocas estrellas de la muestra.
- En cuanto a las correlaciones no se observaron patrones bien marcados de esta tendencia para Al-Mg ni Al-Si. Sin embargo, se obtuvo una tendencia de correlación Si-Mg, en la hay estrellas enriquecidas tanto en silicio como en Mg, lo cual es de esperarse ya que ambos son elementos α que se forman bajo los mismos mecanismos; proporcionados por supernovas tipo II.

Referencias Bibliográficas

- Alonso, A., Arribas, S., and Martínez-Roger, C. (1999). The effective temperature scale of giant stars (F0-K5). II. Empirical calibration of T_{eff} versus colours and [Fe/H]. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 140:261–277.
- Anders, E. and Grevesse, N. (1989). Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1):197–214.
- Asplund, M., Grevesse, N., and Sauval, A. J. (2005). The Solar Chemical Composition. In Barnes, Thomas G., I. and Bash, F. N., editors, *Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, volume 336 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 25.
- Baeza, I., Fernández-Trincado, J., Villanova, S., Geisler, D., Minniti, D., Garro, E., Barbuy, B., Beers, T., and Lane, R. (2022). APOGEE-2S Mg-Al anti-correlation of the metal-poor globular cluster NGC 2298. *Astronomy and Astrophysics*, 662.
- Bastian, N. and Lardo, C. (2018). Multiple stellar populations in globular clusters. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56(1):83–136.
- Baumgardt, H. and Hilker, M. (2018). A catalogue of masses, structural parameters, and velocity dispersion profiles of 112 Milky Way globular clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 478:1520–1557.

- Carretta, E., Bragaglia, A., Gratton, R., D'Orazi, V., and Lucatello, S. (2009). Intrinsic iron spread and a new metallicity scale for globular clusters. *Astronomy & Astrophysics*, 508(2):695–706.
- Dinescu, D. I., Girard, T. M., and van Altena, W. F. (1999). Space Velocities of Globular Clusters. III. Cluster Orbits and Halo Substructure. *The Astronomical Journal*, 117:1792–1815.
- Fernández-Trincado, J. G., Minniti, D., Garro, E. R., and Villanova, S. (2022). APOGEE-2S view of the globular cluster Patchick 125 (Gran 3). *Astronomy & Astrophysics*, 657:A84.
- Fernández-Trincado, J. G., Minniti, D., Souza, S. O., Beers, T. C., Geisler, D., Bidin, C. M., Villanova, S., Majewski, S. R., Barbuy, B., Pérez-Villegas, A., Henao, L., Romero-Colmenares, M., Roman-Lopes, A., and Lane, R. R. (2021). VVV CL001: Likely the most metal-poor surviving globular cluster in the inner galaxy. *The Astrophysical Journal Letters*, 908:L42.
- Gustafsson, B., Edvardsson, B., Eriksson, K., Jørgensen, U. G., Nordlund, Å., and Plez, B. (2008). A grid of MARCS model atmospheres for late-type stars. *Astronomy & Astrophysics*, 486:951–970.
- Hawkins, J. and Gilmore (2015). Using chemical tagging to redefine the interface of the galactic disk and halo. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 453(1):758–774.
- Hayes, C. R., Masseron, T., Sobeck, J., García-Hernández, D. A., Prieto, C. A., Beaton, R. L., Cunha, K., Hasselquist, S., Holtzman, J. A., Jönsson, H., Majewski, S. R., Shetrone, M., Smith, V. V., and Almeida, A. (2022). BACCHUS analysis of weak lines in APOGEE spectra (BAW-LAS). *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 262:34.

- Johnson, C. I., Dupree, A. K., Mateo, M., Bailey, J. I., Olszewski, E. W., and Walker, M. G. (2020). The most metal-poor stars in Omega Centauri (NGC 5139). *The Astronomical Journal*, 159(6):254.
- Johnson, C. I. and Pilachowski, C. A. (2010). Chemical abundance for 855 giants in the globular cluster Omega Centauri (NGC 5139). *The Astrophysical Journal*, 722(2):1373–1410.
- Johnson, C. I., Pilachowski, C. A., Simmerer, J., and Schwenk, D. (2008). Fe and Al abundances for 180 red giants in the globular cluster Omega Centauri (NGC 5139). *The Astrophysical Journal*, 681:1505–1523.
- Kruijssen, J. M. D., Pfeffer, J. L., Chevance, M., Bonaca, A., Trujillo-Gomez, S., Bastian, N., Reina-Campos, M., Crain, R. A., and Hughes, M. E. (2020). Kraken reveals itself – the merger history of the Milky Way reconstructed with the e-MOSAICS simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498(2):2472–2491.
- Latour, M., Calamida, A., Husser, T.-O., Kamann, S., Dreizler, S., and Brinchmann, J. (2021). A stellar census in globular clusters with MUSE. *Astronomy & Astrophysics*, 653:L8.
- Massari, D., Koppelman, H. H., and Helmi, A. (2019). Origin of the system of globular clusters in the Milky Way. *Astronomy & Astrophysics*, 630:L4.
- Masseron, T., Merle, T., and Hawkins, K. (2016). BACCHUS: Brussels Automatic Code for Characterizing High accuracy Spectra. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1605.004.

Mészáros, S., Masseron, T., Fernández-Trincado, J. G., García-Hernández, D. A., Szigeti, L., Cunha, K., Shetrone, M., Smith, V. V., Beaton, R. L., Beers, T. C., Brownstein, J. R., Geisler, D., Hayes, C. R., Jönsson, H., Lane, R. R., Majewski, S. R., Minniti, D., Munoz, R. R., Nitschelm, C., Roman-Lopes, A., and Zamora, O. (2021). Homogeneous analysis of globular clusters from the APOGEE survey with the BACCHUS code – III. ω Cen. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505:1645–1660.

Mészáros, S., Masseron, T., García-Hernández, D. A., Allende Prieto, C., Beers, T. C., Bizyaev, D., Chojnowski, D., Cohen, R. E., Cunha, K., Dell’Agli, F., Ebelke, G., Fernández-Trincado, J. G., Frinchaboy, P., Geisler, D., Hasselquist, S., Hearty, F., Holtzman, J., Johnson, J., Lane, R. R., Lacerna, I., Longa-Peña, P., Majewski, S. R., Martell, S. L., Minniti, D., Nataf, D., Nidever, D. L., Pan, K., Schiavon, R. P., Shetrone, M., Smith, V. V., Sobeck, J. S., Stringfellow, G. S., Szigeti, L., Tang, B., Wilson, J. C., and Zamora, O. (2020). Homogeneous analysis of globular clusters from the APOGEE survey with the BACCHUS code - II. The Southern clusters and overview. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(2):1641–1670.

Pérez, A. E. G., Prieto, C. A., Holtzman, J. A., Shetrone, M., Mészáros, S., Bizyaev, D., Carrera, R., Cunha, K., García-Hernández, D. A., Johnson, J. A., Majewski, S. R., Nidever, D. L., Schiavon, R. P., Shane, N., Smith, V. V., Sobeck, J., Troup, N., Zamora, O., Weinberg, D. H., Bovy, J., Eisenstein, D. J., Feuillet, D., Frinchaboy, P. M., Hayden, M. R., Hearty, F. R., Nguyen, D. C., O’Connell, R. W., Pinsonneault, M. H., Wilson, J. C., and Zasowski, G. (2016). ASPCAP: The APOGEE Stellar Parameter and Chemical Abundance Pipeline. *The Astronomical Journal*,

151(6):144.

van Leeuwen, F., Le Poole, R. S., Reijns, R. A., Freeman, K. C., and de Zeeuw, P. T. (2000). A proper motion study of the globular cluster ω Centauri. *Astronomy and Astrophysics*, 360:472–498.

Wan, Z., Lewis, G., Li, T., Simpson, J., Martell, S., Zucker, D., Mould, J., Erkal, D., Pace, A., Mackey, D., Ji, A., Koposov, S., Kuehn, K., Shipp, N., Balbinot, E., Bland-Hawthorn, J., Casey, A., Costa, G., Kafle, P., and Silva, G. (2020). The tidal remnant of an unusually metal-poor globular cluster. *Nature*, 583:768–770.

Wilson, J. C., Hearty, F. R., Skrutskie, M. F., Majewski, S. R., Holtzman, J. A., Eisenstein, D., Gunn, J., Blank, B., Henderson, C., Smee, S., Nelson, M., Nidever, D., Arns, J., Barkhouser, R., Barr, J., Beland, S., Bershady, M. A., Blanton, M. R., Brunner, S., Burton, A., Carey, L., Carr, M., Colque, J. P., Crane, J., Damke, G. J., Davidson, J. W., Dean, J., Mille, F. D., Don, K. W., Ebelke, G., Evans, M., Fitzgerald, G., Gillespie, B., Hall, M., Harding, A., Harding, P., Hammond, R., Hancock, D., Harrison, C., Hope, S., Horne, T., Karakla, J., Lam, C., Leger, F., MacDonald, N., Maseman, P., Matsunari, J., Melton, S., Mitcheltree, T., O'Brien, T., O'Connell, R. W., Patten, A., Richardson, W., Rieke, G., Rieke, M., Roman-Lopes, A., Schiavon, R. P., Sobock, J. S., Stolberg, T., Stoll, R., Tembe, M., Trujillo, J. D., Uomoto, A., Vernieri, M., Walker, E., Weinberg, D. H., Young, E., Anthony-Brumfield, B., Bizyaev, D., Breslauer, B., Lee, N. D., Downey, J., Halverson, S., Huehnerhoff, J., Klaene, M., Leon, E., Long, D., Mahadevan, S., Malanushenko, E., Nguyen, D. C., Owen, R., Sánchez-Gallego, J. R., Sayres, C., Shane, N.,

Shectman, S. A., Shetrone, M., Skinner, D., Stauffer, F., and Zhao, B. (2019). The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE) spectrographs. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131:055001.

Apéndices

Apéndice A. Tablas de las líneas espectrales atómicas seleccionadas

A continuación se presentan las líneas espectrales de una de las 14 estrellas del estudio a manera de muestra, después del proceso de selección línea a línea realizado durante el desarrollo de este trabajo.

Tabla 8

Líneas seleccionadas de Fe I y Si I.

Nº	λ Fe I [Å]	λ Si I [Å]
1	15207.5300	15376.8000
2	15244.9740	15557.8000
3	15294.5620	15888.4000
4	15591.4970	15960.1000
5	15604.2250	16060.0000
6	15621.6540	16094.8000
7	15631.9500	16215.7000
8	15662.0160	16241.8000
9	15723.5860	16380.2000
10	15769.0940	16381.5000
11	15769.4230	16680.8000
12	15964.8670	16828.2000
13	15967.6570	-
14	16071.3990	-
15	16125.9010	-
16	16153.2490	-
17	16165.0310	-
18	16316.3230	-
19	16517.2260	-
20	16524.4690	-
21	16561.7670	-

Tabla 9

Líneas seleccionadas de Mg I y Al I.

N°	λ Mg I [Å]	λ Al I [Å]
1	15740.7000	16718.9570
2	15748.9000	16750.5640
3	15765.8000	16763.3590