

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
CAMPUS GUANAJUATO
DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS



*CARACTERIZACIÓN ESPECTROSCÓPICA DE
ESTRELLAS HUÉSPEDES DE EXOPLANETAS
CON EL TELESCOPIO TIGRE*

*El papel de los planetas en la determinación del momento
angular de las estrellas*

Tesis presentada al
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMÍA

como requisito para la obtención del grado de
DOCTORA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

por

M. en C. LAUREN MELISSA FLOR TORRES

asesorado por

Dr. ROGER COZIOL

Dr. KLAUS-PETER SCHRÖDER

Dr. DENNIS JACK

Guanajuato, Gto. - Febrero 2020

Al mejor mentor que he podido tener, Roger Coziol.
A mis padres, mis hermanas, mis abuelos,
y al resto de mi familia, en especial a mi prima Gabriela Torres Berrio
una pequeña gigante que me ha enseñado tanto.
A la lucha por la educación de calidad que se lleva en Colombia
y en muchos países latinos.

*“Si ustedes los jóvenes no asumen la dirección de su propio país, nadie va a
venir a salvarlo. ¡Nadie!”
- Jaime Garzón*

Agradecimientos

Institucionales

- Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haberme otorgado la beca con la que pude mantenerme durante el periodo de realización de mis estudios de doctorado.
- Agradezco a la Universidad de Guanajuato, en especial, al Departamento de Astronomía, a sus administrativos, investigadores y profesores, así como al Posgrado en Ciencias (Astrofísica) y a su coordinador por brindarme su apoyo y permitir realizar mi preparación profesional.
- Al consorcio del Telescopio TIGRE por el tiempo dado para la obtención de los espectros trabajados en esta tesis.
- A los proyectos bilaterales Conacyt-DFG 192334, 207772 y 278156 por el apoyo dado por la Universidad de Guanajuato (Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado, DAIP, División de Ciencias Naturales y Exactas, y Campus Guanajuato) para la participación a conferencias y colaboraciones internacionales.

Personales

- Un inmenso agradecimiento a mi mentor, asesor y amigo Dr. Roger Coziol. No me alcanzan las palabras para agradecer su apoyo incondicional. Estuvo en los mejores, buenos y malos momentos durante mi estancia en México. Es algo que nunca olvidaré.
- A Dr. Klaus Peter-Schröeder y Dr. Dennis Jack por hacer parte de la investigación hecha en el doctorado.

-
- A mis sinodales, Dres. Juan Pablo Torres Papaqui, Erick Nagel Vega, Josep Maria Masqué Saumell, Oscar Barragán, Sergi Blanco-Cuaresma y Lucero Uscanga por aceptar ser los jurados en mi titulación, tomarse el tiempo de leer mi tesis y por presentar comentarios de esta.
 - A Sergi Blanco-Cuaresma por su tiempo en la solución de dudas sobre el código iSpec.
 - A mi amigo Oscar Barragán, gracias por tu apoyo personal y profesional.
 - A la familia Torres-Papaqui, Juan, Gabriela y Miguel, por la amistad, que espero no se rompa con la distancia sino por el contrario se haga más fuerte.
 - Agradezco al resto de mis amigos de Guanajuato, Perla, Fernando, Paulina, Alina, Collins, Edith, Armando, Chema, Alicia, Jesús, Paulina, Joaquín, Sol, por ser parte de esa familia mexicana que espero sea para siempre.
 - Agradezco a mis padres José Flor y Silvia Torres, y a mis hermanas, Luisa Flor y Daniela Flor, por ser incondicionales, por su amor, su apoyo, su paciencia y su unión.
 - Agradezco al resto de mi familia colombiana, abuelas, abuelo, tíos, tías, primos, primas, desde cualquier parte del mundo, por cada palabra brindada en el momento justo.
 - Agradezco a quién durante cuatro años fue mi compañero, Sebastián Morales, gracias por el apoyo brindado.

Agradezco a estas tierras mexicanas que me permitió cumplir el sueño de ser una doctora en Astrofísica. Agradezco a todas las personas que conocí durante estos 6 años de estancia en México, pues se aprendió tanto de los buenos, como de los malos momentos.

Es momento de seguir mi camino en tierras colombianas, pues para nadie es un secreto que Colombia es un país que necesita de nuevos conocimientos, ideas y fuerzas. Es mi momento de apostarle a la educación colombiana, pues sé que en la tierra del olvido hay mucho potencial humano, niños y jóvenes, que lo que necesitan es una guía para salir adelante, sea en Colombia o lejos del país, de su familia, sus amigos, de todo.



Resumen

Hasta la fecha, el número de exoplanetas confirmados supera los 4000. La mayoría fueron detectados por el método de tránsito o de la velocidad radial. Ambas técnicas introducen un sesgo observacional el cual favorece la detección de objetos masivos, los cuales orbitan a distancias muy cercanas de sus estrellas anfitrionas. Esto nos lleva a cuestionarnos como es que dichos objetos se formaron y además determinar, en particular, si su proceso de formación sigue el modelo estándar para la formación del Sistema Solar. Para resolver este problema se necesita información sobre las características físicas de sus estrellas, las cuales se pueden relacionar con el proceso de formación de los sistemas planetarios. Una de estas características es la velocidad de rotación de las estrellas, la cual se relaciona con el momento angular, que a su vez se relaciona con las propiedades del disco protoplanetario en donde se forman los planetas.

En esta tesis se desarrolló un método semi-automático de análisis espectral, usando el código iSpec, para determinar rápidamente y de manera confiable las características físicas más importantes de estrellas anfitrionas de exoplanetas: la temperatura efectiva, T_{eff} , la gravedad de superficial, $\log(g)$, dos índices de metalicidad, $[M/H]$ y $[Fe/H]$, así como la velocidad de rotación, $V \sin i$. Con el uso del telescopio TIGRE (Telescopio Internacional de Guanajuato Robótico Espectroscópico) de 1.2 m instalado en Guanajuato, se obtuvieron espectros de resolución media-alta ($R \sim 20000$) para 39 estrellas anfitrionas de exoplanetas, las cuales analizamos usando el método creado en esta tesis. Los resultados que se obtuvieron fueron usados para estudiar la relación entre el momento angular de las estrellas y de sus planetas, distinguiendo entre dos tipos: planetas de baja masas o LME ("Low Mass Exoplanet") y planetas más masivos o HME ("High Mass Exoplanet"), que por hipótesis se difieren de los planetas LME por tener envoltentes dominantes de Hidrógeno Metálico Líquido (LMH en inglés). Como nuestra muestra observada es pequeña, se compararon nuestros resultados con los resultados de una muestra más grande determinada a partir de datos de la literatura, y por medio de pruebas estadísticas se confirmó el nivel de confiabilidad de todos los resultados reportados en esta tesis.

Se encontró una relación entre $V \sin i$ y el conjunto $T_{\text{eff}} - \log(g)$, consistente con una variación del momento angular de las estrellas con sus masas: el momento angular crece con la masa de las estrellas. También se confirmó que los planetas más masivos, de tipo HME,

orbitan preferiblemente alrededor de estrellas de alta masa y alta velocidad de rotación, mientras los planetas LME siguen una tendencia inversa. Además determinamos que los planetas HME tienen momentos angulares más altos que los planetas LME. Basándonos en estos resultados determinamos que la componente principal que podría explicar nuestras observaciones es el disco protoplanetario (*ProtoPlanetary Disk*, PPD). A medida que la masa de las estrellas aumenta, también aumenta su velocidad de rotación. Por lo tanto, a medida que la masa de las estrellas aumenta, también aumenta la masa del PPD y de los exoplanetas que se forman alrededor de él, y así el momento angular de ambos. Consistente con esta explicación, se observa que los planetas HME pierden más momento angular por migración que los planetas LME, lo cual es consistente con lo encontrado. Adicionalmente, se encontró que los planetas HME son menos sensibles a los efectos de migración por marea (interacciones estrella-planeta) que los LME. Esto sugiere una diferencia de composición que hace las envolturas de los planetas HME más rígidas que las envolturas LME, lo cual es consistente con la hipótesis de la envoltura de Hidrógeno Metálico Líquido (ya que los HME no son comprensibles). En general concluimos que, tomando en cuenta la variación de masa del PPD se puede explicar la formación de los exoplanetas con el modelo estándar para el Sistema Solar.

En nuestro análisis se confirmó que el Sol tiene un momento angular comparable al momento angular de las estrellas anfitriones de planetas LME (pero no con estrellas huéspedes de planetas de tipo HME). Por otro lado, el momento angular del Sistema Solar (Sol + planetas) es único por su valor tan alto. Esto implica que la migración de los planetas en el disco fue poco importante en el PPD del Sol. Esta diferencia sugiere que un fenómeno adicional debe haber sido activado durante la formación del Sol. Dentro del modelo estándar consistente con los exoplanetas, las condiciones para el Sistema Solar podrían ser: 1- un PPD de masa mínima, y 2- la formación rápida de un sistema múltiple de planetas en equilibrio por el fenómeno de resonancia gravitacional. Por lo tanto, los sesgos observacionales en el descubrimiento de exoplanetas, no nos permite concluir todavía si la formación del Sistema Solar fue una formación típica o peculiar.

Abstract

To date, the number of exoplanets confirmed has surpassed 4000. The majority of these exoplanets were discovered either through the transit method or the radial velocity method. Both techniques introduce serious observational biases, favoring the discovery of massive gas giants that are found to be located very near their host stars. This raises one important question about their formation process: is the formation of exoplanets consistent with the standard model of formation of the solar system? To answer this question we need information about the physical characteristics of the stars that can be connected with the process of the formation of the planets. One such characteristic is the rotational velocity of a star, which through the angular momentum can yield some information about the protoplanetary disk where the planets formed.

In this thesis, a semi-automatic method was developed using the spectral analysis code iSpec, to measure quickly and reliably the most important physical characteristics of exoplanet host stars: the effective temperature, T_{eff} , the surface gravity, $\log g$, two indices of metallicities, global ($[M/H]$) and relative ($[Fe/H]$), and the rotational velocity, $V \sin i$. Using the Tigré 1.2 m telescope installed in Guanajuato, medium-high resolution spectra ($R \sim 20000$) were obtained for 39 stars with exoplanet systems, these were analysed using the method created in this thesis. The data obtained were used to study how the angular momentum of stars correlated with the angular momentum of two different types of exoplanets that rotates around them. We distinguished two types of exoplanets based on their masses, the low-mass exoplanets (LME) and the higher mass exoplanets (HME), where liquid metallic hydrogen envelopes are suspected to be dominant. We used these data to shed some light about their formation process. To verify the effect of our small sample, we compared our results with those of a larger sample based on the literature. Through the use of statistical tests we confirmed the confidence interval of all our results in this thesis.

We found one relation between $V \sin i$, and $T_{\text{eff}} - \log(g)$, consistent with a variation of angular momentum of star with its mass: stellar angular momentum seem to decrease with their mass, following an empirical relation consistent with $J_* \propto M_*^\alpha$. In this relation the HME are found to be preferentially associated with high-mass and fast-rotator stars, while the LME seem to orbit preferentially around low-mass, slow-rotator stars. We also found

that the angular momentum of the HME is higher on average than the angular momentum of the LME.

Based on this observation we conclude that the main component explaining these behaviors is the PPD: since high mass stars rotate faster than low mass stars, they most also have had more massive and faster rotating PPD than low mass stars, explaining why more massive and faster rotating planets form around them. More massive PPD seems also to be a condition favoring large disk migration of planets, and the bigger the mass of the exoplanet the bigger the loss of angular momentum due to migration. However, LME seem to be more sensitive to tidal migration than HME, which could be due to the stiffness of a massive LMH envelopes (LMH contrary to gas being incompressible).

For the solar system, the fact that there are no evidence of large disk migration favors the minimal mass model, where multiple planets form rapidly interacting through resonance to reach near equilibrium. However, it is not clear how the solar system reached such conditions. Therefore, although the standard model was found to be consistent with the formation of the exoplanets, due to the strong observational biases in their detection we cannot decide yet if the formation of the solar system is standard or peculiar.

Índice general

Resumen	ix
Abstract	xi
1 Introducción	1
1.1 Modelo estándar de formación de planetas en el Sistema Solar	3
1.2 Los problemas del flujo magnético y del momento angular	6
1.3 Origen de los Júpiter calientes	12
1.4 Relacionando el proceso de formación de los exoplanetas con la formación de sus estrellas	15
1.5 Objetivos de esta tesis	17
2 Muestra de estrellas huéspedes de exoplanetas	21
2.1 Lista general	21
2.2 Relación Masa-Radius de los exoplanetas y BDs	31
2.3 Muestra observacional	33
3 Observaciones, reducción y método de análisis	35
3.1 Observaciones	35
3.2 Reducción y análisis	36
3.3 Método óptimo para el análisis de espectros del TIGRE usando iSpec	39
3.4 Muestra de comparación y método estadístico	40
4 Resultados y Discusión	41
4.1 Parámetros físicos de la muestra observada	41
4.2 Relación entre $V \sin i$, T_{eff} y $\log g$ de las estrellas	43
4.2.1 Diferenciando entre el tipo de exoplaneta	46
4.3 Momento angular en sistemas planetarios	51

4.3.1	Momento angular de las estrellas huéspedes de exoplanetas	51
4.3.2	Momento angular de los sistemas planetarios	55
4.3.3	Momento angular de los planetas	59
5	Conclusiones	63
5.1	Trabajo a Futuro	66
	Apéndice	67
A	Muestra general seleccionada en Agosto 2015	69
A.1	Lista de estrellas de sistemas simples (un solo exoplaneta conocido)	69
A.2	Lista de las estrellas con sistema múltiples	77
B	Estrellas candidatas para ser observadas con el Tigre	79
B.1	Estrellas candidatas a observación	79
B.2	Tiempos de exposición y señal a ruido de la muestra observada	81
C	Guía de uso de iSpec	83
D	Lista de líneas y segmentos usados en iSpec	87
D.1	Lista de líneas usadas en iSpec	87
D.2	Lista de segmentos usados en iSpec	89
E	Tablas de exoplanet.org	93
E.1	LMH de “Exoplanet orbit Database”	93
E.2	HJ de “Exoplanet orbit Database”	96
F	Artículo	101
F.1	Proceeding of The 19th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, 2016	101

Índice de figuras

1.1	<i>Distribución masa-periodo de los exoplanetas, distinguiendo por método de detección. Tomado de https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu</i>	2
1.2	<i>Esquema de un disco de acreción que se forma después la difusión ambipolar. También se muestra la zona muerta (“dead zone”) donde la viscosidad es baja y cubre una región entre 0.1 AU hasta 15 AU donde se forman los planetas. Tomado de la tesis de Champion (2019)</i>	8
1.3	<i>Esquema de la interacción entre el campo magnético de la estrella y el PPD en el modelo “disk-locking”; tomado de Matt & Pudritz (2004)</i>	9
1.4	<i>Modelo de frenado magnético propuesto por Matt & Pudritz (2004). En la izquierda se muestra la variación del torque magnético, el torque de acreción y el torque del debido a la viscosidad del disco. En la derecha se muestra el radio, $R_{out} \approx 1.6R_{co}$, donde la estrella se desconecta magnéticamente del disco.</i>	10
1.5	<i>Momento angular de las estrellas huéspedes de la muestra de Irwin (2015). En esta figura hacen la diferencia en color por el tipo de técnica observacional usada para la detección. La línea gris continua es la relación obtenida por (McNally, 1965) para las estrellas de alta masa y la discontinua es para las estrellas de baja masa. . . .</i>	17
1.6	<i>Momento angular de los sistemas planetarios de la muestra de Irwin (2015). En esta figura hacen la diferencia en color por el tipo de técnica observacional usada para la detección. La línea gris continua es la relación obtenida por (McNally, 1965) para las estrellas de alta masa y la discontinua es para las estrellas de baja masa. . . .</i>	18
1.7	<i>Comparación entre la masa y el semieje mayor en la muestra de Irwin (2015). Se puede observar la diferencia entre los valores del semieje mayor, lo cuál es un resultado de las diferencias en las técnicas observacionales.</i>	18
2.1	<i>Distribución de los 314 exoplanetas en sistemas simples, en función del tipos espectrales de su estrellas anfitriones.</i>	22
2.2	<i>Distribución de los 87 exoplanetas en 32 sistemas múltiples, en función de tipos espectrales de su estrellas anfitriones.</i>	22

2.3	<i>Diagrama de diagnóstico para la clasificación de exoplanetas en sistemas simples. Los diferentes símbolos corresponden al tipos espectrales de la estrellas anfitrionas. Las distancias de los exoplanetas a sus estrellas huéspedes está dada relativamente a la distancia de Júpiter al Sol ($a_{\text{planeta}}/a_{\text{jup}}$, donde $a_{\text{jup}} = 5.2 \text{ AU}$). La línea vertical corresponde a la Línea de Hielo en el Sistema Solar (donde los elementos volátiles se condensan en el disco protoplanetario, Martin & Livio, 2012).</i>	24
2.4	<i>Similar a la Figura 2.3 para los exoplanetas en sistemas múltiples.</i>	25
2.5	<i>Densidad de probabilidad de la metalicidad de las estrellas anfitriones para los sistemas simples (panel superior) y sistemas múltiples (panel inferior). La Línea representa la densidad de probabilidad de la muestra.</i>	27
2.6	<i>Distribución de la metalicidad en función del tipo espectral de las estrellas anfitrionas para los sistemas simples (panel superior) y sistemas múltiples (panel inferior). El punto es el promedio. Los “box-and-whisker” muestran la mediana (Q_2), el primero (Q_1) y tercero (Q_3) cuartiles y los “whiskers” corresponden a $Q_1 - 1.5(IQR)$ y $Q_3 + 1.5(IQR)$ donde IQR es el interquartile ($IQR = Q_3 - Q_1$).</i>	28
2.7	<i>Distribución de la edad en función del tipo espectral de la estrellas anfitrionas para los sistemas simples (panel superior) y sistemas múltiples (panel inferior). La Línea representa la densidad de probabilidad de la muestra.</i>	29
2.8	<i>Relación entre la metalicidad y la edad para los sistemas simples. Los símbolos están descritos en la Figura 2.3.</i>	30
2.9	<i>Diagrama HR teórico de sistemas simples (paneles de arriba) y sistemas múltiples (paneles de abajo). En las gráficas de la izquierda se incluyen toda las estrellas con su tipo espectral determinado, mientras en la derecha se incluyen las estrellas sin tipo espectral.</i>	31
2.10	<i>Relación Masa-Radius para la lista de exoplanetas actualizada el 14 de Abril de 2018. Esta lista se divide en tres grupos: HJ (puntos rojos), LMH (puntos azules) y BDs (puntos púrpuras). Las líneas verticales indican los límites para los exoplanetas LMH ($1.2M_J$) y el límite inferior de las BDs ($13M_J$).</i>	33
4.1	<i>Relación entre la velocidad de rotación y la temperatura efectiva tomando en cuenta la gravedad superficial. La zona gris corresponde a los intervalos de confiabilidad y la zona delimitada por las líneas punteadas corresponde al máximo y mínimo de estos intervalos (intervalos de predicción). En esta figura se observa el comportamiento descrito en Tassoul (2000), pero diferente a lo que se pensaba en aquel entonces, porque la velocidad de rotación no disminuye de manera aleatoria. Cada estrella se ha identificado según el número que le corresponde en la Tabla 4.1. El Triángulo negro representa la posición del Sol en nuestra relación.</i>	44
4.2	<i>Comparación de la relación obtenida en la Figura 4.1 con la muestra de la literatura.</i>	45
4.3	<i>Relación entre la T_{eff} y $V \sin i$ para las estrellas de la Tabla 4.1, diferenciándolas por el tipo de planeta que las orbitan (ver Tabla 4.1): equis azules HME y triángulos rojos LME. El círculo con equis representa el planeta que podría ser BDs (el objeto más masivo de la muestra). Puntos negros identifican las estrellas con sistemas múltiples (algunos con ambos HME y LME).</i>	47
4.4	<i>Similar a la Figura 4.3 pero para la muestra de comparación</i>	48

4.5	<i>Comparación entre la luminosidad y la temperatura de las estrellas de nuestra muestra diferenciándolas por el tipo de planeta que las orbitan (ver Tabla 3.1): equis azules HME y triángulos rojos LME) y de la muestra comparativa usando los mismos símbolos de la clasificación mencionada.</i>	48
4.6	<i>Box-plots para (a) la temperatura, y (b) la velocidad de rotación de las estrellas en sistemas HME y LME en ambas muestras (observadas y de comparación).</i>	49
4.7	<i>Resultados del test max-T para (a) la temperatura, y (b) la velocidad de rotación de las estrellas en sistemas HME y LME en ambas muestras (observadas y de comparación).</i>	50
4.8	<i>Momento angular específico (a) de las estrellas huéspedes observadas por el Tigre (cruz azul para HME y triángulo invertido rojo para LME), (b) de las estrellas huéspedes con sistemas HME en la muestra comparativa (cruz), y (c) de las estrellas huéspedes con sistemas LME en la muestra comparativa (triángulo invertido). El Sol se representa por un triángulo negro. También se muestra la relación $j_{\star} - M_{\star}$ encontrada por McNally (1965) para estrellas de baja masa (A5 - G0), y una extensión de la relación para las estrellas más masivas (línea punteada).</i>	52
4.9	<i>Box-plots para (a) la masa, y (b) el momento angular específico de las estrellas en ambas muestras (observadas y de comparación).</i>	53
4.10	<i>Resultados del test max-T para (a) la masa, y (b) el momento angular específico de las estrellas en ambas muestras (observadas y de comparación).</i>	54
4.11	<i>Momento angular específico de los sistemas planetarios, (a)HME (cruz verde) y LME (triángulo invertido verde) en la muestra observada, (b) HME de la muestra comparativa (cruz) y (c) LME de la muestra comparativa (triángulo invertido). También se muestra el momento angular del Sol (triángulo negro) y del Sistema Solar (triángulo verde). Las líneas están descritas en la Figura 4.8.</i>	56
4.12	<i>Momento angular de los planetas en diferentes sistemas y diferentes muestras: cruz azul HME observada, triángulo invertido rojo LME observada, cruz gris HME comparación y triángulo invertido LME comparación. Cabe destacar que la escala de distancia es logarítmica.</i>	57
4.13	<i>Igual que en la Figura 4.11 pero teniendo en cuenta la pérdida de momento angular debido a la migración.</i>	58
4.14	<i>Momento angular de los planetas respecto a la velocidad de rotación de sus estrellas huéspedes (en el caso de sistemas múltiples sólo se tomó en cuenta el planeta dominante).</i>	60
4.15	<i>(a) Box-plots comparando la excentricidad e de los exoplanetas de diferentes tipos en las dos muestras. (b) Análisis max-t comparando la excentricidad de las dos muestras.</i>	61
C.1	<i>Formato de los archivos espectrales para trabajar con iSpec</i>	83
C.2	<i>Espectro de la Luna (Sol) en longitudes de onda en rojo observada por el Tigre</i>	84
C.3	<i>Determinación de la velocidad radial para la corrección de este parámetro</i>	84
C.4	<i>Parámetros para el ajuste del continuo</i>	85
C.5	<i>Parámetros para la creación del espectro sintético del Sol</i>	85
C.6	<i>Espectro observado (línea azul) y espectro sintético creado (línea roja)</i>	86
C.7	<i>Parámetros para la determinación de los parámetros del espectro que se está estudiando</i>	86



Índice de tablas

3.1	<i>Parámetros físicos de los exoplanetas asociados a las estrellas observadas. (1) número de identificación para las estrellas, el cuál será usado en los gráficos del Capítulo 4. (2) número de identificación del planeta (la letra b, c, d, etc. sólo da una idea del orden de detección y por lo tanto no hay significado físico), (3) nombre del planeta, (4) tipo de clasificación del planeta siguiendo nuestra definiciones, (5), (6), (7), (8), (9), (10) características publicadas en Schneider: masa (5), radio (6), periodo (7) semieje mayor (8), excentricidad (9) y distancia a la Tierra (10). Es importante mencionar que 28 de estos exoplanetas fueron detectados por el método de Tr, 21 por RV y 2 por Imaging.</i>	37
3.2	<i>Parámetros físicos del Sol calculados mediante el método establecido en esta sección.</i>	39
4.1	<i>Parámetros físicos de las estrellas huésped de la muestra observada por el TIGRE. Col. (1) número de identificación de las estrellas en los gráficos, Col. (2) nombre de la estrella, Col. (3) y Col. (4) temperatura efectiva y su incertidumbre determinada por iSpec, Col. (5) y Col. (6) logaritmo de la gravedad superficial y su incertidumbre determinada por iSpec, Col. (7) y Col. (8) metalicidad total y su incertidumbre determinada por iSpec, Col. (9) y Col. (10) metalicidad relativa al hierro determinada por iSpec y su incertidumbre, Col. (11) y Col. (12) velocidad de rotación y su incertidumbre determinada por iSpec, Col. (13) y Col. (14) micro- y macro-turbulencia las cuales son determinadas de manera empírica (ecuaciones 3.1 y 3.2), Col. (15) media cuadrática del ajuste del espectro sintético determinada por iSpec, y Col. (16) tipo de sistema planetario “S.T” o “System type”: simple (S) o múltiple (M) más de un planeta.</i>	42
A.1	<i>Estrellas acompañadas de exoplanetas en sistemas simples. La información encontrada en esta tabla es: (1) nombre de las estrellas huéspedes, (2) ascensión recta, (3) declinación (4) magnitud visual, (5) metalicidad relativa al hierro, (6) masa, (7) radio, (8) tipo espectral, (9) edad y (10) temperatura efectiva.</i>	76

A.2	<i>Estrellas acompañadas de exoplanetas en sistemas múltiples. La información encontrada en esta tabla es: (1) nombre de las estrellas huéspedes, (2) ascensión recta, (3) declinación (4) magnitud visual, (5) metalicidad relativa al hierro, (6) masa, (7) radio, (8) tipo espectral, (9) edad y (10) temperatura efectiva.</i>	77
B.1	<i>La información encontrada en esta tabla es: (1) nombre de la estrella, (2) ascensión recta, (3) declinación, (4) magnitud B y (5) magnitud V.</i>	80
B.2	<i>La información encontrada en esta tabla es: (1) nombre de la estrella, (2) tiempo de exposición en segundos y (3) señal a ruido del espectro.</i>	82
D.1	<i>La información encontrada en esta tabla es: (1) pico de la línea en longitud de onda, (2) longitud de onda mínima para la línea, (3) longitud de onda máxima para la línea, y (4) nombre de la línea.</i>	89
D.2	<i>La información encontrada en esta tabla es: (1) valor mínimo del segmento y (2) valor máximo del segmento.</i>	92
E.1	<i>Lista de LMH obtenidos de la base de datos “Exoplanet orbit Database” (http://exoplanets.org/)</i>	95
E.2	<i>Lista de HJ obtenidos de la base de datos “Exoplanet orbit Database” (http://exoplanets.org/)</i>	100