



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“Análisis Estadístico de Planetas Solares y
Extrasolares:
Un Estudio Comparativo”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F I S I C A

P R E S E N T A :

MARÍA DEL CONSUELO ROMERO SÁNCHEZ



**Director de Tesis:
Dr. Héctor Javier Durand Manterola**

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:
"Análisis Estadístico de Planetas Solares y Extrasolares: Un Estudio Comparativo".
realizado por Romero Sánchez María del Consuelo
con número de cuenta 09122934-6 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario Dr. Héctor Javier Durand Manterola
Propietario Dra. Julia Espresate Eibenschutz
Propietario Dr. María Guadalupe Cordero Tercero
Suplente Dra. Ana Leonor Rivera López
Suplente M. en C. Julieta Fierro Gossman

Héctor Durand
Julia Espresate E.

Ma. Guadalupe Cordero T.

[Signature]
Julieta Fierro Gossman

Consejo Departamental de Física

Alicia Zarzosa Pérez
M. EN C. ALICIA ZARZOSA PEREZ
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Dedicatorias

A mi madre Florentina Sánchez Flores:

Gracias mamá por todo tu gran amor, apoyo, paciencia, comprensión, consejos y sabiduría que me has brindado durante toda mi vida, sin ti, no lo hubiera logrado. Eres lo máximo. Te quiero. Va por toda mi familia...

A mi padre Rufino Romero García:

Te agradezco papá por todo lo que me has dado, tu amor, ayuda, apoyo, paciencia y comprensión, porque sé que cuento contigo para toda la vida, tampoco sin ti, no lo hubiera logrado. Te quiero

A mi hija María Adriana Moreno Romero:

Mi princesita linda te agradezco el haber sacrificado el tiempo que te debía dedicar, dejándomelo para que pudiera realizar mi sueño. Gracias por todo tu amor, apoyo, paciencia y también por tus cartas que me has dado y que me han impulsado a luchar y a seguir adelante por ti. Te quiero y te adoro, eres mi vida...

A Sergio Moreno Olvera:

Muchas gracias porque alguna vez pensé en abandonar la carrera y me impulsaste a terminarla, gracias también de todo corazón por tu amor, apoyo, ayuda, paciencia y comprensión que me has brindado en todo momento y por todos los momentos felices que alguna vez pasamos juntos.

A mis hermanos Francisco y José Antonio Romero:

Muchísimas Gracias por su amor, motivación y apoyo que siempre me han brindado, a pesar de que la distancia nos separa, los llevo siempre presentes en mi corazón y los admiro por esa fuerza que tienen para luchar y salir adelante.

A mis sobrinos:

José Rufino, José Francisco, Brenda Pamela, José Antonio, Yuridia, Samantha, Tania, Karina, Azucena, Mitzin, que son una parte muy importante de mi vida, los quiero muchísimo.

A mi comadre Alejandra Sánchez Estrada:

Gracias por todo el cariño, apoyo, comprensión, consejos y por la amistad tan grande que me has brindado, no sé que haría sin ti. Te quiero.

A Martha Valdez, Aranzazu Trejo, Leticia Moreno:

Les agradezco ese apoyo, paciencia, comprensión y ayuda tan grande que me han brindado y por estar siempre presentes cuando más las he necesitado. Las quiero.

A mis tíos(as):

Francisca Sánchez, Jose Antonio Rodríguez, Romualdo Sánchez, Maria Alonso por su amor, ayuda, paciencia y apoyo que siempre me han brindado, los admiro, los respeto y los quiero muchísimo.

A mis primas(os):

Nallely, Jose Antonio y Liliana Rodríguez; Miguel, Jaime, Carlos y Patricia Sánchez, a quienes quiero y respeto muchísimo, les agradezco su apoyo y el estar siempre presentes en mi vida.

A mis amigos y compañeros:

Juan Gabriel Hernández, Vaneza Peña, Raúl Velázquez, Jaime A. Osorio, Miguel Rojas, Gil, Ismael Oviedo, Radames, José Abarca, Elizabeth Martínez, , Verónica Álvarez, Alberto, Héctor Mayen, Marisol, Andrés Suárez, Olivia Ramirez, Rolando Hernández, Carmen, a todos los integrantes del Mariachi los Caporales de México, a los del Grupo de 4 y 5º paso del AA, a la familia Moreno (en especial a la Sra. Maria Olvera y el Sr. Miguel Moreno), a mis amigos de Harmon Hall Taxqueña, a mis vecinas y amigas Trini, Eva, Verónica, Aide, y a todos mis amigos de la Facultad de Ciencias y del CCH Sur de la UNAM, así como a aquellas personas que se me haya pasado poner en esta lista y que sé que cuento con ellos.

Por todo lo que han hecho por mí, por brindarme su valiosa amistad, apoyo, sabios consejos, compañía, paciencia, por estar siempre ahí cuando más los he necesitado, muchísimas gracias, siempre los tengo presente. Los estimo y los quiero muchísimo.

Un corazón de una universitaria está
latiendo de felicidad porque...

Nunca se imaginó ser parte de la máxima
casa de estudios en donde...

A pesar de tantos obstáculos y
dificultades, ha logrado sus objetivos...

María del Consuelo se llama y les da las
gracias de corazón a todos...

Agradecimientos

Doy gracias a Dios y a la vida que me permitió llegar y lograr mis objetivos, nuevamente gracias a mis padres, amigos y familiares que me han apoyado siempre...

Muchas gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme formar parte de su máxima casa de estudios como universitaria en el área científica y que gracias a los conocimientos adquiridos durante toda mi carrera en la Facultad de Ciencias, he podido lograr mis metas. Al Instituto de Geofísica (Centro de Ciencias de la Atmósfera) por el uso de sus instalaciones, así como a los investigadores y a todos los que me ayudaron a que hiciera posible este trabajo y a los que pertenecen al Departamento de Física Espacial.

Además quiero agradecerles de corazón a quienes me ayudaron, apoyaron, orientaron y asesoraron en este trabajo de Tesis.

A mis asesores Héctor Durand Manterola y Ana Leonor Rivera López:
Muchísimas gracias por todo su apoyo, orientación, asesoría en este trabajo de tesis y sobre todo por esa paciencia y comprensión que me tuvieron.

A mis sinodales la Dra. Julia Espresate, Dra. Guadalupe Cordero y M. en C. Julieta Fierro: Les agradezco infinitamente sus correcciones y aportaciones a este trabajo de tesis y la dedicación tan especial que le tuvieron, así como su infinita paciencia y ayuda desinteresada que me demostraron.

A Guadalupe Vaneza Y. Peña Cabrera: Gracias por tu apoyo, consejos, paciencia y ayuda en la realización de este trabajo y en mi vida personal.

A TODOS...

Les Agradezco infinitamente esa motivación que me dieron para que lograra este trabajo de Tesis. Sin ustedes no hubiera sido posible.

“Mil Gracias”...

INDICE GENERAL

Introducción	1
Prefacio	2
Resumen	3

CAPITULO 1: EL SISTEMA SOLAR

1.1	Introducción.....	4
1.2	¿Qué es un planeta?.....	4
1.3	El Sistema Solar.....	5
1.4	¿Cómo se formó el sistema solar?.....	7
1.5	El Sol.....	8
1.6	Los Planetas.....	9
1.7	El Sistema Solar Interior.....	11
	1.7.1 Mercurio.....	11
	1.7.2 Venus.....	12
	1.7.3 Tierra.....	13
	1.7.4 Marte.....	14
1.8	Asteroides (Planetas Menores).....	15
1.9	Ley de Titus-Bode.....	18
1.10	El Sistema Solar Exterior.....	19
	1.10.1 Júpiter.....	20
	1.10.1.1 Ganímedes.....	21
	1.10.1.2 Calisto.....	21
	1.10.1.3 Io.....	22
	1.10.1.4 Europa.....	22
	1.10.2 Saturno.....	23
	1.10.2.1 Titán.....	24
	1.10.2.2 Rea.....	24
	1.10.2.3 Japeto.....	24
	1.10.2.4 Dione y Tetis.....	25
	1.10.3 Urano.....	26
	1.10.3.1 Titania.....	27
	1.10.3.2 Oberón.....	27
	1.10.4. Neptuno.....	27
	1.10.4.1 Tritón.....	29
1.11	Plutón.....	29
	1.11.1 Caronte.....	30
1.12	KBOs (Objetos del cinturón de Kuiper).....	31
	1.12.1 Cinturón de Kuiper.....	31
	1.12.2 Sedna.....	32
	1.12.3 Quaoar.....	33
	1.12.4 Los Plutinos.....	33
	1.12.5 Planeta: 2003 UB313.....	35
1.13	Cometas.....	36

CAPITULO 2: LEYES DE KEPLER

2.1	Introducción.....	37
2.2	Antecedentes históricos.....	37
2.3	Primera Ley de Kepler.....	38
2.4	Segunda Ley de Kepler.....	39
2.5	Tercera Ley de Kepler.....	41
2.6	Demostración de la Tercera Ley de Kepler.....	43
2.7	Satélites de los planetas jovianos y la Tercera Ley de Kepler.....	44

CAPITULO 3: PLANETAS EXTRASOLARES

3.1	Introducción.....	47
3.2	¿Que son los Exoplanetas o Planetas Extrasolares?.....	47
3.3	Antecedentes Históricos.....	48
3.4	Métodos de medición de datos de Planetas Extrasolares.....	49
	3.4.1 Detecciones Directas.....	49
	3.4.2 Detecciones Indirectas.....	52
	Efecto Doppler: Velocidad Radial.....	53
	Tránsitos (Fotometría).....	57
	Astrometría.....	59
	Radiointerferometría.....	61
	Microlentes.....	62
3.5	Deducción de Parámetros.....	63
	3.5.1 Período.....	64
	3.5.2 Semieje Mayor.....	64
	3.5.3 Excentricidad.....	64
	3.5.4 Masa Mínima.....	64
3.6	Zona Habitable.....	64
3.7	Clasificación de Exoplanetas.....	65
3.8	¿Cómo se formaron los exoplanetas?.....	68
3.9	Proyectos Futuros.....	70

CAPITULO 4: Resultados y Discusión

4.1	Confiabilidad de los parámetros orbitales y diferencias entre los métodos de observación de los Planetas Extrasolares.....	72
4.2	Propiedades Observadas de los Planetas Extrasolares.....	74
4.3	Ley de Titus-Bode aplicada a planetas extrasolares.....	80
4.4	Energía cinética, potencial y total de los exoplanetas.....	81
4.5	Exoplanetas dentro de la zona habitable.....	83
4.6	Relación entre los principales parámetros orbitales de los planetas extrasolares.....	86

CONCLUSIONES	88
APENDICE A	
Datos de los Satélites de los planetas jovianos del Sistema Solar.....	92
APENDICE B	
Datos de los 170 Planetas Extrasolares hasta enero 2006.....	101
APENDICE C	
Método de mínimos cuadrados y factor de correlación de Pearson.....	125
APENDICE D	
Cálculo utilizados para la Energía Cinética, potencial y total de los planetas extrasolares.....	128
GLOSARIO	132
REFERENCIAS	133
INDICE DE TABLAS Y FIGURAS	139

Introducción

En este trabajo se compiló una base de datos numéricos y bibliográficos sobre todos los planetas extrasolares que se han descubierto desde 1995 y hasta enero de 2006 y se realizó un análisis estadístico de ellos. Este es un tema muy actual e importante ya que lleva a cuestionamientos tales como ¿Qué es un planeta? ¿Hay planetas girando en torno de otras estrellas? ¿Cómo es un planeta? ¿Existen otros planetas como la Tierra?

Estas son sólo algunas de las interrogantes que nos hacemos. Los especialistas en el tema no tienen las respuestas a estas preguntas, pero están preparando diferentes proyectos de búsqueda de exoplanetas no solo para contestar algunas de estas cuestiones sino para poder asegurar si son cuerpos sólidos como la Tierra o Marte o gaseosos como Júpiter y Saturno, o saber si cuentan con satélites como los planetas del sistema solar, pues los métodos actuales de búsqueda son indirectos y no es posible saber todas las características físicas de estos cuerpos. También se desea saber si son planetas que puedan albergar algún tipo de vida y, por lo tanto, si existe el agua líquida y la posibilidad de construcción de cadenas de carbonos. Si estos objetos son verdaderamente planetas o simplemente enanas marrones o cafés, entonces ¿cómo fue que se formaron?

Los datos de los planetas extrasolares se obtuvieron de diferentes fuentes de Internet y son las siguientes:

<http://vo.obspm.fr/exoplanetes/encyclo/catalog.php>,
http://exoplanets.org/planet_table.shtml,
<http://obswww.unige.ch/~udry/planet/planet.html>,
<http://www.dtm.ciw.edu/boss/IAU/div3/wgesp/planets.shtml>,
http://planetquest1.jpl.nasa.gov/atlas_espanol/atlas_index.cfm.
<http://www.ciw.edu/boss/IAU/div3/wgesp/planets.shtml>

Prefacio

La tesis esta organizada en 4 capítulos. En el capítulo 1 se hace una descripción de los planetas y de todos los cuerpos que forman parte del Sistema Solar.

En el capítulo 2 se mencionan y describen las leyes de Kepler, en particular se demuestra la tercera ley y se menciona cómo se aplica esta ley a los satélites de los planetas jovianos.

En el capítulo 3 se analizan los planetas extrasolares, qué son, sus métodos de búsqueda, cómo se clasifican, la deducción de parámetros y proyectos futuros.

En el capítulo 4 se discuten los resultados obtenidos al realizar el análisis estadístico. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo.

En todos los capítulos las referencias se señalan entre corchetes y con números las consultadas vía internet y, entre paréntesis y por autor, las consultadas en artículos y libros.

RESUMEN

El trabajo que a continuación se presenta se centra en un análisis estadístico de los Planetas Extrasolares descubiertos desde Octubre de 1995 hasta enero de 2006 para hacer un estudio comparativo con nuestro Sistema Solar. Un planeta extrasolar es un objeto celeste esférico con una masa entre la masa de Plutón (1.3×10^{22} kg) y 13 veces la masa de Júpiter (1.9×10^{27} kg), sin brillo propio, que gira alrededor de una estrella.

Se analizaron los distintos métodos que se utilizan para medir los parámetros de los planetas extrasolares para verificar qué tan confiables son. Además se verifica la ley de Kepler, para los planetas extrasolares y para los satélites de los planetas jovianos. Habiéndose realizado una investigación previa a este trabajo de tesis una base de datos numéricos y bibliográficos sobre este tema de Planetas Extrasolares. Se presenta una tabla con los parámetros principales de estos: fecha de descubrimiento, masa mínima del planeta, período orbital, excentricidad, distancia a la estrella, clasificación del planeta, ascensión recta, declinación, nombre de la estrella, tipo espectral, masa de la estrella, metalicidad estelar, distancia a la que se encuentra la estrella, energía cinética, potencial y total.

Se han encontrado 170 planetas extrasolares gigantes que se clasifican de dos maneras: La primera comparando los parámetros orbitales de nuestro Sistema Solar con los reportados de los planetas gigantes encontrándose que 69 son exoplanetas calientes, 82 son excéntricos, 40 son exoplanetas semejantes a Júpiter, 8 son exoplanetas poco masivos y 68 son de períodos de traslación cortos. La segunda de acuerdo al tipo de estrella que orbitan encontrándose 22 exoplanetas que orbitan estrellas del Tipo espectral F, de los cuales 6 se encuentran dentro de la Zona Habitable Circumestelar (ZHC), 107 que orbitan estrellas del Tipo espectral G, de los cuales 24 están dentro de la ZHC, 36 orbitan estrellas del Tipo espectral K, con 2 de ellos dentro de la ZHC y finalmente 5 exoplanetas del Tipo espectral M, de los cuales sólo 1 está dentro de la ZHC y finalmente alrededor de púlsares se han encontrado 3;

La distancia más pequeña a la que se encuentra un exoplaneta es 0.0208 UA que corresponde a OGLE-TR-56 b y también es el de menor período orbital de 1.2119 días y el planeta más alejado esta a 5.257 UA que es el 55 Cnc d. Hasta el momento sólo se conoce un planeta extrasolar cuyo periodo orbital rebasa el de Júpiter (4330 días), que es el 55 Cnc d, con un periodo de 4517.4 días Los exoplanetas en su mayoría tienen una gran excentricidad (0.01-0.927).

La cota inferior de la masa estimada de los exoplanetas corresponde al exoplaneta de Gliese 876 d que es de $0.023 M_{Jup}$. La cota superior de masas mínimas corresponde al límite permitido por la definición de planeta, unas 13 veces la masa de Júpiter. Finalmente para las estrellas que tienen hasta 3 o 4 planetas, se observa que la masa de cada uno aumenta con la distancia a la estrella.

CAPITULO 1 **EL SISTEMA SOLAR**

1.1 *Introducción*

El estudio del Sistema Solar comenzó cuando nuestros ancestros observaron el cielo y vieron el Sol y la Luna y se preguntaron qué eran a la vez que se percataron de la periodicidad de sus movimientos. Galileo apuntó por primera vez un telescopio hacia Júpiter y descubrió que era esférico y que tenía cuatro satélites. Newton propuso que la fuerza gravitacional es la causa de la redondez de muchos cuerpos celestes y también del movimiento elíptico de los planetas y satélites. Así como estos pensadores han aportado sus ideas, cientos de personas más lo han venido haciendo para acrecentar el conocimiento del Sistema Solar.

Nuestro Sol es una estrella de segunda o tercera generación que se formó a partir de los restos de estrellas más viejas que terminó su vida en una explosión de supernova. Pero el Sol no fue el único objeto producido por la nube resultante: planetas e innumerables satélites, asteroides, y cometas también fueron formados.

Actualmente sigue activa la investigación del Sistema Solar; constantemente se hacen nuevos descubrimientos y se afinan teorías empleando nuevas formas de estudio y aparatos más sofisticados.

En este capítulo se hace una descripción de algunos aspectos importantes que se han ido descubriendo acerca de los planetas y de todos los cuerpos que forman parte del Sistema Solar.

1.2 *¿Qué es un planeta?*

La diferencia fundamental entre una estrella y un planeta es su masa. Entre más masa tiene un objeto celeste, mayor es la presión y la temperatura en su centro. En una estrella el centro se pone tan caliente que se producen reacciones de fusión nuclear que liberan mucha energía y esto hace que una estrella brille con luz propia [1 - 6].

Después de 10^6 años del nacimiento de una enana marrón, el incremento de la temperatura interna provoca la fusión del deuterio, el cual reacciona con el hidrógeno produciendo un isótopo del helio. Un proceso que libera energía suficiente para estabilizar la estructura de la enana marrón, permitiendo que su radio y brillo permanezcan durante algún tiempo sin experimentar variaciones substanciales. Como la cantidad de deuterio es pequeña, la enana marrón agota el combustible en un tiempo relativamente corto, transcurrido el cual, ya no puede generar la energía necesaria para equilibrar su peso. Por tanto, vuelve a contraerse aumentando la densidad interna que causa, mediante un complejo proceso, un aumento de presión que detiene el colapso [7].

La evolución de las enanas marrones está gobernada por las reacciones nucleares del deuterio, que pueden ocurrir sólo cuando la temperatura interior es suficientemente alta (1.2×10^6 k).

Para ello, es necesario que la masa supere un valor mínimo que es del orden de 13 veces la masa de Júpiter (límite superior para la masa de un planeta). Así pues, las masas de las enanas marrones están comprendidas entre este valor y 80 masas de Júpiter [74], por lo tanto podemos decir que las enanas marrones son las estrellas más pequeñas [2,3].

La masa nos ayuda a determinar la forma del cuerpo. En un planeta, la gravedad tiene suficiente influencia como para hacer que éste sea esférico, pero en un objeto más pequeño como un asteroide, la gravedad no puede vencer la resistencia bajo compresión de la roca y por lo tanto éste no se vuelve esférico, es decir la diferencia que existe entre un planeta y un objeto más pequeño es la fuerza de gravedad que tienen. Existen objetos esféricos en el Sistema Solar que no llamamos planetas, que es el caso de casi todos los satélites.

La masa más pequeña de un planeta no está muy bien definida, para algunos investigadores el límite inferior debería ser Plutón (1.30×10^{22} kg) [1-4]. Pero otros proponen un límite inferior de masa, la mínima necesaria como para que el cuerpo celeste, merced a su propia gravedad, adquiera una forma aceptablemente esférica [5,6], y aquí no sólo calificaría Plutón, sino también algunos asteroides y objetos del "Cinturón de Kuiper". [2-6].

En este trabajo usaremos el criterio de que para que un objeto o cuerpo celeste sea llamado planeta debe cumplir lo siguiente:

- Tener una masa entre la masa de Plutón (1.3×10^{22} Kg) y 13 veces la masa de Júpiter (1.9×10^{27} kg).
- No brillar con luz propia en el visible, sino reflejada.
- Girar alrededor de una estrella.
- Tener forma esférica.

1.3 El Sistema Solar

Nuestro Sistema Solar está compuesto por una estrella central (el Sol), planetas que se mueven alrededor de él (Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno, Plutón), aproximadamente 138 satélites orbitando los planetas, millones de asteroides, billones de cometas, gas y polvo (figura 1.1), parte del cual está concentrado en cinturones (Rodríguez, 1985; Pater de Imke, 2001).

Las dimensiones de este sistema se especifican en términos de la distancia media de la Tierra al Sol, denominada unidad astronómica (1UA= 149,598,000 km).

Sistema Solar

La frontera del viento Solar y el espacio interestelar —llamada heliopausa— se supone que se encuentra a 100 UA. Aunque el gran reservorio de cometas se cree que se localiza a 5×10^4 UA o más [7,8].



Figura 1.1 Representación de los cuerpos del Sistema Solar
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria1.htm>)

El Sistema Solar pertenece a la galaxia llamada Vía Láctea, una galaxia en forma de espiral que contiene unas 10^{13} estrellas (figura 1.2) [4,7].

El Sol ocupa una posición bastante externa en un brazo espiral de la Vía Láctea en el denominado brazo de Orión a 28×10^3 años-luz del centro galáctico y se demora 2.3×10^8 años terrestres en dar una vuelta completa a este centro [7].



Figura 1.2 Galaxia en forma de Espiral
(<http://www.educar.org/SistemaSolar/galaxia.asp>)

La tabla 1 muestra algunos datos relevantes del Sistema Solar, que dan una idea de sus dimensiones, de sus distancias y de sus movimientos de rotación sobre sus ejes y de traslación alrededor del Sol [7-9].

Tabla 1 Algunos datos del Sistema Solar.

<http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=planet&Display=Facts>

	Masa	Período de traslación	Semieje Mayor	excentricidad	Período rotacional
	(Kg)	(años terrestres)	(UA)		(días)
Sol	1.99×10^{30}				25.38
Mercurio	3.30×10^{23}	0.240842	0.387	0.205	58.64
Venus	4.87×10^{24}	0.615188	0.723	0.007	-243.018
Tierra	5.97×10^{24}	1	1	0.017	0.997
Marte	6.42×10^{23}	1.880681	1.52	0.093	1.026
Júpiter	1.90×10^{27}	11.85631	5.20	0.048	0.413
Saturno	5.69×10^{26}	29.44702	9.54	0.054	0.444
Urano	8.68×10^{25}	84.01559	19.2	0.047	-0.719
Neptuno	1.02×10^{26}	164.7885	30.1	0.008	0.671
Plutón	1.30×10^{22}	247.9165	39.4	0.248	6.387

La mayoría de los sistemas de satélites siguen el mismo comportamiento orbital que sus planetas, pero se dan algunas excepciones. Tanto Júpiter, como Saturno y Neptuno tienen algún satélite que se mueve a su alrededor en órbita retrógrada (en el sentido de las agujas del reloj, visto desde el norte de la eclíptica), y muchas órbitas de satélites son muy excéntricas

Júpiter, además, tiene atrapados dos cúmulos de asteroides (los llamados Troyanos), que se encuentran a 60° por delante y por detrás del planeta en su órbita alrededor del Sol.

En el Sistema Planetario se observa una traslación gradual en cuanto a composición química: más cerca del Sol encontramos materia refractaria, rocas y metales; y lejos del Sol y materia volátil, además de la anterior [14].

1.4 ¿Cómo se formó el sistema solar?

La teoría más popular establece que las estrellas pequeñas o de baja masa, como el Sol, se forman de la siguiente manera:

Existía, en el medio interestelar, una "nube molecular" la cual estaba compuesta por gas (H, H₂, He, N, O, C) y polvo (polvos refractarios y polvos volátiles o hielos) con temperatura de unos 10°K y densidad de 1×10^3 partículas por cm³. La cual fue alterada por una explosión de supernova provocando la compresión de dicha nube y el inicio del colapso gravitatorio con el que empezó la formación del Sistema Solar. La nube que se encontraba en rotación comenzó a girar más rápidamente acumulándose en el centro una masa de material que posteriormente formaría al Sol, mientras que en el ecuador de dicha nube se formó un disco de planetesimales que fueron agregándose en cuerpos cada vez más grandes hasta formar los planetas.

Los planetas cercanos al Sol son ricos en elementos pesados porque provienen de polvos refractarios que no se evaporaron cuando nació el Sol. En cambio, los planetas exteriores tienen una composición química más representativa de la nube original, ya que se formaron de polvos refractarios y de hielos.



*Figura 1.3 Representación de la formación del Sistema Solar
(<http://www.astromia.com/solar/formasistema.htm>)*

1.5 El Sol

El Sol es una estrella común del tipo G2, una más entre las 10^{13} estrellas de nuestra galaxia (Pater de Imke, 2001). El Sol es el mayor objeto del sistema solar. Contiene más del 99.8% de la masa total del sistema (Júpiter contiene la mayor parte del resto).

El pasado y el futuro del Sol se han deducido de los modelos teóricos de estructura estelar que nos dicen que durante sus primeros 5×10^7 años, el Sol se contrajo hasta llegar a su tamaño actual. La energía liberada por el gas calentaba el interior y, cuando el centro estuvo suficientemente caliente, la contracción cesó y la combustión nuclear del hidrógeno en helio comenzó en el centro.

El Sol ha estado en esta etapa de su vida alrededor de 4.5×10^9 años (figura 1.4). Su radio es aproximadamente 6.96×10^5 km y su masa 1.99×10^{30} kg. Su densidad media es de 1.4 g/cm^3 y en su superficie se alcanzan temperaturas del orden de 6×10^3 K.

En el núcleo del Sol hay hidrógeno suficiente para durar 4.5×10^9 años más. Cuando se gaste este combustible, el Sol cambiará, según se vayan expandiendo las capas exteriores hasta el tamaño actual de la órbita de la Tierra, el Sol se convertirá en una gigante roja, algo más fría que hoy pero 1×10^4 veces más brillante a causa de su enorme tamaño. El Sol seguirá siendo una gigante roja, con reacciones nucleares de combustión de helio en el centro, durante sólo 5×10^9 años más. No tiene suficiente masa para atravesar sucesivos ciclos de combustión nuclear o un cataclismo en forma de explosión, como les ocurre a algunas estrellas. Después de la etapa de gigante roja, se encogerá hasta ser una enana blanca, aproximadamente del tamaño de la Tierra, y se enfriará poco a poco durante varios millones de años [7, 14, 67].

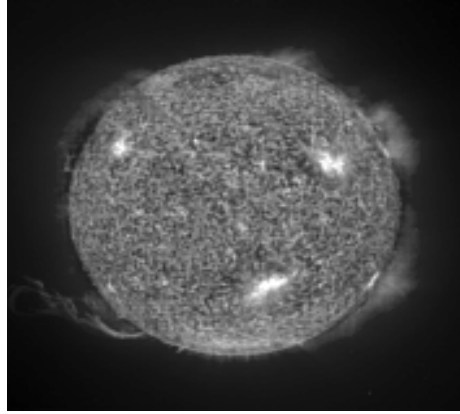


Figura 1.4 Foto del Sol obtenida por el telescopio espacial de rayos X SOHO, proyecto conjunto entre las agencias europea ESA y la estadounidense NASA. (<http://usuarios.lycos.es/latinquasar/modules.php?name=coppermine&file=thumbnails&album=2>)

1.6 Los Planetas

Los planetas giran alrededor del Sol (figura 1.5). No tienen luz propia, sino que reflejan la luz solar. Los planetas tienen diversos movimientos. Los más importantes son dos: el de rotación y el de translación (Karttunen, 2003, Stuart, 1997) [9,10]. Por el de rotación, giran sobre sí mismos alrededor de su eje que pasa por el centro y es perpendicular al plano del ecuador. Esto determina la duración del día del planeta. Por el de translación, los planetas describen órbitas alrededor del Sol. La duración de cada órbita determina el año del planeta. Cada planeta tarda un tiempo diferente para completar su órbita. Cuanto más lejos, más tiempo.

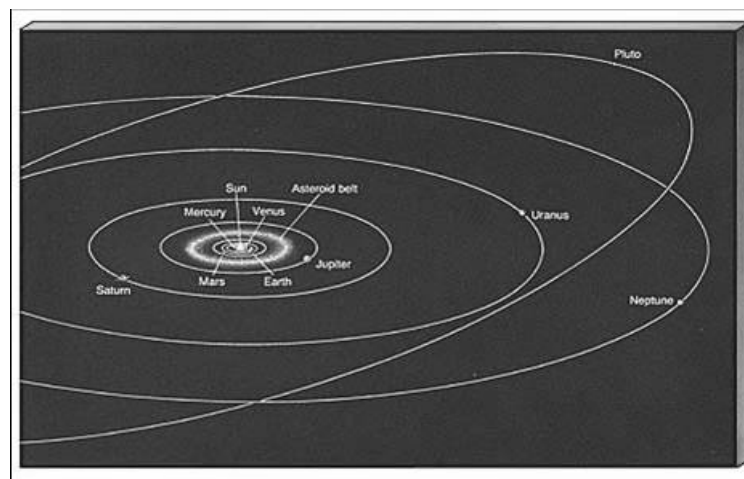


Figura 1.5 Representación de las Órbitas del Sistema Solar (<http://www.astromia.com/solar/planetas.htm>)

El plano en que se encuentran las órbitas de los planetas es denominado eclíptica y está definido por el plano de la órbita de la Tierra, en cambio las órbitas de los cometas suelen tener todo tipo de inclinaciones (Gibilisco, 1991).

La mayoría de los planetas, excepto Venus y Urano, giran sobre su eje en la misma dirección. El Sistema Solar es bastante plano; sólo las órbitas de Mercurio y Plutón son inclinadas. La de este último es tan excéntrica que hay momentos que se acerca más al Sol que Neptuno. Las órbitas de los planetas son elipses con el Sol en uno de sus focos y, salvo para Mercurio y Plutón, son muy parecidas a círculos (poco excéntricas), lo que produce que la mayor distancia a la que se encuentran (afelio) es similar a la menor distancia a la que se encuentran (perihelio) (figura 1.6) [10].

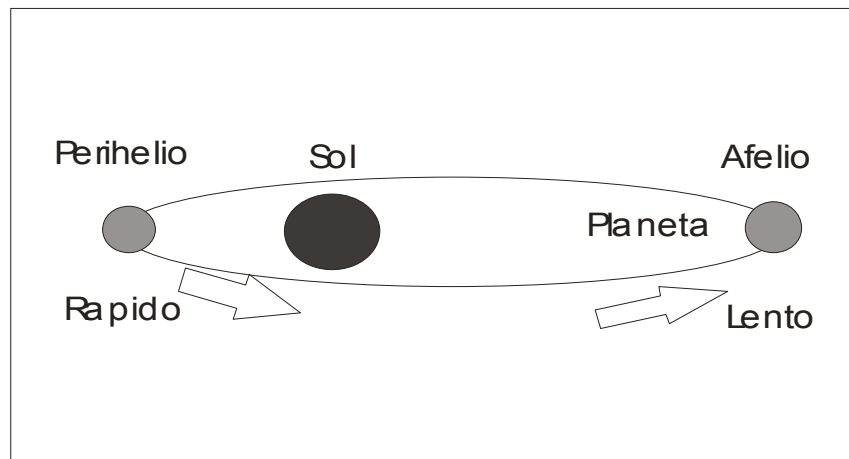


Figura 1.6

Representación de la órbita de un planeta con el Sol en uno de sus focos.

Los planetas tienen forma casi esférica, como una pelota un poco aplanada por los polos. Los elementos pesados están en el núcleo [9,10]. Los gases, si hay, forman una atmósfera sobre la superficie.

Por su composición, los planetas suelen dividirse en terrestres y jovianos (Pater de Imke, 2001).

Los planetas terrestres o rocosos se encuentran antes del cinturón de asteroides y relativamente cerca del Sol. Están compuestos principalmente de roca y metal y tienen densidades relativamente altas, rotaciones lentas, superficies sólidas, carecen de anillos y tienen pocos satélites.

Los planetas jovianos o gaseosos están compuestos principalmente de hidrógeno y helio y, generalmente, tienen densidades bajas, rotación rápida, atmósferas profundas, anillos y muchos satélites (figura 1.7) pero en esta división no entra Plutón ya que es un planeta exterior pero no un planeta joviano).




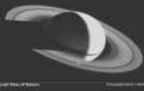




Planetas rocosos				Planetas gaseosos			
Mercurio	R	dens	d	Jupiter	R	dens	d
	0.4	5.4	0.4		11	1.3	5.2
Venus				Saturno			
	0.95	5.2	0.7		9	0.7	9.5
La Tierra				Urano			
	1	5.5	1		4	1.3	19
Marte				Neptuno			
	0.5	3.9	1.5		4	1.76	30

Figura 1.7 División de los planetas: terrestres (izquierda) y jovianos (derecha)
(<http://www.solarviews.com/span/planet.htm>)

1.7 El Sistema Solar Interior

Los cuatro planetas más cercanos al Sol: Mercurio, Venus, Tierra y Marte conforman el Sistema Solar Interior. Son cuerpos de superficie sólida de dimensiones relativamente pequeñas, altas densidades, rotación lenta y de composición similar a la Tierra. Son ricos en elementos pesados y su temperatura promedio es de 473 °K (Pater de Imke,2001) [6-9].

1.7.1 Mercurio

Mercurio es el planeta más cercano al Sol (figura 1.8). Su órbita es sumamente excéntrica, gira lentamente sobre su eje, una vez cada 59 días (Pater de Imke, 2001). Antes lo hacía más rápido, pero la influencia del Sol lo ha ido frenando. Cuando un lado de Mercurio está de cara al Sol, llega a temperaturas superiores a los 698 K. Las zonas en sombra bajan hasta los 103 K. Los polos se mantienen siempre muy fríos.

El paisaje está lleno de cráteres y grietas. La presencia de campo magnético indica que Mercurio tiene un núcleo metálico, parcialmente líquido. Su alta densidad, la misma que la de la Tierra, indica que este núcleo ocupa casi la mitad del volumen del planeta [8, 9, 13, 14].

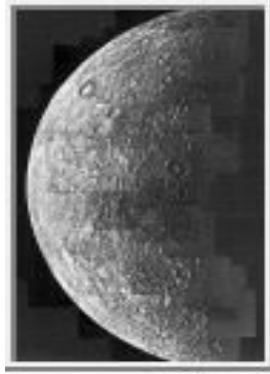


Figura 1.8 Foto de Mercurio
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria1.htm>)

1.7.2 Venus

Es el segundo planeta del sistema solar y el más semejante a la Tierra por su tamaño, masa, densidad y volumen (figura 1.9). Sin embargo, es diferente de la Tierra, no tiene océanos y su densa atmósfera provoca un efecto invernadero que eleva la temperatura hasta los 753 K. La mayor diferencia entre los dos planetas es que Venus, a diferencia de la Tierra no posee un campo magnético intrínseco, lo que implica la ausencia de una región metálica convectiva en su núcleo y/o manto.

Venus gira sobre su eje muy lentamente y en sentido contrario al de los otros planetas, por lo que el Sol sale por el oeste y se pone por el este, al revés de lo que ocurre en la Tierra. Además, el día en Venus dura más que su año. Venus tiene muchos volcanes. El 85% del planeta está cubierto por roca volcánica. La lava ha creado surcos, algunos muy largos. En Venus casi no hay cráteres menores de 2 km de diámetro (los objetos pequeños se deshacen a su paso por la espesa atmósfera). Pero Venus no puede tener agua líquida, a causa de la elevada temperatura. [8, 9, 13, 14].



Figura 1.9 Foto de Venus
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria1.htm>)

1.7.3 Tierra

El planeta Tierra está en la ecósfera, un espacio que rodea al sol y que tiene las condiciones necesarias para que exista vida (Pater de Imke, 2001) [9]. La Tierra es el mayor de los planetas rocosos (figura 1.10). Eso hace que pueda retener una capa de gases, la atmósfera, que dispersa la luz y absorbe calor. La Tierra da una vuelta completa sobre sí misma cada 24 horas. Este movimiento de rotación se realiza de Oeste a Este, por lo que el Sol aparenta salir por Oriente y se pone por Occidente dando lugar a la alternancia entre los días y las noches.

El 71% de la superficie terrestre está cubierto por agua. La Tierra es el único planeta conocido en el que puede haber agua líquida en la superficie (aunque puede haber etano o metano líquidos en la superficie de Titán y agua líquida bajo la superficie de Europa). El agua líquida es, por supuesto, esencial para la vida tal y como la conocemos. La atmósfera terrestre contiene un 77% de nitrógeno, 21% de oxígeno, y trazas de argón, dióxido de carbono y agua [76].

En el núcleo están materiales pesados. El calor los mantiene en estado líquido, con fuertes movimientos. El núcleo interno es sólido. El rápido movimiento rotatorio y el núcleo metálico generan un campo magnético. La órbita de la Tierra es elíptica con el eje de rotación inclinado 23° respecto al plano de la órbita.

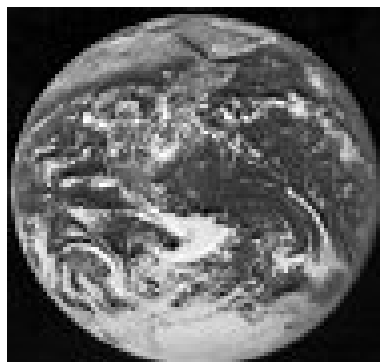


Figura 1.10 Foto de la Tierra
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria2.htm>)

La Luna es el único satélite natural de la Tierra (figura 1.11). La superficie lunar refleja la luz solar de manera diferente según la composición química de la zona que la refleje (Pater de Imke, 2001). La Luna nos muestra siempre la misma cara debido al efecto de las fuerzas de marea que ejerce la Tierra sobre la Luna. Esto significa que el periodo de rotación de la Luna alrededor de su eje coincide con el tiempo que tarda en completar una órbita alrededor de la Tierra y que es de 27 días, 7 horas y 43 minutos.

La Luna no tiene atmósfera ni agua líquida y su actividad geológica es mínima por eso su superficie casi no cambia con el tiempo sino es por el impacto ocasional de algún meteoroides [14].



*Figura 1.11 Foto de la Luna desde el Apolo 11
(imagen de la NASA)*

1.7.4 Marte

Es el cuarto planeta del sistema solar. El planeta Marte tiene una atmósfera muy fina, formada principalmente por dióxido de carbono, que se congela alternativamente en cada uno de los polos con pequeñas cantidades de otros gases (nitrógeno, argón, neón, etc), (Pater de Imke, 2001). Contiene sólo un 0.03% de agua, mil veces menos que la Tierra. Su composición es fundamentalmente basalto volcánico con un alto contenido en óxidos de hierro que proporcionan el característico color rojo de la superficie (figura 1.12).

La superficie de Marte presenta cráteres de impacto, campos de lava, volcanes y cauces secos de ríos, en el suelo de Marte son preponderantes los ferrosilicatos. Sus tres constituyentes principales son, por orden de abundancia, el oxígeno, el silicio y el hierro. Contiene: 20,8% de sílice, 13,5% de hierro, 5% de aluminio, 3,8% de calcio, y también titanio y otros componentes menores. Las áreas volcánicas ocupan el 10% de la superficie del planeta.

Las estructuras más importantes de Marte son: La existencia de un enorme abultamiento que contiene el complejo volcánico llamado [Tharsis](#) en el hemisferio norte, en él se encuentra el Monte Olimpo que ostenta el título del volcán más grande del sistema solar, Entre los cráteres de impacto destacados del hemisferio sur esta la cuenca de impacto Hellas Planitia.

Marte tiene dos satélites que son Fobos y Deimos. Son pequeños y giran rápido cerca del planeta. Esto dificultó su descubrimiento a través del telescopio y se piensa que son asteroides capturados por el campo gravitacional de Marte (Pater de Imke, 2001) [9,10].

Fobos recibe su nombre de uno de los ayudantes de Marte, dios de la guerra. Fue descubierto por Asaph Hall en 1877. Gira en torno a Marte a una distancia de 9.4×10^3 km y efectúa una vuelta completa en 7h.39m. Como su movimiento es más rápido que la rotación del propio planeta, un observador situado en la superficie de Marte vería a Fobos salir por el oeste y ponerse por el este. Fobos es un cuerpo de forma bastante irregular y su superficie está cubierta de cráteres, el mayor de ellos llamado Stikney. Este satélite tiene una dimensión de 27x21x19 km. [15, 16].

Deimos recibe su nombre de otro de los ayudantes del dios de la guerra y, al igual que Fobos fue descubierto por Asaph Hall en 1877. Gira en torno a Marte a una distancia media de 23.4×10^3 km, dando una vuelta en algo más de 30 horas. También es de forma irregular, con unas dimensiones de 15x12x11 km. Su superficie tiene abundantes cráteres, aunque no tan llamativos como los de Fobos [15, 16].

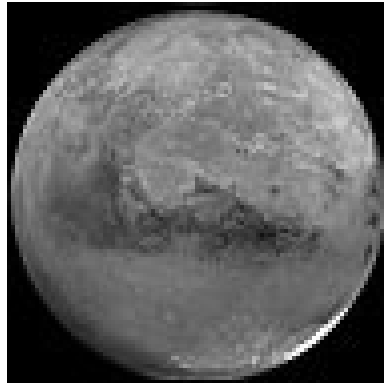


Figura 1.12 Foto de Marte
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria2.htm>)

1.8 Asteroides (Planetas Menores)

La palabra asteroide significa “parecido a una estrella”. Esto se debe a la apariencia visual de estos objetos vistos a través de un telescopio; también son llamados planetas menores (Pater de Imke, 2001; Kowal, 1996).

Según su posición orbital, los asteroides se subdividen en tres grupos:

1) La vasta mayoría de los asteroides se encuentran dentro del “cinturón principal de asteroides”, una colección de miles de cuerpos rocosos localizados entre las orbitas de Marte y Júpiter (entre 2 y 3.5 UA del Sol), moviéndose en órbitas elípticas alrededor del Sol. Los movimientos de los asteroides están en gran medida controlados por Júpiter. Aquí los asteroides más interiores tienen períodos orbitales de aproximadamente dos años, los más exteriores de seis años (Kowal, 1996) [11]. En el interior de este cinturón de asteroides existen vacíos denominados “lagunas de Kirkwood” (llamadas así por el astrónomo Daniel Kirkwood (1814-1895) que las observó por primera vez en 1867). Kirkwood observó que los asteroides que orbitaban entre Marte y Júpiter no estaban distribuidos de una forma uniforme, sino que se agrupaban en varias regiones separadas entre sí por espacios vacíos en los que no existía prácticamente ningún asteroide [12]. Estos espacios vacíos, corresponden a órbitas resonantes en distintas proporciones con el período orbital de 12 años de Júpiter (4:1, 3:1, 5:2, 7:3 y 2:1), por lo que podrían estar causadas por las perturbaciones gravitacionales con este planeta, que convertirían en inestables estas órbitas provocando la expulsión de todos los astros que se encontraran orbitando en ellas. Se puede observar en el histograma de la figura 1.13 que exactamente en 4 UA (3:2) se localizan las Hildas y no existen esos vacíos, lo cual hasta la fecha no se sabe el porque de ello.

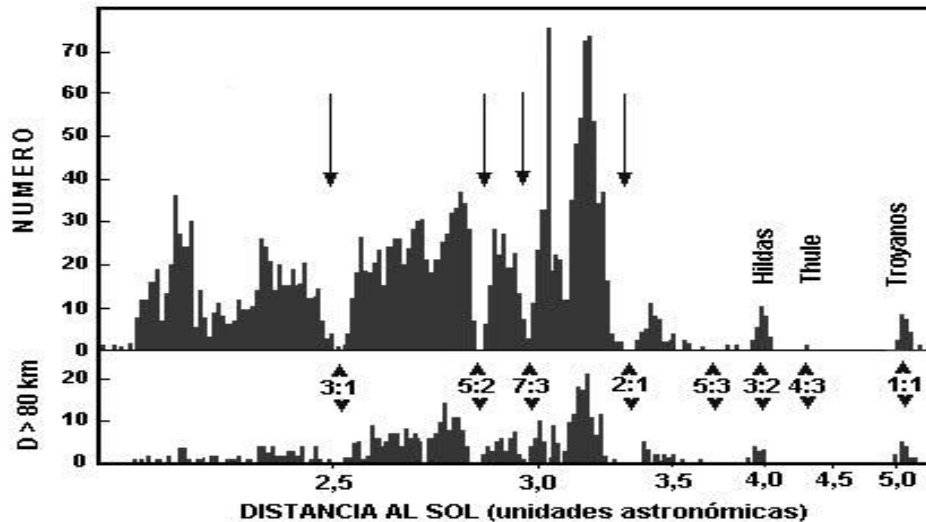


Figura 1.13 Histograma mostrando el número de asteroides en función de su distancia al Sol.

(<http://www.astrogea.org/asteroides/distribucion.htm>)

2) Un asteroide con órbita inusual es Aquiles, encontrado en 1906 por Max Wolf (Gibilisco, 1991). Este viaja en la órbita de Júpiter, pero aproximadamente 60 grados por delante del planeta (de hecho oscila alrededor de un punto a 60 grados de Júpiter).

En primera instancia parece imposible que dos objetos ocupen la misma órbita, esto origina la pregunta de si Aquiles chocará en algún momento con Júpiter. La respuesta la dio el matemático francés, Joseph Louis Lagrange, quien encontró que ciertos objetos pequeños podrían viajar en la misma órbita que un objeto grande, tal como un planeta, siempre y cuando el objeto pequeño formara un triángulo equilátero con el planeta y el Sol. En otras palabras el ángulo formado entre los segmentos que van del Sol al asteroide y del Sol al planeta debe ser de 60 grados. Este objeto podría estar 60 grados por detrás o por delante del planeta sobre los puntos conocidos como puntos de Lagrange. La razón por la cual los asteroides que se encuentran en los puntos Lagrangianos no chocan con el planeta es que en estos puntos hay un equilibrio de fuerzas.

En el caso de Aquiles, éste viaja cerca de uno de los puntos de Lagrange, el que precede a Júpiter. Otros asteroides han sido encontrados cerca de estos puntos. Como Aquiles fue un héroe de la guerra Troyana, los asteroides que se encontraron en los puntos de Lagrange, posteriores a Aquiles, fueron designados con nombres de héroes de esta guerra, en conjunto, a estos asteroides se les conoce como **asteroides troyanos**. Hoy en día se conocen cientos de ellos compartiendo la órbita de Júpiter (figura 1.14).

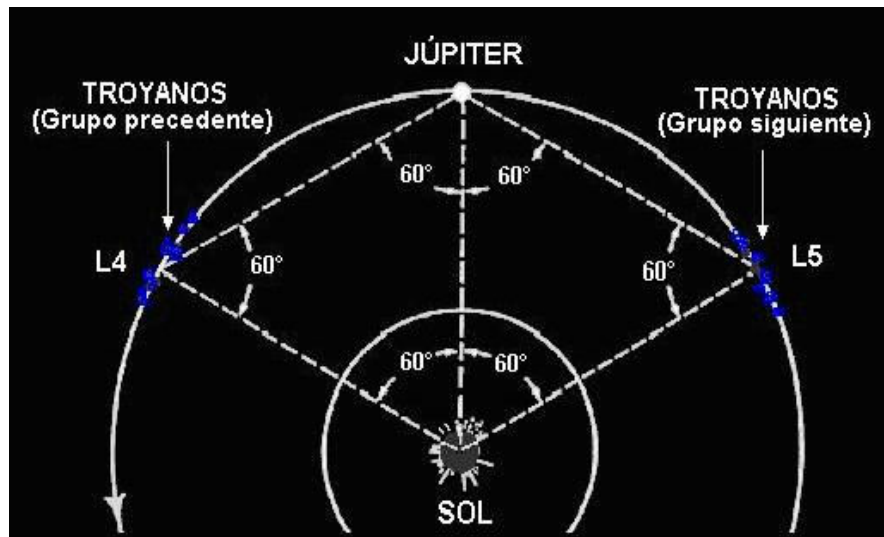


Figura 1.14 Los asteroides Troyanos se hallan distribuidos alrededor del punto lagrangiano L4 (los griegos) y L5 (los troyanos), es decir, a 60 grados por delante y por detrás de Júpiter en la cúspide del triángulo equilátero cuya base está definida por la línea Sol-Júpiter.

(<http://www.astrogea.org/asteroides/troyanos.htm>)

3) Finalmente están los tres grupos de asteroides llamados Apolo, Amor y Atón, que se mueven por el Sistema Solar interior (Kowal, 1996).

Se conoce como asteroides Apolo a los asteroides cuyas órbitas discurren por el exterior de la terrestre, aunque al encontrarse su perihelio a distancias inferiores a una unidad astronómica, pueden llegar a cruzarse con ésta.

Es decir, estos asteroides pasan mas tiempo fuera de la órbita terrestre, pero en algún momento se aproximan al Sol cruzando la región donde está la orbita de la Tierra (figura 1.15). Por esta razón existe la posibilidad, remota pero real, de que alguno de estos objetos pudiera llegar a chocar con nuestro planeta. Estos asteroides toman su nombre del asteroide mas conocido del grupo: Apolo número 1862, descubierto en 1932.

Por otro lado, las órbitas de los asteroides Amor cruzan la órbita de Marte y se aproximan a la órbita de la Tierra. Estos asteroides fueron nombrados así después del descubrimiento del asteroide 1221. Estos asteroides pueden estar a menos de 1.3 UA del Sol pero no llegan a pasar por el interior de la órbita de la Tierra la cual está entre 0.983 y 1.017 UA del Sol.

Finalmente los asteroides Atón tienen una distancia promedio menor a 1 UA y distancia en el afelio mayores a 0.983 UA.

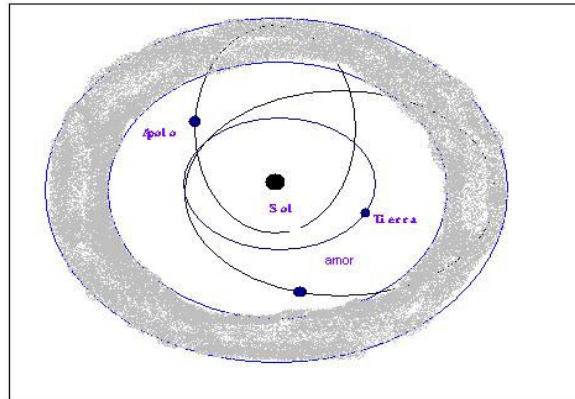


Figura 1.15 Órbitas de los asteroides Apolo, Amor y el cinturón principal de asteroides. (Kowal, 1996).

1.9 Ley de Titus-Bode

En 1766 Johann Titus encontró una relación matemática que describe las distancias de los planetas al Sol y Johann Elert Bode redescubrió esta misma relación y la publicó en 1772, por esta razón se conoce como la ley de Titus-Bode y nos da una idea bastante buena de la distancia respecto al Sol de los planetas conocidos en aquellos tiempos, es decir, Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno, pero no se cumple para Neptuno y Plutón.

La regla de “Titus-Bode” especifica una serie de pasos simples que produce una lista que da los tamaños de las órbitas planetarias. Para construir la lista escribimos el 0 y después el 3. Para encontrar el siguiente número multiplicamos el anterior por 2 y creamos así la serie: 0, 3, 6, 12, 24, 48..... Luego sumamos a cada número 4 y dividimos la suma entre 10 y esto nos da un valor de la distancia en unidades astronómicas (UA). Ver tabla 2.

Tabla 2. Comparación de las distancias medidas a los planetas con las distancias predichas por la ley de Titus-Bode. <http://www.astrodom.org/Asteroides.htm>.

Valor de Titus-Bode en UA	Planeta correspondiente	Valor real en UA
$(0+4)/10 = 0.4$	Mercurio	0.387
$(3+4)/10 = 0.7$	Venus	0.723
$(6+4)/10 = 1.0$	La Tierra	1
$(12+4)/10 = 1.6$	Marte	1.524
$(24+4)/10 = 2.8$	Asteroide Ceres	2.77
$(48+4)/10 = 5.2$	Júpiter	5.203
$(96+4)/10 = 10.0$	Saturno	9.539
$(192+4)/10 = 19.6$	Urano	19.18
$(384+4)/10 = 38.8$	Neptuno	30.06
$(768+4)/10 = 77.2$	Plutón	39.44

Lo interesante es que la regla de Titus-Bode predecía la existencia de un planeta entre Marte y Júpiter a una distancia de 2.8 UA del Sol, pero todavía a finales del siglo XVIII no se conocía un objeto que estuviera a esa distancia. En Enero de 1801 Giuseppe Piazzi en Sicilia, descubrió accidentalmente el “planeta”. El lo llamó Ceres el cual tiene aproximadamente 9×10^2 km de diámetro (Gibilisco, 1991; Kowal, 1996). Posteriormente, en 1802, Olbers encontró otro asteroide, Palas, este segundo descubrimiento abrió la posibilidad de que podría haber muchos planetas menores. En 1804 su colega Kart Harding, encontró un tercer asteroide, Juno, más tarde en 1807, nuevamente Olbers encontró un nuevo asteroide, Vesta y posteriormente, en el gran hueco, Kart Henche encontró el quinto, Astrea en 1845 (Kowal, 1996). Ver Tabla 3. Conforme pasaron los años se fueron encontrando más asteroides. En la actualidad se conocen más de 6×10^3 asteroides aunque no a todos se les han calculado sus parámetros orbitales y se siguen encontrando aproximadamente 30 asteroides nuevos por año (Kowal, 1996).

*Tabla 3 Primeros asteroides encontrados entre las órbitas de Marte y Júpiter.
<http://www.astrodom.org/Asteroides.htm>*

Asteroide	Diámetro en Km.	Año de Descubrimiento
Ceres	900	1801
Palas	480	1802
Juno	193	1804
Vesta	386	1807

1.10 El Sistema Solar Exterior

Los cuatro planetas siguientes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) son más grandes, con anillos y muchas lunas; su composición es principalmente gaseosa (hidrógeno y helio principalmente), poseen bajas densidades y rotación rápida (Pater de Imke, 2001; Karttunen, 2003) [7-10]. Se encuentran más allá del cinturón de asteroides y su temperatura promedio es de 73 K, ya que a las distancias a las que se encuentran interceptan muy poca radiación solar. El primer contacto con los planetas gigantes fue en 1973, cuando el Pionero 10 voló cerca de Júpiter, lo secundaron las misiones Viajero, ofreciéndonos el panorama de un mundo maravilloso.

1.10.1 Júpiter

Observaciones realizadas a Júpiter con un telescopio pequeño muestran su sistema de nubes en forma de bandas que cubren su superficie (figura 1.16) y cuatro de sus muchas lunas, que hacen que Júpiter parezca un sistema solar en miniatura [10,13]. Está compuesto casi totalmente de hidrógeno y helio y pequeñas cantidades de amoníaco, metano, vapor de agua y otros compuestos [10]. La gravedad es tan alta que los gases más livianos no logran escapar de su superficie.

En el interior del planeta el hidrógeno y el helio se comprimen progresivamente. El hidrógeno molecular se comprime de tal manera que se transforma en un líquido de carácter metálico a profundidades de unos 1×10^4 km con respecto a la superficie.

Tiene una estructura de bandas y huracanes en su superficie visible, producidas por la convección interior aunada a la rotación. Las bandas que cubren su superficie tienen tonalidades naranja, café, gris, amarillo, crema y azul. Están en continuo movimiento y en ellas se pueden apreciar cambios en cuestión de días. Las bandas oscuras están 20 km por debajo de las claras. Júpiter rota muy rápido —una vez cada 9.841 horas— y esta rotación también influye en el aspecto de las bandas que, según dijimos, son nubes paralelas al ecuador. No todas las bandas rotan con la misma velocidad: las ecuatoriales rotan un poco más rápido que las cercanas a los polos, completando su rotación cinco minutos antes. En consecuencia, cada 108 días jovianos las bandas ecuatoriales han dado un giro más que las polares.

Las regiones internas de Júpiter también giran a distintas velocidades. Júpiter radia dos veces más energía que la que recibe del Sol, de donde se infiere que, de alguna manera, está generando energía en su interior.

Los anillos de Júpiter están formados por partículas de polvo lanzadas al espacio cuando los meteoritos chocan con los satélites interiores de Júpiter. Tanto los anillos como los satélites de Júpiter se mueven dentro de un enorme globo de radiación atrapado en la magnetosfera, el campo magnético del planeta [6 – 10].

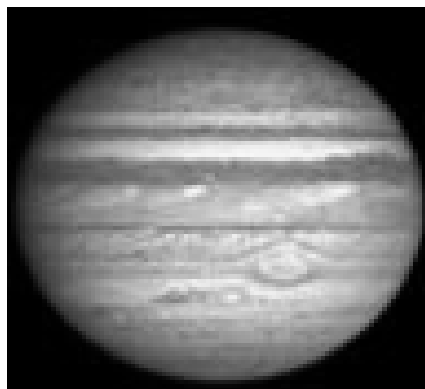


Figura 1.16 Foto de Júpiter
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria3.htm>)

Hasta ahora se han descubierto **63 satélites** en Júpiter, de los cuáles los más importantes son 4, llamados satélites Galileanos. En el apéndice A presento una tabla con los datos principales de todos los satélites planetarios que obtengo de la página de la NASA, dirección http://ssd.jpl.nasa.gov/jup_elem.html.

1.10.1.1 Ganímedes

Ganímedes es uno de los satélites de Júpiter y es el más grande del sistema solar. De hecho es mayor que Mercurio. Ganímedes es mucho más grande que Plutón. También se trata de la única luna que tiene un campo magnético propio, por lo que se cree que su núcleo puede contener metales.

La superficie de Ganímedes es antigua y está marcada por numerosos cráteres de impacto y una compleja red de fisuras (figura 1.17). Ganímedes está compuesto de silicatos y hielo, con una corteza de hielo que flota encima de un fangoso manto que puede contener una capa de agua líquida.



Figura 1.17 Imagen de Ganímedes
(http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/jupiter/jupiter_il.sp.html)

1.10.1.2 Calisto

Calisto es el satélite del sistema solar con más cráteres. De hecho, los cráteres de impacto y los anillos concéntricos asociados son los únicos rasgos encontrados (figura 1.18); no hay ninguna montaña grande. Esto es probablemente debido a la naturaleza helada de su superficie, con los cráteres más grandes y montañas que se borran por el flujo de la corteza helada durante el tiempo geológico. Se encuentran dos cuencas de impacto enormes en Calisto con anillos concéntricos; Valhalla es la más grande con una región central luminosa de unos 6×10^2 km en el diámetro y anillos que se extienden a 3×10^3 km de diámetro, y la cuenca de impacto de Asgard que mide aproximadamente 1.6×10^3 km de diámetro. Otro rasgo interesante es Gipul Catena, una serie larga de cráteres de impacto en una línea recta por la superficie de Calisto. Fue probablemente causada por un objeto destruido por las fuerzas de marea cuando este pasó cerca de Júpiter (como el Cometa Shoemaker-Levy 9) antes de que impactara [10, 15 y 16].



Figura 1.18 Imagen de Calisto
(http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/jupiter/jupiter_il.sp.html)

1.10.1.3 Io

Es el satélite más sorprendente y activo, desde el punto de vista geológico, del Sistema Solar (figura 1.19). Alberga volcanes aún activos y esta actividad volcánica modifica constantemente la superficie del satélite. Io está compuesto principalmente por material rocoso con un bajo contenido de hierro. Está situado dentro del intenso cinturón de radiación formado por los electrones e iones atrapados en el campo magnético de Júpiter. Los depósitos de sal, de compuestos de azufre y otros productos de origen volcánico, transforman la corteza de Io en una zona multicolor [10, 15,16].



Figura 1.19 Imagen de Io
(http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/jupiter/jupiter_il.sp.html)

1.10.1.4 Europa

El aspecto de Europa es el de una bola helada con líneas marcadas sobre la superficie del satélite (figura 1.20). Posee una superficie lisa y muy clara, en la que las diferencias de relieve están poco marcadas. Tiene una capa externa de agua de unos 100 km de espesor (parte como hielo en la corteza, parte en forma de océano líquido bajo el hielo). Datos recientes sobre el campo magnético observado por la sonda Galileo indica que Europa crea un campo magnético a causa de la interacción con el campo magnético de Júpiter, lo que sugiere la presencia de una capa de fluido probablemente un océano líquido de agua salada. Puede que también tenga un pequeño núcleo metálico de hierro. [77].



Figura 1.20 Imagen de Europa
(http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/jupiter/jupiter_il.sp.html)

1.10.2 Saturno

Saturno es el sexto planeta desde el Sol y el segundo más grande del Sistema Solar en cuanto a masa y dimensiones (figura 1.21). Es muy parecido a Júpiter, probablemente debido a que tuvieron un origen similar [6-10]. Gran parte de lo que sabemos sobre este planeta es debido a las exploraciones de los Viajeros en 1980-81. Saturno está claramente achatado en los polos, como resultado de la rápida rotación del planeta alrededor de su eje. Su día dura 10 horas, 39 minutos y tarda 29.5 años terrestres en completar su órbita alrededor del Sol. La atmósfera está básicamente compuesta por hidrógeno con pequeñas cantidades de helio y metano. Saturno es el único planeta cuya densidad es inferior a la del agua (aproximadamente un 30% menos). Si fuese posible encontrar un océano lo suficientemente grande, Saturno flotaría en él. El color amarillo del nuboso Saturno está marcado por anchas bandas atmosféricas similares, pero más tenues, que las encontradas en Júpiter.

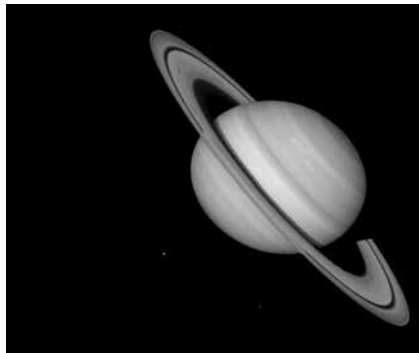


Figura 1.21 Foto de Saturno
(http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/saturn/saturn_il.sp.html)

Se han descubierto **47 satélites** alrededor de Saturno [17]. La densidad de los satélites de Saturno es muy baja y, además, reflejan mucha luz. Esto hace pensar que la materia más abundante es el agua congelada, casi un 70%, y el resto son rocas. Algunos de los satélites importantes son:

1.10.2.1 Titán

Es único entre los satélites porque posee una atmósfera más densa que la de la Tierra compuesta sobre todo de nitrógeno con trazas de otras sustancias entre las que se cuentan metano, etano, acetileno, dióxido de carbono y monóxido de carbono que le dan un color naranja (figura 1.22). Es el mayor de los satélites de Saturno y el segundo del Sistema Solar [10, 15,16].

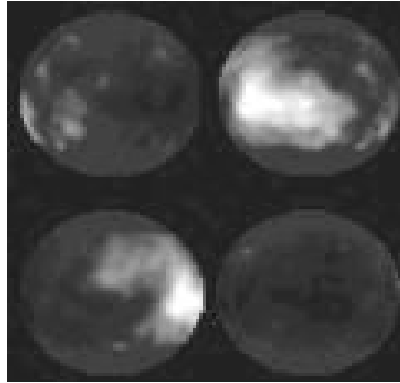


Figura 1.22 Cuatro imágenes de la superficie de Titán
(http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/saturn/saturn_il.sp.html)

1.10.2.2 Rea

Tiene 1.53×10^3 km de diámetro y gira a 5.27×10^8 km de Saturno cada cuatro días y medio. Tiene un pequeño núcleo rocoso (figura 1.23). El resto es un océano de agua helada, con temperaturas que van de los 447 a los 53 K. Los cráteres provocados por los meteoritos duran poco, porque el agua se vuelve a helar y los borra [10].



Figura 1.23 Imagen de Rea
(http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/saturn/saturn_il.sp.html)

1.10.2.3. Japeto

Es uno de los satélites más extraños. Tiene una densidad semejante a la de Rea, pero su aspecto es muy diferente, porque tiene una cara oscura y otra clara (figura 1.24). Se cree que el material oscuro está compuesto de carbono, pero nadie sabe si procede del interior del satélite o si se depositó procedente del espacio [10,16].

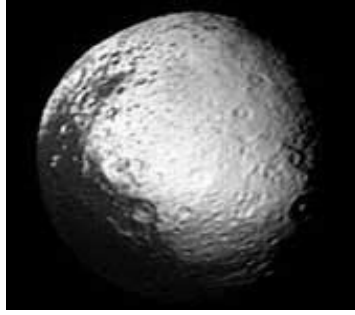


Figura 1.24 Imagen de Japeto
<http://www.solarviews.com/span/iapetus.htm>

1.10.2.4 Dione y Tetis

La densidad de Tetis no es mucho mayor a la del agua por lo que debe estar compuesta casi exclusivamente de hielo. Los accidentes de su superficie recuerdan nombres de la guerra de Troya. Odiseus, un amplio cráter de 4×10^2 km. de diámetro. Otra estructura es Ithaca Chasma y no es más que un cañón que se extiende de polo a polo con una amplitud media de 1×10^2 km y una profundidad de 4 a 5 km.

Por otro lado Dione muestra una superficie cubierta de cráteres, dejado por impactos de objetos menores. Como características propias muestra terrenos con franjas que dominan sólo un lado de la luna. Estas delgadas rayas latitudinales son fracturas producidas por actividad tectónica en terrenos más jóvenes y dividen la superficie de Dione. Sin embargo Dione también posee regiones brillantes probablemente cubiertas de material procedente de regiones por debajo de la corteza helada. Tiene un satélite co-orbital: 1980 S 6 bautizado como HELENA [73].

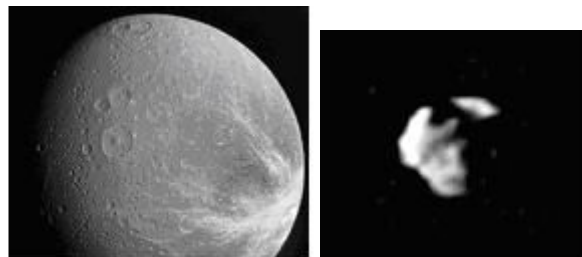


Figura 1.25 Imagen de Dione y su satélite co-orbital Helena. Credit NASA.
(<http://www.cielosur.com/lunas-saturno.htm>)



Figura 1.26 Imagen de Tetis
(<http://www.cielosur.com/lunas-saturno.htm>)

1.10.3 Urano

Es el séptimo planeta desde el Sol y el tercero más grande del Sistema Solar (figura 1.27). La atmósfera de Urano está formada por hidrógeno, metano y otros hidrocarburos [16]. El metano absorbe la luz roja, por eso refleja los tonos azules y verdes.

Urano está inclinado de manera que el ecuador hace casi ángulo recto, 98° , con la trayectoria de la órbita. Esto hace que todo el tiempo la parte más caliente, encarada al Sol, sea uno de los polos. Su distancia al Sol es el doble que la de Saturno. Está tan lejos que, desde Urano, el Sol parece una estrella más, aunque mucho más brillante que las otras. La inclinación sorprendente de Urano provoca un efecto curioso: su campo magnético se inclina 60° en relación al eje y la cola tiene forma de tirabuzón, a causa de la rotación del planeta.

En 1977, se descubrió que Urano tiene anillos, los anillos de Urano son estrechos (miden desde algunos km hasta 1×10^2 km de anchura radial) y están separados por amplias regiones vacías. Se ha confirmado la existencia de once anillos alrededor de Urano.

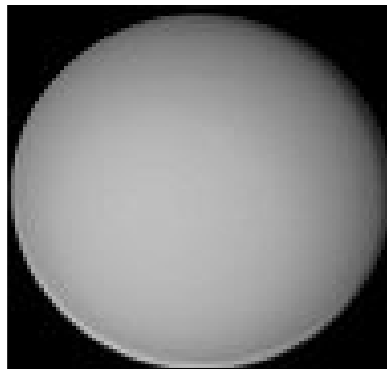


Figura 1.27 Foto de Urano
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria4.htm>)

Se han descubierto **27 satélites** de Urano [17]. Mencionaré solo los más importantes:

1.10.3.1 Titania

La superficie es rugosa, con fallas que indican que las fuerzas internas han moldeado su superficie (figura 1.28). Da una vuelta cada 8 días y 17 horas [16]

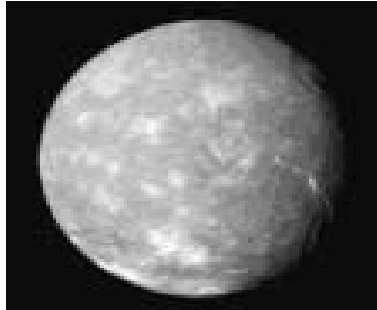


Figura 1.28 Imagen de Titania
(http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/uranus/uranus_il.sp.html)

1.10.3.2 Oberón

Se caracteriza por tener una superficie helada, cubierta de cráteres, algunos de un tamaño considerable (figura 1.29). Tiene reflejos brillantes en algunos lugares, igual que Calisto, uno de los satélites de Júpiter [16].



Figura 1.29 Imagen de Oberón
(http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/uranus/uranus_il.sp.html)

1.10.4. Neptuno

Es el planeta más exterior de los gigantes gaseosos (figura 1.30). Neptuno fue descubierto el 23 de Septiembre de 1846 por Johann Gottfried Galle, del Observatorio de Berlín, y Louis d'Arrest, un estudiante de astronomía, a través de predicciones matemáticas realizadas por Urbain Jean Joseph Leverrier [13].

Debemos destacar que Leverrier comparte los honores del descubrimiento matemático de Neptuno, con el británico John C. Adams, ya que, aunque la observación realizada a sugerencia de Leverrier condujo al descubrimiento de Neptuno, fue Adams el primero que predijo su posición. John Couch Adams considerando la ley de Titus-Bode, trató de hallar la posición del nuevo planeta, pero se evidenció que la ley fallaba en este caso, aunque ayudó a buscar posibles órbitas.

Los británicos vieron con escepticismo el hallazgo de Adams y desdeñaron su búsqueda posterior. Igual que había ocurrido con Urano, el planeta Neptuno había sido observado varias veces por diferentes astrónomos que lo habían confundido con una estrella.

Los dos tercios interiores de Neptuno están compuestos por una mezcla de roca fundida, agua, amoníaco y metano líquidos [16]. El tercio exterior es una mezcla de gases calientes compuestos por hidrógeno, helio, agua y metano.

Neptuno tiene un sistema de cuatro anillos estrechos, delgados y muy tenues. Se han formado a partir de partículas de polvo, arrancadas de las lunas interiores por los impactos de meteoroides pequeños. En la atmósfera de Neptuno se llega a temperaturas cercanas a los 13 K. Las nubes, de metano congelado, cambian con rapidez.

La órbita de Neptuno es tan grande que no le ha dado tiempo de dar una vuelta completa al Sol desde que fue descubierto, aun cuando se mueve a 19.8×10^3 km/hora. Está tan lejos que es muy difícil de observar, es decir completa su órbita alrededor del Sol cada 165 años.

El 10 de octubre de 1846, menos de tres semanas después del descubrimiento de Neptuno, el astrónomo William Lassell descubrió que tenía un satélite, y brillaba más que los dos satélites de Urano conocidos hasta entonces.

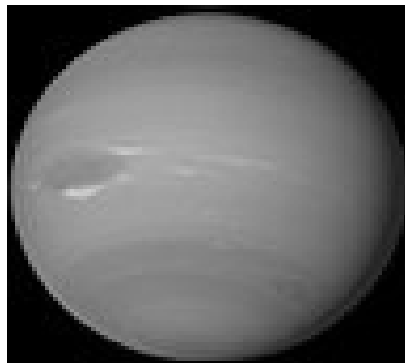


Figura 1.30 Foto de Neptuno
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria4.htm>)

Se han descubierto **13 satélites** de Neptuno [17].

1.10.4.1 Tritón

Tiene un diámetro de 2.7×10^3 km [16] y gira a 3.55×10^5 km de Neptuno en poco menos de 6 días (figura 1.31). Dos características lo hacen especial: es el único satélite grande que gira en dirección contraria a la rotación de su planeta y es el objeto del Sistema Solar donde se ha medido la temperatura media más fría 38 K. Este satélite se compone de una mezcla de hielo y roca que se considera similar a la del noveno planeta [16].



Figura 1.31 Imagen de Tritón
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria4.htm>)

1.11 Plutón

Plutón es un disidente. Con un tamaño minúsculo y situado en una órbita inclinada y muy excéntrica, no puede clasificarse ni como gigante gaseoso ni como planeta terrestre [16]. Plutón es un planeta muy peculiar descubierto en 1930 por Clyde Tombaugh en una cuidadosa revisión de placas fotográficas de la parte del cielo correspondiente a la constelación de Géminis. Es probablemente una bola de roca y hielo. Posee un satélite gemelo llamado Caronte con el cual forma un sistema doble, es decir, cada astro órbita alrededor del otro. Se han descubierto dos pequeñas lunas más orbitando Plutón, aumentando la lista de satélites conocidos de este 'planeta' a tres. Las recién encontradas lunas orbitan a unos 4.4×10^4 Km. Del planeta, más del doble de lo que está Caronte, su otro satélite. Son 5×10^3 veces menos brillantes que Caronte. Las observaciones preliminares sugieren que están en órbita circular alrededor de Plutón y en el mismo plano que Caronte,

Las dos nuevas lunas tienen entre 45 a 160 Km. de diámetro. Estos satélites fueron descubiertos usando el Telescopio Espacial Hubble [71].

El tamaño de Caronte es de aproximadamente la mitad del de Plutón, ningún otro satélite es tan grande en relación al planeta que orbita. Se conocen muy pocos datos de su naturaleza física pues es muy difícil separarlo visualmente de Plutón, ya que su separación es inferior a los 32×10^3 km. El periodo orbital de Caronte es igual al periodo de rotación de Plutón de 6 días y 9 horas.

La órbita de Plutón es la más extraña del sistema solar. Además, su órbita está inclinada 17° respecto del plano de la eclíptica. El tamaño de Plutón le proporciona otras características, como la capacidad para retener una tenue atmósfera formada por nitrógeno, metano y monóxido de carbono que se deposita helada sobre su superficie. Por esta razón su albedo es muy alto, del 60% comparado con el 4% que se estima a los KBOs (Kuiper Belt Object). Hoy en día los investigadores no saben como tomar a Plutón, o lo contemplan como el planeta más pequeño y el que se aleja más del Sol (figura 1.32), o bien se acepta que Plutón es el segundo más grande de los KBOs conocidos [18].

La NASA prepara la misión Plutón Express para que llegue a Plutón en el 2008, antes que la atmósfera se congele. Serán un par de naves pequeñas y rápidas que pasarán a menos de 15×10^3 km del planeta.

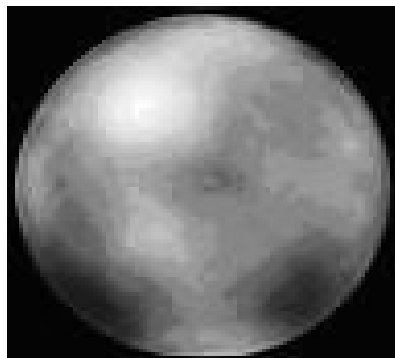


Figura 1.32 Foto de Plutón
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria4.htm>)

1.11.1 Caronte

En 1978 se descubrió su satélite Caronte (figura 1.33), que es de aproximadamente la mitad del tamaño de su planeta [16]. Con el tiempo, la gravedad ha frenado sus rotaciones y ahora se presentan siempre la misma cara, este es un hecho que también ha ocurrido con nuestra Luna, es decir, la Luna siempre presenta la misma cara al observador terrestre, debido al efecto de las fuerzas de marea que ejerce la Tierra sobre la Luna. Esto significa que coincide el periodo de rotación de la Luna alrededor de su eje y el tiempo que tarda en completar una órbita alrededor de la Tierra, que es lo mismo que ocurre ahora con Plutón y Caronte. Por su densidad, Plutón parece hecho de rocas y hielo. En cambio, su satélite es mucho más ligero. Esta diferencia hace pensar que se formaron separadamente y después se juntaron [16,18].

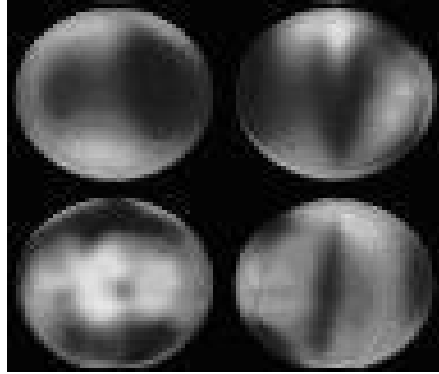


Figura 1.33 Cuatro imágenes de Caronte
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria4.htm>)

1.12 KBOs (Objetos del cinturón de Kuiper)

1.12.1 Cinturón de Kuiper

En 1950, el astrónomo Holandés Jan Oort [1900-1992] propuso la hipótesis de que los cometas venían de una vasta capa de cuerpos helados cerca de 5×10^4 veces más lejos del Sol que la Tierra [24,25]. Un año más tarde el astrónomo Gerard Kuiper (también Holandés, 1905-1973) sugirió que algunos desechos de la formación del Sistema Solar parecidos a cometas también deberían existir justo más allá de Neptuno [24,25]. La hipótesis de Kuiper fue reforzada al principio de los 1980s cuando simulaciones por computadora de la formación del Sistema Solar predijeron que un disco de desechos debería formarse naturalmente alrededor del borde del Sistema Solar.

El Cinturón de Kuiper permaneció como teoría hasta la detección en 1992 de un cuerpo de 150 millas de ancho, llamado 1992QB1, a la distancia del supuesto cinturón [24,25]. Varios objetos de tamaño similar fueron descubiertos rápidamente, confirmando que el Cinturón de Kuiper era real [24].

Más allá de las 50 UA es posible que existan más cuerpos de este tipo, pero en todo caso están fuera del alcance de las actuales técnicas de detección (figura 1.34). Las observaciones muestran también que se hallan confinados dentro de unos pocos grados por encima o por debajo del plano de la eclíptica. Estos objetos se conocen como KBOs (Kuiper Belt Objects). Además, Tritón y Nereida, los satélites de Neptuno, y Febe, el satélite de Saturno, tienen órbitas inusuales y podrían ser objetos capturados del Cinturón de Kuiper.

El Cinturón de Kuiper es una región en forma de disco que se encuentra más allá de la órbita de Neptuno, aproximadamente entre 30 y 100 UA del Sol, que contiene muchos pequeños cuerpos helados. Actualmente se le considera la fuente de los cometas de periodo corto.

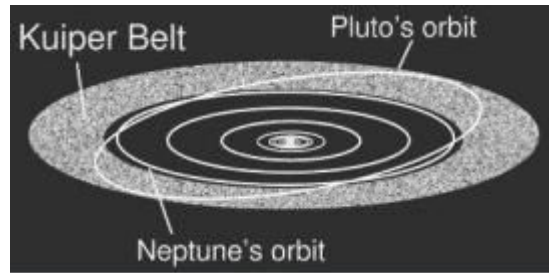


Figura 1.34 Muestra la región del espacio donde se cree se encuentra el Cinturón de Kuiper.

(<http://www.solstation.com/stars/kuiper.htm>)

1.12.2 Sedna

La condición de cuerpo helado de 2003 VB12, condujo a aceptar el nombre de "Sedna" en honor a la diosa del océano de la etnia Inuit, (figura 1.35), una tribu esquimal que puebla regiones del Norte de Canadá y Groenlandia [21]. La diosa Sedna era representada con la forma de león marino y regía las profundidades del océano. Mike Brown, junto con el Dr. Chad Trujillo del Observatorio Gemini, Hawai, y el Dr. David Rabinowitz de la Universidad de Yale en New Haven, Connecticut, descubrieron el objeto tipo planeta, o planetóide, el 14 de Noviembre del 2003 [20]. Los investigadores utilizaron el Telescopio de 48 pulgadas Samuel Oschin en el Observatorio de Caltech en Palomar cerca de San Diego). La rotación de Sedna fue determinada en 40 días por Suzanne Tourtellotte, de la Universidad de Yale, trabajando con el telescopio SMARTS, de 1.3 metros, en Chile [19,20]. Esta rotación lenta hace inferir a los investigadores que el objeto puede poseer un satélite que esté frenando su velocidad de rotación. La órbita del objeto es bastante excéntrica, muy parecida a la de los cometas periódicos. En su punto más cercano se encuentra a 1.3×10^8 km del Sol y en el más lejano, a 1.3×10^{10} km, en pocas palabras, en el afelio, el objeto se encuentra 100 veces más lejos que en el perihelio. Sedna cubre su órbita en 10.5×10^3 años. En los actuales momentos, Sedna se encuentra a unas 90 UA del Sol. En su perihelio, estará a 76 UA. De momento se sabe que por los próximos 72 años, el objeto se encontrará en la parte más próxima al Sol de su órbita.

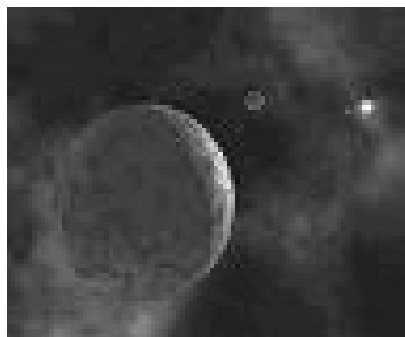


Figura 1.35 Representación de Sedna
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria5.htm>)

1.12.3 Quaoar

En Junio del 2002 Michael Brown y Chad Trujillo identificaron dentro del cinturón de Kuiper, un cuerpo celeste bautizado provisionalmente como Quaoar [22,23]. El término Quaoar está inspirado en el mito de la creación del pueblo Tongva, que habitó Los Ángeles antes de la colonización. Para los indígenas, Quaoar era la gran fuerza de la naturaleza que daba origen a todas las cosas. Quaoar es también denominado 2002 LM60. Su órbita, calculada por sus descubridores es casi una trayectoria perfectamente circular.

Su tiempo de traslación, es decir, el tiempo que le lleva dar una vuelta completa alrededor del Sol es de 288 años terrestres.

El tamaño de Quaoar fue resuelto a partir de imágenes del Telescopio Espacial Hubble [22]. Es probablemente un mundo frío cubierto de hielo, desde el cual el Sol parece una estrella particularmente brillante, nada más. Tiene el tamaño equivalente a la décima parte de nuestro planeta, (figura 1.36), es decir, posee un diámetro de 1.3×10^3 km. Su masa es menor a la de todos los asteroides del cinturón de Kuiper juntos, pero su volumen es bastante considerable.



Figura 1.36 Quaoar: Comparación de diámetros.
(http://www.cosmopediaonline.com/imagenes/planetas/quaoar_diametro.gif)

1.12.4 Los Plutinos

Los Plutinos son objetos transneptunianos que orbitan a 39 UA de distancia del Sol y se encuentran en resonancia orbital 3:2 con Neptuno (por cada tres revoluciones de Neptuno alrededor del Sol, los objetos realizan dos), formando la zona interna del cinturón de Kuiper [24].

Deben su nombre al hecho de que comparten órbita con el planeta Plutón el cual puede ser considerado como el principal de ellos. De esta forma, los objetos resonantes pueden acercarse a la órbita de Neptuno sin que nunca puedan chocar con él, porque sus perihelios se hallan alejados de Neptuno. De hecho, se conoce que la órbita de Plutón cruza por dentro de la de Neptuno.

Esta propiedad también es compartida por cierto número de Plutinos conocidos (por ejemplo 1993 SB, 1994 TB, 1995 QY9), lo que refuerza su similitud dinámica con Plutón. Este se diferencia de los Plutinos por su tamaño.

Una de las hipótesis sobre el origen de los Plutinos es que son los fragmentos de un impacto catastrófico sufrido por el proto-plutón en los primeros tiempos de la formación del sistema solar, que también tiene la virtud de explicar la naturaleza del sistema Plutón-Caronte [16, 24,25]. En tal caso, el origen de Plutón podría haber sido independiente del cinturón de Kuiper, lo que en cierto modo daría la razón a los que defienden que Plutón debe ser considerado un auténtico planeta [68].

Plutón es el segundo más grande en tamaño que el de cualquier otro objeto del cinturón de Kuiper. El diámetro de Plutón es de 2.3×10^3 km frente a 3.1×10^3 km del mayor KBO conocido, 2003-UB313 (Xena). Como se puede ver, o se contempla a Plutón como el planeta más pequeño, con la órbita más excéntrica e inclinada de todos los planetas, o bien se acepta que Plutón es el segundo mayor KBO conocido, pero completamente típico entre los objetos de su clase (Tabla 4). La excentricidad e inclinación de Plutón tiene el mismo origen que las excentricidades e inclinaciones de los otros (probables) 25×10^3 plutinos con diámetros superiores a los 100km, que posiblemente fueron arrastrados por la migración radial de Neptuno [68].

*Tabla 4 Muestra algunos de los KBOs descubiertos
(<http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/jewitt/kb.html>)*

Nombre	Distancia Solar (UA)	Diámetro Km
2003-UB313	67.66	3100
Plutón	39.61	2300
Sedna		1500
2004 DW		1500
Caronte		1270
Quaoar	42	1250
2005 FY9		1250
2003 EL61		1200
Ixion (2001KX76)	43	1055
Varuna	43	900
2002AW197	48	890
1999TC36	31	675

1.12.5 Planeta: 2003 UB313

El planeta 2003-UB313 bautizado extraoficialmente por sus descubridores con el nombre de “Xena” se encuentra actualmente a 97 veces la distancia Tierra-Sol (UA) y ostenta el récord de ser el objeto más lejano del Sistema Solar observado hasta ahora (figura 1.37). Está tan lejos que para calcular su diámetro se realizan estimaciones en base a la reflectividad de luz solar (albedo). El planeta tiene un diámetro de 3.1×10^3 km y está actualmente a una distancia de 97 UA y gira alrededor del Sol en una órbita muy inclinada y excéntrica cada 557 años. Estos datos indican que 2003 UB313 es el mayor KBO conocido hasta la fecha [26,27]. La Unión Astronómica Internacional (IAU) afirma que, mientras tanto, todos los objetos descubiertos a una distancia mayor de 40 UA seguirán considerándose como parte de la población de transneptunianos [27]. Por tanto, oficialmente, 2003 UB313 no es el décimo planeta ya que es competencia de la (IAU) (no de la NASA ni del descubridor) otorgar tal denominación.

Además, la mayoría de los planetas del Sistema Solar son sólidos -como Mercurio, Venus, la Tierra o Marte- o gigantes gaseosos -como Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno-, mientras que tanto Plutón como “Xena” no encajan exactamente en ninguna de estas dos definiciones, y su composición es más parecida a la de un asteroide [26,27].

El problema, según la comunidad científica, es la ausencia de una definición concreta de lo que es un planeta, un trabajo en el que una comisión de la IAU lleva trabajando más de un año [27].

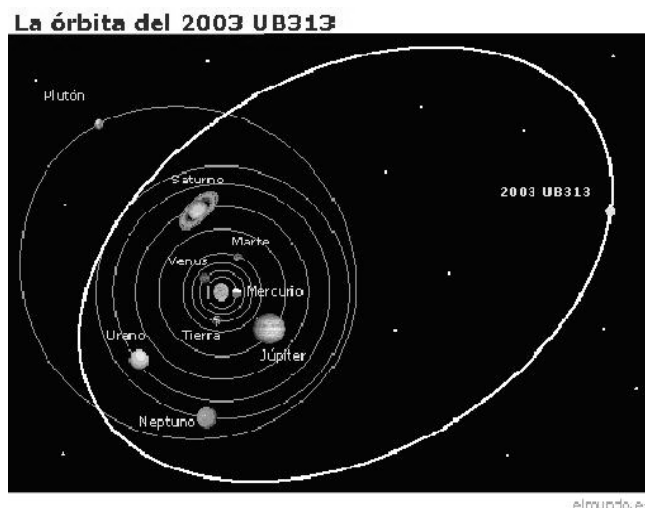


Figura 1.37 Muestra la órbita que sigue el planeta 2003 UB313 (<http://www.elmundo.es/elmundo/2005/08/02/ciencia/1122978544.html>).

1.13 Cometas

Los cometas son «bolas de nieve sucia», que habitan en los confines del Sistema Solar (figura 1.38), en una gigantesca envoltura compuesta por la Nube de Oort y el Cinturón de Kuiper que probablemente se formó, junto al resto de nuestro Sistema Solar [69]. Sometidos a la fuerza de la gravedad, como cualquier objeto del Universo, de vez en cuando sucede que choques entre ellos o el «tirón gravitacional» de una estrella cercana son capaces de arrancarlos de su nube precipitándolos hacia el Sol. Una vez iniciado el viaje, nuevos encuentros gravitacionales definirán su órbita. Una órbita parabólica o hiperbólica (ambas curvas abiertas) significa que el cometa caerá hacia el Sol, lo rodeará y se alejará de él para no volver nunca más. Una órbita elíptica (curva cerrada) nos indica que el cometa volverá y, cuanto menos alargada sea la elipse, menos tiempo tardará en hacerlo (Gibilisco, 1991; 69).

Estas «bolas de nieve sucia», cuyos diámetros pueden superar los 100 km, están compuestas sobre todo de agua y, en menor proporción, de monóxido y dióxido de carbono, cianuro, silicatos, etc. Alejado del Sol, el cometa se reduce a su núcleo, pero conforme el cometa se acerca al Sol, los gases helados que contiene se evaporan originando alrededor del núcleo un halo esférico al que llamamos «cabellera» o «coma». A medida que la distancia al Sol disminuye, la cabellera aumenta, hasta alcanzar millones de km. Simultáneamente, el viento solar empuja a las partículas de ésta en sentido opuesto al Sol, haciendo que de la cabellera brote una larga cola que puede llegar a medir decenas o, en casos excepcionales, cientos de millones de kilómetros (Gibilisco, 1991; Pater de Imke 2001; Karttunen, 2003).

Cuando de nuevo se aleja del Sol, adentrándose en las gélidas temperaturas del Sistema Solar exterior, volverá a ser una fría bola de gases, pero un poco más pequeña, pues parte de su cuerpo habrá quedado, como una huella, flotando sobre la zona caliente de su órbita [69].

Los cometas pueden tener varias colas. Éstas, a su vez, pueden ser de polvo o de gas. Ambos tipos de cola apuntan en dirección opuesta al Sol, aunque las de polvo suelen estar ligeramente curvadas. En algunos cometas se ha observado una «anticola» (cola que, desde nuestra perspectiva, parece apuntar al Sol, pero en realidad es una ilusión óptica) [69].

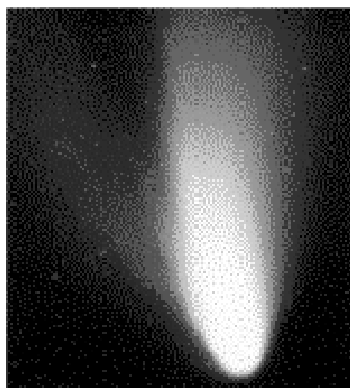


Figura 1.38 Imagen de un Cometa
(<http://www.astromia.com/fotosolar/galeria6.htm>)

CAPITULO 2 **LEYES DE KEPLER**

2.1 Introducción

Durante siglos, el estudio del movimiento de los planetas fue uno de los campos más importantes de la astronomía. Así, en el siglo XVI el astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601) observó el cielo durante décadas, tomando valiosas notas acerca de las posiciones de cada uno de los planetas conocidos en aquel entonces: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno [32].

Al morir Tycho Brahe, su asistente Johannes Kepler se dio a la tarea de buscar algún orden entre estos registros. Johannes Kepler fue un astrónomo alemán (Württemberg, 1571-Ratisbona, 1630) al que se deben las tres leyes que describen el movimiento de los planetas de nuestro sistema solar. Partidario de la teoría heliocéntrica de Copérnico, Kepler en principio supuso que las órbitas planetarias eran perfectamente circulares, y se propuso perfeccionar el sistema de Copérnico ayudándose de las observaciones de Marte que había hecho Tycho Brahe durante más de 20 años, así como en sus propias observaciones. Durante varios años realizó prolijos cálculos sobre la manera de obtener parámetros de las órbitas planetarias, hasta llegar al convencimiento de que había de desecharse la idea de que fueran circulares.

En otras palabras Kepler realizó uno de los estudios científicos más importantes de todos los tiempos que culminó en las llamadas tres leyes de Kepler, las cuales nos dicen cómo se mueven los planetas [29].

2.2 Antecedentes históricos

Kepler descubrió que los planetas giran alrededor del Sol describiendo elipses [28, 29, 31, 32]. Con la excepción de Mercurio (y de Plutón, descubierto en el siglo XX), las elipses en las cuales se mueven los planetas son muy poco elongadas y de dibujarlas nos parecerían como círculos.

Kepler encontró además que un planeta va más rápido cerca del Sol que lejos de este, también una relación entre el tiempo que tarda cada planeta en dar una vuelta alrededor del Sol y la distancia de dicho planeta al Sol [28, 29, 31, 32].

Con el tiempo se encontró que las leyes de Kepler no solo valían para todos los planetas sino que los cometas, muchos de los cuales siguen trayectorias en forma de elipses muy excéntricas, también cumplen con las leyes de Kepler [31–35]. Así, en acuerdo con estas leyes, los cometas se mueven muy despacio cuando están lejos del Sol y extremadamente rápido cuando se acercan a él. También se encontró que las lunas de los planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) también cumplen con las leyes de Kepler, esta vez tomando el planeta en cuestión en lugar del Sol [31-35].

De hecho, las leyes de Kepler son consecuencia directa de la fuerza gravitacional y fueron probadas por Newton en sus Principia [31–33]. Para esta prueba Newton propuso su ley de Gravitación Universal que dice que la fuerza de atracción gravitacional entre dos cuerpos se encuentra en la dirección de la línea que los une, es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa [32, 33]:

$$F_g = -G \frac{M * m}{r^2} \quad (2.2.1)$$

donde G es la constante de gravitación universal, las masas de los cuerpos son M* y m y r es la distancia de separación entre ellos.

Las Leyes de Kepler son una descripción dinámica del movimiento planetario. En lo que resta de este capítulo las enunciaremos de manera más precisa.

2.3 Primera Ley de Kepler

Ley de las órbitas elípticas:

“Todos los planetas se mueven en órbitas elípticas, con el Sol en uno de sus focos” (figura 2.1) [28].

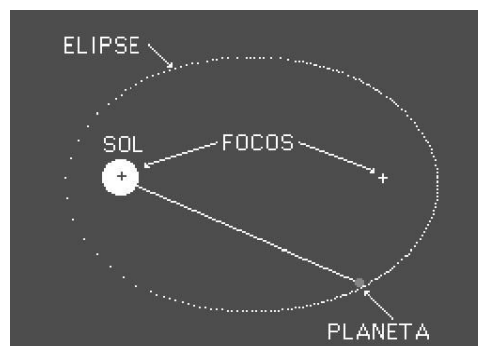


Figura 2.1 La forma elíptica de la órbita (primera ley de Kepler) es resultado de la fuerza de gravedad inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. (http://almaak.tripod.com/temas/leyes_kepler.htm)

Kepler obtuvo esta ley de forma empírica, mediante observación de los movimientos aparentes de los planetas pero si tomamos en cuenta el movimiento general de los cuerpos celestes habría que enunciar esta primera ley kepleriana de la siguiente manera:

Bajo la fuerza de atracción gravitacional, el movimiento de un objeto alrededor de otro sigue una trayectoria cónica (círculo, elipse, parábola, hipérbola). Esto es, la órbita será elipse, parábola o hipérbola dependiendo de que la excentricidad, ϵ , sea menor que, igual a, o mayor que, uno, respectivamente.

2.4 Segunda Ley de Kepler

Ley de las áreas:

“El radio vector que une el planeta al Sol, recorre áreas iguales en tiempos iguales” (figura 2.2) [28].

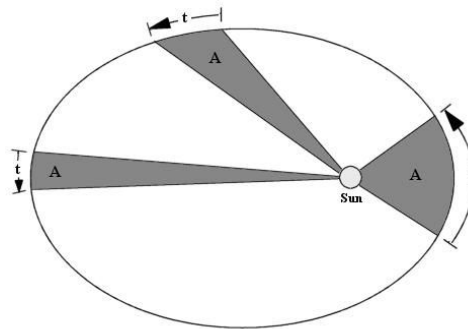


Figura 2.2 La segunda ley de Kepler surge de la conservación del momento angular.
(http://es.wikipedia.org/wiki/Leyes_de_Kepler)

Esto indica que entre más cerca está un planeta del Sol, éste se mueve con mayor velocidad, es decir, que la velocidad orbital es variable a lo largo de la trayectoria del astro siendo máxima en el perihelio y mínima en el afelio (la velocidad del astro sería constante si la órbita fuera un círculo perfecto).

La deducción de la segunda ley de Kepler [29] es la siguiente: Sea F la fuerza central de atracción gravitacional hacia un objeto de masa M sufrida por un objeto de masa m que revoluciona a su alrededor. Sean sus dos componentes cartesianas a lo largo de los ejes x e y : F_x , F_y . Por tratarse de una fuerza central, existe la proporcionalidad $\frac{F_x}{x} = \frac{F_y}{y}$ (Bakulin et al., 2001) y [29]. La segunda ley de Newton nos dice que:

$$F_x = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2.4.1)$$

$$F_y = m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (2.4.2)$$

Multiplicando (2.4.1) por y y (2.4.2) por x , y restando ambas expresiones, se obtiene:

$$x \cdot F_y - y \cdot F_x = m \left(x \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} - y \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} \right) = m \cdot \frac{d}{dt} \left(x \cdot \frac{dy}{dt} - y \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (2.4.3)$$

Leyes de Kepler

y dado que $\frac{F_x}{x} = \frac{F_y}{y}$, se tiene

$$xF_y - yF_x = 0, \quad (2.4.5)$$

por lo que:

$$m \frac{d}{dt} \left(x \frac{dy}{dt} - y \frac{dx}{dt} \right) = 0 \Rightarrow x \frac{dy}{dt} - y \frac{dx}{dt} = cte. \quad (2.4.6)$$

Y se tiene, tomando coordenadas polares:

$$x = r \cos \theta \quad (2.4.7)$$

$$y = r \operatorname{sen} \theta \quad (2.4.8)$$

Derivando (2.4.7) y (2.4.8) se obtiene:

$$\frac{dx}{dt} = -r \operatorname{sen} \theta \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4.9)$$

$$\frac{dy}{dt} = r \cos \theta \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4.10)$$

Multiplicando (2.4.9) por y y (2.4.10) por x:

$$y \frac{dx}{dt} = -r^2 \operatorname{sen}^2 \theta \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4.11)$$

$$x \frac{dy}{dt} = r^2 \cos^2 \theta \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4.12)$$

Restando (2.4.11) de (2.4.12), se tiene:

$$x \frac{dy}{dt} - y \frac{dx}{dt} = r^2 (\operatorname{sen}^2 \theta + \cos^2 \theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4.13)$$

Finalmente se llega a la siguiente ecuación:

$$x \frac{dy}{dt} - y \frac{dx}{dt} = r^2 \frac{d\theta}{dt} = cte. \quad (2.4.14)$$

Es decir, la ecuación (2.4.14) nos dice que el área recorrida por el radio vector en cada unidad de tiempo es constante.

2.5 Tercera Ley de Kepler

Ley armónica:

“Los cuadrados de los períodos (P) de los planetas alrededor del Sol, son proporcionales a los cubos de sus distancias medias (a) al astro” (figura 2.3) [28]:

$$P^2 = k \cdot a^3$$

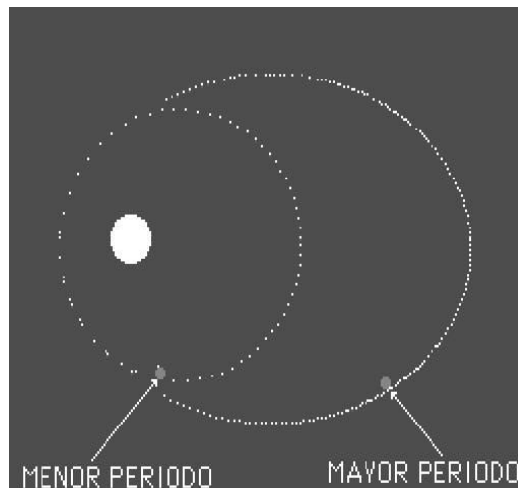


Figura 2.3 La tercera ley de Kepler surge de la ley de la gravitación descubierta por Newton.
(http://almaak.tripod.com/temas/leyes_kepler.htm)

Dado que las leyes de Kepler son consecuencias de la ley de gravitación universal entonces también rigen en otros sistemas solares. La proporción entre el período y el semieje mayor es la misma para todos los planetas que giran alrededor de un mismo astro y la constante k es función de la masa del cuerpo central.

Las dos primeras Leyes de Kepler se refieren a las relaciones que existen entre un planeta y su órbita mientras que la tercera Ley implica que a mayor distancia del planeta al Sol mayor será su periodo de traslación. La constante de proporcionalidad de ésta ley de Kepler se simboliza por k y se denomina **constante de Kepler**. Tiene el mismo valor para todos los planetas del sistema solar y para otros cuerpos que orbiten alrededor del Sol (cometas, asteroides, etc.). En la tabla 5 se presentan los datos de período y semieje mayor de los planetas del sistema solar que muestran la validez de la Tercera Ley de Kepler. En la figura 2.4 presentamos la gráfica de los datos de tabla 5 de a^3 vs p^2 para los planetas del sistema solar. Por el método de mínimos cuadrados se ajustó una recta a los datos de pendiente 1 y ordenada al origen 0 con un factor de correlación de Pearson de 1 que el mejor ajuste que satisface la ecuación: $p^2 = 1.0017 \pm 0.00037$ (años²/UA³) $a^3 - 5.2751 \pm 8.2845$ es decir, se satisface la tercera Ley de Kepler.

Tabla 5 Datos para la 3ª Ley de Kepler de los planetas del Sistema Solar tomados de la dirección de internet:

(<http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=planet&Display=Facts>)

Nombre	Período orbital	Semieje mayor	a^3	P^2	a^3 / P^2
Planeta	(años)	(UA)	(UA ³)	(años ²)	(años ² /UA ³)
Mercurio	0.240	0.387	5.796x10 ⁻²	5.76x10 ⁻²	1
Venus	0.615	0.723	3.779x10 ⁻¹	3.782x10 ⁻¹	0.999
Tierra	1	1	1	1	1
Marte	1.880	1.523	3.5326	3.5344	0.999
Júpiter	11.856	5.203	1.408x10 ⁺²	1.406x10 ⁺²	1
Saturno	29.447	9.537	8.674x10 ⁺²	8.671x10 ⁺²	1
Urano	84.0156	19.191	7.068x10 ⁺³	7.058x10 ⁺³	1
Neptuno	164.788	30.069	2.718x10 ⁺⁴	2.715x10 ⁺⁴	1
Plutón	247.916	39.482	6.154x10 ⁺⁴	6.146x10 ⁺⁴	1

Tercera Ley de Kepler para el Sistema Solar

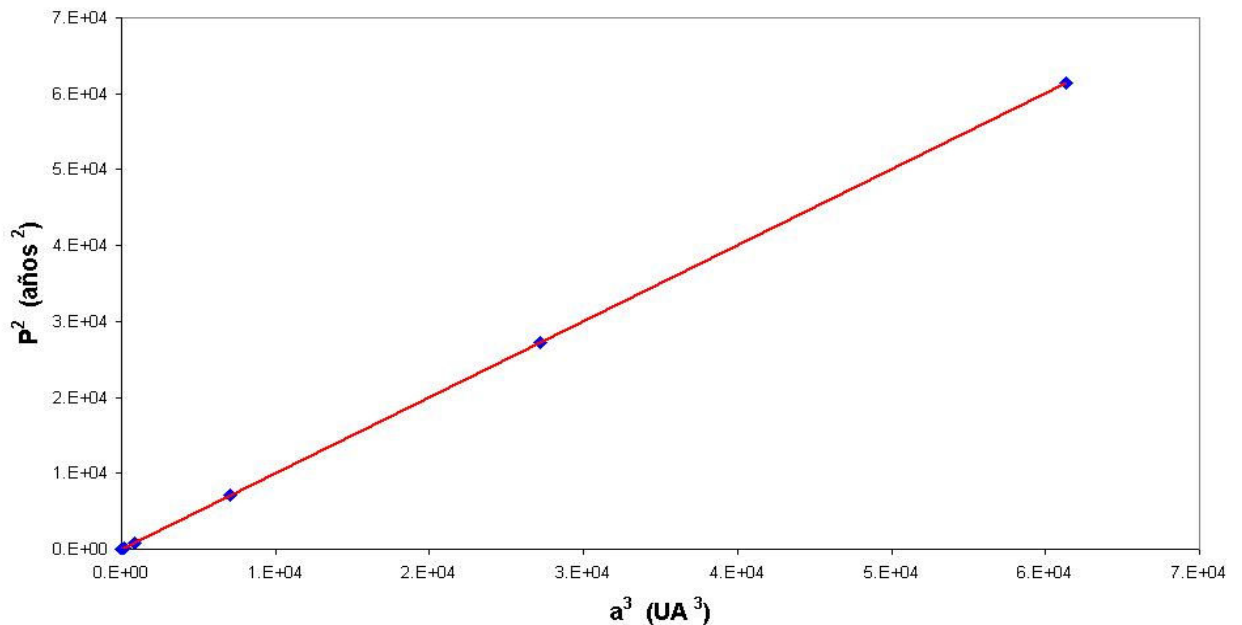


Figura 2.4 Gráfica que muestra los resultados obtenidos al aplicar la Tercera Ley de Kepler para el Sistema Solar, se observa que una línea recta de pendiente 1 se ajusta muy bien a los datos.

2.6 Demostración de la Tercera Ley de Kepler.

Suponiendo que $e \approx 0 \Rightarrow r = a$ y dado que la fuerza gravitacional sobre el planeta es:

$$F_g = -G \frac{M_* m}{a^2} \quad (2.6.1)$$

donde G es la constante de gravitación universal y a es la distancia entre las dos masas. La fuerza centrípeta necesaria para mantener el planeta en movimiento circular es:

$$F_c = m \frac{v^2}{a} \quad (2.6.2)$$

siendo v la velocidad de la órbita. Como en una órbita la fuerza centrípeta es idéntica a la fuerza de gravedad podemos igualar las ecuaciones (2.6.1) y (2.6.2) con lo cual:

$$G \frac{M_* m}{a^2} = m \frac{v^2}{a} \quad (2.6.3)$$

Como $v = 2\pi a / P$ con P = período tenemos:

$$\frac{G M_*}{a} = \left(\frac{2\pi a}{P} \right)^2 \quad (2.6.4)$$

Despejando P^2 se llega finalmente a la tercera Ley de Kepler:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM_*} a^3 = K \cdot a^3 \quad (2.6.5)$$

Si se miden los semiejes mayores en unidades astronómicas (UA) y los periodos (P) en años, la constante de Kepler para el sistema solar vale $k = 1 \text{ años}^2 / \text{UA}^3$ y la ecuación de Kepler se simplifica:

$$\mathbf{P^2 = a^3} \quad (2.6.6)$$

Para aplicar la ecuación (2.6.5) a otros sistemas estelares expresamos la masa de la estrella (M_*) en masas solares (M_s). Así tendremos la ecuación para P en años y a en UA:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM_s} \frac{M_s}{M_*} a^3 = K \frac{M_s}{M_*} a^3 = \frac{M_s}{M_*} a^3 \quad (2.6.7)$$

Entonces, si P se mide en años, a en UA y (M_*) en masas solares la tercera ley de Kepler se escribe para estrellas de masa M_* :

$$P^2 = \frac{a^3}{M_*} \quad (2.6.8)$$

2.7 Satélites de los planetas jovianos y la Tercera Ley de Kepler

Las leyes de Kepler también son válidas para los satélites que giran alrededor de los planetas gigantes, tomando ahora el planeta en cuestión en lugar del sol. En esta sección de manera empírica probaremos la validez de la tercera ley de Kepler utilizando los datos de los satélites de los planetas jovianos que han sido determinados por las naves espaciales [17]. Para ello utilizaremos los datos presentados en el apéndice A.

En la figura 2.5 presentamos la gráfica de a^3 / M^* vs p^2 para los satélites de Júpiter. En este caso haciendo un ajuste por mínimos cuadrados encontramos con una **r de Pearson** de **0.997** que el mejor ajuste satisface la ecuación:

$p^2 = 0.993 \pm 0.01 \text{ (años}^2/\text{UA}^3) a^3 / M^* + (7.99e^{-7} \pm 0.03)$ es decir, se satisface la tercera Ley de Kepler.

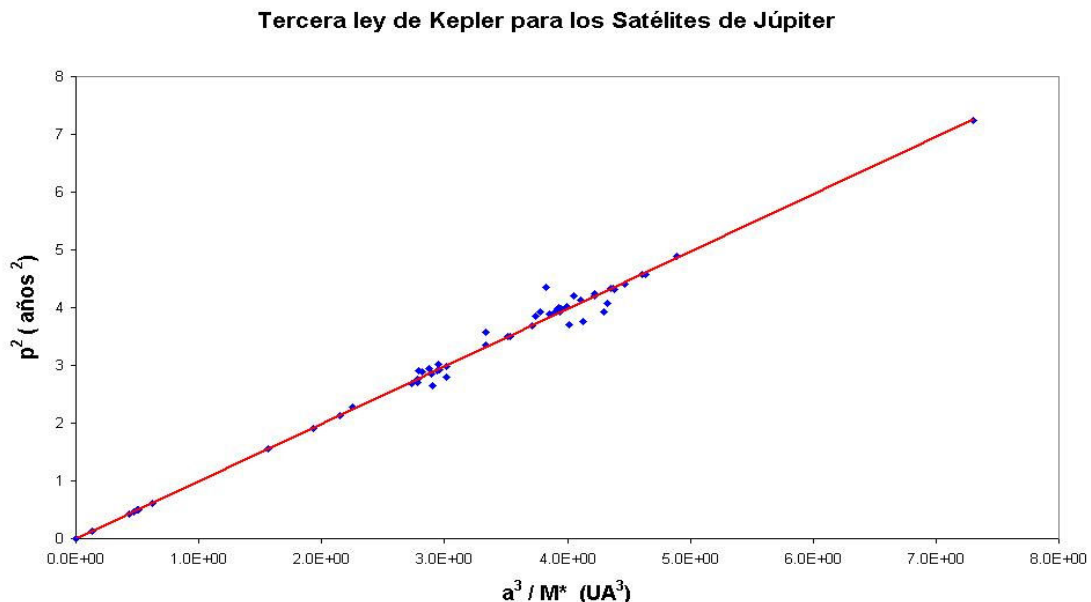


Figura 2.5 Tercera Ley de Kepler para los satélites de Júpiter, el mejor ajuste a los datos es $p^2 = 0.993 \pm 0.01 \text{ (años}^2/\text{UA}^3) a^3 / M^* + (7.99e^{-7} \pm 0.03)$

En la figura 2.6 se presenta la gráfica de a^3 / M^* vs p^2 para los satélites de Saturno. En este caso haciendo un ajuste por mínimos cuadrados encontramos con una **r de Pearson** de **0.999** que el mejor ajuste satisface la ecuación: $p^2 = 0.998 \pm 0.003 \text{ (años}^2/\text{UA}^3) a^3 / M^* - (0.010 \pm 0.01)$ es decir, se satisface la tercera Ley de Kepler.

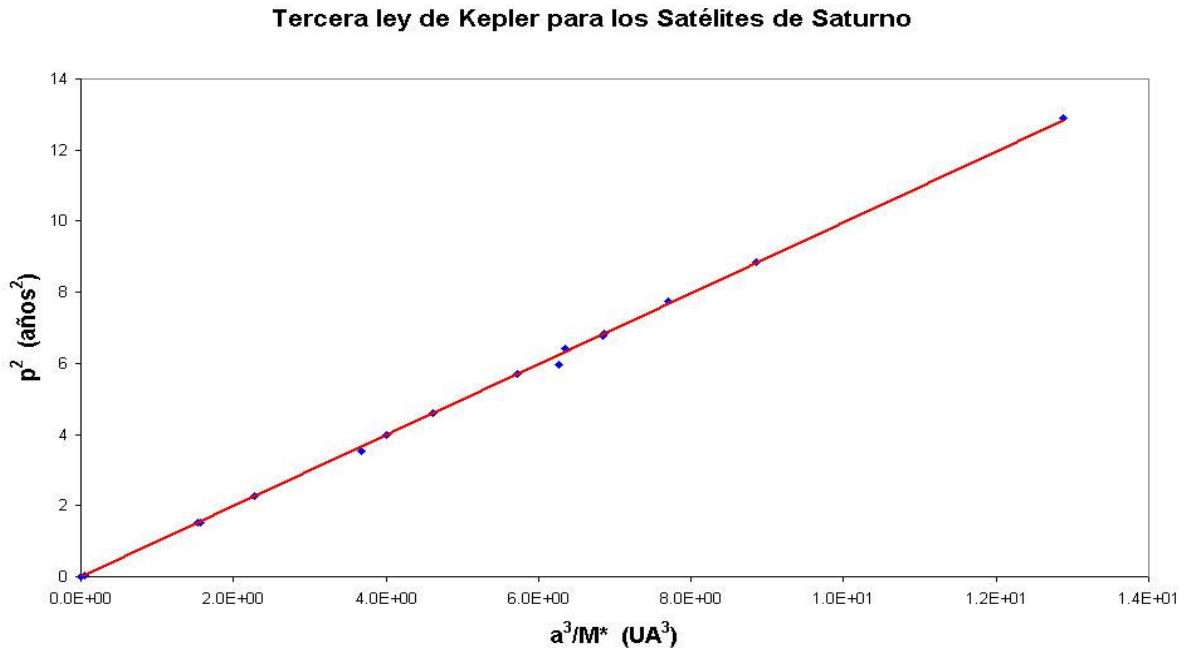


Figura 2.6 Tercera Ley de Kepler para los satélites de Saturno, el mejor ajuste a los datos es $p^2 = 0.998 \pm 0.003 \text{ (años}^2/\text{UA}^3) a^3 / M^* - (0.010 \pm 0.01)$

En la figura 2.7 se presenta la gráfica de a^3 / M^* vs p^2 para los satélites de Urano. En este caso haciendo un ajuste por mínimos cuadrados encontramos con una **r de Pearson** de **0.999** que el mejor ajuste satisface la ecuación: $p^2 = 0.982 \pm 0.008 \text{ (años}^2/\text{UA}^3) a^3 / M^* + (0.297 \pm 0.12)$ es decir, se satisface la tercera Ley de Kepler.

En la figura 2.8 se presenta la gráfica de a^3 / M^* vs p^2 para los satélites de Neptuno. En este caso haciendo un ajuste por mínimos cuadrados encontramos con una **r de Pearson** de **0.999** que el mejor ajuste satisface la ecuación: $p^2 = 1.022 \pm 0.01 \text{ (años}^2/\text{UA}^3) a^3 / M^* + (0.005 \pm 2.5)$ es decir, se satisface la tercera Ley de Kepler.

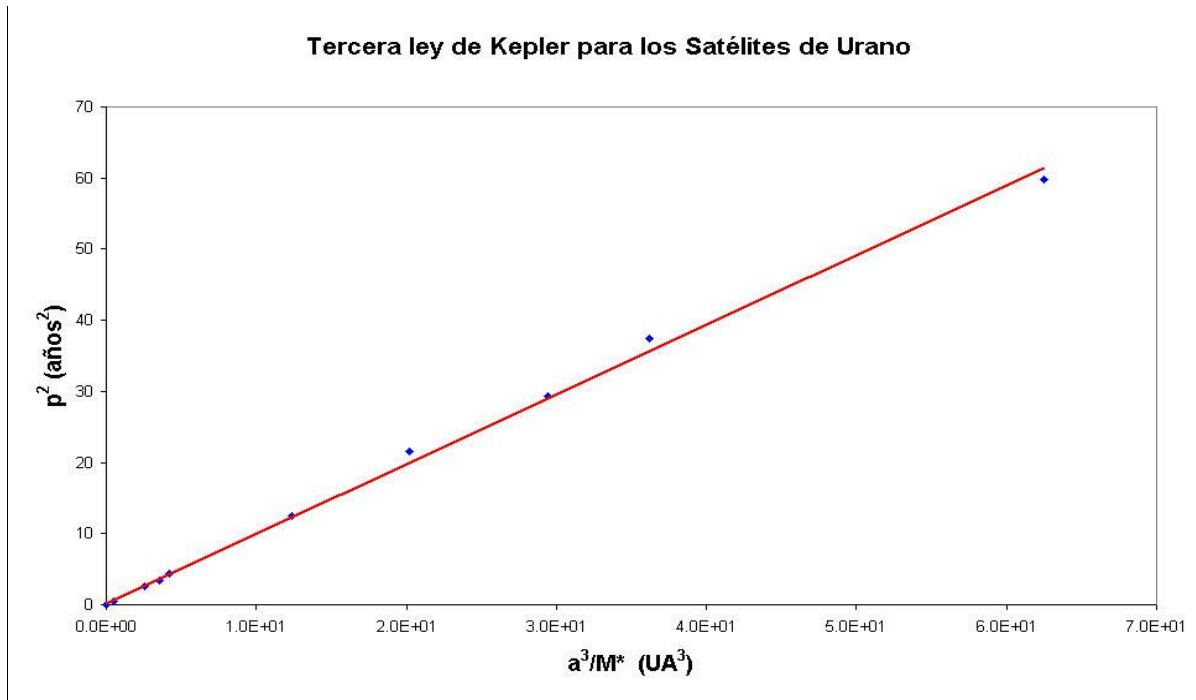


Figura 2.7 Tercera Ley de Kepler para los satélites de Urano, el mejor ajuste a los datos es $p^2 = 0.982 \pm 0.008 \text{ (años}^2/\text{UA}^3) a^3 / M^* + (0.297 \pm 0.12)$

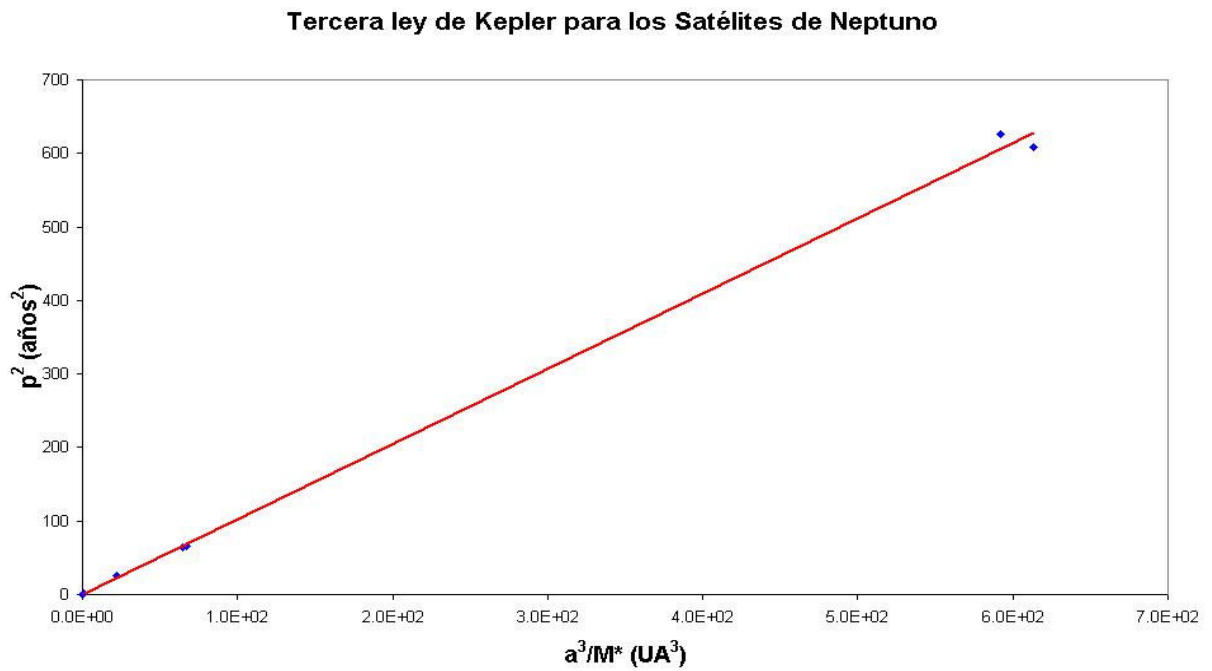


Figura 2.8 Tercera Ley de Kepler para los satélites de Neptuno, el mejor ajuste a los datos es $p^2 = 1.022 \pm 0.01 \text{ (años}^2/\text{UA}^3) a^3 / M^* + (0.005 \pm 2.5)$

CAPITULO 3 **PLANETAS EXTRASOLARES**

3.1 *Introducción*

Desde el descubrimiento del primer planeta extrasolar gigante reportado en 1995 (Mayor et al., 1995), el número de planetas extrasolares conocidos se ha venido incrementando hasta 170 exoplanetas descubiertos, orbitando 148 estrellas normales (enero 2006), usando la Técnica Doppler (Marcy, 2005; Barbieri, 2005). Con esta técnica es posible determinar el producto entre la masa de los planetas y el seno de la inclinación del plano orbital respecto a la línea de visión. Del análisis de la medición de la velocidad radial del planeta es posible determinar el período orbital y la excentricidad de los planetas no vistos a simple vista (Barbieri 2005). Pocos exoplanetas han sido descubiertos por otras técnicas de búsqueda.

En este capítulo presentamos toda la información relacionada con los planetas extrasolares, su definición, y los distintos métodos de detección que son:

- Detecciones Directas
- Efecto Doppler
- Tránsitos
- Astrometría
- Radiointerferometría
- Microlentes gravitacionales.

3.2 *¿Que son los Exoplanetas o Planetas Extrasolares?*

Se conocen como exoplanetas, o planetas extrasolares, a los planetas que orbitan alrededor de otras estrellas, y por lo tanto no forman parte de nuestro sistema solar. Al igual que en el capítulo uno, usaremos el criterio de que para que un objeto o cuerpo celeste sea llamado exoplaneta debe cumplir lo siguiente [1-6, 36]:

- Tener un límite de masa planetaria entre la masa de Plutón y 13 veces la masa de Júpiter.
- No brille con luz propia, sino reflejada.
- Gire alrededor de una estrella distinta del Sol.
- Su forma sea esférica.

3.3 Antecedentes Históricos

Gracias a las observaciones llevadas a cabo por el satélite IRAS [40], en la década de 1980, se descubrió una veintena de estrellas (van de Kamp, 1982) rodeadas de discos de gas y polvo, cuya emisión infrarroja se extiende a cientos de unidades astronómicas de distancia. Algunas de las estrellas estudiadas fueron Beta Pictoris [36, 38, 39], HL Tauri, Vega [36, 38, 39], Epsilon Eridani [36, 38, 39] y Fomalhaut [36, 38, 39]. Esto llevó a los astrónomos a realizar observaciones más detalladas de esas estrellas.

En 1992, la primera detección de un planeta extrasolar ampliamente aceptada por la comunidad astronómica fue realizada en Estados Unidos por un equipo de radioastrónomos de la Universidad de Pennsylvania, encabezado por el polaco Alexander Wolszczan y Frail [36, 37]. Wolszczan y colaboradores encontraron tres planetas mediante medidas del tiempo de llegada de los pulsos de PSR B1257+12, obtenidas en el observatorio de Arecibo, Puerto Rico. Este pulsar, remanente de una estrella masiva que sufrió una explosión de supernova, ubicado a 1.6×10^3 años luz de la Tierra y que gira sobre sí mismo una vez cada 0.00621 s, tiene un sistema planetario cuyo primer planeta esta a 0.19 AU, con una masa de $6.292 \times 10^{-5} M_{JUP}$, el segundo planeta esta a 0.36 UA, con una masa de 0.013 M_{JUP} y el tercero se sitúa a 0.46 UA con una masa de 0.012 M_{JUP} [40]. Los dos planetas más externos se perturban gravitacionalmente [39, 40]. Estos son los exoplanetas menos masivos que orbitan al pulsar PSRB 1257+12 que se conocen.

El 5 de Octubre de 1995, 51 Peg b fue el primer planeta extrasolar descubierto en el observatorio francés de Haute Provence (Mayor y Queloz, 1995). Posteriormente fue confirmado por Marcy y Butler con observaciones obtenidas en el observatorio Lick en California (Marcy, 1998). Lo más sorprendente de 51 Peg b es que tiene una masa similar a Júpiter ($M_{seni}=0.44 M_{jup}$) pero su periodo orbital es de tan solo 4.23 días, un semieje mayor de 0.052 UA y gira alrededor de la estrella 51 pegasi, una estrella muy parecida al Sol a 50 años luz de distancia de nuestra estrella (Marcy, 1998).

A partir de este momento la avalancha de descubrimientos de planetas extrasolares comenzó. En 1996 se descubren 6 exoplanetas en las estrellas 55 cancri (Stuart y Marzari, 1996), tau-bootis (Stuart y Marzari, 1996), 70 virginis (Marcy et al., 1996) y upsilon andromedae (Stuart y Marzari, 1996), en 1997 sólo se descubre 1 (Marcy and Butler, 1998), ocho en 1998 (Marcy, 1998), 11 en 1999 (Gonzalez et al., 2001), 25 en el 2000 (Gonzalez et al., 2001), 16 en 2001, 31 en 2002, 14 en 2003, 17 en 2004 y después de esta fecha se han ido descubriendo aproximadamente 5 o 6 exoplanetas por mes (Marcy, 2005; Barbieri, 2005). En el apéndice B se presenta la lista de los exoplanetas descubiertos hasta abril de 2005 con sus principales parámetros y datos relevantes de su descubrimiento.

3.4 Métodos de medición de datos de Planetas Extrasolares

Existen diferentes métodos de detección empleados (figura 3.1), solo el primero de los métodos listados a continuación es un método directo, los demás son métodos indirectos:

1. Detecciones Directas
2. Efecto Doppler (Velocidad Radial)
3. Tránsitos (Fotometría)
4. Astrometría
5. Radiointerferometría (Tiempos de Pulsares)
6. Microlentes gravitacionales

En el diagrama mostrado en la figura 3.1, se presentan los principales métodos de detección de planetas extrasolares, pero sólo hablaré de los métodos más importantes.

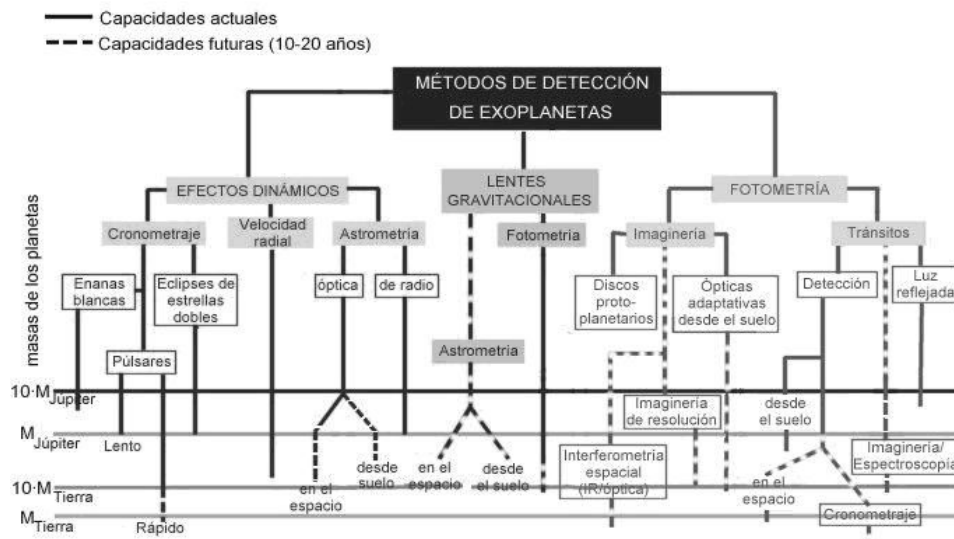


Figura 3.1 Diagrama adaptado de M.A.C. Perryman (Rep Prog. Phys, 2000, Vol. 63, 1209-1272).

3.4.1 Detecciones Directas

Las detecciones directas con medios ópticos son casi imposibles (figura 3.2) ya que, por ejemplo, un planeta como Júpiter sería 10^6 veces menos brillante que el Sol, y la Tierra aún 10^8 veces menor. Este método resulta muy difícil por tres razones fundamentales:

1º: El planeta no emite luz propia sino que refleja parte de la que recibe de la estrella (según el albedo del planeta). El brillo de un planeta depende de sus dimensiones, de la proximidad a la estrella y de la dispersión de la luz por parte de la atmósfera del planeta (figura 3.2).

Para una determinada longitud de onda λ , la relación entre la luminosidad del planeta, L , y la luminosidad de la estrella, L^* , es [50]:

$$\frac{L}{L_*} = p(\lambda, \alpha) \left(\frac{R}{a} \right)^2$$

Donde R es el radio del planeta, a el semieje mayor de su órbita y $p(\lambda, \alpha)$ es una función que incluye el resto de los factores (efectos de la inclinación orbital, de dispersión de la luz por parte de la atmósfera del planeta, su periodo orbital, etc.) α es el ángulo que forman estrella y planeta con el observador. El valor L/L^* es muy pequeño, del orden de 10^{-9} , para un planeta como Júpiter observado desde unos 5 parsec de distancia [50, 51], por lo que es prácticamente difícil usar la técnica de imagen directa por la escasa luz que reflejan los exoplanetas.

2°: Se requieren grandes telescopios para que la imagen del planeta se pueda separar de la imagen de difracción que produce la estrella [50].

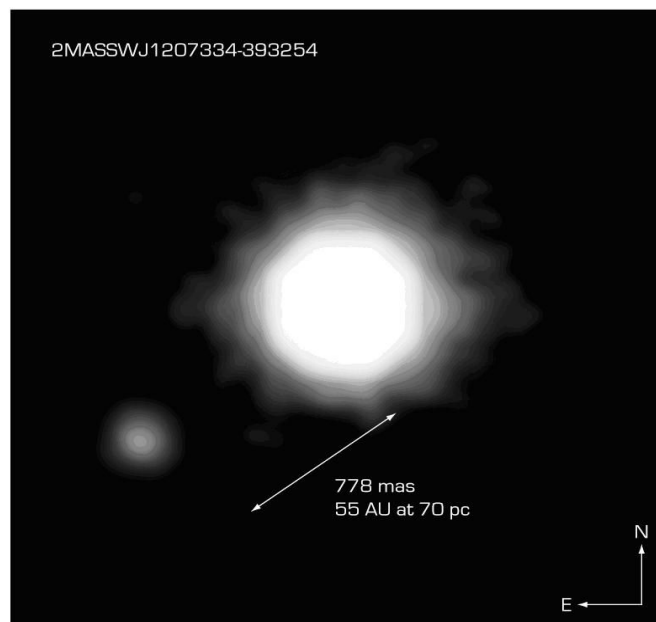
3°: Deben corregirse los efectos de la atmósfera terrestre que degrada las imágenes. Esto puede solucionarse con telescopios situados fuera de la Tierra: en órbita alrededor de ella como el Hubble (se está preparando un nuevo telescopio espacial para ser puesto en órbita en el 2009, el NGST, Next Generation Space Telescope) o situados en la superficie de la Luna o también, mediante telescopios terrestres que usen óptica adaptiva (adaptan la curvatura de los espejos para minimizar los efectos de la atmósfera) [50].



Figura 3.2 Método directo.

(http://perso.wanadoo.es/antoni.salva/index_cas.htm)

A pesar de las dificultades técnicas, en abril de 2004, se reportó el descubrimiento de un probable planeta gigante por la técnica de imagen directa (Chauvin et al. 2004), cerca de la enana marrón 2M1207 (figura 3.3), un objeto muy frío y difícil de observar, sólo perceptible por la cámara infrarroja del telescopio ESO VLT. Su análisis espectral, realizado con mucha dificultad debido a su baja luminosidad, reveló que contenía ¡agua! Este cuerpo fue bautizado provisionalmente como GPCC de “Giant Planet Candidate Companion”, que se podría traducir como “posible planeta gigante compañero”. Según los modelos (Chauvin et al. 2004), GPCC sería un gigante gaseoso, algo así como Júpiter, pero con una masa cinco veces superior y diez veces más caliente (aproximadamente 1273°K). Gravitaría a 55 UA de su enana marrón, es decir, dos veces la distancia entre Neptuno y el Sol (figura 3.4), ahora hay que cerciorarse de que estos dos objetos están realmente vinculados físicamente. Claro que podríamos esperar hasta que GPCC efectuara una revolución alrededor de su enana marrón, pero esto podría requerir un centenar de años. En cuanto a intentar observar una fracción de su revolución en unos años únicamente, el telescopio de 8.20 m, incluso equipado con NAOS (Nasmyth Adaptive Optics System) no es capaz de hacerlo (Chauvin et al. 2004). En la tabla 6 se muestran los datos del posible primer planeta extrasolar tomado por imagen directa.



NACO Image of the Brown Dwarf Object 2M1207 and GPCC

ESO PR Photo 26a/04 (10 September 2004)

© European Southern Observatory



*Figura 3.3 Primera imagen de un posible planeta extrasolar.
(A&A 425, L30, 2004).*

Tabla 6 Datos obtenidos para el primer posible exoplaneta observado por técnica de imagen directa (ref).

Nombre	Tipo	M	P	a	E
Planeta	Espectral de la estrella	(masa/jup.)	(días)	(UA)	
2M 1207 b	M8	5	894.25	55	0

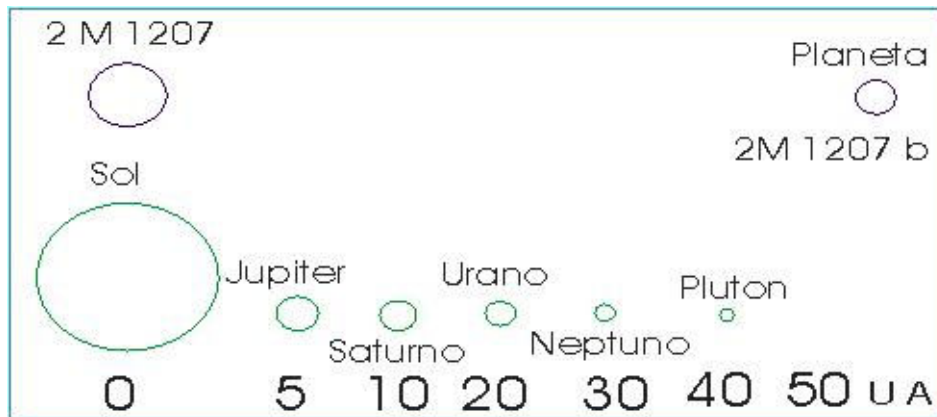


Figura 3.4 Comparación del sistema 2M1207 con el Sistema Solar. (<http://perso.wanadoo.es/antoni.salva/imagineria.html>)

3.4.2 Detecciones Indirectas

Ahora bien, en cuanto a métodos indirectos podemos distinguir, entre otros,

- los astrométricos o de medidas posicionales;
- los de monitoreo de la velocidad radial o espectroscopía Doppler;
- los de radiointerferometría;
- los de tránsitos planetarios, y
- los de microlenticulación gravitacional.

Los tres primeros están orientados a analizar los efectos que generan los planetas en órbita, sobre el movimiento de la estrella; es decir, se trata de buscar evidencias de los efectos gravitacionales de un cuerpo sobre la estrella central o el pulsar. Por su parte, el método de tránsito planetario consiste en medir los cambios lumínicos periódicos que ocurren en las estrellas, los cuales pueden ser ocasionados por el paso de un objeto delante de ellas. Por último, el método de microlenticulación se basa en el principio enunciado por Einstein en la teoría de la relatividad sobre los lentes gravitacionales.

Efecto Doppler: Velocidad Radial

Este método se basa en que la órbita de un planeta alrededor de una estrella induce una pequeña oscilación en ésta, ese movimiento es mayor para planetas gigantes en órbitas pequeñas (Lindegren, 2003). Las oscilaciones de la estrella pueden detectarse mediante leves cambios en la posición de las líneas espectrales, es decir que la fuerza gravitacional de un planeta afecta el movimiento de una estrella, ya que tira primero para un lado y luego para otro, tironeo que afecta sutilmente a la emisión de luz. La luz vira levemente al azul y al rojo y es a este fenómeno al que se le denomina efecto Doppler y que se registra con el uso de un espectrómetro que permite analizar en detalle la luz emitida por un cuerpo tras ser dispersada por un prisma (o varios).

Dependiendo del movimiento de la estrella observada con respecto a la Tierra, las líneas del espectro estelar se pueden desplazar hacia longitudes de onda más cortas en el extremo azul del espectro si la estrella se mueve acercándose hacia la Tierra, y hacia las longitudes de onda roja, más largas, si se está alejando de ella (figura 3.5).

Cuando la estrella se mueve perpendicularmente a la dirección de movimiento de la Tierra, no se genera el efecto Doppler, y las líneas del espectro estelar corresponderían a las que producen los cuerpos luminosos en reposo.

Así, midiendo estos desplazamientos en las líneas espectrales de una estrella, se puede deducir la velocidad radial de la misma, y observando si existe alguna oscilación periódica en dicho desplazamiento, se puede detectar la presencia de objetos orbitando a la estrella. La velocidad del movimiento se determina aplicando la siguiente ecuación [36]:

$$v' = v \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \theta}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

donde v' es la frecuencia de la luz observada (por ejemplo el de una determinada línea espectral), v es la frecuencia que debería tener esa línea espectral (la que se observa en reposo), v es la velocidad con que se mueve el observador respecto de la fuente de emisión, c es la velocidad de la luz y θ es el ángulo que forman la dirección de observación y la de movimiento relativo.

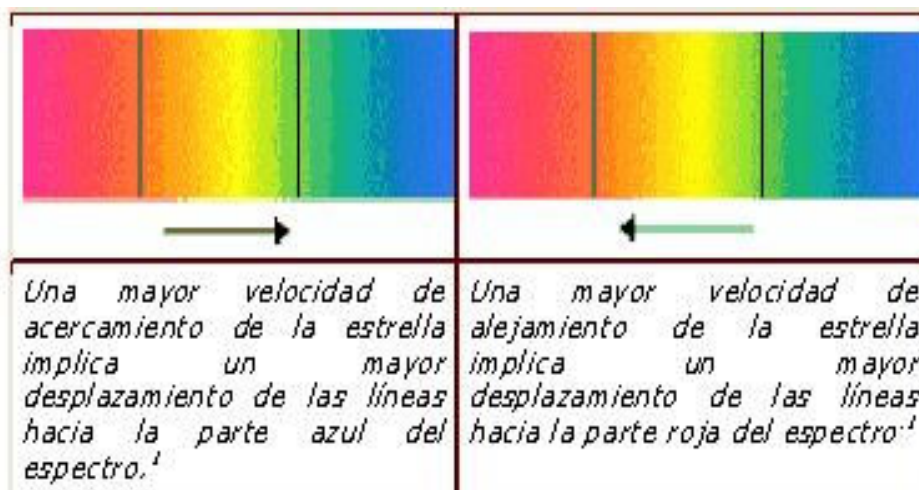
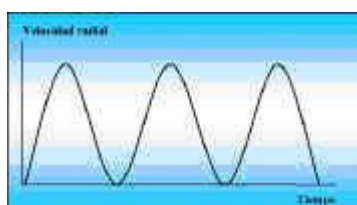


Figura 3.5 Efecto Doppler
(<http://perso.wanadoo.es/silesma/>)

Al representar la velocidad radial de la estrella en función del tiempo se obtienen gráficas como las de la figura 3.6

Como los desplazamientos son muy pequeños, los detectores deben ser muy precisos para cuantificar con precisión la velocidad de la estrella. Además, el efecto es mayor si el planeta tiene una masa mayor y si se encuentra cerca de la estrella. Esto quiere decir que utilizando este método no es posible detectar, por ejemplo, planetas de pequeña masa y/o que estén muy alejados de la estrella. La forma de la gráfica nos da una idea de cómo sería la órbita del planeta (ver figura 3.6)



Gráfica 1

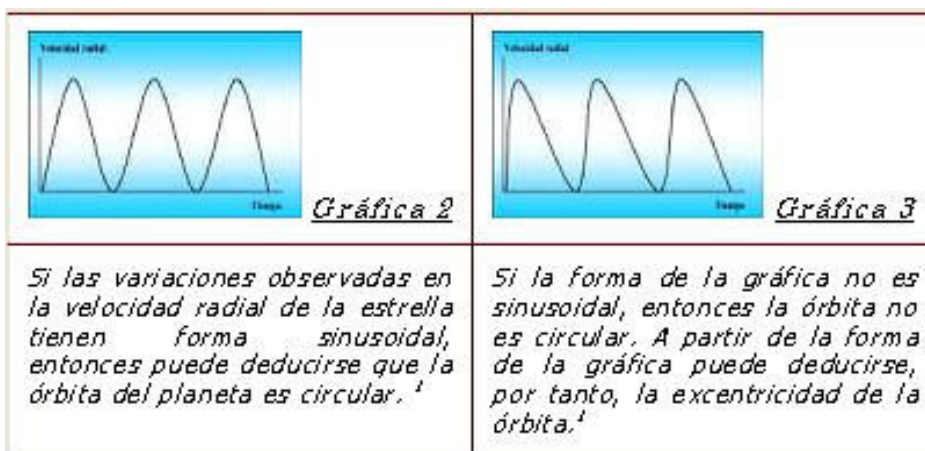


Figura 3.6 Representación de la velocidad radial (<http://perso.wanadoo.es/silesma/>)

Para explicar con más detalle este método tengamos en cuenta que el conjunto estrella y planetas se desplaza por el espacio según lo que se denomina velocidad propia del centro de masa (CM). Si la estrella no tiene planetas el centro de masa (CM) corresponde al centro de la estrella en cualquier instante. Sin embargo, un sistema planetario causa pequeñas variaciones en la posición de su estrella la cual se desplaza alrededor del CM (ver figura 3.7). El movimiento es circular o elíptico si sólo existe un planeta y más complicado si existen varios.

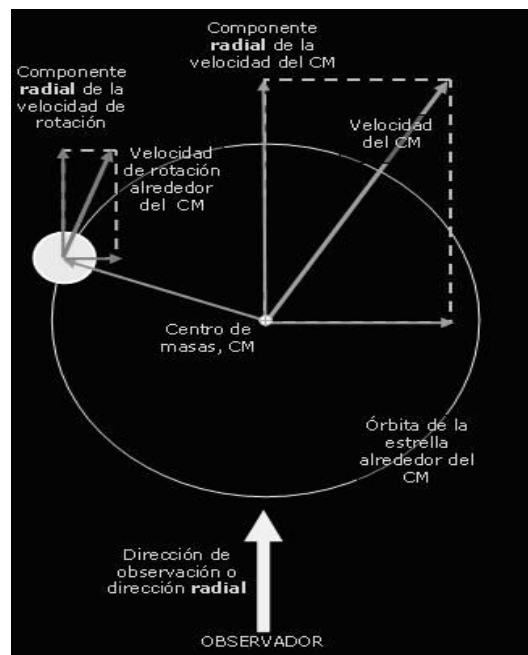


Figura 3.7

La velocidad radial de la estrella será la suma de dos componentes: la componente radial de la velocidad del CM más la componente radial de la velocidad de traslación alrededor de éste.

(<http://perso.wanadoo.es/antoni.salva/radial.htm>)

A partir del seguimiento de las variaciones de velocidad radial de una estrella pueden detectarse actualmente planetas gigantes.

Los datos obtenidos por este método sólo aportan la cantidad, $M \sin i$, donde M es la masa planetaria e i es la inclinación orbital. Para la determinación de masas mínimas de los planetas gigantes, el ángulo i corresponde a la inclinación del plano orbital del planeta alrededor de la estrella que, con esta técnica, no es posible conocer. Se calcula una masa que corresponde al límite inferior de la masa real. Para ello se tienen que considerar algunas situaciones posibles (figura 3.8):

- Si la órbita estuviese en el mismo plano de la dirección de observación el ángulo i valdría 90° y $\sin 90^\circ = 1$; la masa calculada sería la masa del planeta.
- Para inclinaciones menores (60° , 45° ,...) los valores de los senos son menores y, al dividir el valor de la masa calculada, darían masas reales mayores.

Si la órbita del planeta tuviera una inclinación de 0° (perpendicular a la dirección de observación) no habría posibilidad de que el planeta ocasionara ningún tipo de movimiento en la estrella en la dirección del observador.

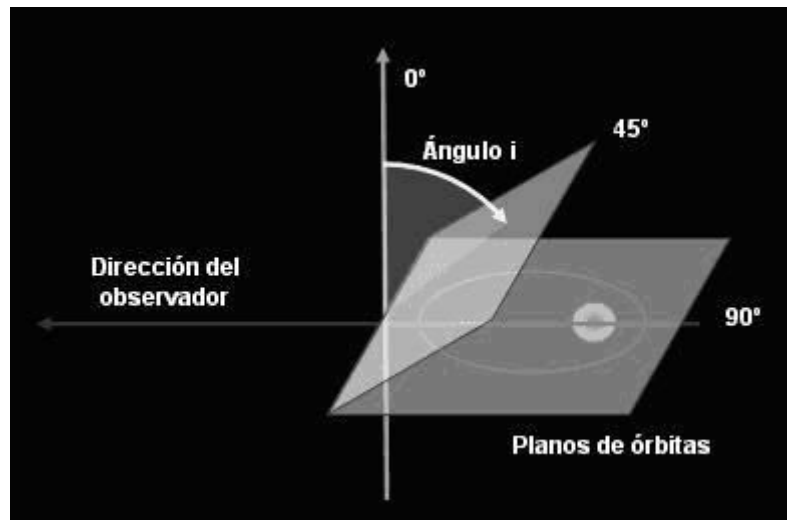


Figura 3.8

Ángulo i que corresponde a la inclinación del plano orbital del planeta alrededor de la estrella.

(http://perso.wanadoo.es/antoni.salva/v_radial2.html)

Actualmente la masa del planeta debe precisarse, ya sea empleando conjuntamente otro método, o bien a partir de consideraciones físicas más o menos ad hoc sobre el sistema planetario observado.

Ahora para explicar el factor seno tenemos que la fuerza gravitatoria que ejerce el planeta sobre la estrella, según la teoría de Newton, es proporcional a la masa del planeta ($F \propto m$). Esta fuerza puede descomponerse en dos componentes: radial y normal (figura 3.9). La fuerza radial es la que produce el movimiento de la estrella que se detecta mediante la técnica de las velocidades radiales en la dirección de observación.

Cuando se determina la masa de un planeta se obtiene un valor (m') que equivale a la masa de un planeta hipotético orbitando en el plano que contiene la dirección del observador. Esta masa hipotética, deducida de la fuerza radial, es $m' = m \sin i$. La masa real será, por tanto: $m = m' / \sin i$ y finalmente de la forma de la curva puede deducirse la excentricidad de la órbita.

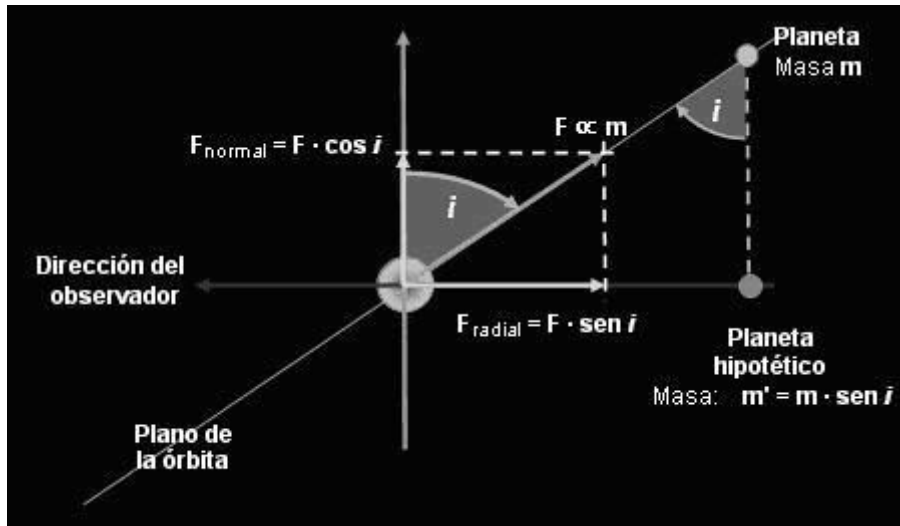


Figura 3.9 Fuerza gravitacional que ejerce el planeta sobre la estrella según la teoría de Newton, (http://perso.wanadoo.es/antoni.salva/v_radial2.html)

El número de planetas descubiertos por el método de velocidad radial es de 163 planetas (para ver los datos de estos exoplanetas consultar el apéndice B).

Tránsitos (Fotometría)

Este método consiste en detectar el bloqueo de la emisión de una pequeña fracción de luz que se produce cuando un objeto del tamaño de un exoplaneta pasa por delante de una estrella frente a la línea de visión de un observador, (figura 3.10).

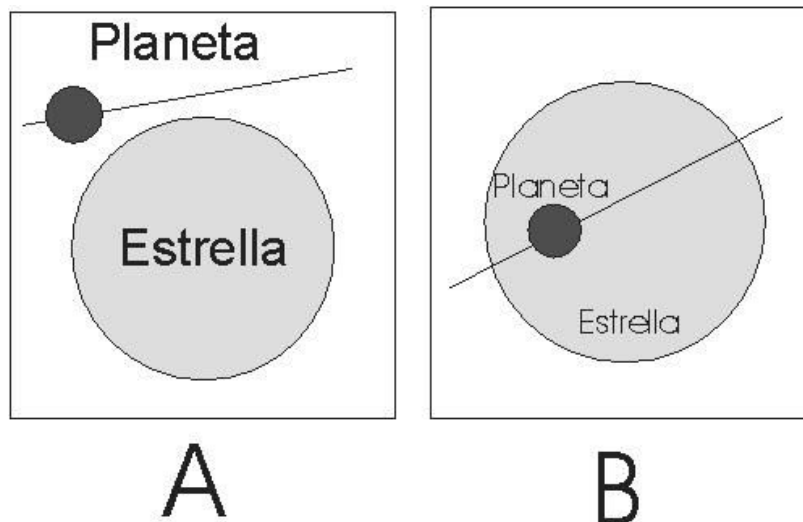


Figura 3.10 A.- En este caso, como la órbita del planeta no cruza la línea que une la estrella con la Tierra, no se observará nunca una disminución en el brillo de la estrella debido a un tránsito del planeta.

B.- Si el planeta se interpone entre la estrella y la Tierra, disminuye la superficie de estrella que podemos ver y, como el planeta no emite luz, disminuye el brillo de la estrella.

(<http://perso.wanadoo.es/silesma/>)

Este efecto sólo puede observarse si el planeta se interpone entre la estrella y la Tierra, es decir, cuando la inclinación de la órbita vista desde la Tierra es de aproximadamente 90°. A partir de la medición de la disminución del brillo de la estrella se puede calcular el tamaño de la sombra del planeta que la orbita, y a partir del período de éste se puede calcular el tamaño de su órbita y su temperatura estimada [36, 50, 51]. En la figura 3.11 se muestra el esquema de un tránsito de un planeta y el registro de la luminosidad de la estrella. Si se dispone de instrumentos de elevada precisión se detectará una disminución de la luminosidad en el momento del tránsito, entonces se cumple la siguiente relación [36]:

$$\frac{\Delta L_*}{L_*} \approx \left(\frac{R}{R_*} \right)^2$$

Donde R es el radio del disco del planeta, R* el radio del disco de la estrella (no los radios orbitales); ΔL^* es la disminución de luminosidad de la estrella debida al tránsito la cual es aproximadamente directamente proporcional al área del disco del planeta: $\Delta L^* \propto S = \pi R^2$, y L^* es la luminosidad de la estrella que es directamente proporcional al área del disco estelar: $L^* \propto S^* = \pi \cdot R^{*2}$

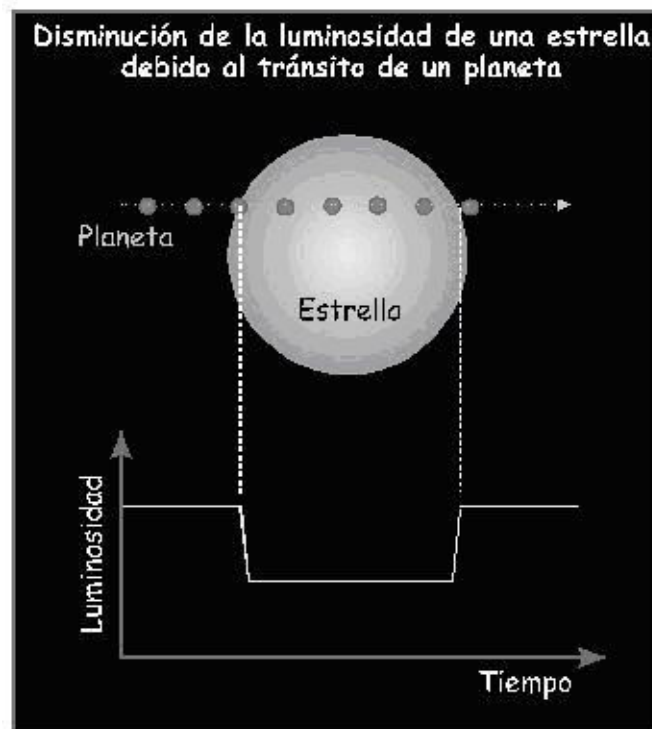


Figura 3.11

Disminución de la luminosidad de una estrella debido al tránsito de un planeta.
(<http://perso.wanadoo.es/antoni.salva/ocultacio.html>)

Visto desde la Tierra, cuando un exoplaneta pasa por delante de la estrella al orbitarla, bloquea una pequeña fracción de la luz emitida por la misma. Si la disminución del brillo de la estrella es realmente causada por un objeto que la orbita, entonces debe repetirse periódicamente. Medir tres tránsitos de este tipo, todos con un período, una duración y una disminución del brillo consistentes, provee un riguroso método para descubrir y confirmar la existencia de planetas incluso más pequeños que nuestra Tierra.

Konacki y colaboradores (Konacki et al.,2003) publicaron el primer descubrimiento de un planeta extrasolar en la estrella OGLE-TR-56 mediante este método, y de ahí en adelante se han descubierto otros cinco planetas más cuyos parámetros se presentan en la tabla 7.

*Tabla 7
Datos de los exoplanetas encontrados por la técnica de tránsito.*

Nombre	Tipo	Masa Del planeta	Período	Semieje mayor	Excen-tricidad
Planeta	Espectral de la estrella	(M _{jup})	(días)	(UA)	
OGLE-TR-56	G	1.45	1.2119189	0.0225	0
OGLE-TR-113	K	1.35	1.4324758	0.0228	0
OGLE-TR-132	F	1.19	1.689857	0.0306	0
TrES-1	K0V	0.61	3.030065	0.0393	0.135
OGLE-TR-111	G o K	0.53	4.0161	0.047	0
OGLE-TR-10	G o K	0.54	3.101269	0.04162	0

Astrometría:

La perturbación que produce la existencia de un planeta o de un sistema planetario alrededor de una estrella se manifiesta, como un balanceo de la estrella, una pequeña variación de su posición.

Es decir, este método trata de detectar la oscilación de la estrella en torno al centro de masas por la perturbación gravitacional del planeta, es decir permite determinar el movimiento propio de una estrella, usando otras estrellas fijas como puntos de referencia [ref. 36, 50 y 51]. Si uno o más objetos orbitan alrededor de la estrella, su gravedad perturbará el movimiento rectilíneo de la misma a través del espacio, ocasionando una leve oscilación de su trayectoria.

A partir de la medición del movimiento propio de la estrella se puede calcular el tamaño y la órbita del planeta que la acompaña, (figura 3.12).

Por tanto los planetas extrasolares más fácilmente detectables con esta técnica son los situados cerca de la estrella y con una elevada masa ya que producen un mayor desplazamiento de la estrella. La medición astrométrica de la estrella también se puede realizar en el intervalo de las longitudes de onda de radio usando los más modernos métodos de observación con alta resolución angular como es la interferometría de muy larga base o VLBI (Very Large Baseline Interferometry). Este método consiste en usar radiotelescopios distantes unos 104 km [51].

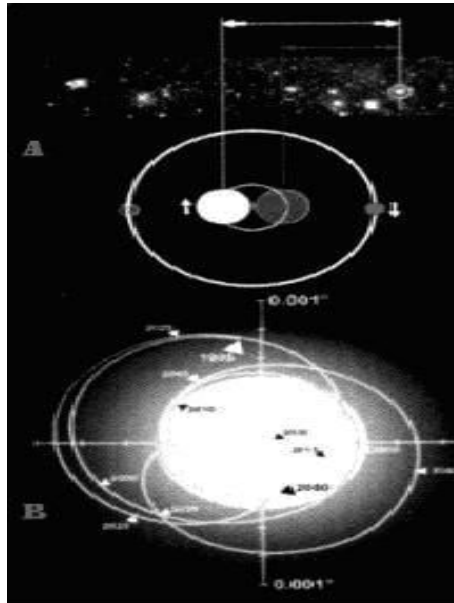


Figura 3.12 Método Astrométrico.

La periodicidad de las variaciones que se observan en una estrella hace posible estimar el número y la masa de los cuerpos que orbitan el astro estelar (A). Así, desde una distancia de hasta 33 años luz del Sol se podría percibir en su disco solar las variaciones de movimientos reflejos producidos por la influencia gravitacional de su cohorte de planetas (B). (http://www.astrocosmo.cl/astrofis/astrofis-01_02.htm)

Por este método se ha encontrado 1 planeta extrasolar (epsilon eridani b) cuyos parámetros se presentan en la tabla 8 [36, 50, 51].

Tabla 8

Datos del exoplaneta encontrado por la técnica de astrometría.

Nombre	Tipo	Masa del planeta	Período	Semieje mayor	Excen-tricidad
Planeta	Espectral de la estrella	(M _{jup})	(días)	(UA)	
Epsilon eridani b	K2 V	0.86	2502.1	3.3	0.608

Radiointerferometría

Los pulsares son fuentes de radiación electromagnética cuyas emisiones, muy breves (50 ms, aprox.), se reproducen a intervalos muy regulares [36]. Los pulsos luminosos que emiten tienen una duración que varía entre 1/100 y 1/10 del periodo de pulsación [75]. Los pulsares emiten por lo general en toda la gama de longitudes de onda del radio en el espectro electromagnético. Algunos incluso en los dominios ópticos, de rayos X y de rayos gamma de forma simultánea [50, 51]. Los pulsares se designan convencionalmente con las letras PSR, seguidas de su ascensión recta expresada en horas y minutos.

El pulsar denominado PSR 1257+12 está situado a unos 300 pc de la Tierra (1 parsec = 206 265 UA) y da un giro sobre si mismo cada 6.2 ms.

La radiointerferometría mide a través de radiotelescopios la demora entre los pulsos provenientes de estrellas de neutrones o pulsares, es decir, por efecto de la órbita de un planeta masivo alrededor de esa estrella, ésta se acerca o se aleja periódicamente, retrasando o acelerando los pulsos (figura 3.13).

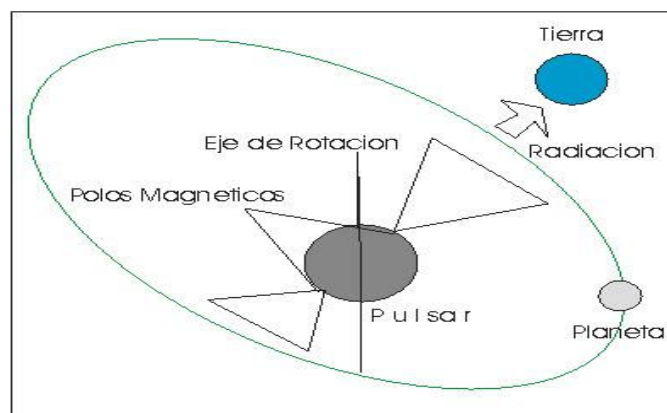


Figura 3.13 Método por radiointerferometría.
(<http://perso.wanadoo.es/silesma/>)

Al encontrarse una estrella de neutrones en el mismo plano de la órbita que un compañero, ésta denuncia el correspondiente tirón gravitacional que también produce el efecto Doppler que puede ser detectado desde la Tierra al recibir las ondas de radio que emanan desde el pulsar.

En la tabla 9 se muestran los planetas descubiertos por esta técnica y que orbitan alrededor del pulsar PSRB1257+12. Son tres, dos algo mayores que la Tierra, en resonancia 3:2, y un tercero como nuestra Luna [40].

Más próximo al púlsar descubierto en 1994 también por A. Wolszczan, se ha propuesto la existencia de un cuarto planeta, el d, más alejado y masivo pero todavía no hay nada claro [36].

Tabla 9
Datos de los exoplanetas encontrados por radiointerferometría

Planeta	M sin i (M_T)	Período (días)	Semieje mayor (UA)	Excen- tricidad
PSRB1257+12-A	0.015	25.26	0.19	0.0
PSRB1257+12-B	3.4	66.54	0.36	0.019
PSRB1257+12-C	2.8	98.21	0.47	0.026

Microlentes

Este método se basa en la teoría de relatividad general: La luz no siempre se mueve en línea recta, sino que se curva al pasar cerca de un objeto masivo como el Sol [36, 50, 51]. Debido a este fenómeno relativista, los planetas actúan como lentes, provocando una magnificación en el brillo de otras estrellas lejanas, es decir, ocurre cuando los campos de gravedad del planeta y la estrella actúan para aumentar o focalizar la luz de una estrella distante, y para que este método funcione, los 3 objetos tienen que estar casi perfectamente alineados. El principal defecto de este método es que las posibles detecciones no son repetibles por lo que el planeta así descubierto debería ser estudiado adicionalmente por alguno de los métodos anteriores.

En nuestro caso se trata de los planetas extrasolares, la estrella madre es el cuerpo que actúa como lente al interponerse entre la tierra y una estrella más lejana, si un cuerpo pasa justo por delante de una estrella lejana, en lugar de observarse una disminución en el brillo de ésta, el cuerpo puede actuar como una lente y concentrar los rayos de luz procedentes de la estrella lejana y dirigirlos hacia nuestro planeta, de tal modo que un telescopio terrestre observaría un ligero aumento en el brillo del astro, como podemos observar en la figura 3.14. Hasta enero de 2006 se han reportado tres planetas extrasolares por este método [40-42]. Los parámetros relevantes de estos exoplanetas se presentan en la tabla 10.



Figura 3.14 Método de Microlentes.

(http://www.cnice.mecd.es/tematicas/cosmologia/2005_09/2005_09_05.html)

Tabla 10

Datos de los tres exoplanetas encontrados por la técnica de microlentes.

Nombe	Masa del planeta	Período	Semieje Mayor	e
Planeta	(M _{jup})	(días)	(UA)	
OGLE 2003-BLG-235	2	-	2.9	0
OGLE-05-071L b	2,7	2920	3	0
OGLE-05-390L b	0,018	3800	2,6	0

3.5 Definición de Parámetros

Pocas características se conocen de los planetas extrasolares ya que las técnicas de observación actuales no permiten obtener muchos datos. Sin embargo se han podido determinar los parámetros más básicos de sus órbitas (período, semieje mayor y excentricidad) y una cota inferior para sus masas. Casi todos los exoplanetas (ver tabla de datos en el apéndice B) de cuya existencia se tiene firme constancia han sido descubiertos por el método de las velocidades radiales.

3.5.1 *Período*

El período orbital es el tiempo que tarda un planeta en completar su órbita. Con los sistemas de observación se puede determinar el periodo del movimiento de la estrella, P^* , alrededor del centro de masas del sistema estrella-planeta, ya que es más fácilmente observable [36, 42, 49]. A partir de la ley de gravitación universal se demuestra que el periodo del planeta, P , es el mismo.

3.5.2 *Semieje Mayor*

Para calcular el radio medio o semieje mayor de la órbita de un planeta se aplica la 3ª ley de Kepler que, para un planeta con una masa despreciable comparada con la de la estrella ($m \ll M^*$), situación habitual, toma la expresión [36, 42, 49]:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM_*} a^3 \quad (3.5.1)$$

Donde

$$a = \sqrt[3]{\frac{GM_*}{4\pi^2} P^2} \quad (3.5.2)$$

El valor de la masa de la estrella, M^* , puede estimarse a partir de su espectro electromagnético y de su posición en el diagrama HR [50].

3.5.3 *Excentricidad*

Es conocido que los valores de la excentricidad para las elipses son mayores que 0 y menores que 1 ($0 < \varepsilon < 1$). La circunferencia tiene un valor de 0 y la parábola 1 [36]. El cálculo de la excentricidad, ε puede realizarse a partir de la forma de la curva observacional.

3.5.4 *Masa Mínima*

La masa del exoplaneta viene dada en unidades de masa de Júpiter (M_J) y corresponde al valor mínimo esperado de la masa real del exoplaneta que es desconocida, es decir, al producto de la masa real del exoplaneta (m) por el seno de la inclinación de la órbita respecto a nuestra visual ($m \times \sin i$). (Ver método de velocidades radiales.)

3.6 Zona Habitable

La "Zona Habitable Circumestelar" (ZHC) es la región alrededor de una estrella en la cual un planeta puede presentar las condiciones necesarias para sustentar vida (kasting et al.1993).

Diremos entonces que un planeta es habitable si puede albergar algún tipo de vida y, por tanto, si existe el agua líquida y la posibilidad de construcción de cadenas de carbonos. Esta idea es porque todos los organismos que se conocen requieren del agua en su estado líquido durante al menos una parte de su ciclo de vida. También para el surgimiento de la vida ha de tomarse en cuenta la cantidad de energía que llega desde la estrella hasta el planeta para que comiencen a darse las reacciones necesarias para el desarrollo de los seres vivos, pues del calentamiento solar dependen los ciclos estacionales, los vientos, las corrientes marinas y, por supuesto, la fotosíntesis, que es la base de casi todas las cadenas alimenticias.

Kasting dio los siguientes valores de los bordes; interno a 0.95 UA y externo a 1.37 UA de la ZHC del Sistema Solar (Kasting et al. 1993).

Peña-Cabrera et al., 2004 calcularon la ZHC para todos los tipos espectrales de estrellas de la secuencia principal obteniendo los bordes internos, externos y el ancho de la ZHC que se presentan en la siguiente tabla 11.

Tabla 11. Muestra los bordes internos, externos y ancho de la ZHC para todos los tipos espectrales de estrellas de la secuencia principal.

Tipo Espectral	Borde Interno	Borde Externo	Ancho de la ZHC
	UA	UA	UA
O5	496	1136	640
B0	124	285	161
A0	4.17	9.56	5.39
F0	1.39	3.20	1.80
G0	0.70	1.60	0.90
K0	0.372	0.852	0.480
M0	0.156	0.359	0.202
M8	0.0186	0.0427	0.0240

Los datos que se obtuvieron de los exoplanetas encontrados dentro de la llamada Zona Habitable que se hablará mas adelante se obtuvieron utilizando los bordes internos y externos que se encuentran en esta tabla.

3.7 Clasificación de Exoplanetas

Hallar a un planeta con algún rasgo semejante a los del sistema solar ha sido, para los investigadores, una tarea extremadamente difícil. Los planetas extrasolares descubiertos hasta el momento pueden clasificarse de acuerdo a sus características orbitales y en comparación con los planetas de nuestro sistema solar en los siguientes grupos [50]:

Exoplanetas Calientes.- Son aquellos planetas gigantes que tienen una órbita extremadamente cercana a su estrella anfitriona, con periodos entre 1 y 182 días, pese a lo cual los planetas son tan grandes como el mayor de los de nuestro sistema solar e incluso más. [50 y 52]. Estos son llamados Júpiteres calientes porque comparándolos con los planetas de nuestro Sistema Solar tienen semiejes mayores inferiores a 0.387 UA que es la distancia de Mercurio al Sol. Se han encontrado 69 exoplanetas con estas características, en la siguiente figura 3.15 se muestra una comparación de 3 exoplanetas con estas características con los planetas más internos de nuestro Sistema Solar.

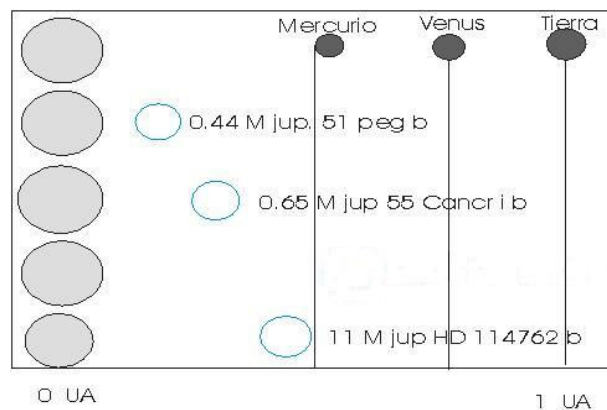


Figura 3.15 Comparación de la posición de algunos Júpiteres calientes con la posición que ocupan los planetas más internos de nuestro sistema solar.

Exoplanetas Excéntricos.- En esta clasificación se han incluido a aquellos que tienen una órbita significativamente excéntrica [50, 52]. Esa característica orbital somete a estos objetos planetarios a cambios extremos en la temperatura media de sus respectivas superficies (ver la figura 3.16, en donde se muestra un ejemplo de ésta clasificación). Estos exoplanetas se tomaron así porque se compararon con las excentricidades de los planetas de nuestro Sistema Solar y se tomaron excentricidades mayores a 0.249 que es la excentricidad de Plutón. Se han encontrado 82 de estos planetas.

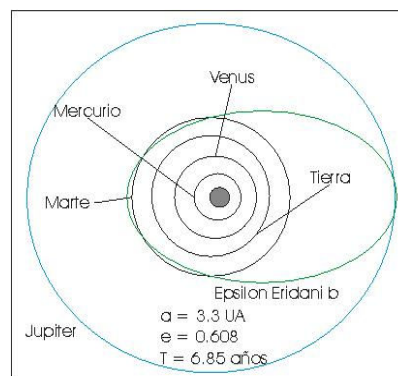


Figura 3.16 Órbita de ϵ Eridani b, un exoplaneta excéntrico, comparada con la de los planetas del sistema solar. Obsérvese que en nuestro sistema solar orbitaría entre las órbitas de Marte y de Júpiter.

Exoplanetas Semejantes a Jupiter.- En esta clasificación entran aquellos planetas descubiertos en otros sistemas solares que comparándolos con el planeta más grande de nuestro Sistema Solar presentan masas mínimas semejantes a las de Júpiter entre 1 y 1.94 veces M_{JUP} [50, 52]. Se han clasificado en este grupo 40 exoplanetas.

Exoplanetas de periodos cortos de traslación.- En esta clasificación entran aquellos exoplanetas que presentan períodos entre 1.2 y 83.89 días que corresponden a períodos menores que Mercurio en nuestro Sistema Solar y tienen semiejes mayores entre 0.02 y 0.35 UA, se han encontrado 68 exoplanetas de este tipo. Dentro de éste grupo, se clasifica un subgrupo conocido como: **Exoplanetas poco masivos.-** Son aquellos planetas gigantes descubiertos que presentan $M \sin i < 0.1 M_{JUP}$, orbitan muy cerca de su estrella, con períodos cortos de traslación y poco excéntricos, se conocen solo 8 exoplanetas de este tipo debido a la dificultad que aún existe para su detección.

Los planetas extrasolares también pueden clasificarse de acuerdo al tipo de estrella que orbitan en los siguientes grupos:

Exoplanetas que giran alrededor de estrellas de secuencia principal de un cierto tipo espectral.- En este grupo se han clasificado 22 exoplanetas del Tipo espectral F, 107 del Tipo espectral G, 36 del Tipo espectral K y finalmente 5 exoplanetas del Tipo espectral M.

Exoplanetas alrededor de pulsares.- En esta categoría se han clasificado a aquellos objetos que se asemejan a un planeta, pero que orbitan a una estrella de neutrones o pulsar [50, 52]. Se han encontrado 3 exoplanetas de este tipo.

Exoplanetas en Zonas habitables.- En esta categoría se han clasificado a los planetas que orbitan estrellas de la secuencia principal y que tienen sus órbitas dentro de la llamada zona habitable [50]. De este grupo se han encontrado 6 exoplanetas que pertenecen a estrellas de tipo espectral F, 24 que pertenecen a estrellas de tipo espectral G, 2 que pertenecen a estrellas de tipo espectral K y ningún exoplaneta que pertenece a una estrella de tipo espectral M, es decir, finalmente se han encontrado 32 exoplanetas dentro de esta zona habitable.

Otras clasificaciones referentes a estrellas.

Sistemas exoplanetarios.- Esta clasificación se ha realizado considerando a aquellas estrellas que se les han descubierto más de un exoplaneta, con masas no superiores a las $13 M_{Jup}$ [50, 52]. En alguna medida, son sistemas planetarios que se asemejan bastante al sistema solar y se han encontrado 15 Sistemas planetarios de este tipo.

Sistemas extramásicos.- Se trata de objetos estelares a los cuales se les ha hallado orbitándolos una estrella enana café, con $M_{sen i} > 13 M_{Jup}$, períodos mas largos de hasta miles de días y excéntricos entre (0.2-0.45). En la figura 3.17 se puede observar una comparación de temperaturas que se hace entre el sol, una enana roja, dos enanas café y un planeta (Júpiter). Se han clasificado aquí solo 4 sistemas binarios de estrellas con estas características.

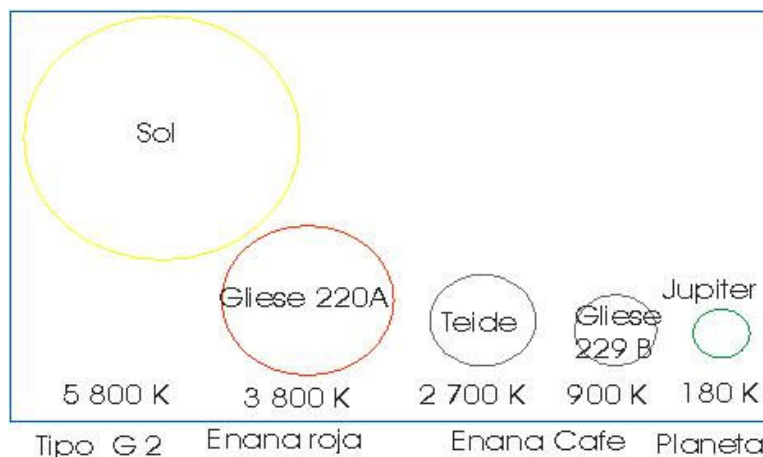


Figura 3.17 Comparación entre el sol, un planeta y enanas café.

3.8 ¿Cómo se formaron los exoplanetas?:

Como he mencionado hasta el momento, de los planetas extrasolares encontrados actualmente de masa similar a la de Júpiter orbitando estrellas semejantes al Sol, la mayoría son mayores que éste. Algunos tardan solo unos días para completar su traslado orbital alrededor de su estrella, mientras que otros se tardan años.

Respecto a su estructura física nadie puede asegurar si son cuerpos sólidos como la Tierra o Marte o gaseosas como Júpiter y Saturno, tampoco si cuentan con satélites como los planetas del sistema solar.

Finalmente, la discusión se centra en si algunos o todos estos objetos son verdaderamente planetas o simplemente enanas marrones, ya que se encuentran demasiado cerca de su estrella y tienen masas superiores a la de Júpiter, entonces ¿cómo fue que se formaron?

Una de las teorías actuales sobre una posible forma en que se habrían formado los exoplanetas de gran tamaño (júpiteres calientes) y con órbitas cercanas a la estrella madre, señala de que existe la posibilidad de que un gran planeta sea sometido a los efectos de espirales rápidas de una estrella sin que sea tragado por ella. En ese escenario, en el cual el planeta está en una órbita muy cercana a la estrella, las interacciones de mareas gravitatorias, especialmente durante la etapa joven de la estrella y de las fases iniciales de formación del planeta, generan algún tipo de ímpetu desde la rápida rotación de la estrella hacia el movimiento orbital del planeta. Esto le podría dar al planeta un ligero impulso de escape hacia afuera, lo que impediría que se zambullera en la estrella.

Otra teoría señala que no es factible que se hubiesen formado planetas con órbitas muy cercanas a una estrella como son las observadas en algunos de los exoplanetas que se han descubierto. Dice que debieron haberse formado, primero, relativamente lejos de la estrella, fuera de los efectos generados por los procesos espirales, en el disco de gas y polvo que rodea a las más jóvenes. "En unos millones de años", los tirones gravitatorios generaron un proceso de atracción que fue acercando al exoplaneta hacia su estrella madre, siendo aspirado lenta e implacablemente por ella. Finalmente, algunos de los planetas ceden a la atracción de la estrella y caen en ella, expulsando hacia afuera una parte de los elementos más pesados. De ser cierto esto, los exoplanetas júpiteres calientes que se han descubierto hasta ahora pertenecerían a sistemas caracterizados por una alta inestabilidad.

Pero también se han encontrado exoplanetas con órbitas marcadamente excéntricas, lo cual agudiza la discusión sobre si los objetos descubiertos son planetas o enanas marrón. Investigadores han desarrollado un modelo que trata de explicar como fue que estos objetos pudieron haberse formado desde un disco protoplanetario. Si dos o más planetas masivos se forman en órbitas circulares alrededor de una estrella joven, las interacciones gravitatorias tirarán de las órbitas hacia una forma elíptica. Después de decenas de miles de años, las órbitas de los planetas se cruzarán. Eventualmente ellos chocarán y se transformarán en un sólo exoplaneta con una órbita excéntrica parecida a la de HD 114762 b o a la de 70 Virginis b.

3.9 *Proyectos Futuros*

Telescopios: Cazadores de planetas extrasolares

La misión ahora para los investigadores es encontrar planetas similares a la Tierra, es decir, de 30 a 600 veces menos masivos que Júpiter [53- 60].

Los telescopios cazadores de planetas, con base en el espacio, que están siendo desarrollados por la NASA y la ESA son:

1. La misión Kepler, un telescopio espacial que será lanzado en el 2006 o 2007, para investigar alrededor de 10^5 estrellas cercanas en busca de disminuciones de brillo que indiquen el tránsito de exoplanetas de tamaño similar a la Tierra.
2. Eddington de la Agencia Espacial Europea (European Space Agency), una misión similar, será un telescopio espacial de gran precisión construido especialmente para detectar sutiles variaciones en la luz estelar, es decir va a ir en búsqueda de planetas extrasolares de tipo terrestre, será lanzada en el año 2008.
3. La Space Interferometry Mission (SIM) que constará de 2 telescopios y durará 5 años, buscará planetas situados en las zonas habitables de 150 estrellas cercanas, programada aproximadamente para el 2009.
4. El Terrestrial Planet Finder (TPF, Buscador de Planetas Terrestres) contará con grandes telescopios, se lanzará aproximadamente en el 2011, y se encargará de detectar planetas pequeños de tipo terrestre. Es un interferómetro que reducirá el brillo de la estrella en un factor de 10^5 y podrá ver planetas hasta 50 años luz de distancia. Podrá medir abundancias relativas de gases como CO_2 , vapor de agua, O_3 y CH_4 para investigar qué planetas estarían en condiciones de ser habitables.
5. Un sucesor mucho más ambicioso del TPF, llamado Life Finder (Buscador de Vida), estaría terminado en algún momento después del 2020. Estos telescopios (TPF y Life Finder) buscarán aquellos momentos reveladores en que el brillo de la luz disminuye al pasar un planeta delante de una estrella, y los rastros químicos que deja la luz de esa estrella cuando atraviesa la atmósfera de un planeta.
6. GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics). Relevará cientos de miles de estrellas con alta precisión astrométrica. Podrá detectar planetas tipo Júpiter entre 50-200 pc's. y planetas tipo Tierra a varios pc's., programado aproximadamente para el 2010-2012.

7. Darwin Project: El obstáculo más importante para la observación directa de planetas extrasolares es que, en las longitudes de onda de la luz visible, una estrella es aproximadamente mil millones de veces más brillante que un planeta similar al nuestro; para superar ese inconveniente, Darwin, una misión de la ESA a lanzarse en el año 2015, observará las estrellas cercanas en longitudes de onda infrarrojas, en las cuales una estrella es aproximadamente un millón de veces más brillante que un planeta de tipo terrestre, lo cual facilitará su detección.

8. Un proyecto franco-suizo de estudio de la sismología estelar, el proyecto COROT (Convection Rotation & planetary Transits), se ha adaptado también para el estudio de tránsitos de planetas extrasolares. Constará de un telescopio en órbita geocéntrica polar a unos 826 km de altura. Se lanzó en el 2005 con participación de otros países europeos.

Estos proyectos futuros están resumidos en la siguiente tabla 12:

Tabla 12. Muestra los proyectos futuros en la búsqueda de planetas extrasolares.

Misión	Lanzamiento (aprox.)	Longitudes de onda	Técnica de detección
COROT (ESA)	2005	Opt	Tránsitos
Eddington (ESA)	2008	Opt	Tránsitos
Darwin (ESA)	2015	IR	Interferometría
GAIA (ESA)	2010-2012	Opt	Astrometría
SIRTF (NASA)	2003	IR	Imagen
Kepler (NASA)	2006-2007	Opt	Tránsitos
SIM (NASA)	2009	Opt	Astrometría
TPF (NASA)	2011	IR/Opt	Interf./Coronógrafo
Life Finder	2020	IR/Opt	Interf./Coronógrafo

CAPITULO 4 Resultados y Discusión

4.1 Confiabilidad de los parámetros orbitales y diferencias entre los métodos de observación de los Planetas Extrasolares

Un resultado obtenido fue la determinación de los parámetros orbitales reportados por diferentes fuentes de información. Para ello apliqué la tercera ley de Kepler a estos sistemas estelares expresando la masa de la estrella (M^*) en masas solares (M_{Sol}) y aplicando la ecuación (2.6.8) a planetas extrasolares con sus respectivas incertidumbres (reportadas por los investigadores), se obtuvo lo siguiente.

En la figura 4.1 presento la gráfica de a^3 / M^* vs p^2 para los 170 Planetas Extrasolares. En este caso haciendo un ajuste por mínimos cuadrados encontramos, con una r de Pearson de **0.99**, que el mejor ajuste satisface la ecuación: $p^2 = 1.03 \pm 0.007 \text{ (UA}^3/\text{años}^2) a^3 / M^* - 0.12 \pm 0.01 \text{ (UA}^3/\text{años}^2)$

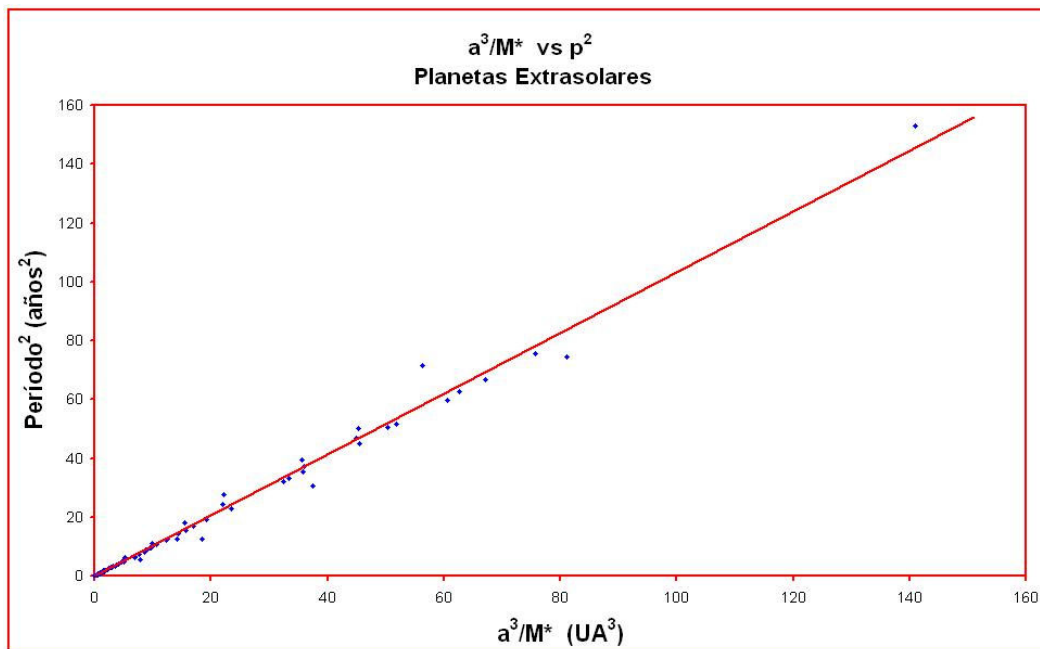


Figura 4.1 Gráfica de la Tercera Ley de Kepler aplicada a los 170 Planetas Extrasolares encontrados mediante los métodos de Efecto Doppler, Tránsito y el de Astrometría.

La mayoría de los parámetros orbitales ya mencionados en la sección 3.4.2 han sido obtenidos por el método de Efecto Doppler, es decir, el 95.9% de los exoplanetas se han reportado por éste método, solamente 6 exoplanetas han sido obtenidos por el método de tránsito, esto es, el 3.5% y a su vez confirmados por el Efecto Doppler y finalmente solamente 1 planeta obtenido por el de Astrometría, es decir, el 0.6% también confirmado por el método de Efecto Doppler. En particular los investigadores utilizan esta ley de Kepler sólo para encontrar el semieje mayor de los planetas.

Sin embargo estos parámetros orbitales son confiables pero no al 100%, ya que cada equipo y observatorio dedicado a la búsqueda de exoplanetas, obtienen los parámetros con incertidumbres por diferentes medios.

No se reportan en esta lista de 170 exoplanetas los planetas descubiertos por el método de Microlentes, ya que el principal defecto de este método es que las posibles detecciones no son repetibles por lo que el planeta así descubierto debería ser estudiado adicionalmente por alguno de los métodos anteriores y no son parámetros confiables al 100%; los de Imagen directa porque sólo se conocen los semiejes mayores y masas mínimas y tampoco son parámetros confiables y los que giran alrededor de pulsares porque en la gráfica 1 sólo se reportan los parámetros de planetas que orbitan estrellas de tipo espectral F, G, K y M no de planetas alrededor de pulsares.

Por lo visto anteriormente podemos decir que el Método Doppler es el más confiable, siguiéndole el de Tránsito y después el de Astrometría.

En la tabla 13 se muestran los observatorios y equipos más importantes dedicados a la detección de estos planetas.

Tabla 13.

Observatorios y equipos dedicados a la búsqueda de planetas extrasolares.

OBSERVATORIOS	EQUIPOS
Afoe	Keck
Anglo-Australian Telescope (AAT)	La silla
Coralie	Laboratorio de Francia
Elodie	Lick
ESO	McDonald
Feros	MOA
Flames-Uves	Observatorio de Lisboa
Hamilton	Observatorio de Genova
Harps	OGLE
Hides-OAO	Sarg
Hires/Latham	Ues
Hires/Marcy	

4.2 Propiedades Observadas de los Planetas Extrasolares

En cuanto a los semiejes mayores (**a**) inferidos por los investigadores utilizando la 3ª Ley de Kepler para los planetas extrasolares, encontré lo siguiente:

- ❖ 69 planetas, es decir, 40.59% con $a < 0.387$ UA (semieje mayor de Mercurio) y con períodos entre 1.21 y 182 días, que es en donde se localizan los llamados Júpiteres Calientes (ver figura 4.2).
- ❖ El 59.41% de los planetas extrasolares detectados hasta el momento se hallan a distancias con $a > 0.40$ UA y **5.257 UA** (que corresponde al exoplaneta más distante, 55 Cnc d). El límite inferior se encuentra a 0.020 UA que corresponde al exoplaneta Gliese 876d.

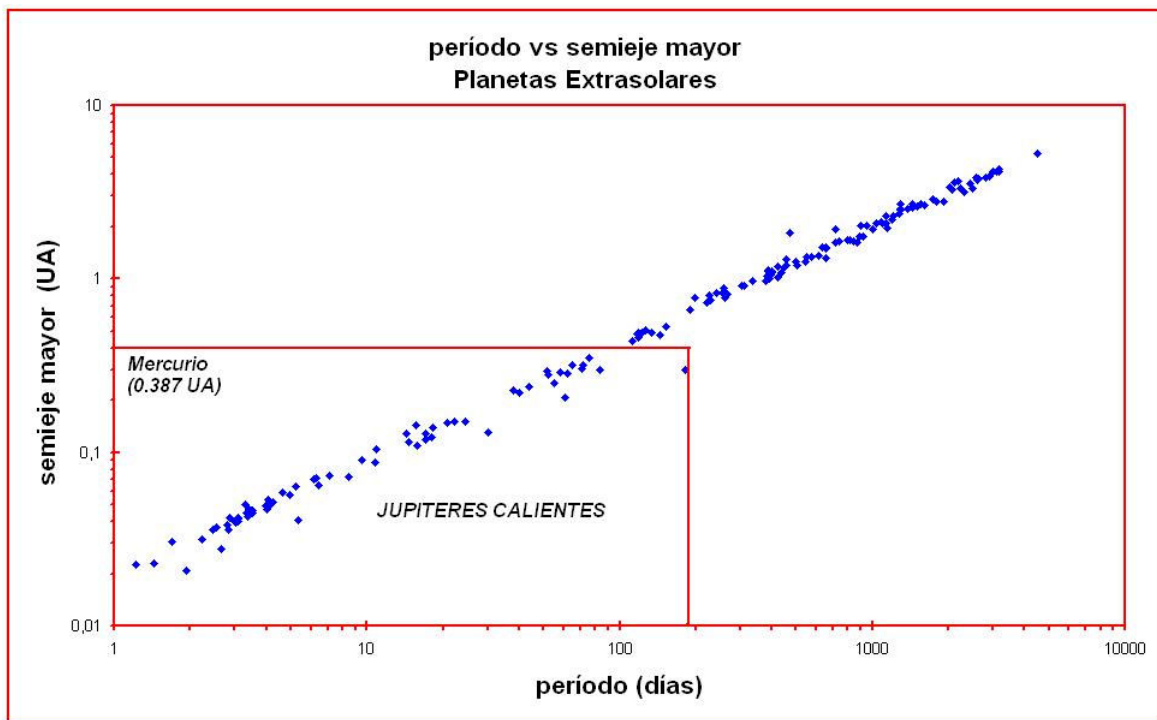


Figura 4.2 Relación Período-Semieje mayor de los 170 Planetas Extrasolares comparados con la distancia de Mercurio de Nuestro Sistema Solar.

En las teorías actuales un sistema solar se forma del disco de gas y polvo que rodea a la estrella recién formada. A nivel teórico y con estos planetas gigantes encontrados orbitando muy cerca de sus estrellas, se tiene que no se requiere que la distancia mínima de localización para planetas tan masivos como Júpiter sea 5 veces la distancia sol-tierra (UA) como se planteó con base en nuestro sistema solar. Surge de aquí que la Teoría de la formación de los planetas tiene procesos muy diversos. Aparece así una visión diferente a la de nuestro propio sistema solar.

Estos exoplanetas encontrados orbitando muy cerca de sus estrellas son los fáciles de detectar. Los investigadores suponen que se han formado en regiones más alejadas y que por alguna causa han migrado hacia órbitas más próximas a su estrella hasta las posiciones en las cuales se han descubierto.

La figura 4.3 muestra los semiejes mayores de los 170 exoplanetas encontrados se hizo graficando la distancia a la que se encuentra cada exoplaneta contra el número asignado a cada planeta en la lista del apéndice B, esto es, a una distancia de 0.0208 UA se encuentra el planeta #1, a 0.0225 UA está el planeta #2 y así sucesivamente hasta llegar a 5.257 UA en donde se encuentra el planeta #170, en ésta gráfica se pueden observar algunos huecos, indicados con flechas, y esto suponemos que es un fenómeno debido exclusivamente al sesgo observacional ya que los planetas corresponden a diferentes estrellas, además de que cada observatorio dedicado a la búsqueda de planetas extrasolares, obtienen los parámetros por diferentes medios.

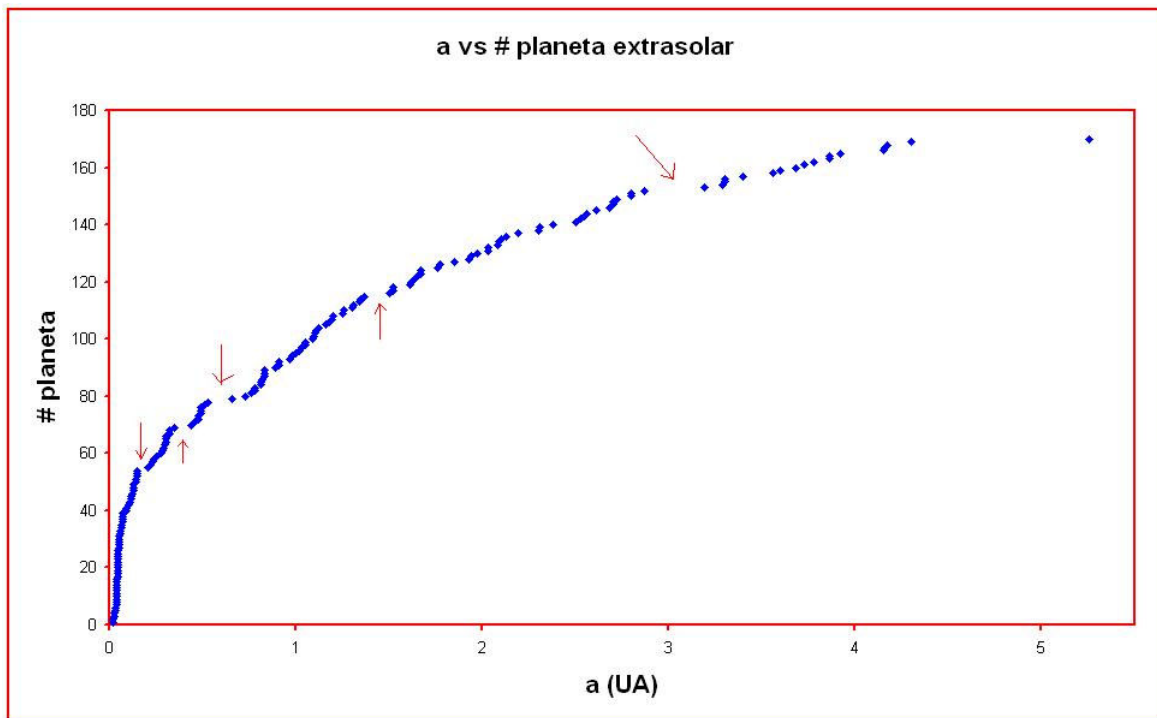


Figura 4.3 Gráfica que representa la distancia a la que se encuentra cada uno de los 170 planetas extrasolares que van de 0.02 a 0.527 UA.

La excentricidad es otra propiedad observada de los planetas extrasolares, en la figura 4.4 podemos observar que las excentricidades varían en un rango de 0.01 – 0.927 que corresponden a los planetas Tau Boo b y HD80606 b respectivamente. Los planetas que se observan con excentricidad cero, esos son porque faltan excentricidades de algunos planetas que no han sido reportados por los investigadores.

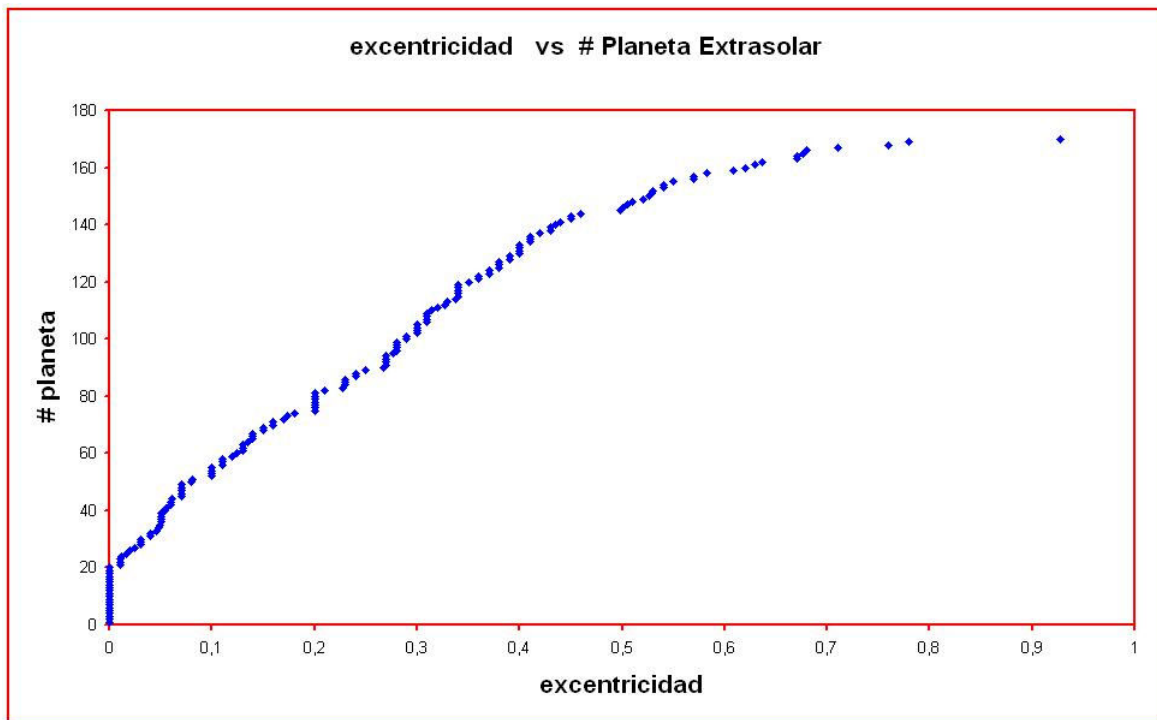


Figura 4.4 excentricidad vs número de planeta extrasolar (0.01 – 0.927).

La mayoría de los planetas extrasolares tienen excentricidades enormes, como se puede observar en la figura 4.5, al incrementarse las distancias tienden a crecer también los valores de las excentricidades. Haciendo nuevamente una comparación con nuestro Sistema Solar, se resume lo obtenido en la siguiente tabla 14:

Tabla 14
Muestra los resultados obtenidos de las excentricidades de los 170 exoplanetas estudiados.

# PLANETAS ENCONTRADOS	EXCENTRICIDAD	PORCENTAJE %	CLASIFICACIÓN EXOPLANETA
82	> 0.249 (Plutón)	48.24	Muy excéntricos
68	0.01 – 0.24	40.00	No excéntricos
20	0	11.76	Excentricidades no reportadas

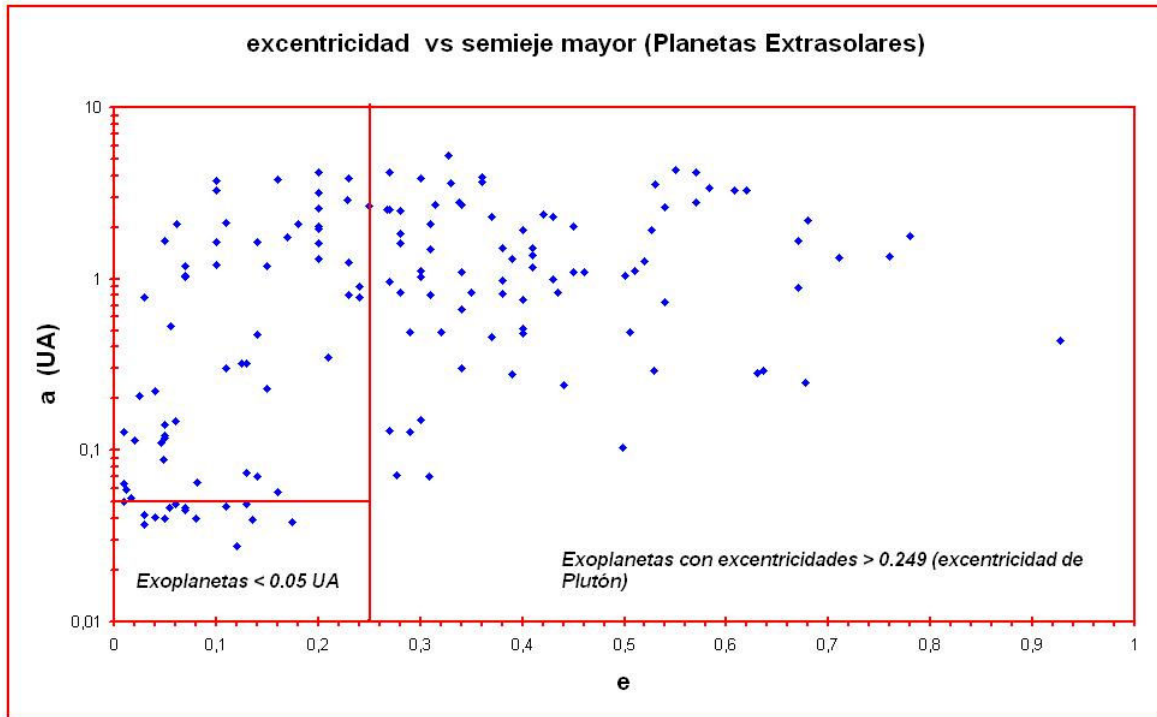


Figura 4.5 Relación excentricidad – semieje mayor de los planetas extrasolares.

De las figuras 4.4 y 4.5 se puede concluir que es sorprendente ver a los exoplanetas con valores muy elevados respecto a las bajas excentricidades de los planetas de nuestro Sistema Solar, lo cual agudiza la discusión sobre si los objetos descubiertos son planetas o enanas marrón. Así los Exoplanetas próximos a 0.05 UA (figura 4.5) residen en orbitas circulares que son debidas a las interacciones de marea entre el planeta y su estrella.

Los Investigadores han desarrollado un modelo que trata de explicar como fue que estos objetos pudieron haberse formado desde un disco protoplanetario, Este modelo nos dice que si dos o más planetas masivos se forman en órbitas circulares alrededor de una estrella joven, las interacciones gravitatorias tirarán de las órbitas hacia una forma elíptica.

Otra propiedad detectada de los exoplanetas es que tienen su masa mínima en el rango 0.023 – 12.7 M_{Jup} . Y se resumen en la siguiente tabla 15:

Tabla 15

Muestra los resultados obtenidos de las masas mínimas de los 170 exoplanetas estudiados.

# PLANETAS ENCONTRADOS	M SEN I (M_{JUP})	PORCENTAJE %	CLASIFICACIÓN EXOPLANETA
8	< 0.1	4.70	Poco Masivos
40	1 – 1.94	23.53	Similares a Júpiter
64	2 - 13	37.65	Masivos
4	> 13	2.35	Muy Masivos
54	0.1 - 1	31.77	Sin Clasificación

Las masas mínimas de los exoplanetas tienen su cota inferior en el exoplaneta Gliese 876 d que es de $0.023 M_{Jup}$. La cota superior de masas mínimas corresponde al límite permitido por la definición de planeta, unas 13 veces la masa de Júpiter. Los cuerpos que superan este valor son considerados enanas marrones ($13 - 80 M_{Jup}$).

Hasta el momento sólo se conocen cuatro planetas reportados en la tabla del apéndice B, que superan ésta cota superior, uno de ellos es HD 162020b con $13.75 M_{Jup}$; HD 13189 b con $14 M_{Jup}$, el otro es HD168443c con $17.1 M_{Jup}$ y por último HD 202206b con $17.4 M_{Jup}$ (figura 4.6)

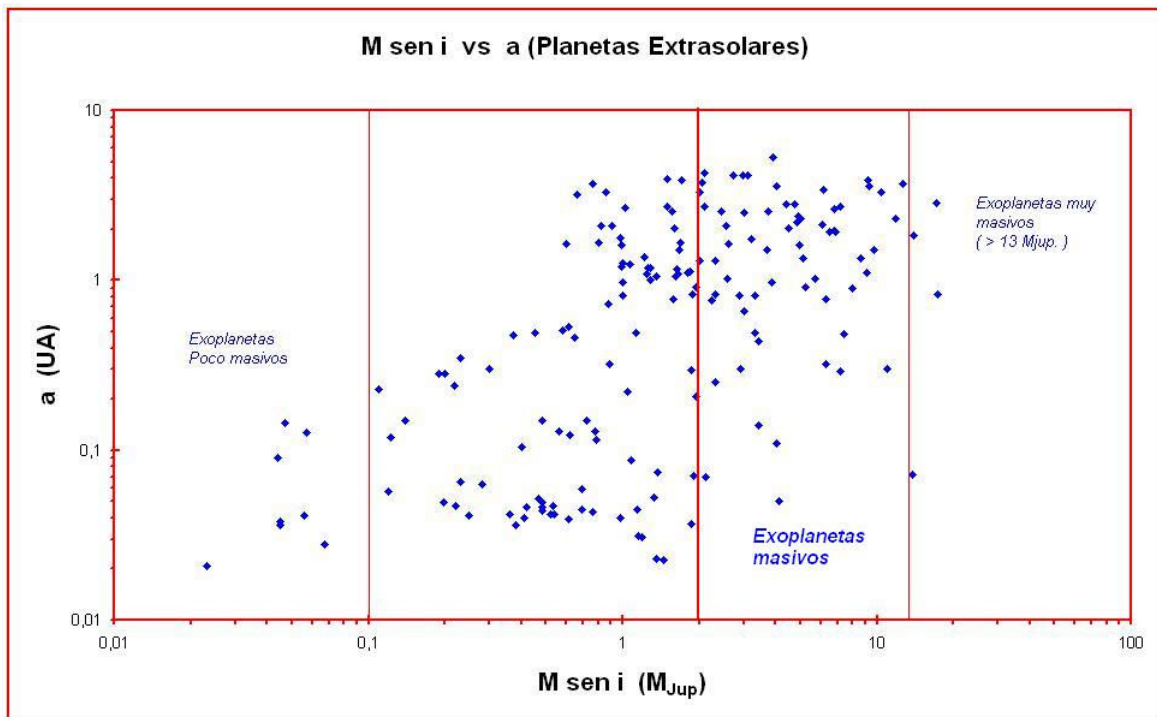


Figura 4.6 Diagrama donde se representa la masa de los exoplanetas respecto a su semieje mayor. Obsérvese que la mayoría que se han descubierto son exoplanetas masivos.

Los períodos orbitales de los exoplanetas están dentro de un rango de 1.2119–4517.4 días.

En el gráfico de la figura 4.7 se observa que el período tiene cierta tendencia a crecer al aumentar la masa aunque se observa mucha dispersión, también prácticamente la mitad de los exoplanetas tienen un periodo inferior al año terrestre (1 año = 365 días). Estos periodos tan cortos no son nada habituales en nuestro sistema solar. Sin embargo resulta que son fácilmente detectables con los medios actuales y es por ello que se han detectado ellos primero antes que otros planetas con mayores periodos. Verificándose que el planeta de menor período orbital lo ostenta actualmente el planeta OGLE-TR-56 b con 1.2119 días.

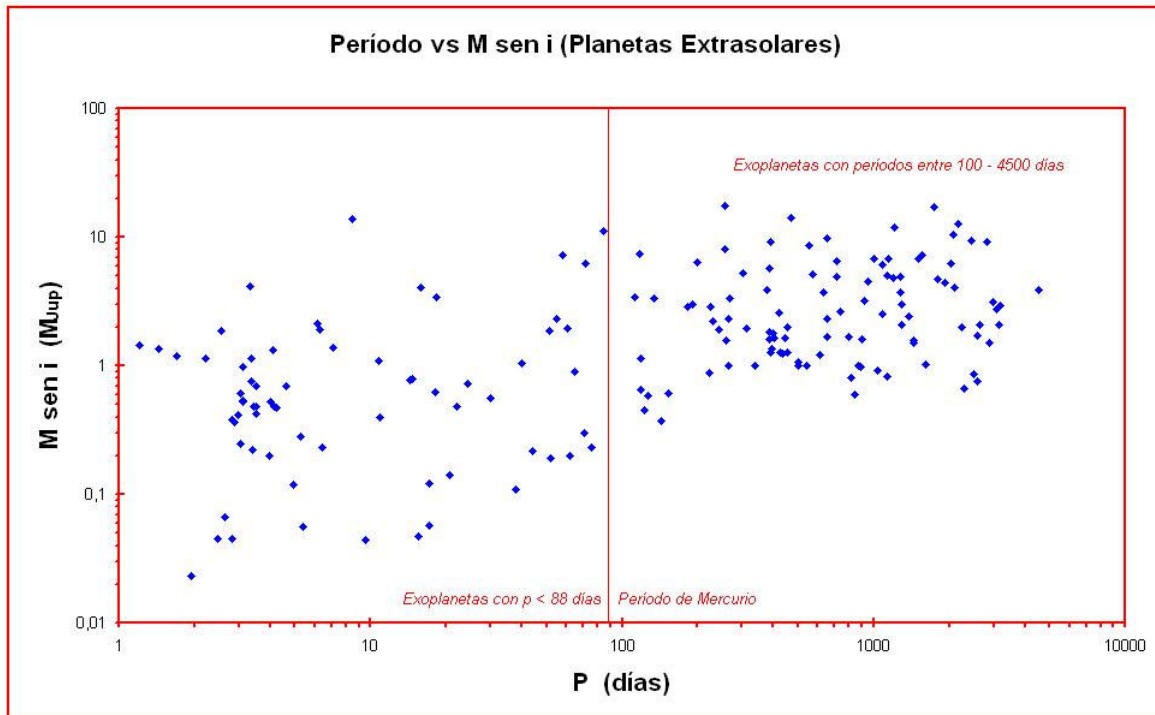


Figura 4.7 Gráfico de períodos en días en función de la masa mínima de los exoplanetas conocidos (escala logarítmica).

Hasta el momento sólo se conoce un planeta extrasolar cuyo periodo orbital rebasa el de Júpiter (4330 días), el cual es 55 Cancri d, con un periodo de 4517.4 días. Los demás planetas tienen períodos menores.

También se puede observar en la gráfica planetas de períodos cortos < 87.969 días, que corresponde al periodo mas corto del planeta de nuestro Sistema Solar, que es Mercurio. Observándose 68 planetas, es decir, el 40% de los planetas tienen períodos cortos y el 60%, esto es, 102 planetas con períodos entre 88 - 4330 días.

Finalmente los de períodos cortos producen perturbaciones en la estrella fáciles de detectar siguiéndola durante varios meses o años. Cabe esperar, pues, que en un futuro próximo se descubran muchos más exoplanetas de periodo largo.

4.3 Ley de Titus-Bode aplicada a planetas extrasolares

Aplicándose la relación empírica de Titus-Bode a los planetas extrasolares se llegó a que, en los planetas del sistema solar se cumple ésta ley excepto para los dos planetas finales Neptuno y Plutón y para los planetas extrasolares no se cumple, ya los planetas no pertenecen a la misma estrella, que comparando con nuestro Sistema Solar, ésta relación se cumple (como se mencionó arriba) para los planetas que pertenecen a un mismo Sistema Estelar.

Para comprobar esto, se aplicó esta relación empírica al Sistema 55 Cnc que es el que tiene más planetas y observando la gráfica 4.8 podemos ver que tampoco se cumple esta relación, de hecho ninguno de los 4 planetas se encuentra a la misma distancia de los planetas de nuestro Sistema Solar, aunque claro, no podemos asegurar si cada sistema estelar tenga su propia relación empírica y no necesariamente la de Titus-Bode, cabe mencionar también que tampoco es obligatorio que ésta relación debiera funcionar para otros sistemas.

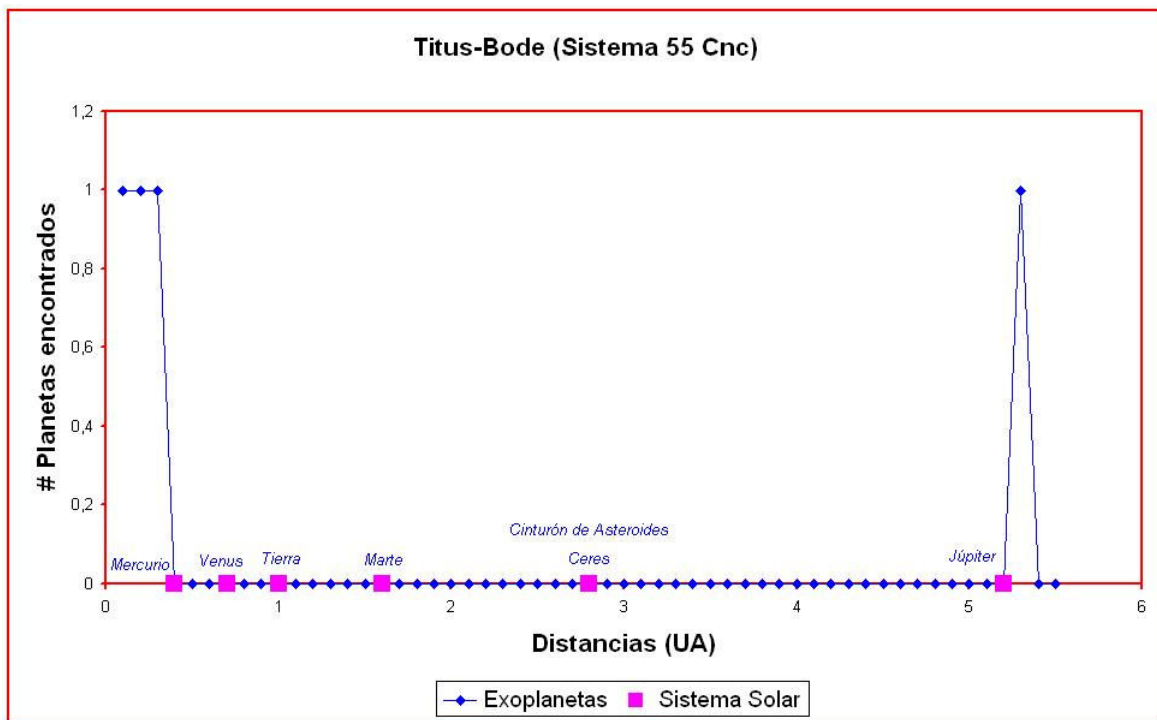


Figura 4.8
Muestra la ley de Titus-Bode aplicado al Sistema 55 Cnc..

4.4 Energía cinética, potencial y total de los exoplanetas

La energía potencial de una planeta cualquiera es

$$E_p = -\frac{GMm}{r} \quad (4.1)$$

Como sabemos que $a=r$ promedio entonces la energía potencial promedio es

$$\frac{E_p}{m_p} = -G\frac{M^*}{a} \quad (4.2)$$

Del Teorema del Virial sabemos que (ver apéndice D).

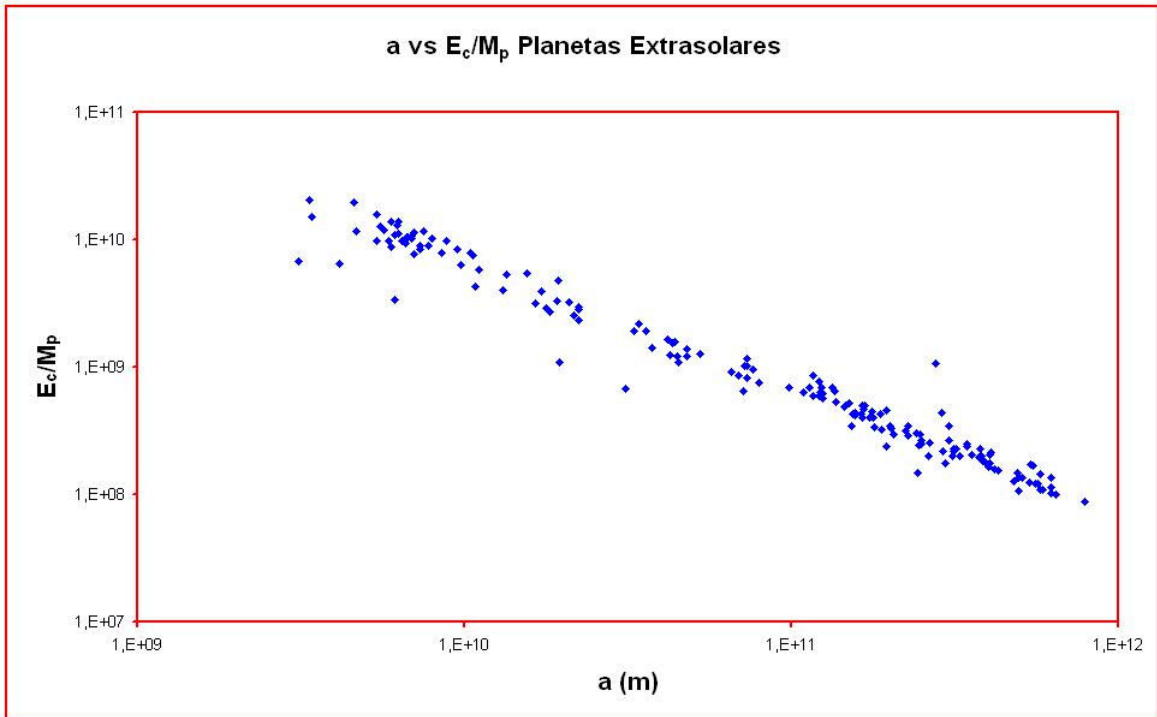
$$\left(\frac{E_c}{m_p}\right) = \frac{GM^*}{2a} \quad (4.3)$$

De (4.2) podemos calcular la energía potencial promedio de todos los planetas extrasolares. De la ecuación (4.3) podemos obtener la energía cinética promedio de todos los planetas extrasolares y sumando ambas obtenemos la energía total.

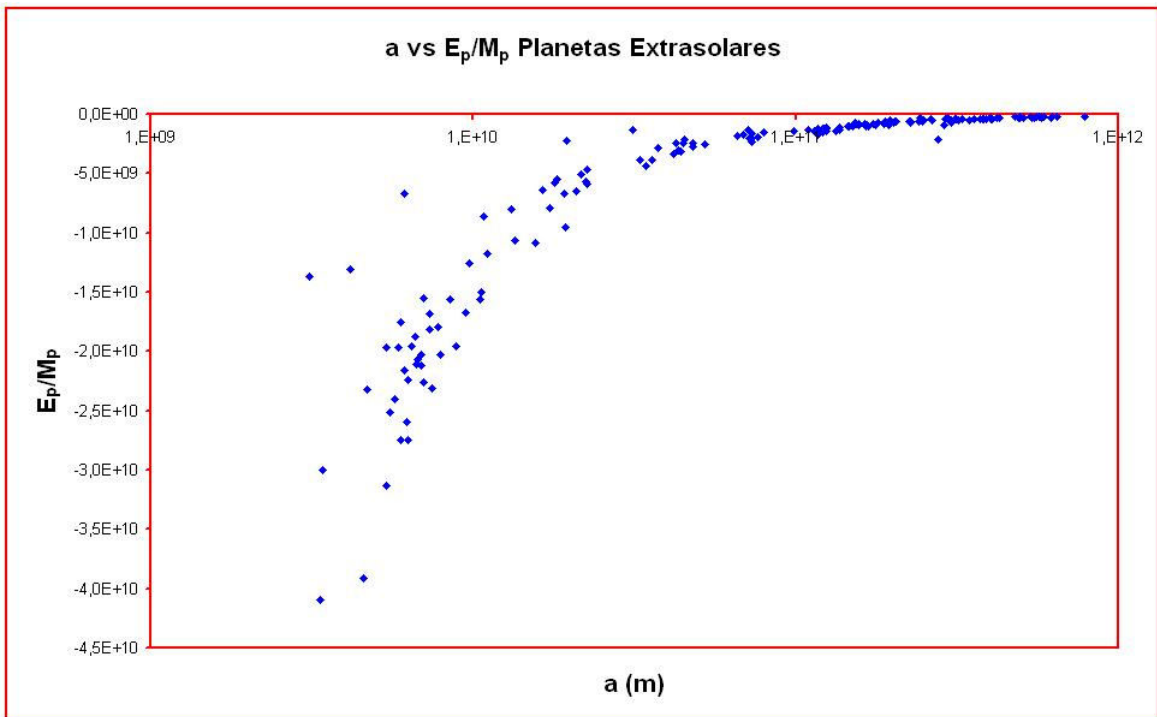
Observando en la figura 4.9 que la energía cinética por unidad de masa es mayor si estamos cerca de la estrella y menor si estamos lejos, es decir, se observa tendencia potencial, esto debido al movimiento del planeta cuando éste se encuentra cerca de la estrella lleva mas velocidad que cuando se encuentra lejos.

Podemos observar en la figura 4.10 que la energía potencial por unidad de masa es pequeña si estamos cerca de la estrella y grande si estamos lejos, es decir, que al crecer la distancia, aumenta la E_p/M_p , esto es debido a que la E_p/M_p depende de la distancia a la que se encuentre cada planeta de su estrella.

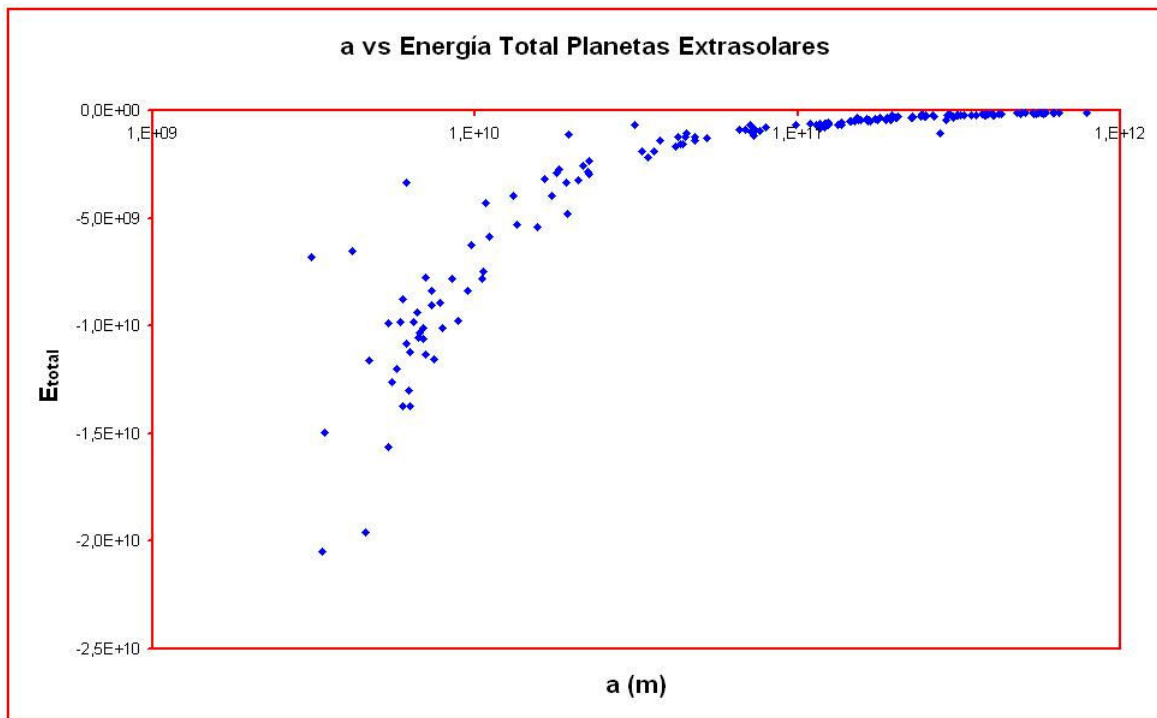
Al graficar la Energía total de la órbita del planeta observamos que la $E < 0$ (es decir, es negativa debido a que los planetas están ligados a su estrella) y depende del semieje mayor, es decir, conforme la distancia crece, la energía total por unidad de masa tiende a aumentar o dicho de otra forma, la Energía total crece como $1/a$ (figura 4.11).



Gráfica 4.9
a vs E_c / M_p Planetas Extrasolares



Gráfica 4.10
a vs E_p / M_p Planetas Extrasolares



Gráfica 4.11
a vs Etotal / Mp Planetas Extrasolar

4.5 Exoplanetas dentro de la zona habitable

Utilizando los bordes internos y externos de los tipos espectrales F, G, K y M que se encuentran en la tabla 11 del capítulo 3 y mencionando que los porcentajes presentados a continuación no son sobre toda la muestra, sino sobre el número de estrellas para cada tipo espectral F, G K y M, se encontró que existen dentro de la Zona Habitable:

- ❖ El 27.27% de los exoplanetas están dentro de la ZHC de estrellas de tipo espectral F(figura 4.12)
- ❖ El 22.43% de planetas extrasolares que orbitan dentro de la ZHC alrededor de estrellas de tipo espectral G,(figura 4.13)
- ❖ 2 planetas extrasolares que orbitan alrededor de estrellas de tipo espectral K (figura 4.14).
- ❖ Y finalmente solo1 planeta extrasolar que orbita alrededor de una estrella de tipo espectral M (figura 4.15).

Dado que las estrellas son de diferente tipo espectral (F, G, K y M) entonces quiere decir que son de distinto brillo y por lo tanto emiten distinta energía al espacio, por lo tanto la ZHC es diferente, es decir, varía de un tipo espectral a otro, como lo podemos observar en las siguientes gráficas.

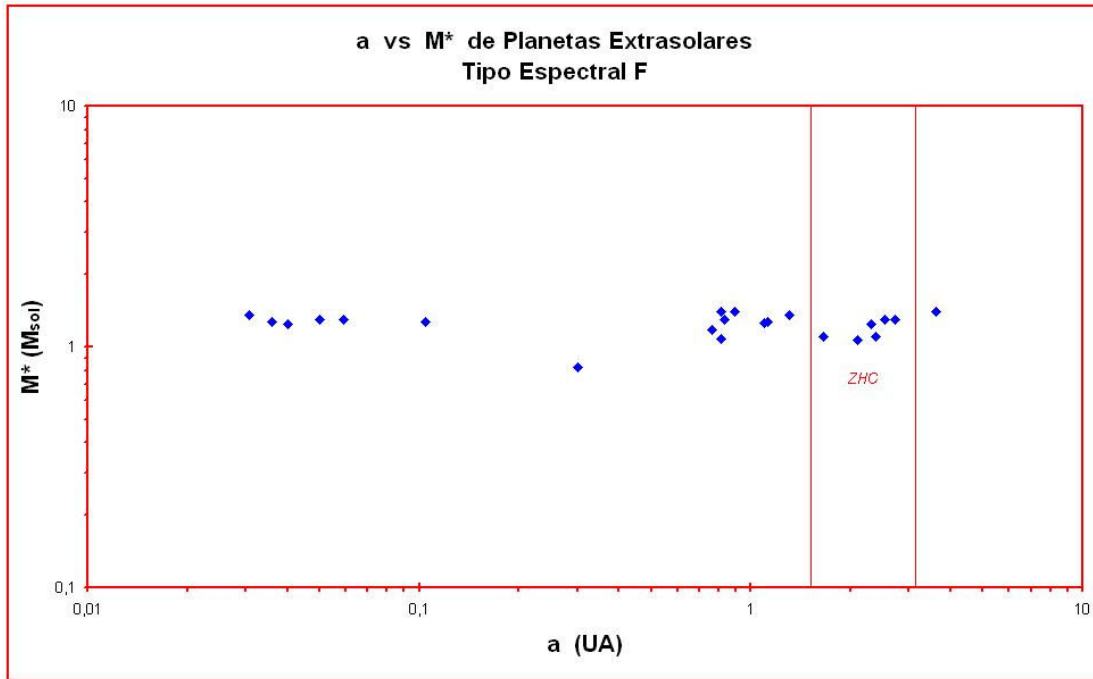


Figura 4.12

a vs M^*

Planetas Extrasolares que orbitan dentro de la zona habitable de estrellas de tipo espectral F.

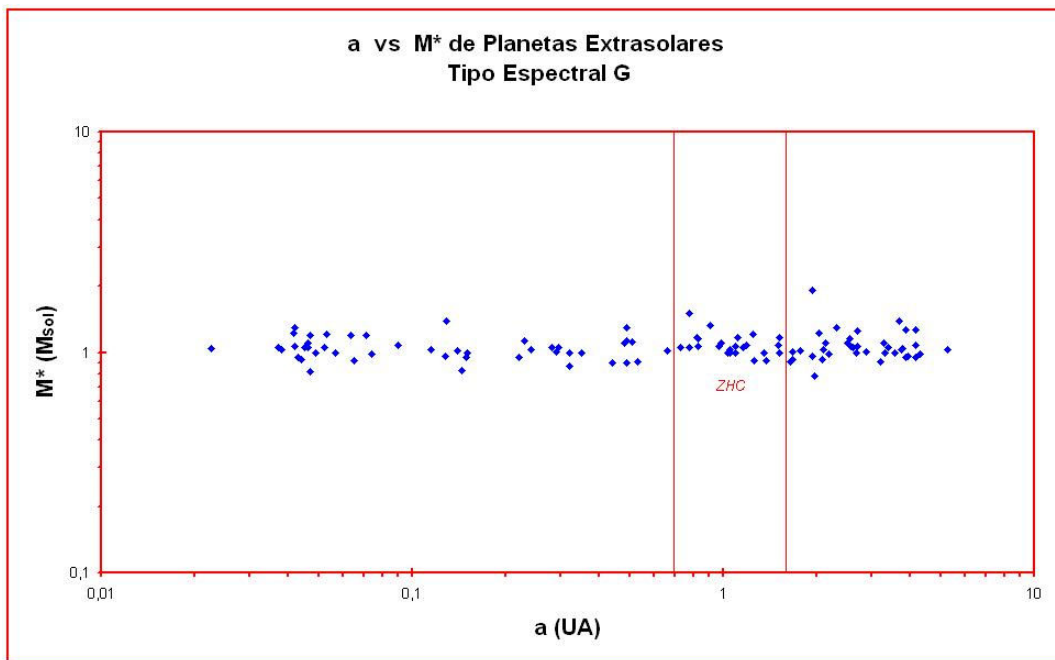


Figura 4.13

a vs M^*

Planetas Extrasolares que orbitan dentro de la zona habitable de estrellas de tipo espectral G.

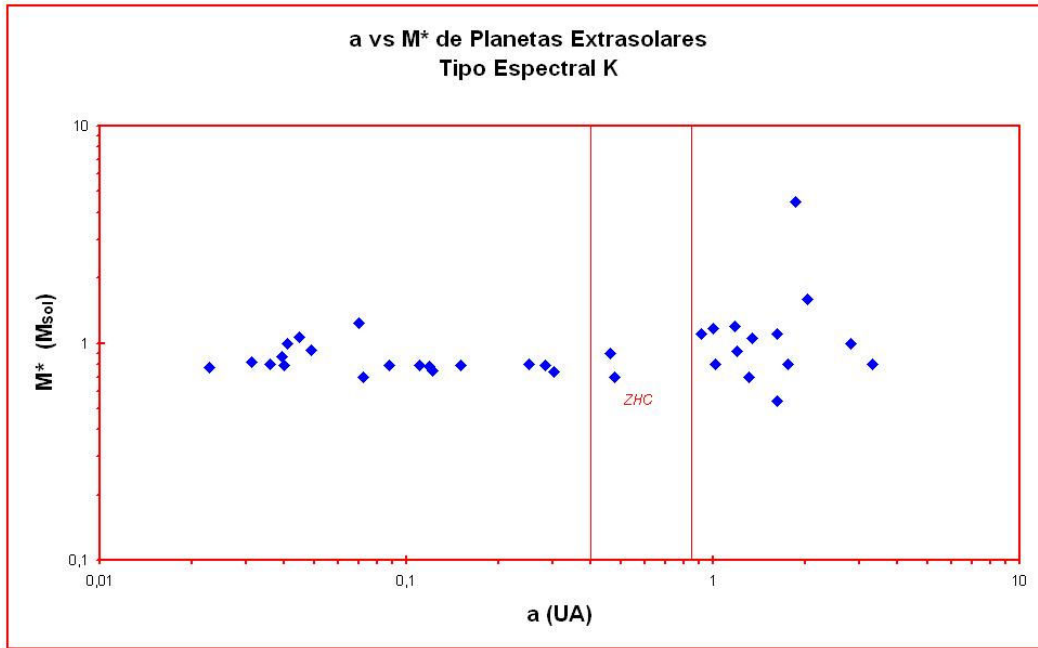


Figura 4.14

a vs M^*

Planetas Extrasolares que orbitan dentro de la zona habitable de estrellas de tipo espectral K.

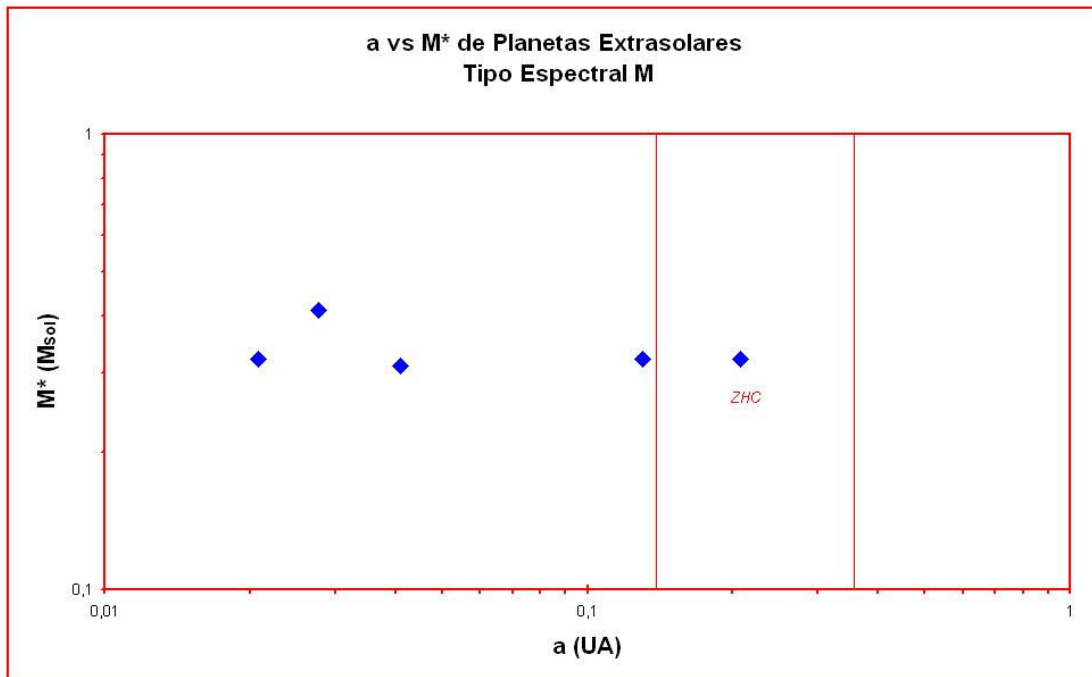


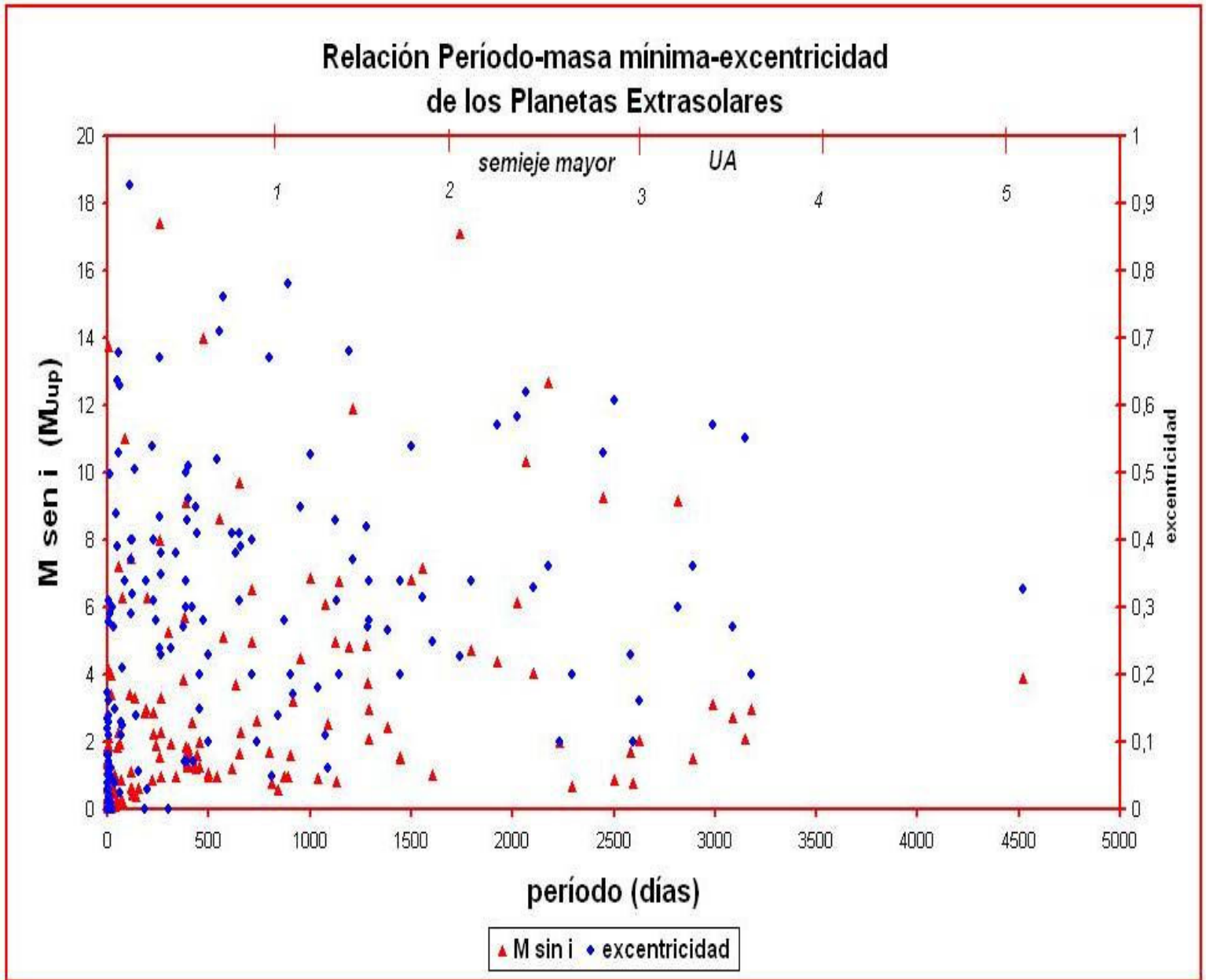
Figura 4.15

a vs M^*

Planeta Extrasolar que orbita dentro de la zona habitable de una estrella de tipo espectral M.

4.6 Relación entre los principales parámetros orbitales de los planetas extrasolares

Para finalizar este trabajo de tesis, en la siguiente figura 4.16 se resume lo dicho anteriormente de los principales parámetros orbitales de los planetas extrasolares que son el semieje mayor, la masa mínima, la excentricidad y el período. Observando en dicha gráfica que la mayoría de los planetas tienen masas mínimas superiores a la de Júpiter = $1 M_{\text{Jup}}$, períodos menores a éste = 4330 días (salvo un planeta), muy excéntricos mayores a 0.249 que es la excentricidad de Plutón y semiejes mayores menores a 5.257 que es la distancia a la que se encuentra Júpiter, es decir los límites se tomaron en comparación con los planetas Júpiter y Plutón de nuestro Sistema Solar, es decir, el planeta más grande y el más pequeño respectivamente.



Conclusiones

Uno de los aportes principales de esta tesis fue la recopilación de información de distintas fuentes con el fin de tener una base de datos actualizada y confiable a partir de la cual poder realizar estudios estadísticos y comparativos de los sistemas extrasolares. A partir de la recopilación de la información actualizada más importante de los parámetros orbitales de los planetas encontrados en otros Sistemas Solares y de los satélites de los planetas jovianos se realizó un estudio comparativo con nuestro Sistema Solar. Así mismo se hicieron dos clasificaciones distintas a las reportadas por los investigadores en distintas fuentes de información de estos planetas encontrados. Partiendo de esta base de datos actualizada para el trabajo de esta tesis encontramos que:

- De los 170 planetas gigantes identificados (hasta enero de 2006), 148 orbitan individualmente estrellas y 17 forman parte de sistemas planetarios:
 - 1 sistema planetario con 4 planetas.
 - 3 sistemas planetarios con 3 planetas.
 - 13 sistemas planetarios con 2 planetas.
- Los exoplanetas orbitan alrededor de estrellas normales de la secuencia principal de tipo espectral F, G, K y M ya que son las que se han estudiado. Están situadas a una distancia de la Tierra entre 40 y 300 años luz.
- Hay 163 exoplanetas encontrados por el método de velocidad radial. 6 por el método de tránsito y 1 exoplaneta por astrometría.
- El método de detección más confiable es el método Doppler, siguiendo después el de Tránsito, después el de Astrometría y por último el de Microlentes. La mayoría de los datos se obtienen por Doppler.
- También se han encontrado 3 exoplanetas por microlentes, pero que no se reportan en esta lista de 170 planetas, los cuales son OGLE235-MOA53 b, OGLE05-071L b y OGLE05-390L b.
- 1 exoplaneta por imagen 2M1207 b.
- Vimos cómo se obtienen los parámetros orbitales de distintas formas, en particular para encontrar el semieje mayor de los planetas se emplea la tercera ley de Kepler. Los parámetros reportados son confiables pero no al 100%, ya que cada observatorio y equipo dedicado a la búsqueda de planetas, obtienen los parámetros con incertidumbres distintas.

Conclusiones

- Respecto a la distancia a la cual se encuentran de su estrella asociada, el límite inferior de los exoplanetas es de 0.0208 UA que corresponde a OGLE-TR-56 b y el planeta más alejado esta a 5.257 UA que es el 55 Cnc d.
- Las excentricidades de los exoplanetas van desde 0.01 hasta 0.927.
- El planeta de menor período orbital es el planeta OGLE-TR-56 b con 1.2119 días. Hasta el momento sólo se conocen un planeta extrasolar cuyo periodo orbital rebasa el de Júpiter (4330 días), que es el 55 Cancri d, con un periodo de 4517.4 días.
- Las masas mínimas de los exoplanetas tienen su cota inferior en el exoplaneta Gliese 876 d que es de $0.023 M_{\text{Jup}}$. La cota superior de masas mínimas corresponde al límite permitido por la definición de planeta, unas 13 veces la masa de Júpiter.

La clasificación de los planetas extrasolares se realizó de acuerdo a dos criterios: por parámetros orbitales y por el tipo de estrella que orbitan.

Por parámetros orbitales:

- 69 son exoplanetas calientes con semiejes menores a 0.387 UA que es la distancia de Mercurio al Sol.
- 82 tienen órbitas muy excéntricas con excentricidades mayores a 0.249 que es la excentricidad de Plutón.
- 40 son exoplanetas con masas semejantes a Júpiter, es decir, con $M_{\text{sen } i}$ entre $1-1.94 M_{\text{Jup}}$.
- 68 son de períodos cortos de traslación, $p < 87.969$ días que corresponde al período de Mercurio y en cuya clasificación existe un subgrupo con 8 exoplanetas poco masivos con $M_{\text{sen } i} < 0.1 M_{\text{Jup}}$

Por tipo de estrella que orbitan:

- Exoplanetas que giran alrededor de estrellas de la secuencia principal por tipo espectral:
 - Encontrándose 22 exoplanetas orbitando estrellas del Tipo espectral F
 - 107 exoplanetas orbitando estrellas del Tipo espectral G
 - 36 exoplanetas orbitando estrellas del Tipo espectral K
 - Y finalmente 5 exoplanetas orbitando estrellas del Tipo espectral M.

Conclusiones

- Exoplanetas alrededor de púlsares: Se han encontrado 3 de este tipo.
- Sistemas exoplanetarios: Se han encontrado 15 Sistemas con más de 1 planeta alrededor de la misma estrella, con masas no superiores a las $13 M_{\text{Jup}}$.
- Sistemas extramásicos: Se han clasificado aquí sólo 4 sistemas binarios de estrellas con $M \sin i > 13 M_{\text{Jup}}$.
- Exoplanetas en Zonas habitables: Dado que las estrellas con planetas encontrados dentro de la Zona Habitable Circumestelar son de diferente brillo, entonces la ZHC es diferente en cada tipo espectral y los límites y planetas de cada tipo son los siguientes:
 - 6 planetas extrasolares alrededor de estrellas de tipo espectral F que se encuentran entre 1,398-3,203 UA.
 - 24 planetas extrasolares alrededor de estrellas de tipo espectral G dentro de 0,700-1,605 UA.
 - 2 planetas extrasolares alrededor de estrellas de tipo espectral K que están entre 0,372-0,852 UA.
 - Y finalmente 1 planeta extrasolar alrededor de una estrella de tipo espectral M entre 0,156-0,359 UA.
 - Concluyendo que la ZHC crece con la luminosidad estelar.
- Realizando la comparación con el Sistema Solar, tenemos que encontramos planetas “gaseosos” similares o mayores que Júpiter dentro de la región de planetas terrestres o rocosos del Sistema Solar (distancia a la estrella menor que 5 UA).
- La mayoría de estos planetas gigantes se encuentran muy cerca de sus respectivas estrellas, más cerca de la distancia que hay de Mercurio al Sol que es todo lo contrario al sistema solar, en donde los planetas gigantes se encuentran lejos.
- Son planetas muy excéntricos que giran alrededor de estrellas de masa similar a la del Sol.
- En el caso de las estrellas que tienen hasta 3 o 4 planetas, la masa de cada uno aumenta con la distancia a la estrella.
- En el Sistema Solar hay un salto muy brusco entre las masas de los planetas terrestres y las de los gigantes, y entre estos últimos la masa disminuye con la distancia al Sol.
- También la mayor cantidad de planetas va hacia masas más pequeñas que es lo que pasa también en el Sistema Solar aumenta el número de planetas, satélites o asteroides hacia menores masas.

Conclusiones

- Hay una tendencia a encontrar planetas en estrellas con metalicidad relativamente alta respecto al promedio de las estrellas de la vecindad solar. Además el Sol es una estrella anómala porque no tiene ninguna estrella compañera (un 70% de las estrellas de tipo solar están en sistemas múltiples).
- Por lo tanto las semejanzas de los exoplanetas con el Sistema Solar sugieren que no hay leyes universales que se cumplen en la formación de planetas. La metalicidad alta indica que la presencia de importantes cantidades de hielo y polvo favorece el crecimiento de planetas más pesados.
- Finalmente si algunas de las teorías descritas en la sección 3.8 es la correcta, ello implica que sistemas planetarios relativamente estables como el Sistema Solar, con un planeta masivo dominante, en el caso Júpiter, pueden ser muy raros. Y todo esto tiene sorprendido a los investigadores ya que estos planetas extrasolares son planetas gigantes, están muy cerca de su estrella anfitriona, tienen altas excentricidades y periodos cortos de traslación, lo cual contradice estas teorías de formación actuales y nos saca del marco de referencia que nos otorga nuestro propio Sistema Solar y nos da argumentos para pensar que el entorno que rodea a esos planetas no debe caracterizarse por su estabilidad, por lo que no existe consenso respecto al origen de estos.

APENDICE A

Tabla A: Datos orbitales de los satélites de los planetas del sistema solar

Fuente: <http://www.ifa.hawaii.edu/sheppard/satellites/jup2003.html><http://jpl.nasa.gov/>

	#	Nombre	Masa	Período orbital	Semieje mayor	excentricidad
Planeta	satélite	satélite	(masa/jup.)	(días)	(UA)	
Tierra	1	Luna	3.87E-05	27.32166	0.002569555	0.055
Marte	1	Fobos	5.58E-12	0.31891	6.26881E-05	0.0151
	2	Deimos	1.26E-12	1.26244	0.000156814	0.0005
Júpiter	1	Io	4.71E-05	1.77	0.002819559	0.004
	2	Europa	2.53E-05	3.55	0.004486026	0.009
	3	Ganimedes	7.79E-05	7.16	0.007155182	0.001
	4	Calisto	5.68E-05	16.69	0.012585072	0.007
	5	Amaltea	3.77E-09	0.5	0.001212584	0.003
	6	Himalia	5.03E-09	250.6	0.076612053	0.162
	7	Elara	4.09E-10	259.6	0.078483738	0.217
	8	Pasifae	1.01E-10	708	0.157916687	0.409
	9	Sinope	4.09E-11	724.5	0.160022332	0.25
	10	Lisitea	4.09E-11	259.2	0.078323308	0.112
	11	Carme	5.03E-11	702.3	0.156446078	0.253
	12	Ananke	2.01E-11	610.5	0.142221276	0.244
	13	Leda	2.99E-12	240.9	0.074633416	0.164
	14	Tebe	4.09E-10	0.68	0.00148331	0.018
	15	Adrastea	1.01E-11	0.3	0.000861643	0.002
	16	Metis	5.03E-11	0.3	0.000856296	0.001
	17	Callirhoe	0,00E+00	758,8	0,16111192	0,283
	18	Themisto	0,00E+00	130	0,050181196	0,242
	19	Megaclite	0,00E+00	752,8	0,159133282	0,421
	20	Taygete	0,00E+00	732,2	0,156151956	0,252
	21	Chaldene	0,00E+00	723,8	0,154942046	0,251
	22	Harpalyke	0,00E+00	623,3	0,141078212	0,226
	23	Kalyke	0,00E+00	743	0,157642619	0,245
	24	Iocaste	0,00E+00	631,5	0,142174484	0,216
	25	Erinome	0,00E+00	728,3	0,155610504	0,266
	26	Isonoe	0,00E+00	725,5	0,15519606	0,246
	27	Praxidike	0,00E+00	625,3	0,141358965	0,23
	28	Autonoe	0,00E+00	762,7	0,154006203	0,334
	29	Thyone	0,00E+00	627,3	0,139975255	0,229

Apéndices

	#	Nombre	Masa	Período orbital	Semieje mayor	excentricidad
Planeta	satélite	satélite	(masa/jup.)	(días)	(UA)	
	30	Hermippe	0,00E+00	633,9	0,141252011	0,21
	31	Aitne	0,00E+00	730,2	0,155289644	0,264
	32	Eurydome	0,00E+00	717,3	0,152843085	0,276
	33	Euanthe	0,00E+00	620,6	0,139032728	0,232
	34	Euporie	0,00E+00	550,7	0,129025901	0,144
	35	Orthosie	0,00E+00	622,6	0,13851133	0,281
	36	Sponde	0,00E+00	748,3	0,157000898	0,312
	37	Kale	0,00E+00	729,5	0,15519606	0,26
	38	Pasithee	0,00E+00	719,5	0,154387225	0,267
	39	S/2000 J11	0,00E+00	287	0,083924992	0,248
	40	S/2002 J1	0,00E+00	723,9	0,153284268	0,259
	41	S/2003 J1	0,00E+00	781,6	0,164155379	0,345
	42	S/2003 J2	0,00E+00	982,5	0,190981396	0,38
	43	S/2003 J3	0,00E+00	504	0,12259456	0,241
	44	S/2003 J4	0,00E+00	723,2	0,155469593	0,204
	45	S/2003 J5	0,00E+00	759,7	0,1609928	0,21
	46	S/2003 J6	0,00E+00	617,3	0,140236656	0,157
	47	S/2003 J7	0,00E+00	748,8	0,159144345	0,405
	48	S/2003 J8	0,00E+00	781,6	0,163866605	0,264
	49	S/2003 J9	0,00E+00	683	0,150013366	0,269
	50	S/2003 J10	0,00E+00	767	0,162098565	0,214
	51	S/2003 J11	0,00E+00	683	0,149703936	0,223
	52	S/2003 J12	0,00E+00	533,3	0,127023734	0,376
	53	S/2003 J13	0,00E+00	737,8	0,160430092	0,412
	54	S/2003 J14	0,00E+00	807,8	0,167114679	0,222
	55	S/2003 J15	0,00E+00	668,4	0,147060917	0,11
	56	S/2003 J16	0,00E+00	595,4	0,14037633	0,27
	57	S/2003 J17	0,00E+00	690,3	0,147060917	0,19
	58	S/2003 J18	0,00E+00	606,3	0,138370954	0,119
	59	S/2003 J19	0,00E+00	701,3	0,152408587	0,334
	60	S/2003 J20	0,00E+00	456,5	0,11430644	0,295
	61	S/2003 J21	0,00E+00	599	0,137702495	0,208
	62	S/2003 J22	0,00E+00	601	0,138370954	0,233
	63	S/2003 J23	0,00E+00	759,7	0,160801086	0,309
Saturno	1	Mimas	2.00E-08	0.94	0.001240659	0.021
	2	Encelado	3.84E-08	1.37	0.0015916	0.0045

Apéndices

	#	Nombre	Masa	Período orbital	Semieje mayor	excentricidad
Planeta	satélite	satélite	(masa/jup.)	(días)	(UA)	
	3	Tetis	3.27E-07	1.89	0.001969948	0.0001
	4	Dione	5.53E-07	2.74	0.002522763	0.0022
	5	Rea	1.31E-06	4.518	0.003523446	0.001
	6	Titán	7.11E-05	15.95	0.008167897	0.029
	7	Hiperion	9.32E-09	21.28	0.009786904	0.018
	8	Japeto	9.89E-07	79.33	0.023802478	0.028
	9	Febe	2.11E-09	548.2	0.086527301	0.164
	10	Jano	1.06E-09	0.7	0.001012715	0.007
	11	Epimeteo	2.95E-10	0.69	0.001012046	0.021
	12	Helena	1.58E-11	2.74	0.002522763	0.005
	13	Telesto	3.68E-12	1.89	0.001969948	0.001
	14	Calipso	2.11E-12	1.89	0.001969948	0.001
	15	Atlas	5.26E-12	0.602	0.000920468	0
	16	Prometeo	1.42E-10	0.613	0.000931831	0.002
	17	Pandora	1.16E-10	0.629	0.000947206	0.004
	18	Pan	1.58E-12	0.575	0.000893061	0
	19	Ymir	0,00E+00	1312.4	0,154387225	0,333
	20	Paaliaq	0,00E+00	686,9	0,10159904	0,364
	21	Tarvos	0,00E+00	925,6	0,121973662	0,536
	22	Ijiraq	0,00E+00	451,5	0,076471677	0,322
	23	Suttungr	0,00E+00	1016,3	0,13010212	0,114
	24	Kiviuq	0,00E+00	449,2	0,075970333	0,334
	25	Mundilfari	0,00E+00	951,4	0,125061941	0,208
	26	Albiorix	0,00E+00	783,5	0,109653968	0,478
	27	Skathi	0,00E+00	728,9	0,104593735	0,27
	28	Erriapo	0,00E+00	871,9	0,117755687	0,474
	29	Siarnaq	0,00E+00	893,1	0,121392103	0,295
	30	Thrymr	0,00E+00	1086,9	0,136245255	0,47
	31	S/ 2003 S1	0,00E+00	956,2	0,125128787	0,352
Urano	1	Ariel	6.68E-07	2.52	0.001276088	0.001
	2	Umbriel	6.68E-07	4.14	0.0017781	0.004
	3	Titania	1.84E-06	8.71	0.002916485	0.001
	4	Oberón	1.59E-06	13.46	0.003900457	0.001
	5	Miranda	0,00E+00	1,41	0,000868328	0,001
	6	Cordelia	0,00E+00	0,335	0,000332892	0,0003
	7	Ofelia	0,00E+00	0,376	0,000359631	0,01

Apéndices

	#	Nombre	Masa	Período orbital	Semieje mayor	excentricidad
Planeta	satélite	satélite	(masa/jup.)	(días)	(UA)	
	8	Bianca	0,00E+00	0,435	0,000395728	0,001
	9	Crésida	0,00E+00	0,464	0,000413107	0,0004
	10	Desdémona	0,00E+00	0,474	0,000419124	0,0001
	11	Julieta	0,00E+00	0,493	0,000430487	0,001
	12	Porcia	0,00E+00	0,513	0,000441851	0,0001
	13	Rosalinda	0,00E+00	0,558	0,000467253	0,0001
	14	Belinda	0,00E+00	0,624	0,000503349	0,0001
	15	Puck	0,00E+00	0,762	0,000574874	0,0001
	16	Caliban	0,00E+00	579,7	0,04833625	0,159
	17	Sycorax	0,00E+00	1288,3	0,081411587	0,522
	18	Prospero	0,00E+00	1977,3	0,108664649	0,445
	19	Setebos	0,00E+00	2234,8	0,116432139	0,591
	20	Sthepano	0,00E+00	677,4	0,053503436	0,229
	21	Trinculo	0,00E+00	759	0,056845729	0,22
	22	S/1986 U10	0,00E+00	0,638	0,000510836	0
	23	S/2001 U2	0,00E+00	2823,4	0,139714556	0,368
	24	S/2001 U3	0,00E+00	266,6	0,028583295	0,146
	25	S/2003 U1	0,00E+00	0,923	0,000653311	0
	26	S/2003 U2	0,00E+00	0,618	0,000500007	0
	27	S/2003 U3	0,00E+00	1694,8	0,095890403	0,661
Neptuno	1	Tritón	1.13E-05	5.88	0.002371692	0.000016
	2	Nereida	1.58E-08	360.1	0.036854803	0.7512
	3	Náyade	1.05E-10	0.294	0.000322197	0.0003
	4	Talasa	2.11E-10	0.311	0.000334898	0.0002
	5	Despina	1.05E-09	0.335	0.000350941	0.0001
	6	Galatea	2.11E-09	0.429	0.000414444	0.0001
	7	Larisa	2.63E-09	0.555	0.000491317	0.0014
	8	Proteo	2.63E-08	1.122	0.000786107	0.0004
	9	S/2002 N1	5.26E-11	1874.8	0.104854434	0.572
	10	S/2002 N2	5.26E-11	2925.6	0.149314893	0.137
	11	S/2002 N3	5.26E-11	2980.4	0.151159906	0.416
	12	S/2002 N4	0.00E+00	9007.1	0.316045075	0.605
	13	S/2003 N1	1.05E-11	9136.1	0.312424234	0.45
Plutón	1	Caronte	9.32E-07	6.38725	0.000131285	0.0002

Continuación de la tabla A

Nombre	#	Nombre	Fecha de	Nombre del	Tipo de satélite
Planeta	satélite	satélite	Descub.	Descubridor	
Tierra	1	Luna			Satélite regular
Marte	1	Fobos	1877	Asaph Hall	Satélite regular
	2	Deimos	1877	Asaph Hall	Satélite regular
Júpiter	1	Io	1610	Marius-Galileo	Satélite galileano
	2	Europa	1610	Marius-Galileo	Satélite galileano
	3	Ganimedes	1610	Marius-Galileo	Satélite galileano
	4	Calisto	1610	Marius-Galileo	Satélite galileano
	5	Amaltea	1892	E. Barnard	Satélite regular interno a los anillos
	6	Himalia	1904	C. Perrine	Satélite irregular
	7	Elara	1905	C. Perrine	Satélite irregular
	8	Pasifae	1908	P. Melotte	Satélite irregular retrógrado
	9	Sinope	1914	S. Nicholson	Satélite irregular retrógrado
	10	Lisitea	1938	S. Nicholson	Satélite irregular
	11	Carme	1938	S. Nicholson	Satélite irregular retrógrado
	12	Ananke	1951	S. Nicholson	Satélite irregular retrógrado
	13	Leda	1974	C. Kowal	Satélite irregular
	14	Tebe	1979	S. Synnott	Satélite regular interno a los anillos
	15	Adrastea	1979	Jewitt-Danielson	Satélite regular interno a los anillos
	16	Metis	1979	S Synnott	Satélite regular interno a los anillos
	17	Callirrhoe	1999	J.V.Scotti, McMillan	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	18	Themisto	2000	Sheppard, Jewitt, Fdez., Magnier	Satélite irregular interno
	19	Megaclite	2000	Sheppard, Jewitt, Fdez., Magnier	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	20	Taygete	2000	Sheppard, Jewitt, Fdez., Magnier	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	21	Chaldene	2000	Sheppard, Jewitt, Fdez., Magnier	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	22	Harpalyke	2000	Sheppard, Jewitt, Fdez., Magnier	Satélite irregular retrógrado
	23	Kalyke	2000	Sheppard, Jewitt, Fdez., Magnier	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	24	Iocaste	2000	Sheppard, Jewitt, Fdez., Magnier	Satélite irregular retrógrado
	25	Erinome	2000	Sheppard, Jewitt, Fdez., Magnier	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	26	Isonoe	2000	Sheppard, Jewitt, Fdez., Magnier	sat. retrógados irregulares 2001-2003

Apéndices

Nombre	#	Nombre	Fecha de	Nombre del	Tipo de satélite
Planeta	satélite	satélite	Descub.	Descubridor	
	27	Praxidike	2000	Sheppard, Jewitt, Fdez., Magnier	Satélite irregular retrógrado
	28	Autonoe	2001	Sheppard, Jewitt, Kleyna	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	29	Thyone	2001	Sheppard, Jewitt, Kleyna	Satélite irregular retrógrado
	30	Hermippe	2001	Sheppard, Jewitt, Kleyna	Satélite irregular retrógrado
	31	Aitne	2001	Sheppard, Jewitt, Kleyna	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	32	Eurydome	2001	Sheppard, Jewitt, Kleyna	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	33	Euanthe	2001	Sheppard, Jewitt, Kleyna	Satélite irregular retrógrado
	34	Euporie	2001	Sheppard, Jewitt, Kleyna	Satélite irregular retrógrado
	35	Orthosie	2001	Sheppard, Jewitt, Kleyna	Satélite irregular retrógrado
	36	Sponde	2001	Sheppard, Jewitt, Kleyna	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	37	Kale	2001	Sheppard, Jewitt, Kleyna	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	38	Pasithee	2001	Sheppard, Jewitt, Kleyna	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	39	S/2000 J11	2000	Sheppard, Jewitt, Fdez., Magnier	Satélite irregular
	40	S/2002 J1	2002	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	41	S/2003 J1	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	42	S/2003 J2	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	43	S/2003 J3	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	44	S/2003 J4	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	45	S/2003 J5	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	46	S/2003 J6	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	47	S/2003 J7	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	48	S/2003 J8	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	49	S/2003 J9	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	50	S/2003 J10	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	51	S/2003 J11	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	52	S/2003 J12	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	53	S/2003 J13	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003

Apéndices

Nombre	#	Nombre	Fecha de	Nombre del	Tipo de satélite
Planeta	satélite	satélite	Descub.	Descubridor	
	54	S/2003 J14	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	55	S/2003 J15	2003	S.S. Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	56	S/2003 J16	2003	B. Gladman	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	57	S/2003 J17	2003	B. Gladman	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	58	S/2003 J18	2003	B. Gladman	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	59	S/2003 J19	2003	B. Gladman	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	60	S/2003 J20	2003	Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	61	S/2003 J21	2003	Sheppard, Gladman	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	62	S/2003 J22	2003	Sheppard, Gladman	sat. retrógados irregulares 2001-2003
	63	S/2003 J23	2003	Sheppard	sat. retrógados irregulares 2001-2003
Saturno	1	Mimas	1789	W. Herschel	Satélite regular interno a los anillos
	2	Encelado	1789	W. Herschel	Satélite regular interno a los anillos
	3	Tetis	1684	G. Cassini	Satélite regular interno a los anillos
	4	Dione	1684	G. Cassini	Satélite regular interno a los anillos
	5	Rea	1672	G. Cassini	Satélite regular externo a los anillos
	6	Titán	1655	C. Huygens	Satélite regular externo a los anillos
	7	Hiperion	1848	W. Bond	Satélite regular externo a los anillos
	8	Japeto	1671	G Cassini	Satélite regular externo a los anillos
	9	Febe	1898	W. Pickering	Satélite irregular
	10	Jano	1966	A. Dollfus	Satélite regular interno a los anillos
	11	Epimeteo	1966	R. Walker	Satélite regular interno a los anillos
	12	Helena	1980	Laques-Lecacheux	Satélite regular interno a los anillos
	13	Telesto	1980	B. Smith	Satélite regular interno a los anillos
	14	Calipso	1980	B. Smith	Satélite regular interno a los anillos
	15	Atlas	1980	R. Terrile	Satélite regular interno a los anillos
	16	Prometeo	1980	S. Collins	Satélite regular interno a los anillos

Apéndices

Nombre Planeta	# satélite	Nombre satélite	Fecha de Descub.	Nombre del Descubridor	Tipo de satélite
	17	Pandora	1980	S. Collins	Satélite regular interno a los anillos
	18	Pan	1990	M. Showalter	Satélite regular interno a los anillos
	19	Ymir	2000	B. Gladman	Satélite irregular
	20	Paaliaq	2000	B. Gladman	Satélite irregular
	21	Tarvos	2000	Kavelaars, Gladman	Satélite irregular
	22	Ijiraq	2000	Kavelaars, Gladman	Satélite irregular
	23	Suttungr	2000	Kavelaars, Gladman	Satélite irregular
	24	Kiviuq	2000	B. Gladman	Satélite irregular
	25	Mundilfari	2000	Kavelaars, Gladman	Satélite irregular
	26	Albiorix	2000	Holman, Spahr	Satélite irregular
	27	Skathi	2000	Kavelaars, Gladman	Satélite irregular
	28	Erriapo	2000	Kavelaars, Gladman	Satélite irregular
	29	Siarnaq	2000	Kavelaars, Gladman	Satélite irregular
	30	Thrymr	2000	Kavelaars, Gladman	Satélite irregular
	31	S/ 2003 S1	2003	S.S. Sheppard	Satélite irregular
Urano	1	Ariel	1851	W. Lassell	Satélite regular
	2	Umbriel	1851	W. Lassell	Satélite regular
	3	Titania	1787	W. Herschel	Satélite regular
	4	Oberón	1787	W. Herschel	Satélite regular
	5	Miranda	1948	G. Kuiper	Satélite regular
	6	Cordelia	1986	Voyager 2	Satélite regular
	7	Ofelia	1986	Voyager 2	Satélite regular
	8	Bianca	1986	Voyager 2	Satélite regular
	9	Crésida	1986	Voyager 2, S.P. Synnott	Satélite regular
	10	Desdémona	1986	Voyager 2, S.P. Synnott	Satélite regular
	11	Julieta	1986	Voyager 2, S.P. Synnott	Satélite regular
	12	Porcia	1986	Voyager 2, S.P. Synnott	Satélite regular
	13	Rosalinda	1986	Voyager 2, S.P. Synnott	Satélite regular
	14	Belinda	1986	Voyager 2, S.P. Synnott	Satélite regular
	15	Puck	1985	Voyager 2, S.P. Synnott	Satélite regular
	16	Caliban	1997	Gladman, Nicholson,Burns,kavelaars	Satélite irregular
	17	Sycorax	1997	Gladman, Nicholson,Burns,kavelaars	Satélite irregular
	18	Prospero	1999	Holman, kavelaars,Gladman,Petit	Satélite irregular
	19	Setebos	1999	Kavelaars, Gladman,Holman,Scholl	Satélite irregular

Apéndices

Nombre	#	Nombre	Fecha de	Nombre del	Tipo de satélite
Planeta	satélite	satélite	Descub.	Descubridor	
	20	Sthepano	1999	Kavelaars, Gladman,Holman,Scholl	Satélite irregular
	21	Trinculo	2001	Holman,Kavelaars,Milisavljevic	Satélite irregular
	22	S/1986 U10	1999	Karkoschka,Voyager 2	Satélite irregular
	23	S/2001 U2	2001	Holman, Gladman	Satélite irregular
	24	S/2001 U3	2001	Holman, Gladman	Satélite irregular
	25	S/2003 U1	2003	Showalter, Lissauer	Satélite irregular
	26	S/2003 U2	2003	Showalter, Lissauer	Satélite irregular
	27	S/2003 U3	2003	S. S. Sheppard	Satélite irregular
Neptuno	1	Tritón	1846	W. Lassell	Satélite irregular
	2	Nereida	1949	G. Kuiper	Satélite irregular
	3	Náyade	1989	Voyager 2	Satélite regular
	4	Talasa	1989	Voyager 2	Satélite regular
	5	Despina	1989	Voyager 2	Satélite regular
	6	Galatea	1989	Voyager 2	Satélite regular
	7	Larisa	1989	S. Synnott	Satélite regular
	8	Proteo	1989	S. Synnott	Satélite regular
	9	S/2002 N1	2002	Kavel., Grav, Fraser, Milisavljevic	Satélite irregular
	10	S/2002 N2	2002	Kavel., Grav, Fraser, Milisavljevic	Satélite irregular
	11	S/2002 N3	2002	Kavel., Grav, Fraser, Milisavljevic	Satélite irregular
	12	S/2002 N4	2002	Holman, Gladman	Satélite irregular
	13	S/2003 N1	2003	Jewitt, Kleina, Sheppard	Satélite irregular
Plutón	1	Caronte	1978	Christy	Satélite regular

APENDICE B

Tabla B.1 Datos orbitales de los planetas extrasolares de las siguientes direcciones.

<http://vo.obspm.fr/exoplanetes/encyclo/catalog.php>,
http://exoplanets.org/planet_table.shtml,
<http://obswww.unige.ch/~udry/planet/planet.html>,
<http://www.dtm.ciw.edu/boss/IAU/div3/wgesp/planets.shtml>,
http://planetquest1.jpl.nasa.gov/atlas_espanol/atlas_index.cfm.
<http://www.ciw.edu/boss/IAU/div3/wgesp/planets.shtml>

#	Nombre	M sin i	Período	Semieje mayor	excentricidad	Clasificación de
P	Planeta	(Mjup)	(días)	(UA)		Exoplanetas
1	OGLE-TR-56 b	1,45	1,2119189	0,0225	0	caliente, semej jup, periodo corto
2	OGLE-TR-113 b	1,35	1,4324758	0,0228	0	caliente, semej jup, periodo corto
3	OGLE-TR-132 b	1,19	1,689857	0,0306	0	caliente, semej jup, periodo corto
4	Gliese 876 d	0,023	1,93776	0,0208067	0	caliente, poco masivo, periodo corto
5	Gliese 876 c	0,56	30,1	0,13	0,27	caliente, excentrico, periodo corto
6	Gliese 876 b	1,935	60,94	0,20783	0,0249	caliente, semej jup, periodo corto
7	HD 189733 b	1,15	2,218574	0,0313	0	caliente, semej jup, periodo corto
8	HD 212301 b	0,045	2,457	0,036	0	caliente, poco masivo, periodo corto
9	HD 73256 b	1,87	2,54858	0,037	0,03	caliente, semej jup, periodo corto
10	GJ 436 b	0,067	2,6441	0,0278	0,12	caliente, poco masivo, periodo corto
11	55 Cnc e	0,045	2,81	0,038	0,174	caliente, poco masivo, periodo corto
12	55 Cnc b	0,784	14,67	0,115	0,0197	caliente, periodo corto
13	55 Cnc c	0,217	43,93	0,24	0,44	caliente, excéntrico, periodo corto
14	55 Cnc d	3,92	4517,4	5,257	0,327	excéntrico
15	HD 63454 b	0,38	2,81782	0,036	0	caliente, periodo corto
16	HD 149026 b	0,36	2,8766	0,042	0	caliente, periodo corto
17	HD 83443 b	0,41	2,9853	0,04	0,08	caliente, periodo corto
18	HD 46375 b	0,249	3,024	0,041	0,04	caliente, periodo corto
19	TrES-1	0,61	3,030065	0,0393	0,135	caliente, periodo corto
20	HD 179949 b	0,98	3,092	0,04	0,05	caliente, periodo corto
21	HD 187123 b	0,52	3,097	0,042	0,03	caliente, periodo corto
22	OGLE-TR-10 b	0,54	3,101269	0,04162	0	caliente, periodo corto
23	Tau Boo b	4,13	3,312	0,05	0,01	caliente, periodo corto
24	HD 188753A b	1,14	3,3481	0,0446	0	caliente, semej jup, periodo corto

Apéndices

#	Nombre	M sin i	Período	Semieje mayor	excentricidad	Clasificación de
P	Planeta	(M _{jup})	(días)	(UA)		exoplanetas
25	HD 330075 b	0,76	3,369	0,043	0	caliente, periodo corto
26	HD 88133 b	0,22	3,41	0,047	0,11	caliente, periodo corto
27	HD 2638 b	0,48	3,4442	0,044	0	caliente, periodo corto
28	BD-10 3166 b	0,48	3,487	0,046	0,07	caliente, periodo corto
29	HD 75289 b	0,42	3,51	0,046	0,054	caliente, periodo corto
30	HD 209458 b	0,69	3,52474541	0,045	0,07	caliente, periodo corto
31	HD 76700 b	0,197	3,971	0,049	0,13	caliente, periodo corto
32	OGLE-TR-111 b	0,53	4,0161	0,047	0	caliente, periodo corto
33	HD 149143 b	1,33	4,072	0,053	0,016	caliente, semej jup, periodo corto
34	HD 102195 b	0,48	4,115	0,049	0,06	caliente, periodo corto
35	51 Peg b	0,468	4,23077	0,052	0	caliente, periodo corto
36	Ups And b	0,69	4,617	0,059	0,012	caliente, periodo corto
37	Ups And c	1,89	241,5	0,829	0,28	excentrico, semej jup
38	Ups And d	3,75	1284	2,53	0,27	excentrico
39	HD 49674 b	0,12	4,948	0,0568	0,16	caliente, periodo corto
40	HD 109749 b	0,28	5,24	0,0635	0,01	caliente, periodo corto
41	GI 581 b	0,056	5,366	0,041	0	caliente, poco masivo, periodo corto
42	HD 118203 b	2,13	6,1335	0,07	0,309	caliente, excentrico, periodo corto
43	HD 68988 b	1,9	6,276	0,071	0,14	caliente, semej jup, periodo corto
44	HD 168746 b	0,23	6,403	0,065	0,081	caliente, periodo corto
45	HD 217107 b	1,37	7,1269	0,074	0,13	caliente, semej jup, periodo corto
46	HD 217107 c	2,1	3150	4,3	0,55	excentrico
47	HD 162020 b	13,75	8,428198	0,072	0,277	caliente, excent, muy masivo, p. corto
48	HD 160691 d	0,044	9,55	0,09	0	caliente, poco masivo, periodo corto
49	HD 160691 b	1,67	654,5	1,5	0,31	caliente, excentrico, semej jup
50	HD 160691 c	3,1	2986	4,17	0,57	excentrico
51	HD 130322 b	1,08	10,724	0,088	0,048	caliente, semej jup, periodo corto
52	HD 108147 b	0,4	10,901	0,104	0,498	caliente, excentrico, periodo corto
53	HD 38529 b	0,78	14,309	0,129	0,29	caliente, excentrico, periodo corto
54	HD 38529 c	12,7	2174,3	3,68	0,36	excentrico
55	HD 4308 b	0,047	15,56	0,144	0	caliente, poco masivo, periodo corto
56	GI 86 b	4,01	15,766	0,11	0,046	caliente, periodo corto
57	HD 99492 b	0,122	17,038	0,119	0,05	caliente, periodo corto
58	HD 190360 c	0,057	17,1	0,128	0,01	caliente, poco masivo, periodo corto
59	HD 190360 b	1,502	2891	3,92	0,36	excentrico, semej jup

Apéndices

#	Nombre	M sin i	Período	Semieje mayor	excentricidad	Clasificación de
P	Planeta	(M _{jup})	(días)	(UA)		exoplanetas
60	HD 27894 b	0,62	17,991	0,122	0,049	caliente, periodo corto
61	HD 195019 b	3,43	18,3	0,14	0,05	caliente, periodo corto
62	HD 102117 b	0,14	20,67	0,149	0,06	caliente, periodo corto
63	HD 6434 b	0,48	22,09	0,15	0,3	caliente, excentrico, periodo corto
64	HD 192263 b	0,72	24,348	0,15	0	caliente, periodo corto
65	HD 11964 b	0,11	37,82	0,229	0,15	caliente, periodo corto
66	rho CrB b	1,04	39,945	0,22	0,04	caliente, semej jup, periodo corto
67	HD 74156 b	1,86	51,643	0,294	0,636	caliente, excent, semej jup, p. corto
68	HD 74156 c	6,17	2025	3,4	0,583	excentrico
69	HD 117618 b	0,19	52,2	0,28	0,39	caliente, excentrico, periodo corto
70	HD 37605 b	2,3	55	0,25	0,677	caliente, excentrico, periodo corto
71	HD 168443 b	7,2	58,116	0,29	0,529	caliente, excentrico, periodo corto
72	HD 168443 c	17,1	1739,5	2,87	0,228	muy masivo
73	HD 3651 b	0,2	62,23	0,284	0,63	caliente, excentrico, periodo corto
74	HD 121504 b	0,89	64,6	0,32	0,13	caliente, periodo corto
75	HD 101930 b	0,3	70,46	0,302	0,11	caliente, periodo corto
76	HD 178911 B b	6,292	71,487	0,32	0,1243	caliente, periodo corto
77	HD 16141 b	0,23	75,56	0,35	0,21	caliente, periodo corto
78	HD 114762 b	11,02	83,89	0,3	0,34	caliente, excentrico, periodo corto
79	HD 80606 b	3,41	111,78	0,439	0,927	excentrico
80	70 Vir b	7,44	116,689	0,48	0,4	excentrico
81	HD 216770 b	0,65	118,45	0,46	0,37	excentrico
82	HD 52265 b	1,13	118,96	0,49	0,29	excentrico, semej jup
83	HD 208487 b	0,45	123	0,49	0,32	excentrico
84	HD 34445 b	0,58	126	0,51	0,4	excentrico
85	GJ 3021 b	3,32	133,82	0,49	0,505	excentrico
86	HD 93083 b	0,37	143,58	0,477	0,14	no entran en ninguna clasificación
87	HD 37124 b	0,61	152,46	0,53	0,055	no entran en ninguna clasificación
88	HD 37124 c	0,6	843,6	1,64	0,14	no entran en ninguna clasificación
89	HD 37124 d	0,66	2295	3,19	0,2	no entran en ninguna clasificación
90	HD 219449 b	2,9	182	0,3	0	caliente
91	HD 73526 b	3	190,5	0,66	0,34	excentrico
92	HD 104985 b	6,3	198,2	0,78	0,03	no entran en ninguna clasificación
93	HD 82943 c	0,88	221,6	0,73	0,54	excentrico
94	HD 82943 b	1,63	444,6	1,16	0,41	excentrico, semej jup

Apéndices

#	Nombre	M sin i	Período	Semieje mayor	excentricidad	Clasificación de
P	Planeta	(M _{jup})	(días)	(UA)		exoplanetas
95	HD 169830 b	2,88	225,62	0,81	0,31	excentrico
96	HD 169830 c	4,04	2102	3,6	0,33	excentrico
97	HD 8574 b	2,23	228,8	0,76	0,4	excentrico
98	HD 202206 b	17,4	255,87	0,83	0,435	excentrico, muy masivo
99	HD 202206 c	2,44	1383,4	2,55	0,267	excentrico
100	HD 89744 b	7,99	256,605	0,89	0,67	excentrico
101	HD 134987 b	1,58	260	0,78	0,24	semej jup
102	HD 12661 b	2,3	263,6	0,83	0,35	excentrico
103	HD 12661 c	1,57	1444,5	2,56	0,2	semej jup
104	HD 150706 b	1	264	0,82	0,38	excentrico, semej jup
105	HD 40979 b	3,32	267,2	0,811	0,23	no entran en ninguna clasificación
106	HD 59686 b	5,25	303	0,911	0	no entran en ninguna clasificación
107	HR 810 b	1,94	311,288	0,91	0,24	semej jup
108	HD 142 b	1	337,112	0,98	0,38	excentrico, semej jup
109	HD 92788 b	3,86	377,7	0,97	0,27	excentrico
110	HD 28185 b	5,7	383	1,03	0,07	no entran en ninguna clasificación
111	HD 196885 b	1,84	386	1,12	0,3	excentrico, semej jup
112	HD 142415 b	1,62	386,3	1,05	0,5	excentrico, semej jup
113	HD 33564 b	9,1	388	1,1	0,34	excentrico
114	HD 177830 b	1,28	391	1	0,43	excentrico, semej jup
115	HD 108874 b	1,36	395,4	1,051	0,07	semej jup
116	HD 108874 c	1,018	1605,8	2,68	0,25	excentrico, semej jup
117	HD 154857 b	1,8	398,5	1,11	0,51	excentrico, semej jup
118	HD 4203 b	1,65	400,944	1,09	0,46	excentrico, semej jup
119	HD 128311 b	2,58	420,514	1,02	0,3	excentrico
120	HD 128311 c	3,21	919	1,76	0,17	no entran en ninguna clasificación
121	HD 27442 b	1,28	423,841	1,18	0,07	semej jup
122	HD 210277 b	1,24	435,6	1,097	0,45	excentrico, semej jup
123	HD 19994 b	2	454	1,3	0,2	no entran en ninguna clasificación
124	HD 188015 b	1,26	456,46	1,19	0,15	semej jup
125	HD 13189 b	14	471,6	1,85	0,28	excentrico, muy masivo
126	HD 20367 b	1,07	500	1,25	0,23	semej jup
127	HD 114783 b	0,99	501	1,2	0,1	no entran en ninguna clasificación
128	HD 147513 b	1	540,4	1,26	0,52	excentrico, semej jup
129	lota draconis b	8,64	550,651	1,34	0,71	excentrico
130	HD 222582 b	5,11	572	1,35	0,76	excentrico
131	HD 65216 b	1,21	613,1	1,37	0,41	excentrico, semej jup
132	HD 183263 b	3,69	634,23	1,52	0,38	excentrico
133	HD 141937 b	9,7	653,22	1,52	0,41	excentrico
134	HD 41004 A b	2,3	655	1,31	0,39	excentrico

Apéndices

#	Nombre	M sin i	Período	Semieje mayor	excentricidad	Clasificación de
P	Planeta	(M _{jup})	(días)	(UA)		exoplanetas
135	HD 11977 b	6,54	711	1,93	0,4	excentrico
136	HD 47536 b	4,96	712,13	1,61	0,2	no entran en ninguna clasificación
137	HD 23079 b	2,61	738,459	1,65	0,1	no entran en ninguna clasificación
138	16 Cyg B b	1,69	798,938	1,67	0,67	excentrico, semej jup
139	HD 4208 b	0,8	812,197	1,67	0,05	no entran en ninguna clasificación
140	HD 114386 b	0,99	872	1,62	0,28	excentrico
141	HD 45350 b	0,98	890,76	1,77	0,78	excentrico
142	Gamma Cephei b	1,59	902,26	2,03	0,2	semej jup
143	HD 213240 b	4,5	951	2,03	0,45	excentrico
144	HD 81040 b	6,86	1001,7	1,94	0,526	excentrico
145	HD 10647 b	0,91	1040	2,1	0,18	no entran en ninguna clasificación
146	HD 10697 b	6,12	1077,906	2,13	0,11	no entran en ninguna clasificación
147	47 Uma b	2,54	1089	2,09	0,061	no entran en ninguna clasificación
148	47 Uma c	0,76	2594	3,73	0,1	no entran en ninguna clasificación
149	HD 190228 b	4,99	1127	2,31	0,43	excentrico
150	HD 114729 b	0,82	1131,478	2,08	0,31	excentrico
151	HD 111232 b	6,8	1143	1,97	0,2	no entran en ninguna clasificación
152	HD 2039 b	4,85	1192,582	2,19	0,68	excentrico
153	HD 136118 b	11,9	1209	2,3	0,37	excentrico
154	HD 50554 b	4,9	1279	2,38	0,42	excentrico
155	HD 196050 b	3	1289	2,5	0,28	excentrico
156	HD 216437 b	2,1	1294	2,7	0,34	excentrico
157	HD 216435 b	1,49	1442,919	2,7	0,34	excentrico, semej jup
158	HD 106252 b	6,81	1500	2,61	0,54	excentrico
159	HD 23596 b	7,19	1558	2,72	0,314	excentrico
160	14 Her b	4,74	1796,4	2,8	0,338	excentrico
161	HD 142022 A b	4,4	1923	2,8	0,57	excentrico
162	HD 39091 b	10,35	2063,818	3,29	0,62	excentrico
163	HD 70642 b	2	2231	3,3	0,1	no entran en ninguna clasificación
164	HD 33636 b	9,28	2447,292	3,56	0,53	excentrico
165	Epsilon Eridani b	0,86	2502,1	3,3	0,608	excentrico
166	HD 50499 b	1,71	2582,7	3,86	0,23	semej jup
167	HD 117207 b	2,06	2627,08	3,78	0,16	no entran en ninguna clasificación
168	HD 30177 b	9,17	2819,654	3,86	0,3	excentrico
169	HD 89307 b	2,73	3090	4,15	0,27	excentrico

Apéndices

#	Planetas detectados	M sin i	Período	Semieje mayor	excentricidad	Tipo de
170	HD 72659 b	2,96	3177,4	4,16	0,2	no entran en ninguna clasificación
P	imagen directa	Mjup	días	UA		planeta
1	2M1207 b	5	894,25	55	0	
2	GQ Lup b	21,5		103		Muy masivo
3	AB Pic b	13,5		275		Muy masivo
#	Planetas detectados	M sin i	Período	Semieje mayor	excentricidad	Tipo de
P	Microlentes	Mjup	días	UA		planeta
1	OGLE 2003-BLG-235	2	0	2,9	0	
2	OGLE 2005-BLG-071	2,7	2920	3	0	
3	OGLE 2005-BLG-390	0,018	3800	2,6	0	

Tabla B.2 Más datos sobre exoplanetas

#	año	Método	Institución	Referencias	Planetas en ZHC
P	Descub.				
1	2002	Tránsito	Eso-Harps	Udalski et al. 2002	NO
2	2004	Tránsito	Flames-Uves	Bouchy et al. 2004	NO
3	2004	Tránsito	Flames-Uves	Bouchy et al. 2005	NO
4	2005	Velocidad radial	HIRES/Marcy, Hamilton	Rivera et al. 2005	NO
5	2000	Velocidad radial	Keck,Hamilton,Hires/Marcy	Marcy et al. 2001	NO
6	2000	Velocidad radial	Keck,Coralie,Elodie,Hamil,Hires/Marcy	Marcy et al. 1998	SI
7	2005	Velocidad radial	Elodie	Bouchy et al. 2005	NO
8	2005	Velocidad radial	ESO-HARPS		NO
9	2003	Velocidad radial	Coralie	Udry et al. 2003	NO
10	2004	Velocidad radial	HIRES/Marcy	Butler et al. 2004	NO
11	2004	Velocidad radial	HET-HRS	McArthur et al. 2004	NO
12	1996	Velocidad radial	Lick,Elodie, Hamilton	Butler et al. 1997	NO
13	2002	Velocidad radial	Lick,Hamilton	Marcy et al. 2002	NO
14	2002	Velocidad radial	Lick,Elodie,Hamilton	Marcy et al. 2002	NO
15	2005	Velocidad radial	Coralie, ESO_HARPS	Moutou et al. 2005	NO
16	2005	Velocidad radial	N2K consortium (i.e. Keck, Magellan & Subaru)	Sato et al. 2005	NO
17	2002	Velocidad radial	Coralie, Hires/Marcy,Keck	Butler et al. 2002a	NO
18	2000	Velocidad radial	Hires/Marcy,Keck	Marcy et al. 2000	NO
19	2004	Tránsito	TrES	Alonso et al. 2004	NO
20	2000	Velocidad radial	Anglo-Austr.Telesc.(AAT)	Tinney et al. 2001	NO
21	1998	Velocidad radial	Elodie,Hires/marcy,Keck	Butler et al. 1998	NO
22	2004	Tránsito	FLAMES-UVES, OGLE	Konacki et al. 2005	NO
23	1996	Velocidad radial	Hamilton, AFOE	Butler et al. 1997	NO
24	2005	Velocidad radial	HIRES/Konacki	Konacki 2005	NO
25	2004	Velocidad radial	Eso-Harps	Pepe et al. 2004	NO
26	2004	Velocidad radial	N2K consortium (i.e. Keck, Magellan & Subaru),	Fischer et al. 2005	NO
27	2005	Velocidad radial	ESO-HARPS	Moutou et al. 2005	NO
28	2000	Velocidad radial	Hires/Marcy, Keck	Butler et al. 2000	NO
29	1999	Velocidad radial	Coralie,Anglo-Austr.(AAT)	Udry et al. 2000	NO
30	1999	Velocidad radial	Coralie,Elodie,H/latham,H/marcy,Keck	Henry et al. 2000	NO
31	2002	Velocidad radial	Anglo-Austr.Telesc.(AAT)	Tinney et al. 2002b	NO
32	2004	Tránsito	ESO,obs.Genova,obs.Lisboa,lab.Fran.	Pont et al. 2004	NO
33	2005	Velocidad radial	Elodie, N2K consortium		NO
34	2005	Velocidad radial			NO
35	1995	Velocidad radial	Elodie y Lick,Hamilton,Afoe	Mayor & Queloz 1995	NO
36	1996	Velocidad radial	Lick,Elodie, Hamilton	Butler et al. 1997	NO
37	1999	Velocidad radial	Lick,Elodie,Hamilton,Afoe	Butler et al. 1999	NO
38	1999	Velocidad radial	Lick,Elodie,Hamilton,Afoe	Butler et al. 1999	SI
39	2002	Velocidad radial	Keck, Hamilton	Butler et al. 2003	NO
40	2005	Velocidad radial	N2K consortium		NO

Apéndices

#	año	Método	Institución	Referencias	Planetas en ZHC
P	Descub.				
41	2005	Velocidad radial	ESO-HARPS	Bonfils et al. 2005	NO
42	2005	Velocidad radial	Elodie		NO
43	2001	Velocidad radial	Keck, Hires/Marcy	Vogt et al. 2002	NO
44	2002	Velocidad radial	Coralie	Pepe et al. 2002	NO
45	1998	Velocidad radial	Keck,Lick,Coralie, Hamil,Hires/Marcy	Fischer et al. 1999	NO
46	1998	Velocidad radial		Vogt et al. 2005	NO
47	2002	Velocidad radial	Coralie	Udry et al. 2002	NO
48	2004	Velocidad radial		Santos et al. 2004	NO
49	2000	Velocidad radial	Anglo-Aust.Telesc.(AAT)	Butler et al. 2001	SI
50	2004	Velocidad radial	ESO-HARPS	McCarthy et al. 2004	NO
51	1999	Velocidad radial	Coralie	Udry et al. 2000	NO
52	2002	Velocidad radial	Coralie	Pepe et al. 2002	NO
53	2000	Velocidad radial	lick y keck,Hamilton,Hires/Marcy	Fischer et al. 2001	NO
54	2002	Velocidad radial	lick y keck,Hamilton,Hires/Marcy	Fischer et al. 2003a	NO
55	2005	Velocidad radial	ESO-HARPS		NO
56	2000	Velocidad radial	La silla y Anglo-Austr.Telesco.(AAT)	Queloz et al. 2000	NO
57	2004	Velocidad radial	HIRES/Marcy	Marcy et al. 2005	NO
58	2005	Velocidad radial	HIRES/Marcy	Vogt et al. 2005	NO
59	2003	Velocidad radial	Ues,Elodie,Afoe	Naef et al. 2003	NO
60	2005	Velocidad radial	ESO-HARPS	Moutou et al. 2005	NO
61	1998	Velocidad radial	Lick, Hamilton	Fischer et al. 1999	NO
62	2004	Velocidad radial	Anglo-Aust.telesc.(AAT)	Tinney et al. 2005	NO
63	2000	Velocidad radial	Coralie	Mayor et al. 2004	NO
64	2003	Velocidad radial	Feros	Santos et al. 2003	NO
65	2005	Velocidad radial			NO
66	1997	Velocidad radial	Lick,Hamilton,Afoe	Noyes et al. 1997	NO
67	2003	Velocidad radial	Feros	Naef et al. 2004	NO
68	2003	Velocidad radial	Feros,Coralie,Elodie	Naef et al. 2004	NO
69	2004	Velocidad radial	Anglo-Aust.telesc.(AAT)	Tinney et al. 2005	NO
70	2004	Velocidad radial	HET-HRS	Cochran et al. 2004	NO
71	1998	Velocidad radial	Keck,Coralie,Hires/Marcy	Marcy et al. 1999	NO
72	2001	Velocidad radial	Keck,Coralie,Hires/Marcy		NO
73	2003	Velocidad radial	Keck,Hamilton,Hires/Marcy	Fischer et al. 2003b	NO
74	2003	Velocidad radial	Coralie	Mayor et al. 2004	NO
75	2005	Velocidad radial	ESO-HARPS	Lovis et al. 2005	NO
76	2001	Velocidad radial	Elodie	Zucker et al. 2002	NO
77	2000	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy	Marcy et al. 2000	NO
78	1989	Velocidad radial	Lick,Elodie,Hamilton,Hires/Latham	Latham et al. 1989	NO
79	2003	Velocidad radial	Coralie	Naef et al. 2001b	NO
80	1996	Velocidad radial	Keck,Elodie,Hamilton	Marcy y Butler 1996	NO
81	2003	Velocidad radial	Coralie	Mayor et al. 2004	SI
82	2000	Velocidad radial	KeckCoralie,Hires/Marcy	Butler et al. 2000	NO
83	2004	Velocidad radial	Anglo-Aust.telesc.(AAT)	Tinney et al. 2005	NO

Apéndices

#	año	Método	Institución	Referencias	Planetas en ZHC
P	Descub.				
84	2004	Velocidad radial			NO
85	2000	Velocidad radial	Coralie	Naef. et al. 2001a	NO
86	2005	Velocidad radial	ESO-HARPS	Lovis et al. 2005	SI
87	1999	Velocidad radial	KeckCoralie,Elodie,Hires/Marcy	Vogt et al. 2000	NO
88	2002	Velocidad radial	Keck,Coralie,Elodie,Hires/Marcy	Butler et al. 2003	NO
89	2005	Velocidad radial	HIRES/Marcy	Vogt et al. 2005	NO
90	2003	Velocidad radial	Anglo-Aust.Telesc.(AAT)		NO
91	2002	Velocidad radial	Anglo-Aust.Telesc.(AAT)	Tinney et al. 2002b	NO
92	2003	Velocidad radial	Hides-OAO	Sato et al. 2003	SI
93	2003	Velocidad radial	Coralie y Uves	Mayor et al. 2004	SI
94	2003	Velocidad radial	Coralie y Uves	Mayor et al. 2004	SI
95	2000	Velocidad radial	Coralie	Naef. et al. 2001a	NO
96	2003	Velocidad radial	Coralie	Mayor et al. 2004	NO
97	2002	Velocidad radial	Sarg	Perrier et al. 2003	NO
98	2002	Velocidad radial	Coralie	Correia et al. 2005	SI
99	2004	Velocidad radial	Coralie		NO
100	2000	Velocidad radial	Lick,Hamilton,Afoe	Korzennik et al.2000	NO
101	1999	Velocidad radial	Anglo-Aust.(AAT),Hires/Marcy	Vogt et al. 2000	SI
102	2000	Velocidad radial	lick y keck,Hamilton,Hires/Marcy	Fischer et al. 2001	SI
103	2002	Velocidad radial	lick y keck,Hamilton,Hires/Marcy	Fischer et al. 2003a	NO
104	2002	Velocidad radial	Elodie,Ues		SI
105	2002	Velocidad radial	lick y keck,Hamilton,Hires/Marcy	Fischer et al. 2003a	NO
106	2003	Velocidad radial	Hamilton		NO
107	1999	Velocidad radial	ESO,Coralie,AAT	Kürster et al. 2001	SI
108	2001	Velocidad radial	AAT	Tinney et al. 2002a	SI
109	2000	Velocidad radial	Coralie,Hamilton,Lick	Fischer et al. 2001	SI
110	2001	Velocidad radial	Coralie	Santos et al. 2001	SI
111	2004	Velocidad radial			NO
112	2003	Velocidad radial	Coralie	Mayor et al. 2004	SI
113	2005	Velocidad radial	Elodie	Galland et al. 2005	NO
114	1999	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy	Vogt et al. 2000	NO
115	2003	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy	Butler et al. 2003	SI
116	2005	Velocidad radial	HIRES/Marcy	Vogt et al. 2005	NO
117	2004	Velocidad radial		McCarthy et al. 2004	SI
118	2001	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy	Vogt et al. 2002	SI
119	2002	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy	Butler et al. 2003	NO
120	2005	Velocidad radial	HIRES/Marcy	Vogt et al. 2005	NO
121	2000	Velocidad radial	Anglo-Aust.telesc.(AAT)	Butler et al. 2001	NO
122	1998	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy,Coralie	Marcy et al. 1999	SI
123	2003	Velocidad radial	Coralie, Feros, Uves	Mayor et al. 2004	NO
124	2004	Velocidad radial	HIRES/Marcy	Marcy et al. 2005	SI
125	2005	Velocidad radial	McDonald, HET-HRS, TOPS (Tautenburg)	Hatzes et al. 2005	NO
126	2002	Velocidad radial	Elodie		SI

Apéndices

#	año	Método	Institución	Referencias	Planetas en ZHC
P	Descub.				
127	2001	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy	Vogt et al. 2002	NO
128	2003	Velocidad radial	Coralie	Mayor et al. 2004	SI
129	2002	Velocidad radial	Lick,Hamilton	Frink et al. 2002	NO
130	1999	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy	Vogt et al. 2000	SI
131	2003	Velocidad radial	Coralie	Mayor et al. 2004	SI
132	2004	Velocidad radial	HIRES/Marcy	Marcy et al. 2005	SI
133	2002	Velocidad radial	Coralie	Udry et al. 2002	SI
134	2004	Velocidad radial	Coralie	Zucker et al. 2004	NO
135	2005	Velocidad radial	ESO-Feros	Setiawan et al. 2005	NO
136	2003	Velocidad radial	Coralie y Eso-Feros	Setiawan et al. 2003	NO
137	2001	Velocidad radial	Anglo-Aust.Telesc.(AAT)	Tinney et al. 2002a	SI
138	1996	Velocidad radial	Lick,Hamilton,McDonald	Cochran et al. 1997	NO
139	2001	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy	Vogt et al. 2002	NO
140	2003	Velocidad radial	Coralie	Mayor et al. 2004	NO
141	2004	Velocidad radial	HIRES/Marcy	Marcy et al. 2005	NO
142	2003	Velocidad radial	MacDonald	Hatzes et al. 2003	NO
143	2001	Velocidad radial	Coralie	Santos et al. 2001	NO
144	2005	Velocidad radial	HIRES/Latham, Elodie		NO
145	2003	Velocidad radial	Coralie		SI
146	2000	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy	Vogt et al. 2000	NO
147	1996	Velocidad radial	Lick,Elodie,Hamilton	Butler y Marcy 1996	NO
148	2001	Velocidad radial	Lick,Hamilton	Fischer et al. 2002a	NO
149	2002	Velocidad radial	Elodie,Ues y Sarg	Terrier et al. 2003	NO
150	2002	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy	Butler et al. 2003	NO
151	2004	Velocidad radial	Coralie	Mayor et al. 2004	NO
152	2002	Velocidad radial	Anglo-Aust.Telesc.(AAT)	Tinney et al. 2002b	NO
153	2002	Velocidad radial	Lick,Hamilton	Fisher et al. 2002	SI
154	2002	Velocidad radial	Lick,Hamilton,Elodie,Hires/Marcy	Fischer et al. 2002b	SI
155	2002	Velocidad radial	Anglo-Aust.Telesc.(AAT),coralie	Jones et al. 2002b	NO
156	2002	Velocidad radial	Anglo-Aust.Telesc.(AAT),coralie	Jones et al. 2002b	NO
157	2002	Velocidad radial	Anglo-Aust.Telesc.(AAT)	Jones et al.2003	NO
158	2002	Velocidad radial	Lick,Elodie,Hamilton,Coralie, ESO etc.	Fischer et al. 2002b	NO
159	2002	Velocidad radial	Elodie,Ues	Perrier et al. 2003	SI
160	2002	Velocidad radial	Keck,Elodie,Hires/Marcy	Butler et al. 2003	NO
161	2005	Velocidad radial	Coralie, ESO-HARPS		NO
162	2001	Velocidad radial	Anglo-Aust.Telesc.(AAT)	Jones et al. 2002	NO
163	2003	Velocidad radial	Anglo-Aust.Telesc.(AAT)	Carter et al. 2003	NO
164	2001	Velocidad radial	Keck,Coralie,Elodie,H/M	Vogt et al. 2002	NO
165	2000	Astrometría	Lick,Hamilton,McDonald,Eso-Ces	Hatzes et al. 2000	NO
166	2005	Velocidad radial	HIRES/Marcy	Vogt et al. 2005	NO
167	2004	Velocidad radial	HIRES/Marcy	Marcy et al. 2005	NO
168	2002	Velocidad radial	Anglo-Aust.Telesc.(AAT)	Tinney et al. 2002b	NO
169	2004	Velocidad radial			NO
170	2002	Velocidad radial	Keck,Hires/Marcy	Butler et al. 2003	NO

Tabla B.3 Más datos sobre exoplanetas

#	alfa	delta	Nombre del	Dist. Ang.	Radio	Densidad	última fecha
P	Ascensión Recta	Declinación	Descubridor	(arcsec)	R _{jup}	g*cm ⁻³	actualización
1	17 56 35	-29 32 21	Udalski et al.	1,50E-05	1,23	1	22/08/2005
2	10 52 24	-61 26 48	Bouchy et al.	1,50E-05	1,09	1	13/04/2005
3	10 50 34	-61 57 25	Bouchy et al.	2,00E-05	1,13	1,02	13/04/2005
4	22 53 13	-14 15 13	Rivera et al.	0,004408	0	0	22/08/2005
5	22 53 13	-14 15 13	Marcy et al.	0,027542	0	0	19/12/2005
6	22 53 13	-14 15 13	Marcy et al.	0,044032	0	0	19/12/2005
7	20 00 43	+22 42 39	Bouchy et al.	0.001622	1.26	0	15/10/2005
8	22 27 30	-77 43 04		0.000683	0	0	31/01/2006
9	08 36 23	-30 02 15	Udry et al.	0,001	0	0	11/04/2005
10	11 42 11	+26 42 23	Butler et al.	0,003	0	0	11/04/2005
11	08 52 37	+28 20 02	McArthur et al.	0,003	0	0	11/04/2005
12	08 52 37	+28 20 02	Butler et al.	0,009	0	0	09/01/2006
13	08 52 37	+28 20 02	Marcy et al.	0,018	0	0	11/04/2005
14	08 52 37	+28 20 02	Marcy et al.	0,392	0	0	11/04/2005
15	07 39 21	-78 16 44	Moutou et al.	0,001	0	0	22/08/2005
16	16 30 29	+38 20 50	Sato et al.	0,000532	0.725	0	13/02/2006
17	09 37 11	-43 16 19	Butler et al.	0,001	0	0	12/04/2005
18	06 33 12	+05 27 46	Marcy et al.	0,001	0	0	12/04/2005
19	19 04 09	+36 37 57	Alonso et al.	0,00025	1.08	0	03/11/2005
20	19 15 33	-24 10 45	Tinney et al.	0,001481	0	0	22/04/2005
21	19 46 57	+34 25 15	Butler et al.	0,001	0	0	11/04/2005
22	17 51 28	-29 52 34	Konacki et al.	2,80E-05	1,24	0,38	22/08/2005
23	13 47 17	+17 27 22	Butler et al.	0,003	0	0	24/10/2005
24	19 54 58	+41 52 17	Konacki	0,000995	0	0	24/08/2005
25	15 49 37	-49 57 48	Pepe et al.	0,001	0	0	18/08/2005
26	10 10 07	+18 11 12	Fischer et al.	0,001	0	0	20/08/2005
27	00 29 59	-05 45 50	Moutou et al.	0,001	0	0	08/09/2005
28	10 58 28	-10 46 13	Butler et al.	-	0	0	22/08/2005
29	08 47 40	-41 44 12	Udry et al.	0,002	0	0	11/04/2005
30	22 03 10	+18 53 04	Henry et al.	0,000957	1,4	0,31	22/08/2005
31	08 53 55	-66 48 03	Tinney et al.	0,001	0	0	22/08/2005
32	10 53 1	-61 24 20	Pont et al.	3,10E-05	1	0,61	13/04/2005
33	16 32 51	+02 05 05		0.000841	0	0	15/10/2005
34	11 45 42	+02 49 17		0.001691	0	0	13/02/2006
35	22 57 27	+20 46 07	Mayor & Queloz	0,004	0	0	18/08/2005
36	01 36 48	+41 24 38	Butler et al.	0,004	2.2	0	12/04/2005

Apéndices

#	alfa	delta	Nombre del	Dist. Ang.	Radio	Densidad	última fecha
P	Ascensión Recta	Declinación	Descubridor	(arcsec)	Rjup	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	actualización
37	01 36 48	+41 24 38	Butler et al.	0,062	0	0	12/04/2005
38	01 36 48	+41 24 38	Butler et al.	0,188	0	0	12/04/2005
39	06 51 30	+40 52 03	Butler et al.	0,001	0	0	22/08/2005
40	12 37 16	-40 48 43		0.001076	0	0	08/10/2005
41	15 19 26	-07 43 20	Bonfils et al.	0.00655	0	0	15/10/2005
42	13 34 02	+53 43 42		0.00079	0	0	15/10/2005
43	08 18 22	+61 27 38	Vogt et al.	0,001	0	0	12/04/2005
44	18 21 49	-11 55 21	Pepe et al.	0,002	0	0	12/04/2005
45	22 58 15	-02 23 42	Fischer et al.	0,002	0	0	24/06/2005
46	22 58 15	-02 23 42	Vogt et al.	0,116216	0	0	24/06/2005
47	17 50 38	-40 19 06	Udry et al.	0,002	0	0	12/04/2005
48	17 44 08	-51 50 02	Santos et al.	0,006	0	0	22/08/2005
49	17 44 08	-51 50 02	Butler et al.	0,098	0	0	18/08/2005
50	17 44 08	-51 50 02	McCarthy et al.	0,273	0	0	18/08/2005
51	14 47 32	-00 16 53	Udry et al.	0,003	0	0	12/04/2005
52	12 25 46	-64 01 19	Pepe et al.	0,003	0	0	31/08/2005
53	05 46 34	+01 10 05	Fischer et al.	0,003	0	0	12/04/2005
54	05 46 34	+01 10 05	Fischer et al.	0,087	0	0	12/04/2005
55	00 44 39	-65 38 58		0.005205	0	0	15/10/2005
56	02 10 14	-50 50 00	Queloz et al.	0,01	0	0	12/04/2005
57	11 26 46	+03 00 22	Marcy et al.	0,007	0	0	12/04/2005
58	20 03 37	+29 53 48	Vogt et al.	0,008055	0	0	24/06/2005
59	20 03 37	+29 53 48	Naef et al.	0,246696	0	0	24/06/2005
60	04 20 47	-59 24 39	Moutou et al.	0,003	0	0	08/09/2005
61	20 28 17	+18 46 12	Fischer et al.	0,007	0	0	12/04/2005
62	11 44 50	-58 42 13	Tinney et al.	0,004	0	0	16/09/2005
63	01 04 40	-39 29 17	Mayor et al.	0,004	0	0	12/04/2005
64	20 13 59	-00 52 00	Santos et al.	0,008	0	0	22/08/2005
65	01 57 09	-10 14 32		0,007	0	0	09/01/2006
66	16 01 03	+33 18 51	Noyes et al.	0,013	0	0	08/10/2005
67	08 42 25	+04 34 41	Naef et al.	0,005	0	0	12/04/2005
68	08 42 25	+04 34 41	Naef et al.	0,053	0	0	12/04/2005
69	13 32 25	-47 16 16	Tinney et al.	0,007	0	0	16/09/2005
70	05 40 01	+06 03 38	Cochran et al.	0,005828	0	0	16/05/2005
71	18 20 04	-09 35 34	Marcy et al.	0,009	0	0	12/04/2005
72	18 20 04	-09 35 34		0,087	0	0	12/04/2005
73	00 39 21	+21 15 01	Fischer et al.	0,026	0	0	12/04/2005
74	13 57 17	-56 02 24	Mayor et al.	0,007	0	0	12/04/2005
75	11 43 30	-58 00 24	Lovis et al.	0,01	0	0	12/04/2005
76	19 09 03	+34 35 59	Zucker et al.	0,007	0	0	12/04/2005
77	02 35 19	-03 33 38	Marcy et al.	0,01	0	0	12/04/2005
78	13 12 19	+17 31 01	Latham et al.	0,011	0	0	13/02/2006
79	09 22 37	+50 36 13	Naef et al.	0,008	0	0	12/04/2005

Apéndices

#	alfa	delta	Nombre del	Dist. Ang.	Radio	Densidad	última fecha
P	Ascensión Recta	Declinación	Descubridor	(arcsec)	R _{jup}	g ³ cm ⁻³	actualización
80	13 28 26	+13 47 12	Marcy & Butler	0,022	0	0	18/08/2005
81	22 55 53	-26 39 31	Mayor et al.	0,012	0	0	12/04/2005
82	07 00 18	-05 22 01	Butler et al.	0,017	0	0	12/04/2005
83	21 57 19	-37 45 49	Tinney et al.	0,011	0	0	16/09/2005
84	05 17 40	+07 21 12		0,011	0	0	12/04/2005
85	00 16 12	-79 51 04	Naef. et al.	0,028	0	0	18/08/2005
86	10 44 20	-33 34 37	Lovis et al.	0,017	0	0	12/04/2005
87	05 37 02	+20 43 50	Vogt et al.	0,016061	0	0	02/10/2005
88	05 37 02	+20 43 51	Butler et al.	0,049697	0	0	02/10/2005
89	05 37 02	+20 43 52	Vogt et al.	0,096667	0	0	02/10/2005
90	23 15 53	-09 05 15		0,007	0	0	22/08/2005
91	08 37 16	-41 19 08	Tinney et al.	0,006667	0	0	10/06/2005
92	12 05 15	+76 54 20	Sato et al.	0,008	0	0	12/04/2005
93	09 34 50	-12 07 46	Mayor et al.	0,027	0	0	23/12/2005
94	09 34 51	-12 07 47	Mayor et al.	0,042243	0	0	23/12/2005
95	18 27 49	-29 49 00	Naef. et al.	0,022	0	0	13/02/2006
96	18 27 50	-29 49 01	Mayor et al.	0,099	0	0	13/02/2006
97	01 25 12	+28 34 00	Perrier et al.	0,017	0	0	12/04/2005
98	21 14 57	-20 47 21	Correia et al.	0,018	0	0	12/04/2005
99	21 14 58	-20 47 22		0,055	0	0	12/04/2005
100	10 22 10	+41 13 46	Korzennik et al.	0,022	0	0	12/04/2005
101	15 13 28	-25 18 33	Vogt et al.	0,031	0	0	12/04/2005
102	02 04 34	+25 24 51	Fischer et al.	0,022	0	0	12/04/2005
103	02 04 35	+25 24 52	Fischer et al.	0,069	0	0	12/04/2005
104	16 31 17	+79 47 23		0,03	0	0	12/04/2005
105	06 04 29	+44 15 37	Fischer et al.	0,024	0	0	12/04/2005
106	07 31 48	+17 05 09		0,01	0	0	22/08/2005
107	02 42 31	-50 48 12	Kürster et al.	0,059	0	0	19/08/2005
108	00 06 19	-49 04 30	Tinney et al.	0,048	0	0	12/04/2005
109	10 42 48	-02 11 01	Fischer et al.	0,03	0	0	19/08/2005
110	04 26 26	-10 33 02	Santos et al.	0,026	0	0	12/04/2005
111	20 39 51	+11 14 58		0,034	0	0	12/04/2005
112	15 57 40	-60 12 00	Mayor et al.	0,031	0	0	12/04/2005
113	05 22 33	+79 13 52	Galland et al.	0,052431	0	0	17/01/2006
114	19 05 20	+25 55 14	Vogt et al.	0,017	0	0	12/04/2005
115	12 30 26	+22 52 47	Butler et al.	0,015343	0	0	24/06/2005
116	12 30 27	+22 52 48	Vogt et al.	0,039124	0	0	24/06/2005
117	17 11 15	-56 40 50	McCarthy et al.	0,016	0	0	12/04/2005
118	00 44 41	+20 26 56	Vogt et al.	0,014	0	0	12/04/2005
119	14 36 00	+09 44 47	Butler et al.	0,061446	0	0	12/04/2005
120	14 36 01	+09 44 48	Vogt et al.	0,106024	0	0	02/10/2005
121	04 16 29	-59 18 07	Butler et al.	0,065	0	0	12/04/2005

Apéndices

#	alfa	delta	Nombre del	Dist. Ang.	Radio	Densidad	última fecha
P	Ascensión Recta	Declinación	Descubridor	(arcsec)	Rjup	$g \cdot \text{cm}^{-3}$	actualización
122	22 09 29	-07 32 32	Marcy et al.	0,05	0	0	12/04/2005
123	03 12 46	-01 11 45	Mayor et al.	0,058	0	0	02/10/2005
124	19 52 04	+28 06 01	Marcy et al.	0,023	0	0	12/04/2005
125	02 09 40	+32 18 59	Hatzes et al.	0,01	0	0	12/04/2005
126	03 17 40	+31 07 37		0,046	0	0	12/04/2005
127	13 12 43	-02 15 54	Vogt et al.	0,055	0	0	12/04/2005
128	16 24 01	-39 11 34	Mayor et al.	0,098	0	0	12/04/2005
129	15 24 55	+58 57 57	Frink et al.	0,043	0	0	13/02/2006
130	23 41 51	-05 59 08	Vogt et al.	0,032	0	0	12/04/2005
131	07 53 4	-63 38 50	Mayor et al.	0,04	0	0	12/04/2005
132	19 28 24	+08 21 28	Marcy et al.	0,028679	0	0	04/07/2005
133	15 52 17	-18 26 09	Udry et al.	0,045	0	0	12/04/2005
134	05 59 49	-48 14 22	Zucker et al.	0,031	0	0	12/04/2005
135	01 54 56	-67 38 50	Setiawan et al.	0,029023	0	0	28/05/2005
136	06 37 47	-32 20 23	Setiawan et al.	0,013	0	0	12/04/2005
137	03 39 43	-52 54 57	Tinney et al.	0,047	0	0	12/04/2005
138	19 41 51	+50 31 03	Cochran et al.	0,078037	0	0	13/04/2005
139	00 44 26	-26 30 56	Vogt et al.	0,049	0	0	12/04/2005
140	13 10 39	-35 03 17	Mayor et al.	0,058	0	0	12/04/2005
141	06 28 45	+38 57 46	Marcy et al.	0,036	0	0	12/04/2005
142	23 39 20	+77 37 56	Hatzes et al.	0,172	0	0	18/08/2005
143	22 31 00	-49 25 59	Santos et al.	0,05	0	0	12/04/2005
144	09 23 47	+20 21 52		0,059582	0	0	13/02/2006
145	01 42 29	-53 44 27		0,121	0	0	12/04/2005
146	01 44 55	+20 04 59	Vogt et al.	0,071	0	0	12/04/2005
147	10 59 29	+40 25 46	Butler & Marcy	0,157	0	0	18/08/2005
148	10 59 30	+40 25 47	Fischer et al.	0,28	0	0	18/08/2005
149	20 03 00	+28 18 24	Perrier et al.	0,035	0	0	12/04/2005
150	13 12 44	-31 52 24	Butler et al.	0,059	0	0	12/04/2005
151	12 48 51	-68 25 30	Mayor et al.	0,068	0	0	12/04/2005
152	00 24 20	-56 39 00	Tinney et al.	0,024	0	0	12/04/2005
153	15 18 55	-01 35 32	Fisher et al.	0,044	0	0	12/04/2005
154	06 54 42	+24 14 44	Fischer et al.	0,077	0	0	12/04/2005
155	20 37 51	-60 38 04	Jones et al.	0,053	0	0	12/04/2005
156	22 54 39	-70 04 25	Jones et al.	0,102	0	0	12/04/2005
157	22 53 37	-48 35 53	Jones et al.	0,081	0	0	12/04/2005
158	12 13 29	+10 02 29	Fischer et al.	0,07	0	0	22/08/2005
159	03 48 00	+40 31 50	Perrier et al.	0,052	0	0	12/04/2005
160	16 10 23	+43 49 18	Butler et al.	0,154696	0	0	17/11/2005
161	16 10 15	-84 13 53		0,078	0	0	11/04/2005
162	05 37 09	-80 28 08	Jones et al.	0,16	0	0	11/04/2005
163	08 21 28	-39 42 19	Carter et al.	0,114	0	0	11/04/2005
164	05 11 46	+04 24 12	Vogt et al.	0,124	0	0	11/04/2005
165	03 32 55	-09 27 29	Hatzes et al.	1,031	0	0	12/04/2005
166	06 52 02	-33 54 56	Vogt et al.	0,081676	0	0	24/06/2005

Apéndices

167	13 29 21	-35 34 15	Marcy et al.	0,115	0	0	11/04/2005
168	04 41 54	-58 01 14	Tinney et al.	0,07	0	0	11/04/2005
169	10 18 21	+12 37 15		0,126	0	0	11/04/2005
170	08 34 03	-01 34 05	Butler et al.	0,080934	0	0	02/05/2005

Tabla B.4 Datos sobre las estrellas en las que orbitan planetas

#	Nombre	Estrella	Estrella	Masa *	Tipo Espectral	[Fe / H]
P	Estrella	HR o Hipp	HD	Msol	Clase luminosidad	
1	OGLE-TR-56			1,04	G	0
2	OGLE-TR-113			0,77	K	0,14
3	OGLE-TR-132			1,35	F	0,43
4	Gliese 876	hip113020		0,32	M4V	0,02
5	Gliese 876	hip113020		0,32	M4V	0,02
6	Gliese 876	hip113021		0,32	M4V	0,02
7			HD189733	0,82	K1-K2	-0.03
8			HD212301	1,27	F8 V	0
9			HD73256	1,05	G8/K0	0,29
10	GJ436			0,41	M2.5	-0,03
11	55Cnc e		HD75732	1,03	G8 V	0,29
12	55 Cnc b	HR637,hip43587b	HD75732	1,03	G8 V	0,29
13	55 Cnc c	hip43587,HR3522	HD75732	1,03	G8 V	0,29
14	55 Cnc d	hip43587d	HD75732	1,03	G8 V	0,29
15			HD63454	0,8	K4 V	0,11
16			HD149026	1,3	G0 IV	0,36
17		hip47202b	HD83443	0,79	K0 V	0,33
18		hip31246	HD46375	1	K1 IV	0,25
19	TrES-1b			0,87	K0V	0,001
20		hip94645	HD179949	1,24	F8 V	0,02
21		hip97336	HD187123	1,06	G5	0,16
22	OGLE-TR-10			1,22	G or K	0,12
23	Tau Boo	hip67275	HD120136	1,3	F7 V	0,28
24			HD188753A	1,06	K0	0
25			HD 330075	0,95	G5	0
26			HD 88133	1,2	G5 IV	0,34
27			HD2638	0,93	G5	0,16
28	BD-103166			1,1	G4 V	0,5
29		hip43177	HD75289	1,05	G0 V	0,29
30		hip	HD209458	1,05	G0 V	0,04
31		hip43686	HD76700	1	G6 V	0
32	OGLE-TR-111			0,82	G or K	0,12
33			HD149143	1,21	G0 IV	0,26
34			HD102195	0,928	K0V	-0.09
35	51 Peg	hip113357	HD217014	1,05	G2 IV	0
36	Ups And	hip7513b	HD9826 b	1,3	F8 V	0,09

Apéndices

#	Nombre	Estrella	Estrella	Masa *	Tipo Espectral	[Fe / H]
P	Estrella	HR o Hipp	HD	Msol	Clase luminosidad	
38	Ups And	hipp7513d	HD9826 d	1,3	F8 V	0,09
39		hipp32916	HD49674	1	G5 V	0,25
40			HD109749	1,2	G3 IV	0,25
41	GI581			0,31	M3	-0,25
42			HD118203	1,23	K0	0,1
43		hipp40687	HD68988	1,2	G0	0,24
44		hipp90004	HD168746	0,92	G5	-0,07
45	HR 8734	hip113421	HD217107	0,98	G8 IV	0,3
46	HR 8734	hip113421	HD217107	0,98	G8 IV	0,3
47			HD162020	0,7	K2 V	0,01
48	Mu Ara	HR6584	HD160691	1,08	G3 IV-V	0,28
49	Mu Ara	hipp86796	HD160691	1,08	G3 IV-V	0,28
50	Mu Ara	HR6585	HD 160691	1,08	G3 IV-V	0,28
51		hipp72339	HD130322	0,79	K0 V	-0,02
52		hipp60644	HD108147	1,27	F8/G0 V	0,2
53		hipp27253	HD38529	1,39	G4 IV	0,313
54		hipp27253	HD38529	1,39	G4 IV	0,313
55			HD4308	0,83	G5 V	-0,31
56	GI86	hipp10138	HD13445	0,79	K1V	-0,24
57			HD99492	0,78	K2V	0,36
58	GJ 777A	hipp98767	HD190360A	0,96	G6 IV	0
59	GJ 777A	hipp98767	HD190360A	0,96	G6 IV	0
60			HD27894	0,75	K2 V	0,3
61	BD+184505	hip 100970	HD 195019	1,02	G3 IV-V	0
62			HD 102117	0,95	G6V	0,18
63		hipp5054	HD6434	1	G3 IV	-0,52
64			HD192263	0,79	K2 V	-0,2
65			HD11964	1,125	G5	0
66	rho CrB	HR 5968	HD143761	0,95	G0V or G2V	-0,19
67		hipp42723	HD74156	1,05	G0	0,13
68		hipp42723	HD74156	1,05	G0	0,13
69			HD 117618	1,05	G2V	0,04
70			HD 37605	0,8	K0V	0,39
71		hipp89844	HD168443	1,01	G5	0,1
72		hip 89844	HD 168443	1,01	G5	0,1
73	HR 166	hipp3093	HD3651	0,79	K0 V	0,05
74		hipp68162	HD121504	1	G2 V	0,16
75			HD101930	0,74	K1 V	0,17
76		hip 94075	HD 178911B	0,87	G5	0,28
77		hipp12048	HD16141	1	G5 IV	0,22
78			HD114762	0,82	F9V	-0,5
79		hipp45982	HD80606	0,9	G5	0,43

Apéndices

#	Nombre	Estrella	Estrella	Masa *	Tipo Espectral	[Fe / H]
P	Estrella	HR o Hipp	HD	Msol	Clase luminosidad	
80	70 Vir	hipp65721	HD117176	1,1	G4 V	-0,03
81		hipp113238	HD216770	0,9	K1 V	0,23
82	HR 2622	hipp33719	HD52265	1,13	G0 V	0,11
83			HD 208487	1,3	G2V	-0,06
84			HD34445	1,11	G0	0
85	GJ 3021	hipp1292	HD1237	0,9	G6 V	0,2
86			HD93083	0,7	K3 V	0,15
87		hipp26381	HD37124	0,91	G4 V	-0,32
88		hipp26381	HD37124	0,91	G4 V	-0,32
89		hipp26381	HD37124	0,91	G4 V	-0,32
90	91 Aqr		HD 219449	0	K0 III	0
91		hipp42282	HD73526	1,02	G6 V	0,28
92			HD104985	1,5	G9 III	-0,35
93		hipp47007	HD82943	1,05	G0	0,32
94		hipp47007	HD82943	1,05	G0	0,32
95		hipp90485	HD169830	1,4	F8 V	0,21
96		hipp90485	HD169830	1,4	F8 V	0,21
97		hipp6643	HD8574	1,18	F8	-0,09
98			HD202206	1,15	G6 V	0,37
99			HD202206	1,15	G6 V	0,37
100	HR 4067	hipp50786	HD89744	1,4	F7 V	0,18
101		hipp74500	HD134987	1,05	G5 V	0,23
102		hipp9683	HD12661	1,07	G6 V	0,293
103		hipp9683	HD12661	1,07	G6 V	0,293
104			HD150706	1,17	G0	-0,13
105		hipp28767	HD40979	1,08	F8 V	0,194
106			HD59686	1,1	K2 III	0
107	iota hor	HR810	HD17051	1,32	G0V pecul	0,25
108	HR 6	hipp522	HD142	1,1	G1 IV	0,04
109		hipp52409	HD92788	1,06	G5	0,24
110		hipp20723	HD28185	0,99	G5	0,24
111			HD196885	1,27	F8IV	0
112		hipp78169	HD142415	1,03	G1 V	0,21
113			HD33564	1,25	F6 V	-0,12
114		hipp93746	HD177830	1,17	K0	0
115		hipp61028	HD108874	1	G5	0,14
116		hipp61028	HD108874	1	G5	0,14
117			HD 154857	1,17	G5V	-0,23
118		hipp3502	HD4203	1,06	G5	0,22
119		hipp71395	HD128311	0,8	K0	0,08
120		hipp71395	HD128311	0,8	K0	0,08
121	HR 1355	hipp19921	HD27442	1,2	K2 IV a	0,2

Apéndices

#	Nombre	Estrella	Estrella	Masa *	Tipo Espectral	[Fe / H]
P	Estrella	HR o Hipp	HD	Msol	Clase luminosidad	
122		hip109378	HD 210277	0,99	G0	0,16
123		hipp14954	HD19994	1,35	F8 V	0,23
124			HD188015	1,08	G5IV	0,29
125			HD13189	4,5	K2 II	0
126			HD20367	1,21	G0	0,1
127		hipp64467	HD114783	0,92	K0	0,33
128		hipp80337	HD147513	0,92	G3/G5V	-0,03
129	Iota Draconis	hipp 75458	HD137759	1,05	K2 III	0,03
130		hipp116906	HD222582	1	G5	-0,01
131		hipp38558	HD65216	0,92	G5 V	-0,12
132			HD183263	1,17	G2IV	0,3
133		hipp77740	HD141937	1	G2/G3 V	0,16
134			HD41004A	0,7	K1 V	-0,09
135			HD11977	1,91	G8.5 III	-0,21
136			HD47536	1,1	K0 II	0
137		hipp17096	HD23079	1,1	F8/G0 V	0
138	16 CygB	HR7504,	186408	1,01	G2.5 V	0,09
139		hipp3479	HD4208	0,93	G5 V	-0,24
140		hipp64295	HD114386	0,54	K3 V	-0,03
141			HD45350	1,02	G5 IV	0,29
142	gam.Cephei		HD222404	1,59	K2 V	0
143		hipp111143	HD213240	1,22	G4 IV	0,23
144			HD81040	0,96	G2/G3	-0,16
145			HD10647	1,07	F8V	-0,03
146		hipp8159	HD10697	1,1	G5 IV	0,15
147	47 Uma	hip53721b	HD95128	1,03	G0V	-0,08
148	47 Uma	hipp53721c	HD95128	1,03	G0V	-0,08
149			HD190228	1,3	G5IV	-0,24
150		hipp64459	HD114729	0,93	G3 V	-0,22
151		hipp62534	HD111232	0,78	G8V	-0,36
152		hipp1931	HD2039	0,98	G2/G3 IV-V	0,1
153		hipp 74948	HD136118	1,24	F9 V	-0,065
154			HD50554	1,1	F8	0,02
155		hipp101806	HD196050	1,1	G3 V	0
156	HR 8701	hipp101806	HD216437	1,07	G4 IV-V	0
157	1 Gru	hipp113044	HD216435	1,25	G0 V	0,15
158			HD106252	1,05	G0	-0,16
159		hipp17747	HD23596	1,3	F8	0,32
160	14 Her	hipp79248	HD145675	1	K0 V	0,35
161			HD142022	0,99	K0 V	0,19
162			HD39091	1,1	G1 IV	0,09
163		hipp40952	HD70642	1	G5 IV-V	0,16
164			HD33636	0,99	G0 V	-0,13
165	Eps. Eridani	hipp16537	HD22049	0,8	K2 V	-0,1
166			HD50499	1,27	G IV	0

167			HD117207	1,04	G8VI/V	0,27
168		hipp21850	HD30177	0,95	G8 V	0,25
169			HD89307	1,27	G0V	0
170		hipp42030	HD72659	0,95	GO V	-0,14

Tabla B.5 Más datos sobre las estrellas en las que orbitan planetas.

#	Nombre	Distancia	Temperatura	Luminosidad	Magnitud
P	Estrella	(parsecs)	(K)	(Lum. Solar)	aparente (V)
1	OGLE-TR-56	1500	1900	0	16,6
2	OGLE-TR-113	1500	1000	0	I= 14,42
3	OGLE-TR-132	1500	1750	3	I=15,72
4	Gliese 876	4,72	3100	0,0124	10,17
5	Gliese 876	4,72	3100	0,0124	10,17
6	Gliese 876	4,72	3100	0,0124	10,17
7	HD189733	19,3	0	0	7,67
8	HD212301	52,7	0	0	7,77
9	HD73256	36,5	5518	0,69	8,08
10	GJ436	10,2	0	0	10,68
11	55Cnc	13,4	5279	0	5,95
12	55Cnc	13,4	5279	0,65	5,95
13	55Cnc	13,4	5279	0,65	5,95
14	55Cnc	13,4	5279	0,65	5,95
15	HD63454	35,8	4841	0	9,37
16	HD149026	78,9	0	0	8,15
17	HD83443	43,54	5454	0,88	8,23
18	HD46375	33,4	5268	0,76	7,94
19	TrES-1b	157	1000	0	11,79
20	HD179949	27	6260	0	6,254
21	HD187123	50	5845	1,46	7,86
22	OGLE-TR-10	1500	1140	0	I=14,93
23	Tau Boo	15	6339	0	4,5
24	HD188753A	44,82	0	0	7,43
25	HD 330075	50,2	5017	0,47	9,36
26	HD 88133	74,5	5438	0	8,01
27	HD2638	53,71	5192	0	9,44
28	BD-103166	0	5325	0	10,08
29	HD75289	28,94	6143	1,99	6,35
30	HD209458	47	1800	1,6	7,65

Apéndices

#	Nombre	Distancia	Temperatura	Luminosidad	Magnitud
P	Estrella	(parsecs)	(K)	(Lum. Solar)	aparente (V)
31	HD76700	59,7	5737	1,77	8,13
32	OGLE-TR-111	1500	1070	0	I=15,55
33	HD149143	63	0	0	7,9
34	HD102195	28,98	0	0	8,05
35	51 Peg	14,7	5804	1,8	5,5
36	Ups And	13,47	6212	3,36	4,09
37	Ups And	13,47	6212	3,36	4,09
38	Ups And	13,47	6212	3,36	4,09
39	HD49674	40,7	5644	0,86	8,1
40	HD109749	59	0	0	8,1
41	GI581	6,26	0	0	10,55
42	HD118203	88,6	0	0	8,05
43	HD68988	58	5988	1,55	8,21
44	HD168746	43,12	5601	1,1	7,95
45	HR 8734	37	5630	1,2	6,16
46	HR 8734	37	5630	1,2	6,16
47	HD162020	31,26	4882	0,25	9,18
48	Mu Ara	15,3	5798	1,83	5,15
49	Mu Ara	15,3	5798	1,83	5,15
50	Mu Ara	15,3	5798	1,83	5,15
51	HD130322	30	5392	0,5	8,05
52	HD108147	38,57	6248	1,93	6,99
53	HD38529	42,43	5674	0	5,94
54	HD38529	42,43	5674	0	5,94
55	HD4308	21,9	0	0	6,54
56	GI86	11	5119	0	6,17
57	HD99492	18	4810	0	7,57
58	GJ 777A	15,89	5584	1,13	5,71
59	GJ 777A	15,89	5584	1,13	5,71
60	HD27894	42,37	4875	0	9,36
61	BD+184505	20	5859	0	6,91
62	HD 102117	42	5708	0	7,47
63	HD6434	40,32	5835	1,12	7,72
64	HD192263	19,9	4947	0	7,79
65	HD11964	33,98	0	0	6,42
66	rho CrB	16,7	5853	1,78	5,4
67	HD74156	64,56	6105	3,06	7,62
68	HD74156	64,56	6105	3,12	7,62
69	HD 117618	38	6013	0	7,18
70	HD 37605	42,9	5391	0	8,69
71	HD168443	33	5617	2,19	6,92

Apéndices

#	Nombre	Distancia	Temperatura	Luminosidad	Magnitud
P	Estrella	(parsecs)	(K)	(Lum. Solar)	aparente (V)
72	HD 168443	33	5617	2,19	6,92
73	HR 166	11	5173	0	5,8
74	HD121504	44,37	6075	1,55	7,54
75	HD101930	30,49	5079	0	8,21
76	HD 178911B	46,73	5600	1,3	7,98
77	HD16141	35,9	5801	2,07	6,78
78	HD114762	28	5884	0	7,3
79	HD80606	58,38	5574	0,75	8,93
80	70 Vir	22	5560	3	5
81	HD216770	38	5423	0,79	8,11
82	HR 2622	28	6076	1,97	6,3
83	HD 208487	45	6141	0	7,48
84	HD34445	48	0	0	7,32
85	GJ 3021	17,62	5536	0	6,59
86	HD93083	28,9	4995	0	8,3
87	HD37124	33	5546	0	7,68
88	HD37124	33	5546	0	7,68
89	HD37124	33	5546	0	7,69
90	91 Aqr	45	4757	0	4,21
91	HD73526	99	5699	0	9
92	HD104985	102	4786	0	5,797
93	HD82943	27,46	6005	1,54	6,54
94	HD82943	27,46	6005	1,54	6,54
95	HD169830	36,32	6299	4,59	5,9
96	HD169830	36,32	6299	4,59	5,9
97	HD8574	44,15	6151	2,25	7,12
98	HD202206	46,34	5752	1,07	8,08
99	HD202206	46,34	5752	1,07	8,09
100	HR 4067	40	6234	6,25	5,741
101	HD134987	25	5776	1,49	6,45
102	HD12661	37,16	5702	1,31	7,44
103	HD12661	37,16	5702	1,31	7,45
104	HD150706	27,2	5961	0,98	7,03
105	HD40979	33,3	6145	0	6,746
106	HD59686	92	4871	0	5,45
107	iota hor	15,5	6252	0	5,4
108	HR 6	20,6	6302	2,77	5,7
109	HD92788	32,82	5821	1,05	7,31
110	HD28185	39,4	5656	1,02	7,81
111	HD196885	33	0	0	6,39
112	HD142415	34,2	6045	1,14	7,34

Apéndices

#	Nombre	Distancia	Temperatura	Luminosidad	Magnitud
P	Estrella	(parsecs)	(K)	(Lum. Solar)	aparente (V)
113	HD33564	20,98	0	0	5,08
114	HD177830	59	4804	0	7,175
115	HD108874	68,5	5596	1,33	8,76
116	HD108874	68,5	5596	1,33	8,76
117	HD 154857	68,5	5610	0	7,25
118	HD4203	77,5	5636	1,86	8,68
119	HD128311	16,6	4835	0	7,51
120	HD128311	16,6	4835	0	7,51
121	HR 1355	18,1	4825	0	4,442
122	HD 210277	22	5519	1,02	6,63
123	HD19994	22,38	6217	3,81	5,07
124	HD188015	52,6	5793	0	8,22
125	HD13189	185	0	0	7,57
126	HD20367	27	6138	1,67	6,41
127	HD114783	22	5098	0,41	7,57
128	HD147513	12,9	5883	0,98	5,37
129	Iota Draconis	31,5	4775	0	3,3
130	HD222582	42	5843	1,28	7,7
131	HD65216	34,3	5666	0,71	7,98
132	HD183263	53	5991	0	7,86
133	HD141937	33,46	5909	1,17	7,25
134	HD41004A	42,5	5085	0,65	8,65
135	HD11977	66,5	0	0	4,7
136	HD47536	123	4554	0	5,261
137	HD23079	34,8	5959	1,4	7,1
138	16 CygB	21,4	5772	1,25	6,2
139	HD4208	33,9	5626	0	7,79
140	HD114386	28	4804	0,29	8,73
141	HD45350	49	0	0	7,88
142	gam.Cephei	11,8	4916	0	3,223
143	HD213240	40,75	5984	2,59	6,8
144	HD81040	32,56	0	0	7,72
145	HD10647	17,3	6143	0	5,52
146	HD10697	30	5641	2,94	6,292
147	47 Uma	13,3	5954	1,62	5,1
148	47 Uma	13,3	5954	1,62	5,1
149	HD190228	66,11	5312	4,31	7,3
150	HD114729	35	5886	0	6,69
151	HD111232	29	5494	0,69	7,61
152	HD2039	89,8	5976	1,75	9,01
153	HD136118	52,3	6222	3,75	6,9
154	HD50554	31,03	6026	1,46	6,86
155	HD196050	46,9	5918	1,83	7,5
156	HR 8701	26,5	5887	2,25	6,04
157	1 Gru	33,3	5938	0	6,03

Apéndices

158	HD106252	37,44	5899	1,3	7,36
159	HD23596	52	6108	2,76	7,24
160	14 Her	18,1	5255	0,71	6,67
161	HD142022	35,87	5499	0	7,7
162	HD39091	20,55	5991	0	5,67
163	HD70642	29	5693	0	7,18
164	HD33636	28,7	6046	1,08	7,06
165	Eps. Eridani	3,2	5073	0	3,73
166	HD50499	47,26	0	0	7,22
167	HD117207	33	5654	0	7,26
168	HD30177	55	5591	1,2	8,41
169	HD89307	33	0	0	7,06
170	HD72659	51,4	5995	2,29	7,48

APENDICE C

Métodos Cualitativos de análisis gráfico

Método de Ajuste por mínimos cuadrados y cálculo de la incertidumbre (error) en la pendiente y ordenada al origen.

- (<http://vppx134.vp.ehu.es/fisica/agustin/errores/node18.html>)
- International Organization of Standardization, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (Ginebra, Suiza, 1993.)
- D.C. Baird, *Experimentation: An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design*, 3ª Ed. (Prentice Hall, New York, 1995.)
- John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis*, 2ª Ed. (University Science Books, Sausalito, CA, EUA, 1997.)

Frecuentemente es necesario hacer ajustes de modelos lineales a los resultados de mediciones, cuando una de las variables medidas depende de otra de ellas. En estas situaciones, la información que debe obtenerse son los parámetros que caracterizan a la función que debe relacionar ambas variables. Sin duda, el caso más simple es una relación lineal, en la que deben determinarse como parámetros la pendiente y la ordenada al origen de una recta.

El método más simple para el ajuste de una recta a un conjunto de parejas de datos experimentales se refiere a la *regresión lineal*, también conocido como el de *mínimos cuadrados lineales*. En este método, se hace una minimización de la suma cuadrática de las distancias verticales entre los datos experimentales y la recta por ajustar, considerando como variables a la pendiente m y la ordenada al origen b . Esto da como resultado un sistema de ecuaciones para dichas variables, a partir del cual se obtiene la solución:

$$m = \frac{N \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{N \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (\text{C.1})$$

y

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{N \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (\text{C.2})$$

En estas ecuaciones, N es el número de parejas de datos experimentales, con (x_i, y_i) las coordenadas del punto i . Estos parámetros, por haberse obtenido a partir de resultados experimentales, deben tener además una incertidumbre asociada.

Ésta se puede evaluar a partir de las desviaciones entre los puntos experimentales y las predicciones de la recta caracterizada por los parámetros de las ecuaciones (C.1) y (C.2) Así, se utilizaría un equivalente de la desviación estándar, S_y como sigue:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - mx_i - b)^2}{N - 2}} \quad (\text{C.3})$$

Una vez calculada esta desviación estándar, se determinan las incertidumbres en la pendiente, Δm , y en la ordenada al origen, Δb , con las expresiones:

$$\Delta m = S_y \sqrt{\frac{N}{N \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}} \quad (\text{C.4})$$

y

$$\Delta b = S_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{N \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}} \quad (\text{C.5})$$

Debe aclararse, además, que estas expresiones son válidas únicamente en el caso de que las incertidumbres de cada uno de los puntos experimentales sean iguales. No obstante, en el caso de una recta, la consideración de las incertidumbres distintas tanto en x como en y no presenta gran diferencia (puede consultarse la ref. John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis*, para una discusión al respecto.)

Correlación de Pearson

(http://www.psico.uniovi.es/Dpto_Psicologia/metodos/tutor.6/fcope.html)

La correlación entre dos variables refleja el grado en que estas están asociadas. La formulación clásica, conocida como correlación producto momento de Pearson, se simboliza por la letra griega ρ cuando ha sido calculada en la población. Si se obtiene sobre una muestra, se designa por la letra " r_{xy} ".

Este tipo de estadístico puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables si ambas utilizan una escala de medida a nivel de intervalo/razón (variables cuantitativas).

La formula suele aparecer expresada como:

$$r_{xy} = \frac{\hat{S}_{xy}}{\hat{S}_x \hat{S}_y} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{x_i} z_{y_i}}{n-1}$$

-La primera expresión se resuelve utilizando la covarianza y las desviaciones típicas de las dos variables (en su forma insesgada).

-La segunda forma se utiliza cuando partimos de las puntuaciones típicas empíricas.

Este estadístico, refleja el grado de relación lineal que existe entre dos variables. El resultado numérico fluctúa entre los rangos de +1 a -1.

Una correlación de +1 significa que existe una relación lineal directa perfecta (positiva) entre las dos variables. Es decir, las puntuaciones bajas de la primera variable (X) se asocian con las puntuaciones bajas de la segunda variable (Y), mientras las puntuaciones altas de X se asocian con los valores altos de la variable Y.

Una correlación de -1 significa que existe una relación lineal inversa perfecta (negativa) entre las dos variables. Lo que significa que las puntuaciones bajas en X se asocian con los valores altos en Y, mientras las puntuaciones altas en X se asocian con los valores bajos en Y.

Una correlación de 0 se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas.

APENDICE D
Cálculos de la Energía Cinética, Potencial y Total

Determinar la dependencia entre la fuerza F y la distancia r , es un problema difícil. Podemos determinar esta dependencia experimentalmente midiendo la fuerza entre las masas m y m' para varias separaciones y deduciendo de nuestras observaciones la relación entre F y r . Este procedimiento requiere un equipo experimental muy sensible debido a que la interacción es extremadamente débil y la fuerza gravitacional es muy pequeña a menos que las masas sean muy grandes (tales como la de dos planetas), o la distancia r sea muy pequeña. Pero en este segundo caso, como se verá mas adelante, otras interacciones más fuertes que la gravitacional entran en juego e impiden observar efectos gravitatorios. El resultado de estos experimentos nos permite llegar a la conclusión que la interacción gravitacional es atractiva y varía inversamente con el cuadrado de la distancia entre los dos cuerpos; esto es $F(r) \propto 1 / r^2$. Por consiguiente la expresión de la fuerza de gravitación es

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (D.1)$$

Donde la constante de proporcionalidad $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ Kg}^{-2}$, M es la masa de la estrella y m la masa del planeta y r la distancia que los separa. Podemos entonces establecer la ley universal de gravitación de Newton diciendo que:

La interacción gravitacional entre dos cuerpos puede expresarse por una fuerza de atracción central proporcional a las masas de los cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

Debido a que la interacción gravitacional dada por la ecuación (D.1) es central y depende solamente de la distancia, corresponde una fuerza conservativa. Podemos por consiguiente asociar con ella una energía potencial gravitacional suponiendo que el origen de coordenadas se encuentre en m y considerando solamente la fuerza que actúa sobre M , notamos que F , siendo una fuerza de atracción, tiene dirección opuesta, por consiguiente en lugar de la ec. (D.1) debemos escribir con más propiedad la ecuación de la energía potencial gravitacional, recordando que $a = r$ promedio, la energía potencial promedio es

$$Ep = -G \frac{Mm}{a} \quad (D.2)$$

Pero como nos interesa saber cuanta Energía potencial por unidad de masa hay tenemos que:

$$\frac{Ep}{m_p} = -G \frac{M^*}{a} \quad (D.3)$$

Con **G** = constante gravitacional
M* = masa estrella
m_p = masa planeta y
a = distancia promedio que los separa.

El teorema del virial para una sola partícula (aunque no es importante como el de conservación del momentum angular bajo una fuerza central o el de conservación de energía bajo una fuerza conservativa) es muy útil para obtener ciertos resultados prácticos.

Considérese una partícula de masa m en movimiento bajo la acción de una fuerza F . Definamos la cantidad escalar $A = mv \cdot r$ donde r es el vector posición de la partícula y v su velocidad. Tomando la derivada temporal de A , tenemos

$$\frac{dA}{dt} = m \frac{dv}{dt} \cdot r + mv \cdot \frac{dr}{dt} = ma \cdot r + mv^2 \quad (\text{D.4})$$

ya que $a = \frac{dv}{dt}$ y $v = \frac{dr}{dt}$. El último término, es el doble de la Energía Cinética de la partícula y en el primer término podemos escribir $ma = F$. Luego

$$\frac{dA}{dt} = F \cdot r + 2E_c \quad (\text{D.5})$$

Si tomamos el promedio temporal de esta ecuación, tenemos

$$\left(\frac{dA}{dt} \right) = \left(F \cdot r \right) + 2 \left(E_c \right) \quad (\text{D.6})$$

El promedio temporal, en un intervalo τ , de cualquier cantidad $f(t)$ que depende del tiempo se define por

$$\overline{f(t)} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} f(t) dt \quad (\text{D.7})$$

En nuestro caso, entonces,

$$\left(\frac{dA}{dt} \right) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{dA}{dt} dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} dA = \frac{A - A_0}{\tau} \quad (\text{D.8})$$

Si el tiempo τ es muy grande y si A no crece indefinidamente con el tiempo, la cantidad $(A - A_0)/\tau$ puede ser tan pequeña (si τ es suficientemente grande) que puede ser considerada nula. Este es el caso de la partícula que se mueve dentro de una región limitada.

Por ejemplo, un electrón en un átomo se mueve en una región espacial limitada y los valores de r y v que le pertenecen, y que son las cantidades que intervienen en la definición de A , son acotados. Puede decirse lo mismo de la tierra en su movimiento alrededor del Sol. Por tanto, poniendo $(dA/dt)=0$ en la ecuación (D.6) hallamos que

$$\overline{(E_c)} = -\frac{1}{2}\overline{(F \cdot r)} \quad (D.9)$$

Este es el teorema del virial para una partícula. La cantidad $-\frac{1}{2}\overline{(F \cdot r)}$ se llama el virial de una partícula.

El teorema del virial adopta una forma especial cuando las fuerzas son centrales y conservativas. Si $E_p(r)$ es la energía potencial, entonces $F = -u_r \frac{dE_p}{dr}$ y $F \cdot r = -r \frac{dE_p}{dr}$ ya que $u_r \cdot r = r$. Luego la ecuación (D.9) se transforma en

$$\overline{(E_c)} = \frac{1}{2} \overline{\left(r \frac{dE_p}{dr} \right)} \quad (D.10)$$

Supóngase que la energía potencial es de la forma $E_p = -\frac{k}{r^n}$. Entonces

$$\frac{dE_p}{dr} = n \frac{k}{r^{n+1}} = -n \frac{E_p}{r} \quad (D.11)$$

y la ecuación (D.10) viene a ser

$$\overline{(E_c)} = -\frac{1}{2} n \overline{(E_p)} \quad (D.12)$$

Con este resultado, obtenemos una relación entre los promedios temporales de las energías cinéticas y potencial de la partícula.

Esta última ecuación la podemos utilizar, ya que $n=1$ en nuestro caso, para obtener la energía Cinética promedio, nos está diciendo que

$$\overline{(E_c)} = -\frac{\overline{E_p}}{2} \quad (D.13)$$

Entonces, sustituyendo la ecuación (D.2) en (D.13) se tiene

$$\overline{(E_c)} = \frac{GMm}{2a} \quad (D.14)$$

Pero como nos interesa saber cuanta Energía cinética por unidad de masa hay tenemos:

$$\overline{\left(\frac{E_c}{m_p}\right)} = \frac{GM^*}{2a} \quad (D.15)$$

Con **G** = constante gravitacional

M* = masa estrella

m_p = masa planeta y

a = distancia promedio que los separa.

Que es la ecuación de la energía cinética promedio que se utilizó en este trabajo de tesis.

A partir de las ecuaciones (D.3) y (D.15) se obtiene la Energía total de la orbita de un planeta, indicándonos que esta energía es negativa, es decir:

$$\frac{E_{total}}{m_p} = \frac{1}{2} \frac{GM^*}{a} - \frac{GM^*}{a} \quad (D.16)$$

Quedando finalmente la Energía total de la orbita de un planeta como sigue:

$$\frac{E_{total}}{m_p} = -\frac{1}{2} \frac{GM^*}{a} \quad (D.17)$$

GLOSARIO

Año luz. Es la distancia que la luz recorre viajando en el espacio libre durante un año, 63.239,85831 U.A., (cerca de 9,5 millones de millones de Kilómetros)es decir, 9.5×10^{17} cm.

Elipse. Curva que tiene la propiedad de que la suma de las distancias de cualquier punto a otros dos, llamados focos, permanece constante.

Magnitud absoluta Referida a un astro del sistema solar, es la magnitud de un astro situado a una unidad astronómica de distancia, y observado con ángulo de fase cero.

Movimiento retrógrado. Movimiento aparente de los planetas en dirección contraria a sus movimientos usuales.

Orbita Trayectoria seguida por un astro alrededor de otro.

Planetesimal. Uno de los cuerpos pequeños en los que se condensó la nube de la cual se formó el Sistema Solar y que más adelante se aglutinó con otros planetesimales para formar a los planetas.

Unidad astronómica. (U.A.) es la distancia promedio entre la Tierra y el Sol, 149.597.870,691 Km, **cerca de 150 millones de** Kilómetros, y la luz tarda 8 minutos 19 segundos en recorrerla.

Velocidad de la Luz (y de cualquier onda electromagnética) **en el vacío (c)**, es de 299.792.458 m/s, **cerca de 300.000 Km/s.**

Velocidad orbital media [km/s] = velocidad promedio del planeta en la órbita, en kilómetros por segundo

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

Bibliografía : datos de planetas extrasolares

1. Barbieri M. and R. U. Claudi. "**Extrasolar Planets**". Mem. S. A. It. Suppl. Vol. 6, 167, 2005.
2. Barnes Jason W. and O'Brien D. P. "**Stability of satellites around close-in extrasolar giant planets.**" Ap J., 575:1087-1093, August, 2002.
3. Chauvin G. Lagrange A.M., Dumas C., Zuckerman B., Mouiller D., Song I., Beuzit J. L. and Lowrance P.. "**A Giant Planet Candidate near a young brown dwarf**". A&A 425, L29-32, 2004.
4. Correia A. C. M., Udry S., Mayor M., Laskar J., Naef D., Pepe F., Queloz D. and Santos N. C. "**The CORALIE survey for southern extra-solar planets: XIII. A pair of planets around HD 202206 or a circumbinary planet?**".A&A 440, 751-758, 2005.
5. Eggenberger A., Udry S. and Mayor M. "**Statistical properties of exoplanets. III. Planet properties and stellar multiplicity.**" A&A 417, 353-560, 2004.
6. Eggenberger A., Udry S., Mayor M., Beuzit J. L., Lagrange M.A. and Chauvin G. "**Detection and Properties of Extrasolar Planets in Double and Multiple Star Systems.**" ASP Conference Series, vol. 321, 2004.
7. Fisher Debra A., Marcy G. W., Butler Paul and Vogt S. "**Characteristics of Extrasolar Planets.**" ASP Conference Series, Vol. 324, 2004.
8. Gonzalez Guillermo, Laws Chris, Tyagi Sudhi and Reddy B. E.. "**Parents Stars of Extrasolar Planets. VI. Abundance analyses of 20 New Systems.**" Astr. Journal 121: 432-452, January, 2001.
9. Huang S.S. "**Ocurrence of life in the Universe**". Am. Sci. 47, 397-402, 1959

10. Ida S. and Lin D. N. C. **“Toward a deterministic model of planetary formation. I. A Desert in the mass and semimajor axis distributions of extrasolar planets.”** Ap J. 604:388-413, March, 2004.
11. Jiang Ing-Guey, Ip Wing-huen and Yeh Li.Chen. **“On the fate of close-in Extrasolar Planets.”** Ap J., 582:449-454, 2003.
12. Kasting, J. F., D.P. Whitmire and R.T. Raynolds. **“Habitable Zones around Main Sequence Stars”** Icarus 101, 108-128, 1993.
13. Kowal C. T; **“Asteroids”**; Their Nature and Utilization; Second Edition. Ed. Praxis Publishing Ltd, England, 1996.
14. Lindegren and Dravins Dainis **“The fundamental definition of radial velocity”**. A&A 401, 1185-1201, 2003.
15. Lineweaver Charles and Grether Daniel. **“What fraction of sun-like stars have planets?”** Ap J. 598: 1350-1360. December 2003.
16. Marcy G., Butler Paul, Fischer Debra, Vogt Steven, Wright T., Tinney Chris G. and Jones Hugh R. A.. **“Observed Properties of Exoplanets: Masses, Orbits, and Metallicities.”** Progress of Theoretical Physics Supplement No. 158, 2005.
17. Marcy W. Geoffrey and Butler Paul. **“Detection of Extrasolar Giant Planet”**. ARA&A, 36: 57-97, 1998).
18. Marcy, G.W. y Butler, P. **“Detection of extrasolar giant planets”**. ARA&A, 36, 57, 1998.
19. Martín, E.L. et al., **“Keck HIRES spectra of the brown dwarf DENIS-P J11228.2-1547”**. A&A, 327, L29, 1997.
20. Martín, E.L. y Zapatero Osorio, M.R., **“Spectroscopic Estimate of Surface Gravity for a Planetary Member in the α Orionis Cluster”**. ApJ, 593, L113, 2003.
21. Mayor M. **“Statistics of low-mass companions to stars: Implications for their origin.”** A & A 356, 903-912, 2000.

22. Mayor M., Udry S., Naef D., Pepe F., Queloz D., Santos N.C. and Burnet M. **“The CORALIE survey for southern extra-solar planets. XII. Orbital solutions for 16 extra-solar planets discovered with CORALIE.”** A&A 415, 391-402, 2004.
23. Mayor Michel and Queloz Didier **“A Jupiter-mass companion to a solar-type star”** Nature, vol. 378, pp 355, November, 1995.
24. Nakajima, T. Oppenheimer, B. R. Kulkarni, S. R. D. A. Golimowski, S. T. Durrance, K. Matthews, **“Discovery of a cool brown dwarf”**. Nature, 378, 463, 1995.
25. Nauenberg Michael. **“Determination of masses and other properties of extrasolar planetary systems with more than one planet.”** Ap.J 568:369-376, 2002, March 20.
26. Peña-Cabrera G.V.Y. and Durand-Manterola H.J. **“Possible Distribution in our Galaxy”** ASR, 33, 114-117, 2004.
27. Rebolo, R., Zapatero Osorio, M.R., Martín, E.L. **“Discovery of a Brown Dwarf in the Pleiades Star Cluster”** Nature, 377, 129, 1995.
28. Ruiz, M.T. et al **“A Free-floating Brown Dwarf in the Solar Neighborhood”**. . ApJ, 491, L107, 1997.
29. Santos N. C., Israelian G. and Mayor M. **“Spectroscopic [Fe/H] for 98 extra-solar planet-host stars. Exploring the probability of planet formation.”** A&A 415, 1153-1166, 2004.
30. Santos N. C., Israelian G., and Mayor M. **“The metal-rich nature of stars with planets.”** A&A 373, 1019-1031, 2001.
31. Santos N. C., Israelian G., Mayor M., Bento J. P., Almeida P. C., Sousa S. G. and Ecuillon A. **“Spectroscopic metallicities for planet-host stars: Extending the samples.”** A&A 437, 1127-1133, 2005.
32. Santos N.C., Israelian G. Mayor M., Rebolo R. and Udry S. **“Statistical properties of exoplanets. II Metallicity, orbital parameters and space velocities.”** A&A 398, 363-376, 2003.

33. Stuart J. Weidenschilling and Francesco Marzari. "**Gravitational scattering as a possible origin for giant planets at small stellar distances**". Nature, vol. 384, pp 619, December, 1996.
34. Turnbull Margaret C. and Tarter Jill C. "**Target Selection for SETI. A catalog of nearby habitable stellar systems.**" Ap J. Supplement Series, 145:181-198, March, 2003.
35. Udry S., Eggenberger A., Mayor M., Mazeh T. and Zucker S. "**Planets in Multiple-Star Systems: Properties and detections.**" – RevMexAA (Serie de conferencias), 21, 207-214, 2004.
36. Udry S., Mayor M. and Santos N. C. "**Statistical properties of exoplanets. I. The period distribution: Constraints for the migration scenario.**" A&A 407, 369-376, 2003.
37. Van de Kamp, P. "**The planetary system of Barnard's Star.**" Vistas in Astronomy 26:141-157, 1982.
38. Wetherill G. W. "**The Formation and Habitability of Extra-Solar Planets.**" Icarus 119, 219-238. 1996.

Bibliografía para los planetas y lunas del sistema solar:

Bakulin P.I., Kononovich E.V. y Moroz V.I.- "CURSO DE ASTRONOMIA GENERAL", de Editorial Mir-Rubiños, Moscú-Madrid, 2001.

Karttunen H., Kroger P., Oja h., Poutanen M. and Donner K.J. FUNDAMENTAL ASTRONOMY. Editorial Springer, Alemania, 2003.

Pater de Imke and Lissauer Jack J. PLANETARY SCIENCES. Cambridge University, USA, 2001.

Rodríguez Luis F., LA ASTRONOMIA CONTEMPORANEA, en Las ciencias en el siglo XX, UNAM, México, 1985.

Stan Gibilisco. COMETAS, METEOROS Y ASTEROIDES. Cómo afectan a la tierra, Editorial McGraw-Hill, México, 1991.

Stuart Clark "EXTRASOLAR PLANETS". Lecturer in Astronomy, University of Hertfordshire, Published by Wiley-Praxis Series in Astronomy and Astrophysics, UK, 1997.

Direcciones consultadas en la red (datos de planetas solares y extrasolares):

1. <http://es.wikipedia.org/wiki/Planeta>
2. http://www.straddle3.net/context/03/es/2003_04_07.html
3. <http://astron.berkeley.edu/~basri/defineplanet/Mercury.htm>
4. <http://www.astrosociety.org/education/publications/tnl/59/planetdefinesp.html>
5. http://perso.wanadoo.es/antoni.salva/index_cas.htm
6. <http://astron.berkeley.edu/~basri/defineplanet/Mercury.htm>
7. <http://jpl.nasa.gov/>
8. <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=planet&Display=Facts>
9. <http://www.astromia.com/solar/index.htm>
10. <http://www.astromia.com/solar/planetas.htm>
11. <http://www.astrodom.org/Asteroides.htm>
12. <http://www.astrogea.org/asteroides/distribucion.htm>
13. <http://www.nineplanets.org/>
14. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/062/htm/sec_9.htm
15. <http://usuario.tiscali.es/solyplanetas/>
16. <http://www.eureka.ya.com/planet01/planet.html>
17. http://ssd.jpl.nasa.gov/jup_elem.html
18. <http://www.astrowww.com/SistemaSolar/pluton.html>
19. <http://www.gps.caltech.edu/~mbrown/sedna/>
20. <http://www.xtec.es/~rmolins1/textos/es/sedna.htm>
21. http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2004/16mar_sedna.htm
22. <http://www.cosmopediaonline.com/quaoar.html>
23. <http://www.astromia.com/solar/quaoarsedna.htm>
24. <http://www.astrogea.org/asteroides/kuiper.htm>
25. <http://www.astrored.net/nueveplanetas/solarsystem/kboc.html>
26. <http://www.infoastro.com/200507/30tno.html>
27. <http://www.elmundo.es/elmundo/2005/08/02/ciencia/1122978544.html>
28. http://es.wikipedia.org/wiki/Leyes_de_Kepler
29. <http://personales.ya.com/casanchi/ast/kepler001.htm>
30. http://www.psico.uniovi.es/Dpto_Psicologia/metodos/tutor.6/fcope.html
31. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/kepler/kepler.htm>
32. <http://feinstein.com.ar/LasleyesdeKepler.html>
33. http://www.interactiva.matem.unam.mx/kepler/html/kepler_demostracion.html
34. <http://www.astromia.com/biografias/kepler.htm>
35. http://www.matematicas.net/paraiso/historia.php?id=newton_kepler
36. <http://perso.wanadoo.es/antoni.salva/>
37. <http://www.public.asu.edu/~sciref/exopInt.htm>
38. <http://www.solstation.com/stars/barnards.htm>
39. <http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/ir/planets.html>
40. <http://vo.obspm.fr/exoplanetes/encyclo/catalog-main.php>

41. http://planetquest1.jpl.nasa.gov/atlas_espanol/atlas_index.cfm
42. <http://www.phy.duke.edu/~kolena/invisible.html>
43. <http://www.public.asu.edu/~sciref/exopInt.htm>
44. <http://www.dtm.ciw.edu/boss/IAU/div3/wgesp/planets.shtml>
45. <http://www.matessa.org/~mike/planets.html>
46. <http://obswww.unige.ch/~naef/RECAN/announcement.html>
47. http://www.princeton.edu/~willman/planetary_systems/
48. <http://exoplanets.org/>
49. http://www.astrocosmo.cl/astrofis/astrofis-01_01.htm
50. http://perso.wanadoo.es/antoni.salva/index_cas.htm
51. http://www.astrocosmo.cl/astrofis/astrofis-01_02.htm
52. http://www.astrocosmo.cl/astrofis/astrofis-01_03.htm
53. <http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/>
54. <http://laeff.inta.es/EXPORT/>
55. <http://cfa-www.harvard.edu/afoe/espd.html>
56. <http://www.ls.eso.org/index.html>
57. <http://www.as.utexas.edu/mcdonald/mcdonald.html>
58. http://www.ucm.es/info/Astrof/recopilaciones/planetas_ext.html
59. <http://web.pd.astro.it/maurobarbieri/research/esp/>
60. <http://www.extrasolar.net/>
61. <http://www.astrobiology.com/extrasolar.html>
62. http://www.ucm.es/info/Astrof/servicios_a/biblio.html#revistas
63. http://origins.jpl.nasa.gov/library/exnps/ch04_1.html#4.4
64. <http://www.sondasespaciales.com/modules.php?name=News&file=article&sid=929>
65. <http://vppx134.vp.ehu.es/fisica/agustin/errores/node18.html>
66. http://arfiexp.tripod.com/manual_de_laboratorio9.htm
67. <http://www.todoelsistemasolar.com.ar/sol.htm>
68. <http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/jewitt/kb.html> (datos KBO'S)
69. <http://www.iac.es/gabinete/difus/cometas/cometas.htm>
70. http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/01/html/sec_18.html
71. <http://www.astroseti.org/vernew.php?codigo=1614>
72. <http://www.astroseti.org/vernew.php?codigo=1621>
73. <http://www.cielosur.com/lunas-saturno.htm>
74. http://www.cnice.mecd.es/tematicas/cosmologia/2004_10/2004_10_04.html
75. <http://club.telepolis.com/jabuyo/Astronomia/Fenomenos/Pulsares%20y%20Estrellas%20de%20Neutrones.htm>
76. <http://www.astrored.net/nueveplanetas/solarsystem/earth.html>
77. [http://es.wikipedia.org/wiki/Europa_\(luna\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Europa_(luna))

INDICE TABLAS

Tabla 1	
Algunos datos del Sistema Solar.....	7
Tabla 2	
Comparación de las distancias medidas a los planetas con las distancias predichas por la ley de Titus-Bode.....	18
Tabla 3	
Primeros asteroides encontrados entre las órbitas de Marte y Júpiter.....	19
Tabla 4	
Muestra algunos de los KBOs descubiertos.....	34
Tabla 5	
Datos para la 3ª Ley de Kepler de los planetas del Sistema Solar.....	42
Tabla 6	
Datos obtenidos para el primer posible exoplaneta observado por técnica de imagen directa...	52
Tabla 7	
Datos de los exoplanetas encontrados por la técnica de tránsito.....	59
Tabla 8	
Datos del exoplaneta encontrado por la técnica de astrometría.....	60
Tabla 9	
Datos de los exoplanetas encontrados por radiointerferometría.....	62
Tabla 10	
Datos de los tres exoplanetas encontrados por la técnica de microlentes.....	63
Tabla 11. Muestra los bordes internos, externos y ancho de la ZHC para todos los tipos espectrales de estrellas de la secuencia principal.....	65
Tabla 12	
Muestra los proyectos futuros en la búsqueda de planetas extrasolares.....	71
Tabla 13	
Observatorios y equipos dedicados a la búsqueda de planetas extrasolares.....	73
Tabla 14	
Resultados de las excentricidades de los exoplanetas.....	76
Tabla 15	
Resultados de las masas mínimas de los exoplanetas.....	77

INDICE FIGURAS

Figura 1.1	
Representación de los cuerpos del Sistema Solar.....	6
Figura 1.2	
Galaxia en forma de Espiral.....	6
Figura 1.3	
Representación de la formación del Sistema Solar.....	8
Figura 1.4	
Foto del Sol que ha sido captada por el telescopio espacial de rayos X SOHO, proyecto conjunto entre las agencias europea ESA y la estadounidense NASA.....	9
Figura 1.5	
Representación de las Orbitas del Sistema Solar.....	9
Figura 1.6	
Representación de la órbita de un planeta con el Sol en uno de sus focos.....	10
Figura 1.7	
División de los planetas: terrestres (izquierda) y jovianos (derecha).....	11
Figura 1.8	
Foto de Mercurio.....	12
Figura 1.9	
Foto de Venus.....	12
Figura 1.10	
Foto de la Tierra.....	13
Figura 1.11	
Foto de la Luna desde el Apolo 11.....	14
Figura 1.12	
Foto de Marte.....	15
Figura 1.13	
Histograma mostrando el número de asteroides en función de su distancia al Sol.....	16
Figura 1.14	
Los asteroides Troyanos se hallan distribuidos alrededor del punto lagrangiano L4 (los griegos) y L5 (los troyanos).....	17
Figura 1.15	
Orbitas de los asteroides Apolo, Amor y el cinturón principal de asteroides.....	18
Figura 1.16	
Foto de Júpiter.....	20
Figura 1.17	
Imagen de Ganímedes.....	21
Figura 1.18	
Imagen de Calisto.....	22
Figura 1.19	
Imagen de Io.....	22
Figura 1.20	
Imagen de Europa.....	23
Figura 1.21	
Foto de Saturno.....	23
Figura 1.22	
Cuatro imágenes de la superficie de Titán.....	24
Figura 1.23	
Imagen de Rea.....	24
Figura 1.24	
Imagen de Japeto.....	25
Figura 1.25	
Imagen de Dione y su satélite co-orbital Helena. Credit NASA.....	25
Figura 1.26	
Imagen de Tetis.....	26

Índice Tablas y Figuras

Figura 1.27	
Foto de Urano.....	26
Figura 1.28	
Imagen de Titania.....	27
Figura 1.29	
Imagen de Oberón.....	27
Figura 1.30	
Foto de Neptuno.....	28
Figura 1.31	
Imagen de Tritón.....	29
Figura 1.32	
Foto de Plutón.....	30
Figura 1.33	
Cuatro imágenes de Caronte.....	31
Figura 1.34	
Muestra la región del espacio donde se cree se encuentra el Cinturón de Kuiper.....	32
Figura 1.35	
Representación de Sedna.....	32
Figura 1.36	
Quaoar: Comparación de diámetros.....	33
Figura 1.37	
Muestra la órbita que sigue el planeta 2003 UB313.....	35
Figura 1.38	
Imagen de un Cometa.....	36
Figura 2.1	
La forma elíptica de la órbita (primera ley de Kepler) es resultado de la fuerza de gravedad inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.....	38
Figura 2.2	
La segunda ley de Kepler surge de la conservación del momento angular.....	39
Figura 2.3	
La tercera ley de Kepler surge de la ley de la gravitación descubierta por Newton.....	41
Figura 2.4	
Gráfica que muestra los resultados obtenidos al aplicar la Tercera Ley de Kepler para el Sistema Solar, se observa que una línea recta de pendiente 1 se ajusta muy bien a los datos.....	42
Figura 2.5	
Tercera Ley de Kepler para los satélites de Júpiter.....	44
Figura 2.6	
Tercera Ley de Kepler para los satélites de Saturno.....	45
Figura 2.7	
Tercera Ley de Kepler para los satélites de Urano.....	46
Figura 2.8	
Tercera Ley de Kepler para los satélites de Neptuno.....	46
Figura 3.1	
Diagrama adaptado de M.A.C. Perryman (Rep Prog. Phys, 2000, Vol. 63, 1209-1272).....	49
Figura 3.2	
Método directo.....	50
Figura 3.3	
Primera imagen de un posible planeta extrasolar.....	51
Figura 3.4	
Comparación del sistema 2M1207 con el Sistema Solar.....	52
Figura 3.5	
Efecto Doppler.....	54
Figura 3.6	
Representación de la velocidad radial.....	54

Índice Tablas y Figuras

Figura 3.7	
La velocidad radial de la estrella será la suma de dos componentes: la componente radial de la velocidad del CM más la componente radial de la velocidad de rotación.....	55
Figura 3.8	
Ángulo i del plano orbital del planeta alrededor de la estrella.....	56
Figura 3.9 Fuerza gravitacional que ejerce el planeta sobre la estrella	57
Figura 3.10	
A.- En este caso, como la órbita del planeta no cruza la línea que une la estrella con la Tierra, no se observará nunca una disminución en el brillo de la estrella debido a un tránsito del planeta.	
B.- Si el planeta se interpone entre la estrella y la Tierra, disminuye la superficie de estrella que podemos ver y, como el planeta no emite luz, disminuye el brillo de la estrella.....	57
Figura 3.11	
Disminución de la luminosidad de una estrella debido al tránsito de un planeta.....	58
Figura 3.12	
Método Astrométrico.....	60
Figura 3.13	
Método de pulsares.....	61
Figura 3.14	
Método Microlentes.....	63
Figura 3.15	
Comparación de la posición de algunos Júpiteres calientes con la posición que ocupan los planetas más internos de nuestro sistema solar.....	66
Figura 3.16	
Órbita de ϵ Eridani b, un exoplaneta excéntrico, comparada con la de los planetas del sistema solar.....	66
Figura 3.17	
Comparación entre el sol, un planeta y enanas cafés.....	68
Figura 4.1	
Gráfica de la Tercera Ley de Kepler aplicada a los Planetas Extrasolares reportados utilizando los métodos de Efecto Doppler, Tránsito y el de Astrometría.....	72
Figura 4.2	
Relación Período-Semieje mayor de los 170 Planetas Extrasolares comparados con la distancia de Mercurio de Nuestro Sistema Solar.....	74
Figura 4.3	
Gráfica que representa la distancia a la que se encuentra cada uno de los 170 planetas Extrasolares que van de 0.02 a 0.527 UA.....	75
Figura 4.4	
Excentricidad vs número de planeta extrasolar (0.01 – 0.927).....	76
Figura 4.5	
Relación excentricidad – semieje mayor de los planetas extrasolares.....	77
Figura 4.6	
Diagrama donde se representa la masa de los exoplanetas respecto a su semieje mayor.....	78
Figura 4.7	
Gráfico de períodos en días en función de la masa mínima de los exoplanetas conocidos (escala logarítmica).....	79
Figura 4.8	
Muestra la ley de Titus-Bode aplicado al Sistema 55 Cnc.....	80
Gráfica 4.9	
a vs E_c / M_p Planetas Extrasolares.....	82
Gráfica 4.10	
a vs E_p / M_p Planetas Extrasolares.....	82
Gráfica 4.11	
a vs E_{total} / M_p Planetas Extrasolares.....	83

Índice Tablas y Figuras

Figura 4.12	
a vs M^* Planetas Extrasolares que orbitan estrellas de tipo espectral F dentro de la zona habitable.....	84
Figura 4.13	
a vs M^* Planetas Extrasolares que orbitan estrellas de tipo espectral G dentro de la zona habitable.....	84
Figura 4.14	
a vs M^* Planetas Extrasolares que orbitan estrellas de tipo espectral K dentro de la zona habitable.....	85
Figura 4.15	
a vs M^* Planeta Extrasolar que orbita una estrella de tipo espectral M dentro de la zona habitable.....	85
Figura 4.16	
Relación de los principales parámetros orbitales hasta ahora reportados por los investigadores de los planetas extrasolares.....	87