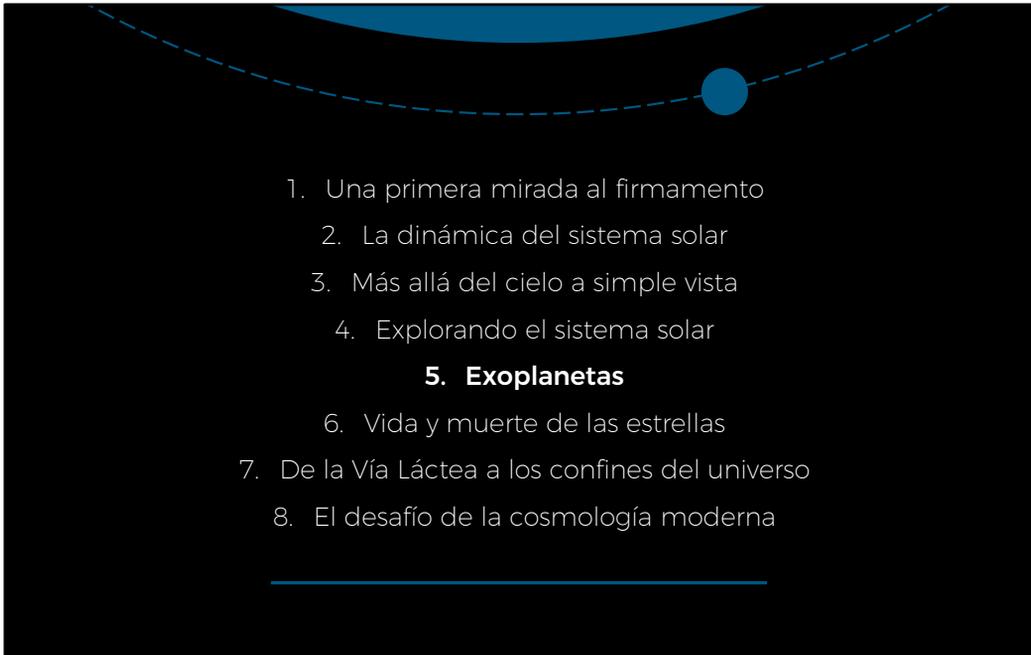




Curso de astronomía y astrofísica “Del Planetario al Cosmos 2025”.

Sesión 5: Exoplanetas. 3 de abril.

Rodrigo González Peinado.



Programa del curso



# ÍNDICE

1. Introducción
  2. Métodos de detección
  3. Clasificación
  4. Evolución
  5. Habitabilidad
  6. Exoplanetas reseñables
  7. Futuro
- 

Índice de la sesión. Puntos más importantes: 2, 3 y 4.



La exoplanetología, o ciencia dedicada a la búsqueda, detección y caracterización de los exoplanetas, es una ciencia relativamente reciente, con menos de 40 años de funcionamiento, en la que se entremezclan varias disciplinas como la astrofísica, la astroquímica, la astrobiología o la astrogeología.

Al ser una “ciencia nueva”, todavía adolece de varios defectos y muchas de las cuestiones que veremos en esta sesión son susceptibles de modificación en los próximos años.

Preguntas a  
**responder**

¿Qué es un exoplaneta?

¿Cómo los detectamos?

¿Cuántos conocemos y cómo son?

¿Qué nos pueden enseñar?

¿Qué hay nuevo?

1. Introducción Exoplanetas 1

Aun así, estos 40 años de estudio de exoplanetas nos han servido para configurar una imagen de ellos relativamente completa y rigurosa. En esta sesión intentaremos dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿qué es un exoplaneta?, ¿cómo los detectamos?, ¿por qué son importantes en nuestra concepción actual del universo?, ¿qué nos pueden enseñar acerca de nuestro planeta? y ¿cuál es el estado del arte actual en la exoplanetología?



El nacimiento de la exoplanetología como ciencia suele fecharse en 1995 con el descubrimiento del primer exoplaneta alrededor de una estrella similar al Sol (51 Pegasi), realizado por los astrofísicos Michel Mayor y Didier Queloz.

A photograph of the Haute-Provence Observatory dome at night, illuminated from within, with the telescope's opening visible. The dome is white and sits on a dark base. The background is a dark blue sky with a faint star.

Observatorio  
**Haute-Provence**

Latitud  $43^{\circ} 55' 51''$ N  
Longitud  $5^{\circ} 42' 48''$  E  
Telescopio 1,93 metros  
Espectrógrafo ELODIE  
Campaña 1994/1995

1. Introducción Exoplanetas 3

El descubrimiento se produjo en la campaña de observación 1994-1995 desde el Observatorio de la Alta Provenza utilizando el espectrógrafo ELODIE, situado en el telescopio de 1,93 m de diámetro.

Observatorio de la Alta Provenza:  
<http://www.obs-hp.fr/welcome.shtml>

Helvetios

# 51 Pegasi

RA 22h 57min 27,98"  
DE +20° 46' 07,79"  
Paralaje 64,40 mas  
Tipo espectral G2V

51 Peg Sol



1. Introducción Exoplanetas 4

The diagram illustrates the 51 Pegasi system. It features a central star, 51 Pegasi, depicted as a bright yellow-white point of light. To its right, a large blue circle represents the planet 51 Pegasi b. A dashed blue line indicates the planet's elliptical orbit around the star. In the background, a circular field of view shows a dense field of distant stars, with the central star being the most prominent. At the bottom left, two smaller blue circles are shown, labeled '51 Peg' and 'Sol' for comparison. The bottom of the slide has a blue bar with the text '1. Introducción', 'Exoplanetas', and a small circle containing the number '4'.

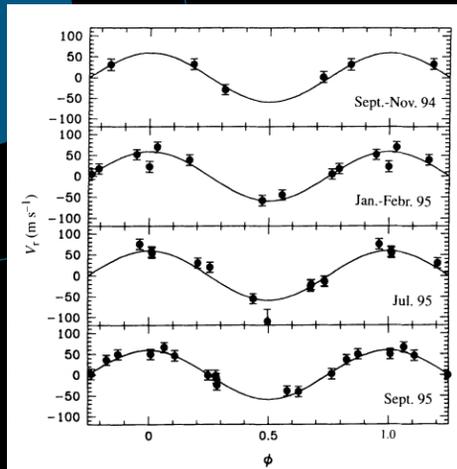
La muestra de Mayor y Queloz se componía de más de 140 estrellas de tipo G y K, es decir, con temperaturas similares a la soar. La primera en la que detectaron un exoplaneta fue 51 Pegasi, una estrella en la constelación de Pegasus situada a medio camino entre las estrellas Markab y Funda. Se localiza a 15,5 parsecs (50,6 años luz) y posee un tipo espectral G2V, es decir, el mismo tipo que el Sol, aunque algo más grande que este.

Más información de la estrella:

<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=51+Pegasi>

# A Jupiter-mass companion to a solar type star

(Mayor, M. & Queloz, D., 1995)



nature

1. Introducción

Exoplanetas

5

Usando el espectrógrafo ELODIE, Mayor y Queloz obtuvieron la curva de velocidad radial de la estrella, la cual nos da información sobre el movimiento de la estrella a partir del desplazamiento del espectro con respecto a uno de referencia. De ese desplazamiento se puede inferir que la estrella se mueve en torno a un centro común de masas, y que ese movimiento se debe a la presencia de un exoplaneta.

Artículo original:

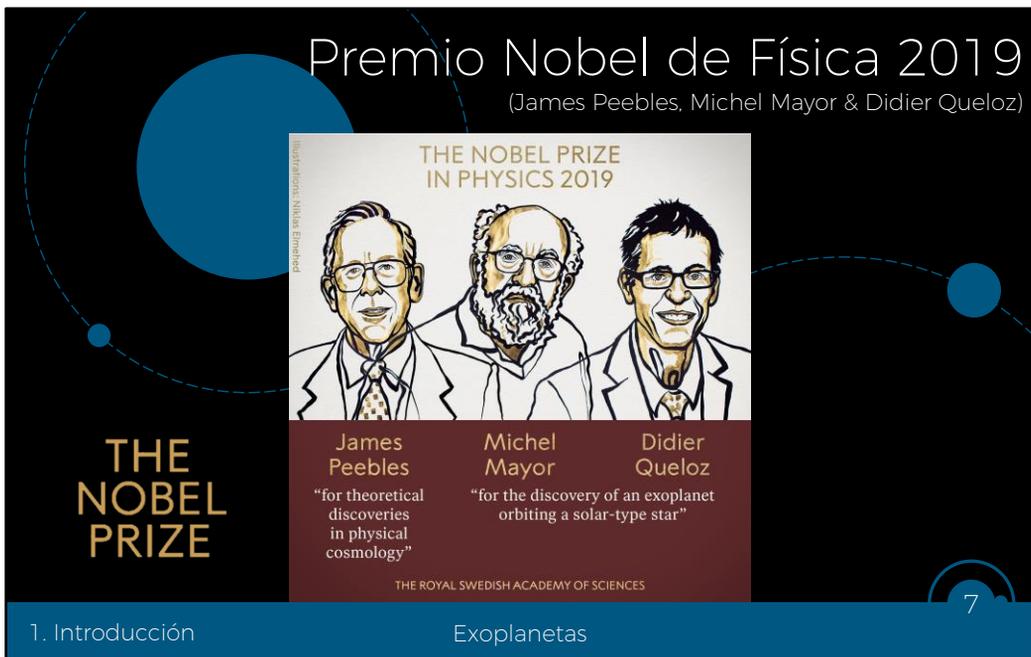
<https://www.nature.com/articles/378355a0>

<https://web.pa.msu.edu/courses/2011spring/AST208/mayorQueloz.pdf>



El exoplaneta descubierto se denominó 51 Pegasi b, el cual es la mitad de masivo que Júpiter, pero casi dos veces su tamaño. Orbita a 51 Pegasi cada 4 días y posee una temperatura efectiva de 1.000 °C.

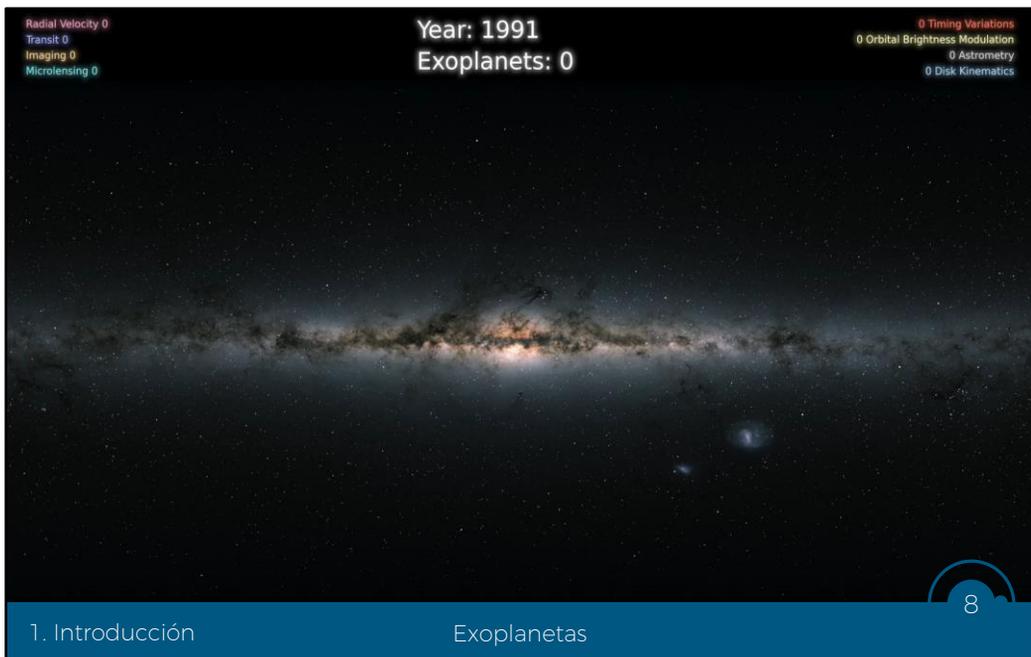
Más información sobre 51 Pegasi b:  
[https://exoplanet.eu/catalog/51\\_peg\\_b--12/](https://exoplanet.eu/catalog/51_peg_b--12/)



Mayor y Queloz fueron ambos galardonados con el Premio Nobel de Física en 2019, compartido con el cosmólogo James Peebles.

Conferencia de Michel Mayor:

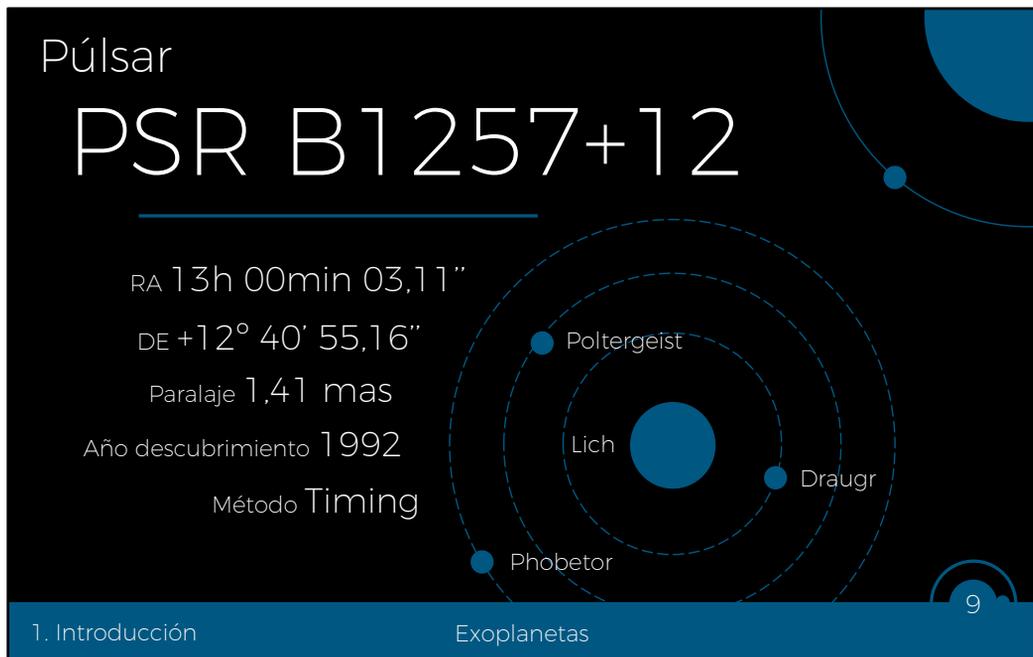
<https://www.youtube.com/watch?v=Vgt88xw6iG0>



Desde entonces, se han detectado más de 5.500 exoplanetas: planetas que orbitan alrededor de otras estrellas que no son el Sol. Este vídeo muestra los exoplanetas descubiertos hasta 2022 sonificado a distancia del exoplaneta a su estrella.

Vídeo:

<https://www.youtube.com/watch?v=yv4DbU1CWAY>



Aun así, es conveniente mencionar que 51 Pegasi b no fue el primer exoplaneta descubierto. Ese honor lo poseen tres exoplanetas orbitando en torno al pulsar Lich, descubiertos por [Aleksander Wolszczan y Dale Frail en 1992](#).

Artículo original: <https://www.nature.com/articles/355145a0>



# 2

## MÉTODOS DE DETECCIÓN





# ¿Qué es un exoplaneta?

1. Objeto celeste con **masa verdadera** por debajo del límite de masa para la **fusión de deuterio** (13 masas de Júpiter para objetos con metalicidad solar) que orbitan en torno a **estrellas, enanas marrones o remanentes estelares** que tienen una **relación de masas** con el objeto central por debajo de la inestabilidad  $L_4/L_5$  ( $M/M_{\text{central}} < 2/(25+\sqrt{621}) \approx 1/25$ ).

2. Métodos de detección

Exoplanetas

10

La UAI define la categoría exoplaneta como sigue:



Infografía con los cuatro métodos más exitosos en la búsqueda de exoplanetas: velocidad radial, tránsitos, microlente gravitatoria e imagen directa.

# Velocidad radial

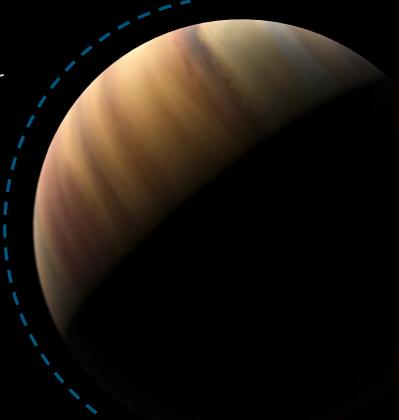


Fundamento Efecto Doppler

Ventajas Masa y parámetros orbitales

Desventajas Planetas grandes y en órbita cercana

Detectados 1112



En el método de velocidades radiales se mide el desplazamiento del espectro de una estrella debido a su interacción gravitatoria con otro objeto (efecto Doppler). Mediante el estudio de la variación de la longitud de onda, se puede obtener la masa mínima del planeta (conociendo la inclinación). Está sesgado hacia planetas muy masivos y cercanos a su estrella, como 51 Pegasi b.

Más información sobre el método de velocidades radiales:

<https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet/#/1>

Cálculo de la masa del exoplaneta a partir de la medida de la velocidad radial:

<https://www.danfleich.com/sgmoa/supplemental/FindExtrasolarPlanetMass.pdf>

Formalismo matemático:

[http://www.relativitycalculator.com/pdfs/RV\\_Derivation.pdf](http://www.relativitycalculator.com/pdfs/RV_Derivation.pdf)

An infographic on a black background. At the top left is a solid blue circle representing a star. Below it is a large, detailed image of a gas giant planet with orange and white bands, representing an exoplanet. A dashed blue line forms a semi-circle around the planet. To the right of the planet, the word 'Tránsitos' is written in white, underlined with a blue horizontal line. Below the title, the text 'Fundamento Eclipse fotométrico' is written. Underneath that, 'Ventajas Radio, temperatura, composición' is listed. Below that, 'Desventajas Inclinaciones de 90 y falsas detecciones' is listed. At the bottom right, 'Detectados 4360' is written.

# Tránsitos

Fundamento Eclipse fotométrico

Ventajas Radio, temperatura, composición

Desventajas Inclinaciones de 90 y falsas detecciones

Detectados 4360

En el método de los tránsitos se mide la disminución de brillo de una estrella cuando el exoplaneta cruza por delante de ella. Estudiando esa disminución de brillo, se puede conocer el radio del planeta. Es actualmente el método más efectivo, pero que solo funciona si el exoplaneta está alineado con la línea de visión de la Tierra.

Más información sobre el método de tránsitos:

<https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet/#/2>

Cálculo del radio de un exoplaneta a partir de la disminución del brillo de la estrella:

<https://astro.unl.edu/newRTs/Transits/background/Transit1.html>

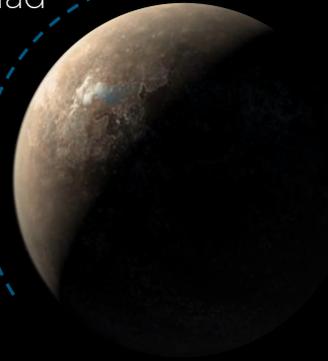
# Microlente

Fundamento T<sup>a</sup> Gral. Relatividad

Ventajas Relación de masas  
y distancia angular

Desventajas Improbable

Detectados 235



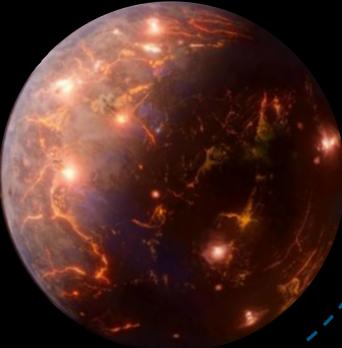
Microlente gravitatoria: se estudia cómo una estrella con un exoplaneta curva la luz de otro objeto lejano, normalmente otra estrella. Se basa en la teoría general de la relatividad de Albert Einstein.

Más información:

<https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet/#/4>

● ○

# Imagen directa



Fundamento Cronógrafo

Ventajas Evidencia directa

Desventajas Muy difícil y sesgado a planetas grandes y lejanos

Detectados 83

Imagen directa: el exoplaneta se detecta directamente haciendo uso de telescopios.

Más información:

<https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet/#/3>



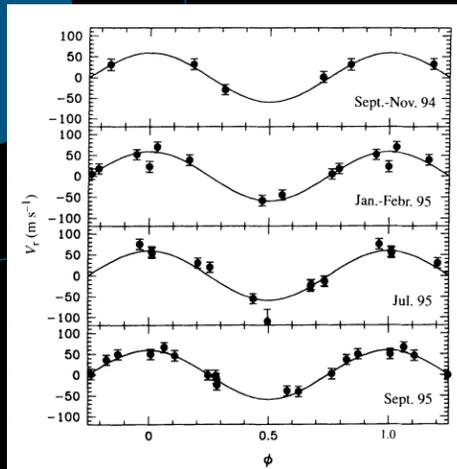
De todos ellos, el método más efectivo hasta ahora es el de los tránsitos, con un 74,3% del total de exoplanetas descubiertos. Le sigue el de velocidades radiales, con un 18,9%.

A su vez, existen otros métodos de detección, aunque mucho menos efectivos: pulsar timing, astrometría, variación de duración del tránsito...

Más información sobre otros métodos de detección:  
<https://arxiv.org/abs/1210.2471>

# A Jupiter-mass companion to a solar type star

(Mayor, M. & Queloz, D., 1995)



nature

51 Pegasi b

12

2. Métodos de detección

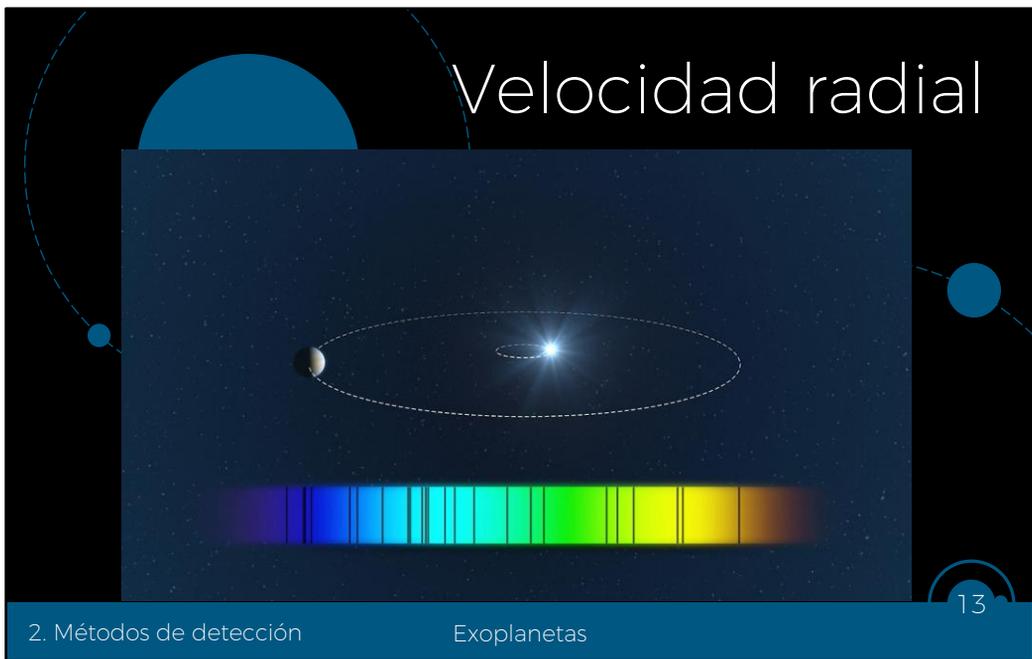
Exoplanetas

Ejemplo de espectro obtenido por la técnica de velocidad radial.

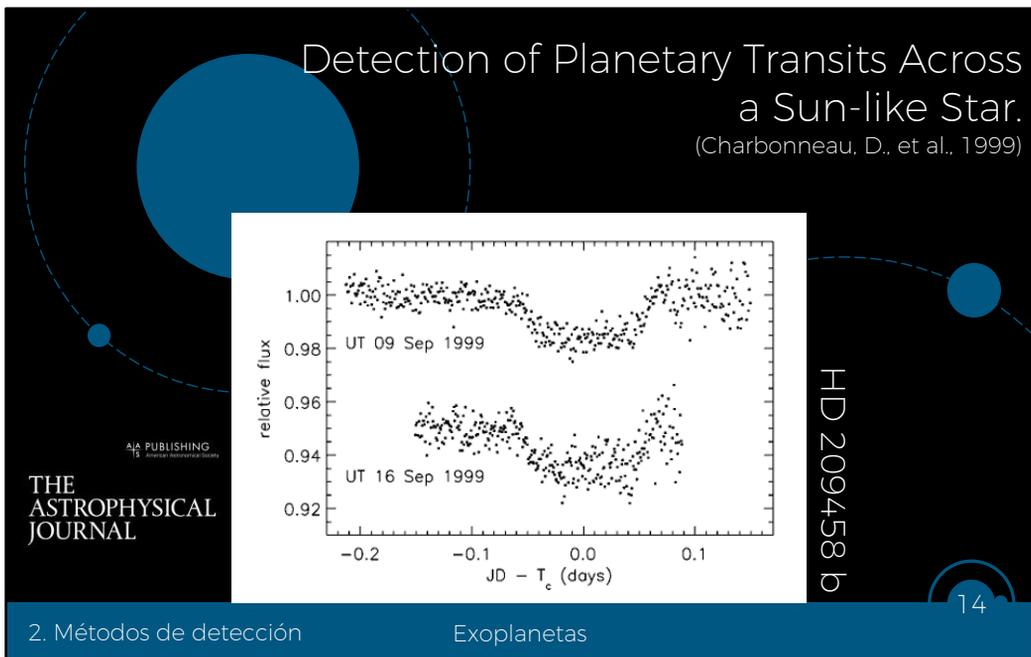
Artículo original:

<https://www.nature.com/articles/378355a0>

<https://web.pa.msu.edu/courses/2011spring/AST208/mayorQueloz.pdf>



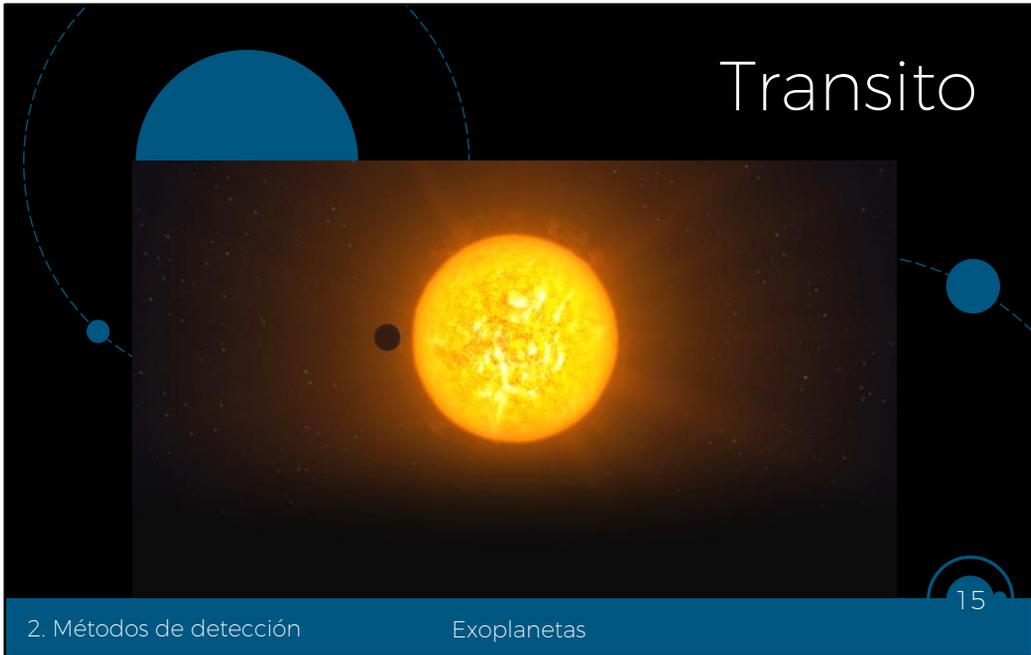
Esquema del desplazamiento Doppler generado por la órbita de un exoplaneta masivo sobre su estrella huésped.



Ejemplo de espectro obtenido por la técnica de los tránsitos.

Artículo original:

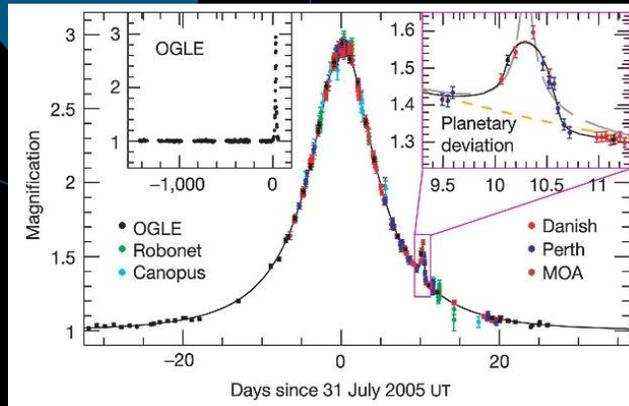
<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/312457>



Visualización de la curva de luz de una estrella al pasar por delante de ella un exoplaneta.

# Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing

(Beaulieu, J. P., et al., 2006)



2. Métodos de detección

Exoplanetas

16

Ejemplo de espectro obtenido mediante microlente gravitatoria.

Artículo original: <https://www.nature.com/articles/nature04441>



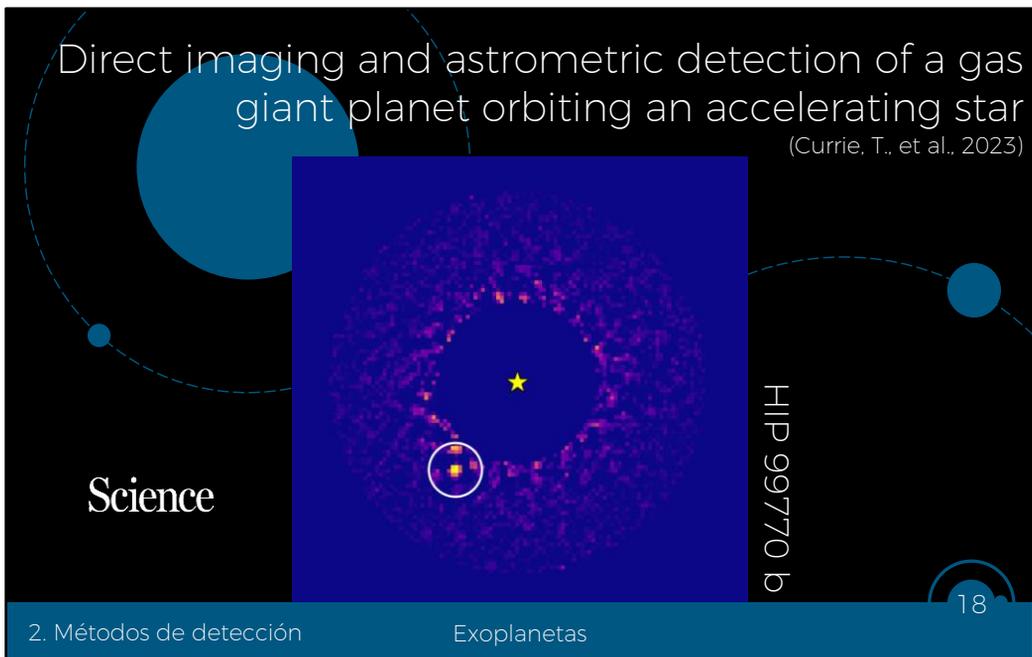
The diagram illustrates the concept of gravitational microlensing. It features a dark background with a field of stars. Two stars are highlighted: a yellow one on the left and a blue one on the right. A white line graph is overlaid on the scene, with the vertical axis labeled 'Brightness'. The graph shows a constant baseline level of brightness that suddenly increases to a higher level for a short duration, representing the light boost caused by a passing exoplanet.

Microlente  
gravitatoria

2. Métodos de detección Exoplanetas

17

Explicación gráfica de una microlente gravitatoria aplicado a exoplanetas: el exoplaneta incrementa el brillo de la estrella que tiene a su fondo.



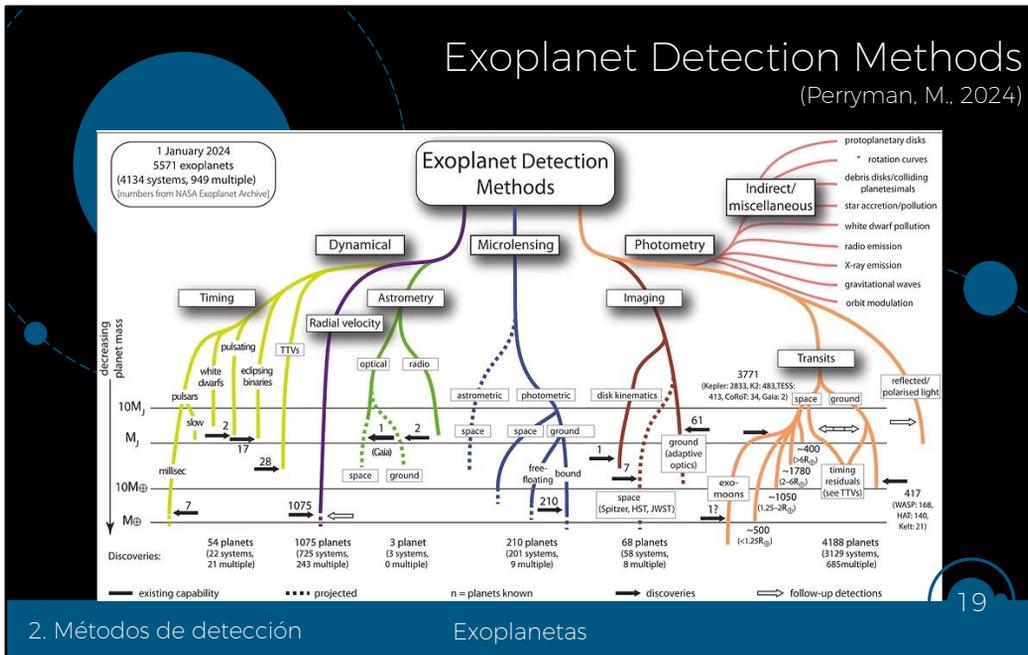
Ejemplo de exoplaneta detectado con imagen directa.

Artículo original:

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.abo6192>

# Exoplanet Detection Methods

(Perryman, M., 2024)



2. Métodos de detección

Exoplanetas

19

La ventaja es que todos estos métodos, y otros, no son excluyentes entre sí. Utilizar varios métodos diferentes refuerza la existencia de un exoplaneta y refina los demás métodos.

Resumen de métodos de detección:

[https://www.researchgate.net/publication/232063462\\_Exoplanet\\_Detection\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/232063462_Exoplanet_Detection_Methods)

<https://www2.mpia-hd.mpg.de/homes/ppvi/chapter/fischer.pdf>

Imagen:

<https://www.michaelperryman.co.uk/exoplanets>

# Criterios de selección de estrellas

Estrellas tipo solar (FGK) o más frías (M)

Estrellas cercanas y de baja masa

Estrellas estables y poco activas

Estrellas de edad intermedia

2. Métodos de detección

Exoplanetas

20

Para seleccionar las estrellas más potenciales a la hora de detectar exoplanetas, los diferentes grupos de investigación dan preferencia a unas características sobre otras, motivados en muchas ocasiones por su financiación, la competitividad, los intereses académicos y científicos...

Las estrellas tipo solar (FGK) poseen la ventaja de que poseen vidas lo suficientemente largas y estables para favorecer la aparición de exoplanetas. Además, no son demasiado brillantes (estrellas O, B, A) de forma que no deslumbra a los aparatos. Por último, encontrar exoplanetas con las características más similares a la Tierra (análogos terrestres) es el objetivo principal de la exoplanetología.

Por otro lado, las estrellas M, al ser de baja masa, favorecen la detección por el método de la velocidad radial y son las más abundantes en el universo (el 70% de las estrellas de la Vía Láctea son enanas M). Aun así, son estrellas con una actividad estelar alta, por lo que hay que tener cuidado con el ruido y los falsos positivos. Esta actividad también afecta al propio exoplaneta, convirtiéndolo en no habitable.



3

# CLASIFICACIÓN

---



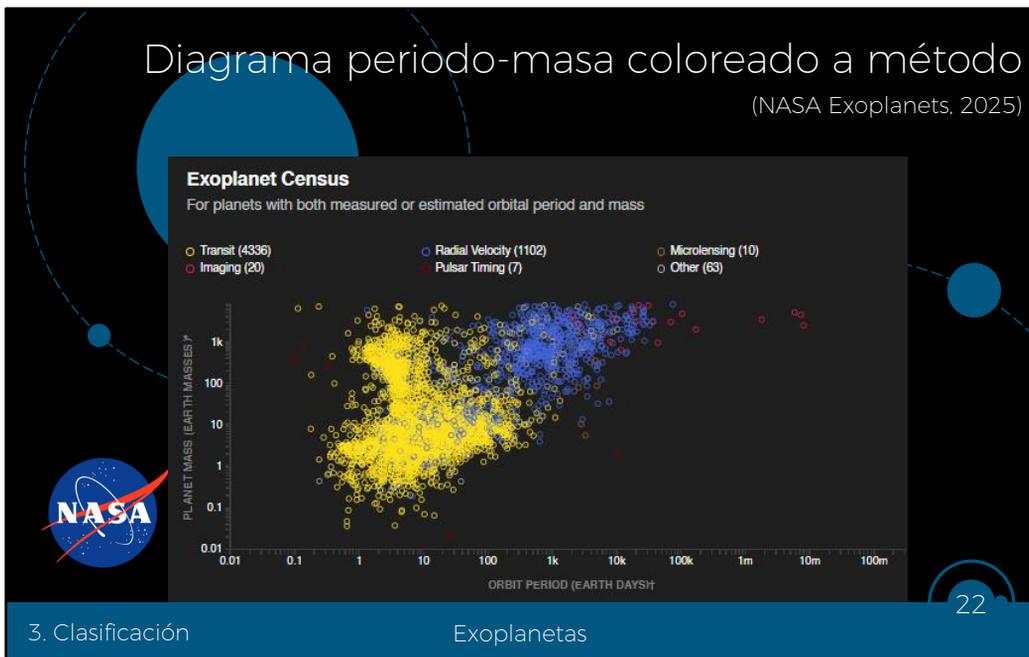
A 3 de abril de 2025, el Archivo de Exoplanetas de la NASA tiene contabilizados 5.867 exoplanetas descubiertos en 4.377 sistemas planetarios, con otros 7.760 candidatos a exoplanetas.

Datos:

<https://science.nasa.gov/exoplanets/discoveries-dashboard/>

# Diagrama periodo-masa coloreado a método

(NASA Exoplanets, 2025)



3. Clasificación

Exoplanetas

22

Censo de exoplanetas coloreado a método de descubrimiento.



La misión Kepler ha sido la más efectiva a la hora de detectar exoplanetas, seguida de TESS y WASP. CARMENES, que lo veremos al final de la sesión, se sitúa en el Top 5.

# Telescopio Espacial Kepler (+K2)

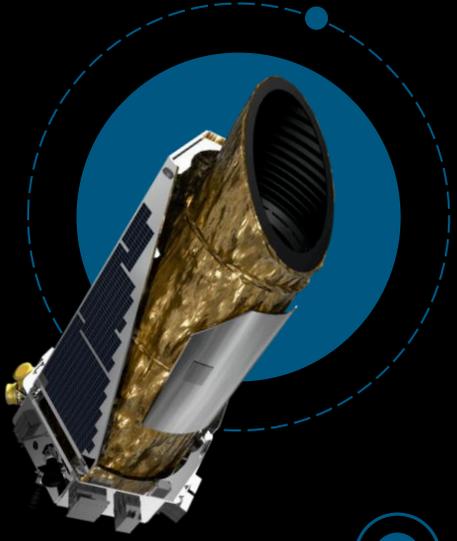
Método Tránsitos

Lanzamiento 06 marzo 2009

Período de actividad 9,5 años

Exoplanetas confirmados 3.326

FOV 115 deg<sup>2</sup>



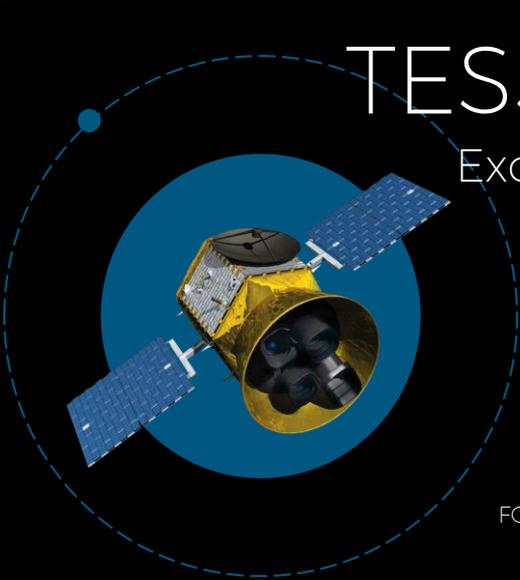
3. Clasificación Exoplanetas

24

El Telescopio Espacial Kepler ha representado un antes y un después en la exoplanetología, con más de 3.300 exoplanetas descubiertos en la región Cygnus-Lyra. Se eligió esta zona por varios motivos: está relativamente lejana de la eclíptica, por lo que Kepler está protegido de la luz solar; las estrellas allí están más o menos a la misma distancia del centro galáctico que la Tierra.

Más información sobre la misión:

[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/kepler/overview/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/overview/index.html)



TESS Transiting  
Exoplanet Survey System

Método Tránsitos  
Lanzamiento 18 abril 2018  
Periodo de actividad 4 años  
Exoplanetas confirmados 620  
FOV All-sky

3. Clasificación Exoplanetas 25

El observatorio TESS, sucesor de Kepler, ya ha conseguido monitorear más de 200.000 estrellas preseleccionadas y detectar 440 exoplanetas (con más de 7.000 candidatos).

Más información:

<https://tess.mit.edu/>

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

<https://www.nasa.gov/tess-transiting-exoplanet-survey-satellite>

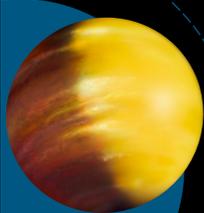


# Nomenclatura de exoplanetas

Dos elementos: (1) Nombre propio o abreviación más (2) una letra minúscula, comenzando por la b.

El primer elemento puede ser: el nombre propio de la estrella, su nombre de catálogo, nombre de la misión...

El segundo elemento corresponde al orden de descubrimiento del exoplaneta (b, c, d...).

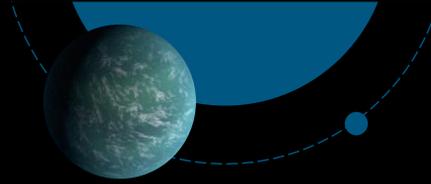


3. Clasificación Exoplanetas 26

Los exoplanetas se denominan siguiendo unas normas universales entre la comunidad científica.

Nomenclatura de exoplanetas:

[https://www.iau.org/public/themes/naming\\_exoplanets/](https://www.iau.org/public/themes/naming_exoplanets/)



En ocasiones, el exoplaneta posee nombre propio, además del científico (Dimidio, Quijote, Galileo, Hypatia, Osiris, Poltergeist...).

Existen campañas públicas de nombramiento de exoplanetas (NameExoWorlds).

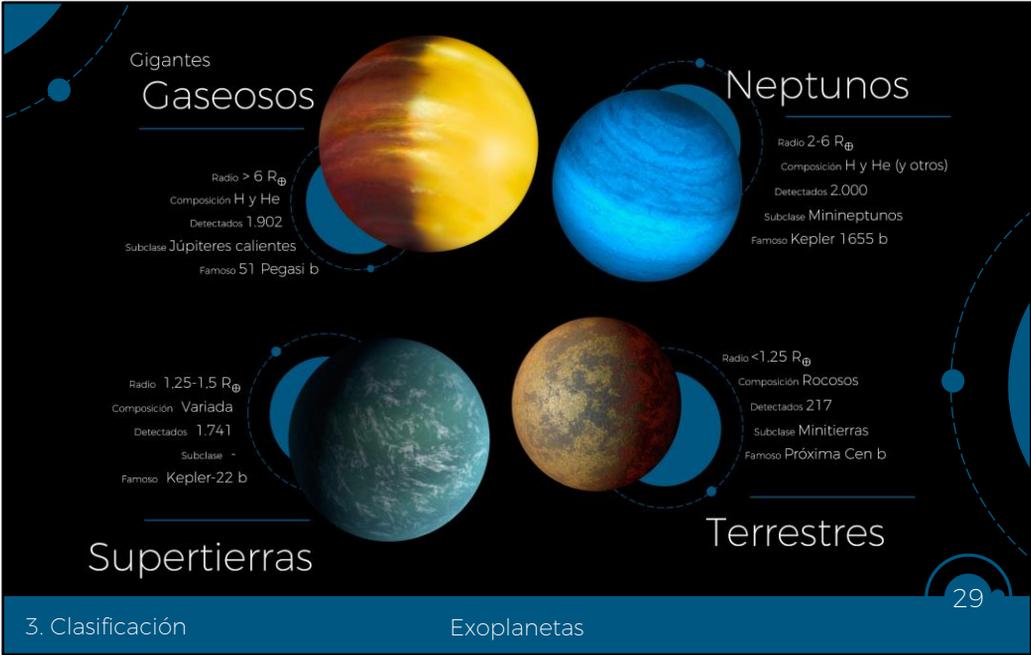
Una palabra, menos de 16 caracteres, pronunciable y no ofensiva.

# Nomenclatura de exoplanetas

27



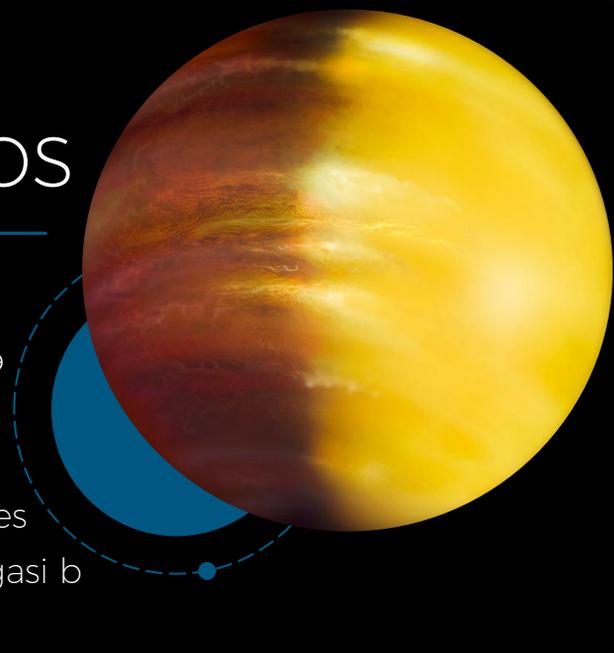
En función de su tamaño, clasificamos los planetas en cuatro tipos mayoritarios: gigantes gaseosos, neptunos, supertierras y terrestres. Los planetas del sistema solar también deben incluirse en alguno de estos tipos.



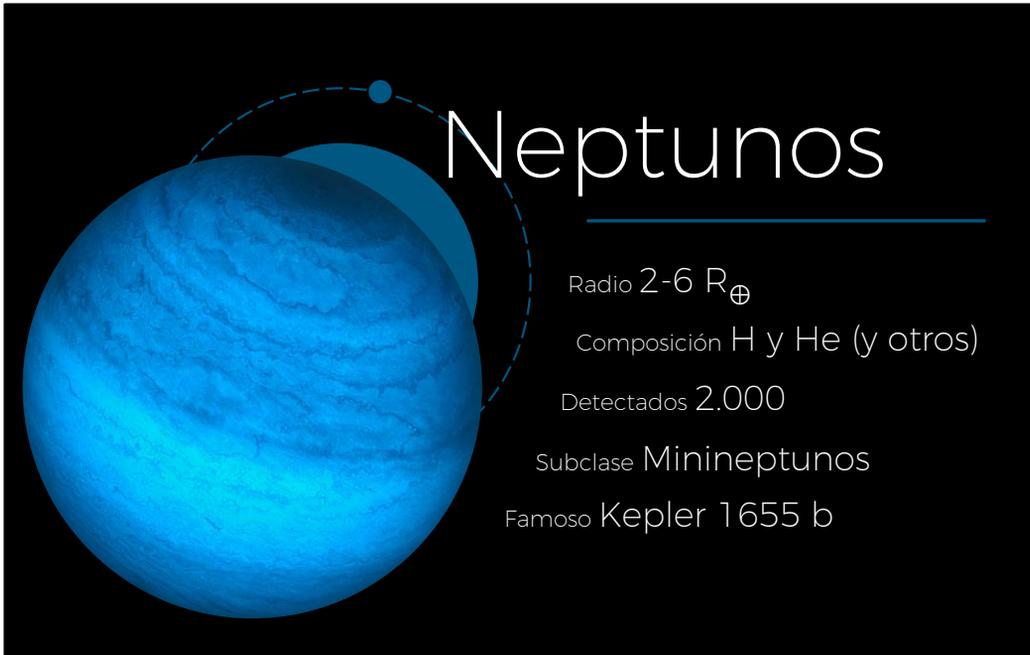
# Gigantes Gaseosos

---

Radio  $> 6 R_{\oplus}$   
Composición H y He  
Detectados 1.902  
Subclase Júpiteres calientes  
Famoso 51 Pegasi b

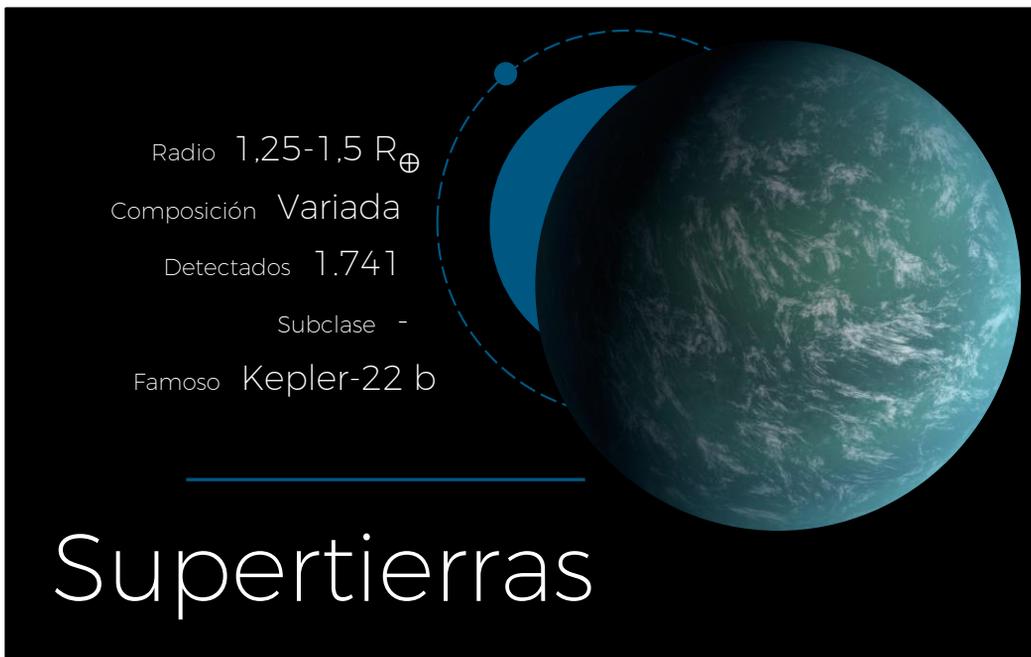


Los gigantes gaseosos son los exoplanetas más grandes. Poseen radios superiores a seis veces el radio de la Tierra y están compuestos casi en su totalidad de hidrógeno y helio. Júpiter y Saturno serían gigantes gaseosos.



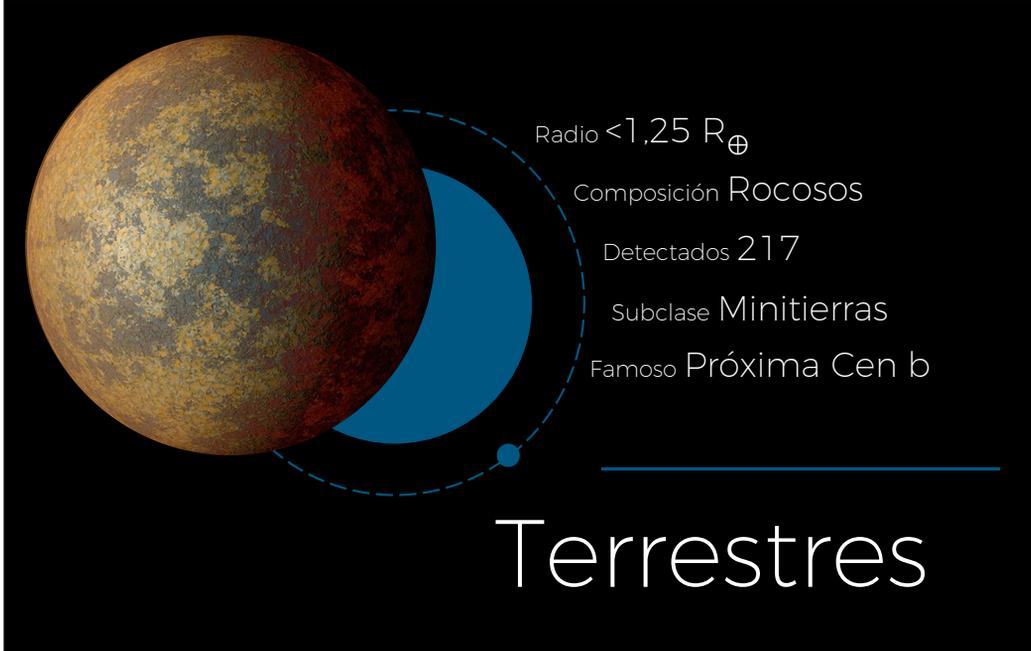
Los siguientes en orden de tamaños son los neptunos, con radios entre dos y seis veces el radio de la Tierra. Además de H y He poseen cantidades importantes de amoníaco, metano... Son los más abundantes descubiertos hasta ahora.

Urano y Neptuno serían neptunos.



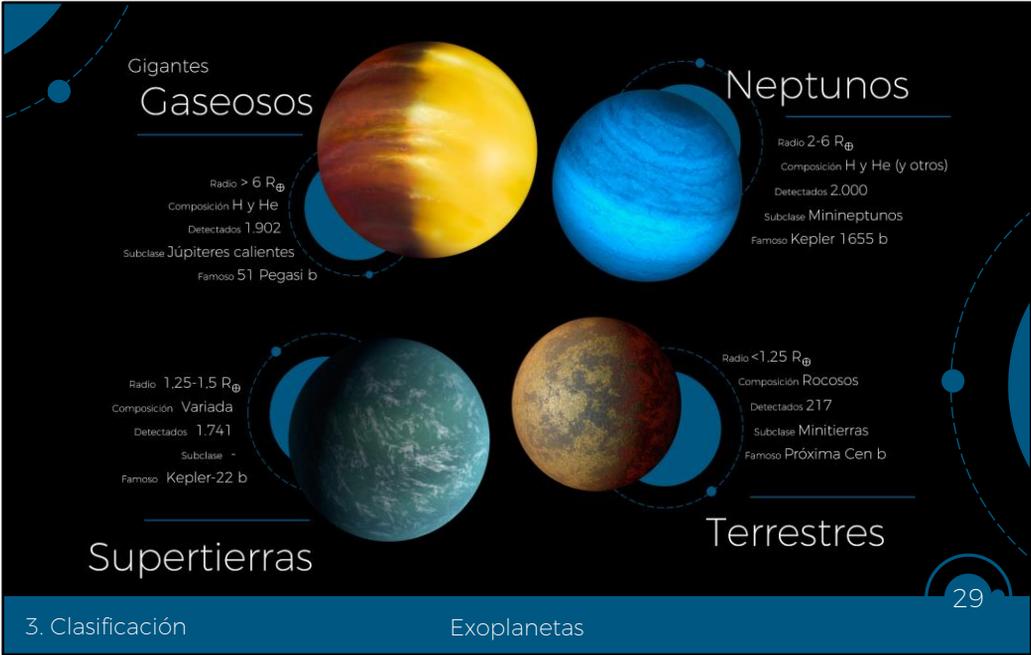
Las supertierras varían entre 1,25 y 1,5 veces el radio de la Tierra. No tienen por qué ser rocosos, por lo que el nombre de supertierra quizás no sea el más conveniente.

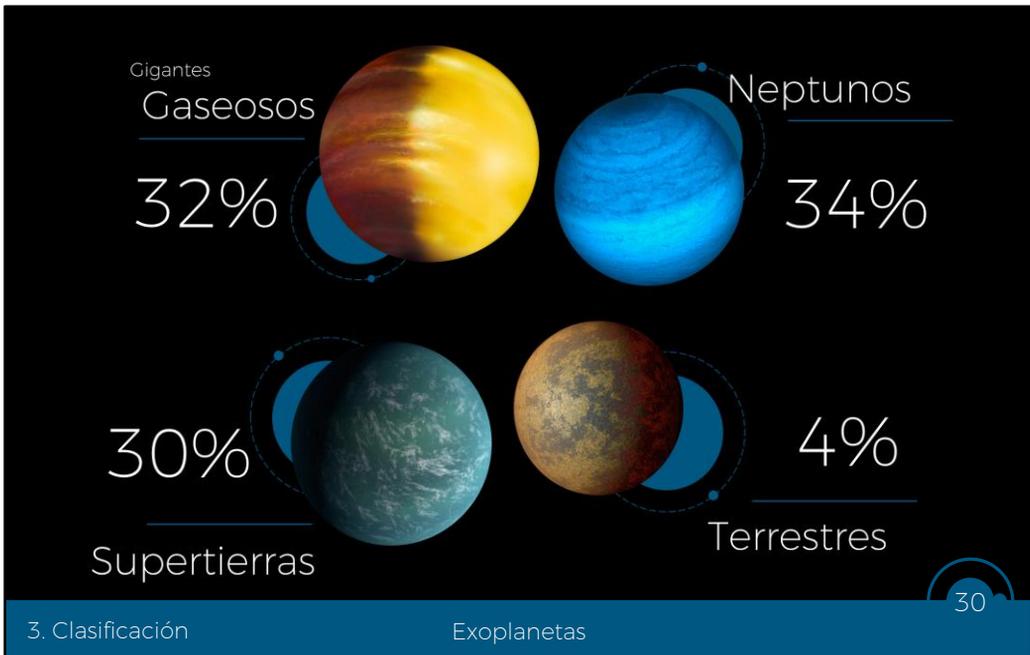
No existen de este tipo de objetos en el sistema solar, que sepamos.



Los más pequeños de todos son los exoplanetas terrestres, con radios inferiores a 1,25 veces el radio de la Tierra y una composición rocosa.

Mercurio, Venus, Tierra y Marte serían terrestres.





Los neptunos son los exoplanetas más descubiertos hasta la fecha, aunque estadísticamente no distan mucho de los gaseosos y las supertierras. Los terrestres solo representan un 4% de los exoplanetas descubiertos, lo que indica que nuestras técnicas de detección están todavía bastante sesgadas hacia exoplanetas grandes.

Estadísticas:

<https://science.nasa.gov/exoplanets/discoveries-dashboard/>



Con los datos obtenidos de masas, radios... con las diferentes técnicas, podemos construir diagramas interesantes en donde se revelan los diferentes tipos de exoplanetas.

Diagrama periodo vs. masa: júpiteres calientes y desierto neptuniano

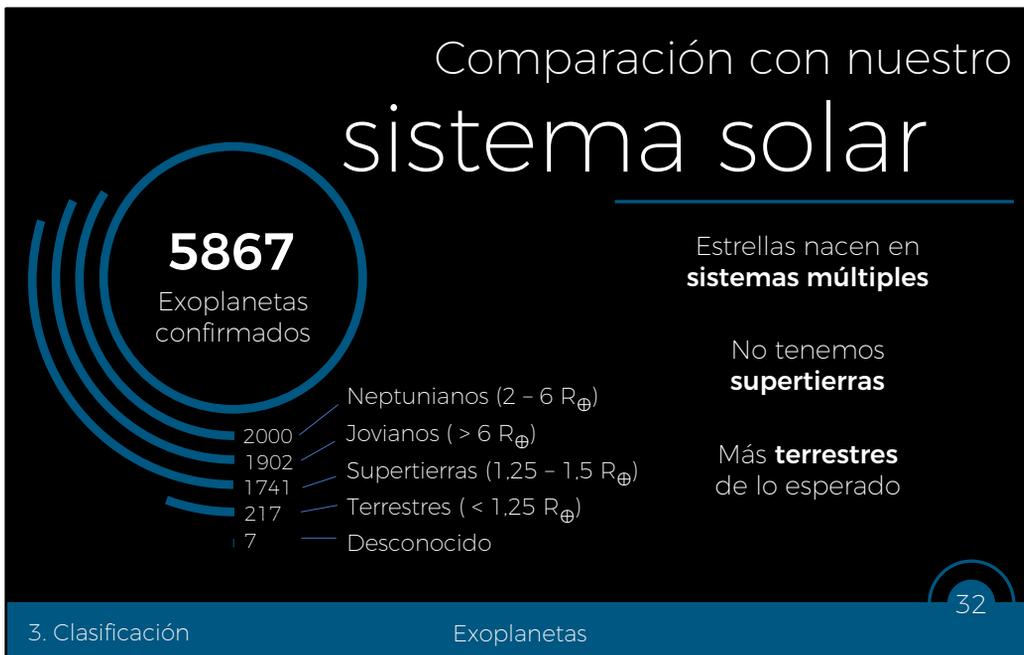
Histograma radio vs. número de planetas: hueco de Fulton o valle de fotoevaporación

Enlaces:

NASA: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

The Extrasolar Planet Encyclopaedia: <https://exoplanet.eu/plots/>

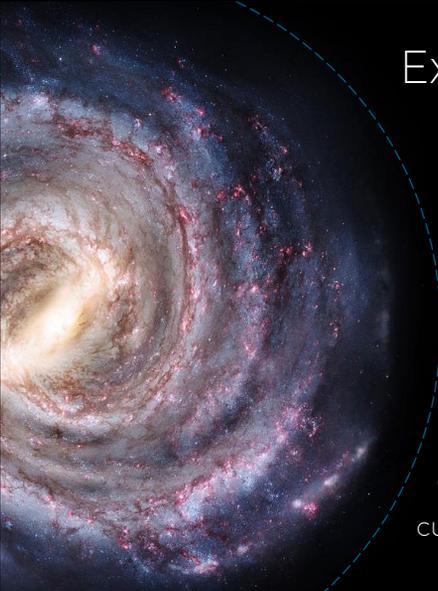
Open Exoplanet Catalogue: <https://www.openexoplanetcatalogue.com/>



Desde 1992 hemos descubierto 5832 exoplanetas, los cuales los podemos clasificar en cuatro grandes grupos: jovianos, neptunianos, supertierras y terrestres. En comparación con los exoplanetas descubiertos, nuestro sistema solar carece de supertierras, muy comunes en el resto de la galaxia. Además, la mayor parte de estrellas (2/3) nacen en sistemas binarios, a diferencia del Sol.

Con estos datos podemos decir que nuestro sistema solar es bastante particular, si bien es posible que nuestros sesgos observacionales sean el causante de este problema.

Artículo: <https://www.forbes.com/sites/jamiecartereurope/2023/03/06/our-solar-system-is-the-rarest-kind-in-the-milky-way-say-scientists/>



## Extrapolación a la Vía Láctea

Asumiendo que nuestra galaxia cuenta con entre 200.000 y 400.000 millones de estrellas, una estimación **conservadora** sería considerar un exoplaneta por estrella y que, de ellos, el 10% se sitúe en su HZ, de los cuales el 4% serían rocosos.

3. Clasificación Exoplanetas 33

Si realizamos un cálculo sencillo extrapolando a toda la Vía Láctea, la cual cuenta con entre 200.000 y 400.000 millones de estrellas, y asumiendo conservadoramente que existe un exoplaneta por cada estrella, obtendríamos que, tan solo en nuestra galaxia, podría haber del orden de 200.000 millones de exoplanetas.

Si pensamos en solo los que se encontrarían en la zona habitable de su estrella (10%) que a su vez fuesen del tamaño de la Tierra (4%), obtendríamos del orden de 800 millones de exoplanetas de tipo terrestre en la zona de habitabilidad de su estrella en la Vía Láctea.



4

# EVOLUCIÓN



Formación de  
**(exo)planetas**

La formación de exosistemas planetarios es una extrapolación del modelo de formación de nuestro sistema solar.

Sus orígenes se rastrean hasta los trabajos de Emanuel Swedenborg (1688-1772), Immanuel Kant (1724-1804) y Pierre-Simon Laplace (1749-1827).

**Modelo Estándar de Disco Solar Nebular (SNDM)** con modificaciones (**Modelo de Niza**).

4. Evolución Exoplanetas 34

La formación de exoplanetas debe ser igual a la de los planetas del sistema solar. El Modelo de Disco Solar Nebular de Safronov también funciona en el caso de los planetas extrasolares.

La modificación más importante a este modelo es el llamado modelo de Niza, el cual intenta explicar el bombardeo intenso tardío a partir de la migración de Urano y Neptuno hacia posiciones exteriores del sistema solar.

Evolution of the protoplanetary cloud  
and formation of the Earth and the planets  
(Safronov, V., 1969)

AKADEMIYA NAUK SSSR  
INSTITUT FIZIKI ZEMLI IMENI O. Ye. SHMIDTA  
Academy of Sciences of the USSR  
Soviet Institute of the Physics of the Earth

V.S. Safronov

EVOLUTION OF THE  
PROTOPLANETARY CLOUD  
AND FORMATION OF THE  
EARTH AND THE PLANETS  
(Evolyutsiya protoplanetnoy obolaki i obrazovanie Zemli i planet)

Izdaniye "Nauka"  
Moskva, 1969

AKADEMIYA  
HAYK  
CCCP

4. Evolución

Exoplanetas

35

Fuente:

[https://ia600208.us.archive.org/21/items/nasa\\_techdoc\\_19720019068/19720019068.pdf](https://ia600208.us.archive.org/21/items/nasa_techdoc_19720019068/19720019068.pdf)

Explicación de:

- Movimientos orbitales
- Edades y abundancias
- Diferenciación planetaria
- Existencia de otros objetos

A partir de:

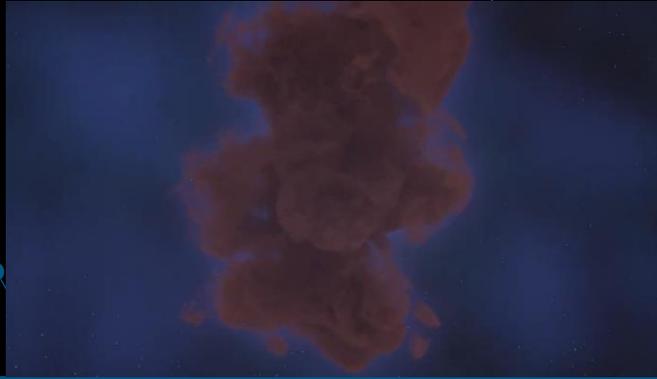
- Estructura presente
- Meteoritos y cometas
- Sistemas en formación

4. Evolución Exoplanetas 36

La formación de los sistemas exoplanetarios tiene que ser compatible con la de nuestro sistema solar. Por ello, un modelo de formación planetario tiene que explicar los movimientos orbitales de los objetos, así como sus edades, abundancias, la diferenciación planetaria y la existencia de otros objetos (nube de Oort, asteroides...).

Para ello, debe considerar la actual estructura del sistema solar, el estudio de meteoritos y cometas y el resto de sistemas en formación.

# Modelo estándar de disco solar nebular



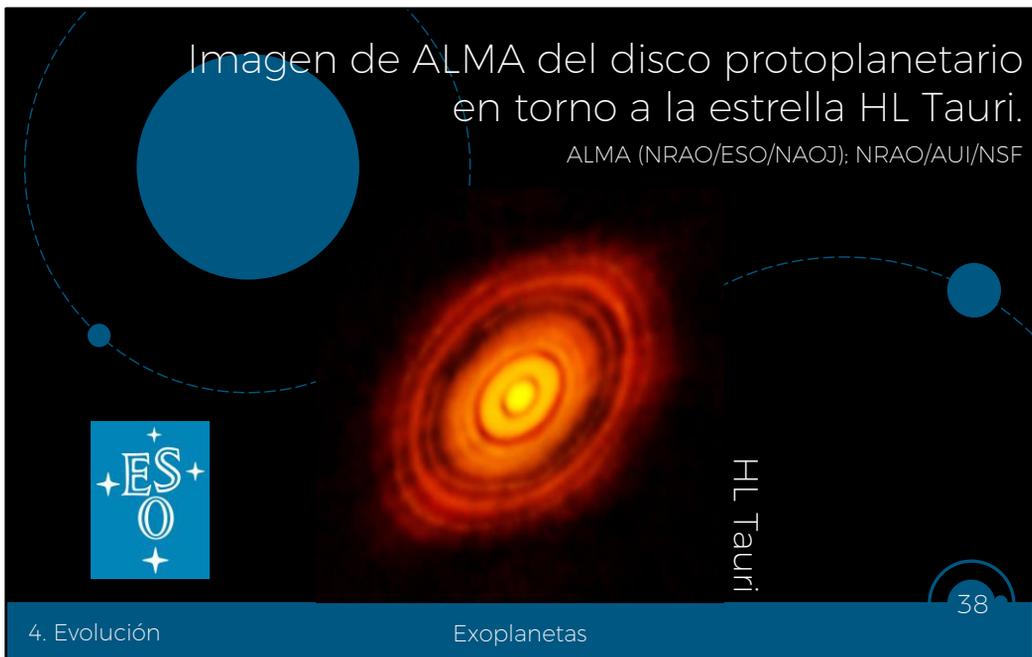
4. Evolución

Exoplanetas

37

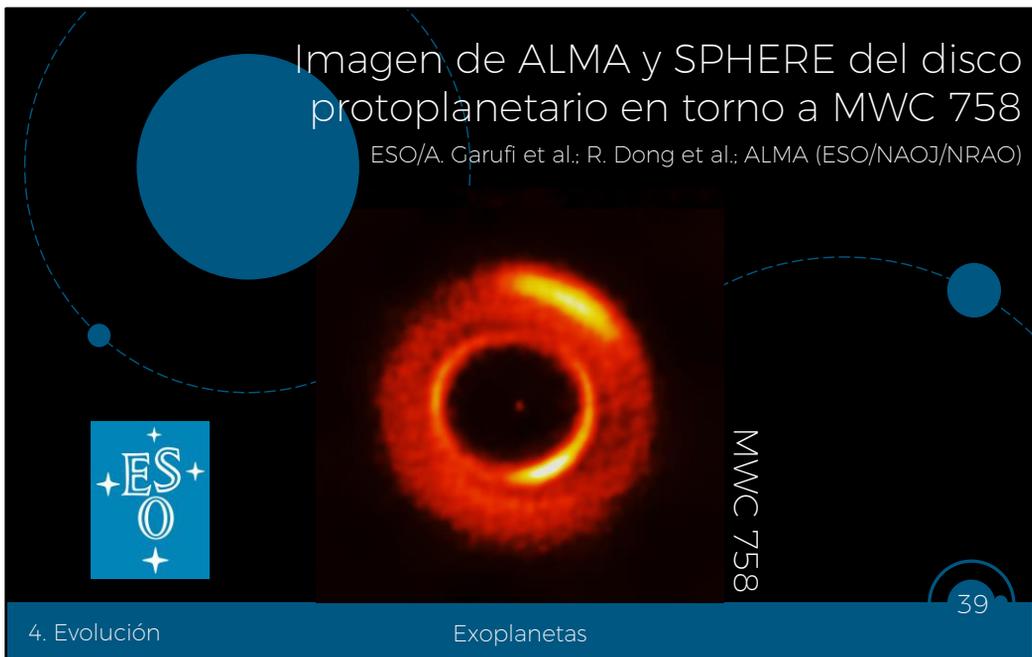
Vídeo:

<https://www.youtube.com/watch?v=PF8NQ9IlaT0>



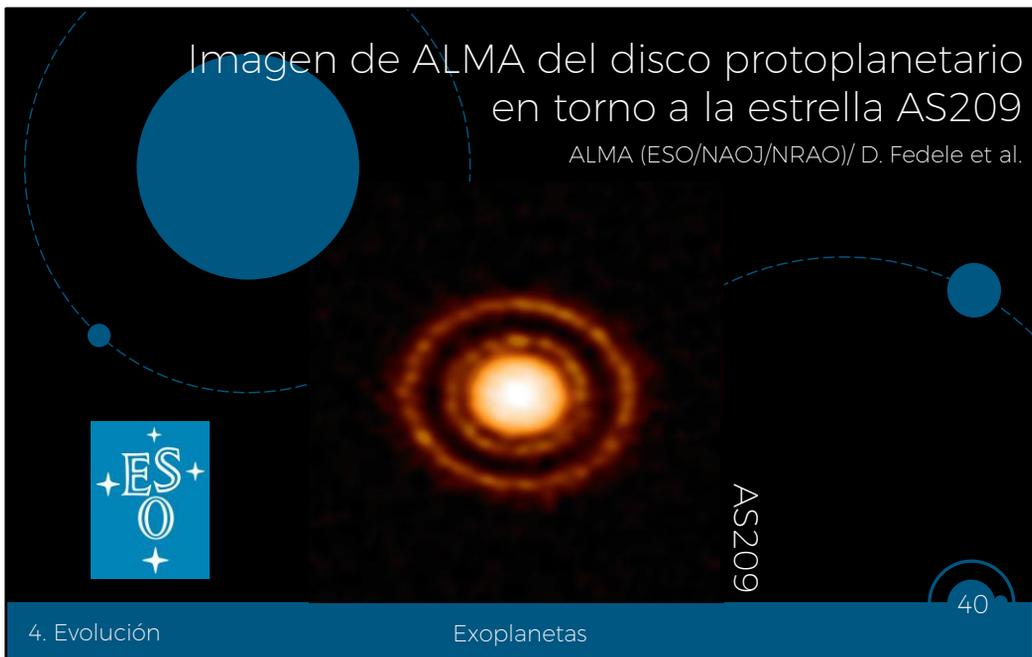
Fuente:

<https://www.eso.org/public/unitedkingdom/images/eso1436a/>



Fuente:

<https://www.eso.org/public/unitedkingdom/images/eso2405e/>



Fuente:

<https://www.almaobservatory.org/es/comunicados-de-prensa/alma-obtiene-la-mejor-imagen-de-un-disco-protoplanetario/>



# El papel de la metalicidad

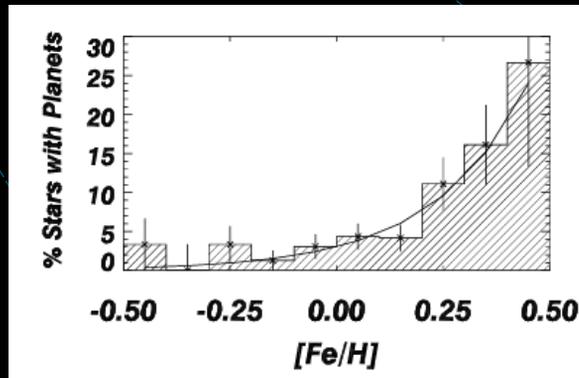
La **metalicidad** es un parámetro que indica la cantidad de metales (elementos que no son H ni He) de un objeto astronómico.

El número de planetas gigantes gaseosos aumenta con la metalicidad de la estrella FGK huésped (2005).  
¿Extensible a otro tipo de estrellas y planetas? Rama muy interesante de estudio.

4. Evolución Exoplanetas 41

La metalicidad estelar (es decir, de la nube molecular de la que se originó) parece jugar un papel importante en la formación de exoplanetas. Posiblemente debido a que, al ser granos más grandes, se empiece la formación de planetesimales a partir de ellos por acrecimiento.

# El papel de la metalicidad



Fischer, D. & Valenti, J., 2005

4. Evolución

Exoplanetas

42

El número de planetas gigantes aumenta con la metalicidad en estrellas de tipo solar. ¿Es extrapolable a otros tipos de planetas y estrellas?

Artículo original:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/428383>



Una parte fundamental del estudio de exoplanetas es su composición atmosférica, las cuales se analizan a través de la luz de la estrella que atraviesa la atmósfera del exoplaneta y llega hasta nosotros.

Catálogo de exoatmósferas:

<https://research.iac.es/proyecto/exoatmospheres/index.php>

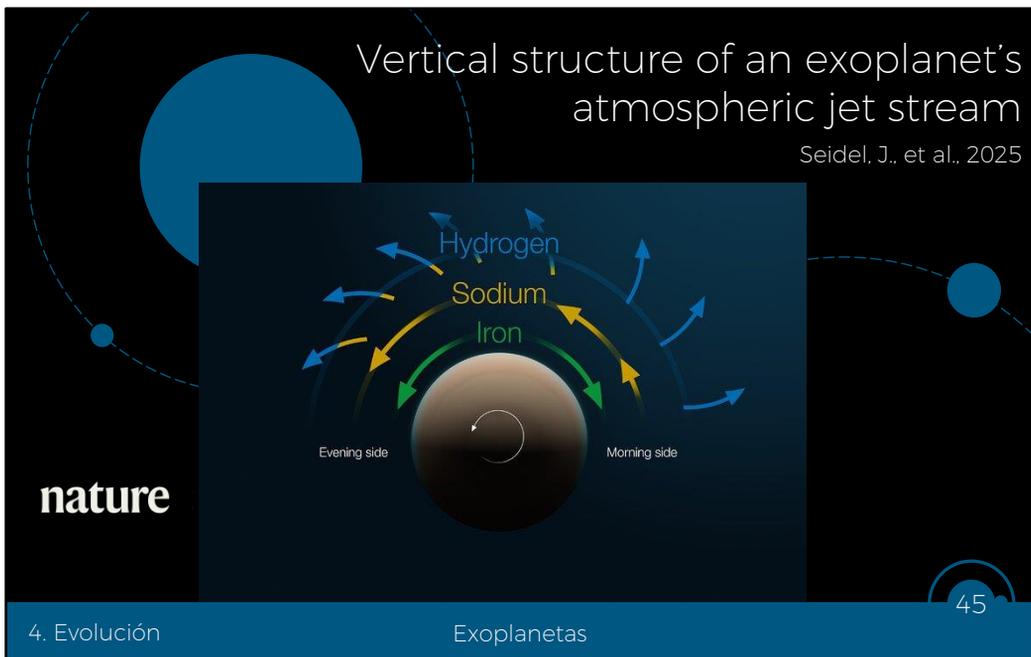


Estudio de atmósferas exoplanetarias simplificado:

<https://science.nasa.gov/resource/spectroscopy-infographic/>

Vídeo:

<https://www.eso.org/public/unitedkingdom/videos/eso2213b/>



Nota de prensa: <https://www.eso.org/public/spain/news/eso2504/>

Artículo original:

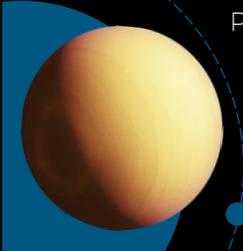
<https://www.eso.org/public/archives/releases/sciencepapers/eso2504/eso2504a.pdf>

# Problema de los Júpiteres calientes

Se denominan **júpiteres calientes** a aquellos gigantes gaseosos que están situados muy cerca de su estrella huésped.

Poseen periodos  $< 10$  días y sus órbitas presentan semiejes mayores entre 0,01-0,1 UA.

Posible explicación: **migraciones planetarias**.



4. Evolución

Exoplanetas

46

El modelo SNDM no puede explicar la existencia de los júpiteres calientes, gigantes gaseosos localizados muy cerca de la estrella. Como solución se propone el fenómeno de la migración planetaria, esto es, los júpiteres se formaron más lejos de su órbita actual, pero se fueron desplazando hacia el interior por interacción con el disco de polvo.

“Desierto” de  
**Neptunos**

Zona alrededor de una estrella en la que no se encuentran exoplanetas tipo Neptuno.

Al estar teóricamente próximos a la estrella, esta barre su atmósfera, dejando el **núcleo desnudo** del exoplaneta.

NCTS-4 b fue el primer exoplaneta descubierto en esta zona (2019). ¿Fin del concepto?

4. Evolución Exoplanetas 47

Por otro lado, en el diagrama semieje mayor-masa existe una zona que debiera estar poblada por planetas tipo Neptuno, pero no lo está. Se trata del desierto de neptunos calientes. Se piensa que, al estar cerca de su estrella, esta barre su atmósfera, dejando solo el núcleo desnudo del planeta (planeta chthoniano).

# Valle de la fotoevaporación

El valle de la fotoevaporación (o **huevo de Fulton**) es la aparente "escasez" de exoplanetas con radios entre 1,5 y 2 veces el radio de la Tierra.



Posible explicación: **fotoevaporación de atmósferas.**  
sesgo observacional...

4. Evolución

Exoplanetas

48

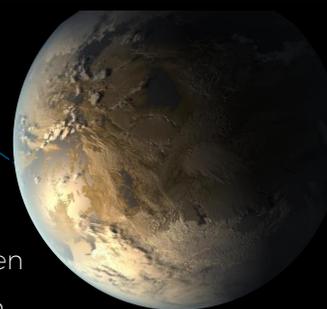
Similar al anterior, el valle de la fotoevaporación o huevo de Fulton es la aparente escasez de exoplanetas entre 1,5 y 2 veces el radio de la Tierra.

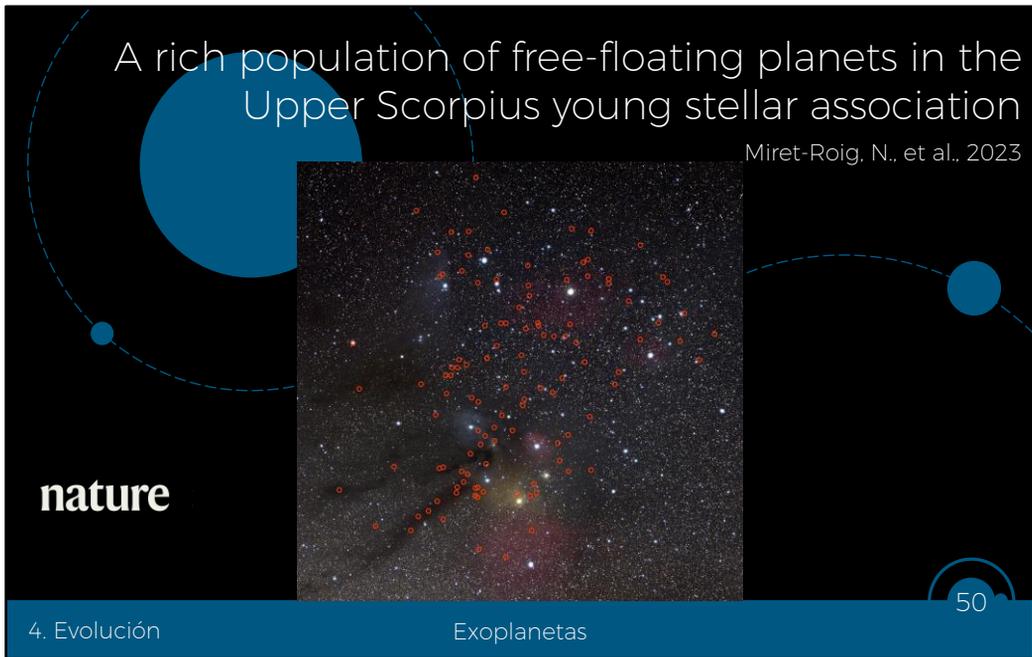
# Exoplanetas errantes

Objetos de **masa planetaria** que no orbitan en torno a ninguna estrella ni enana marrón.

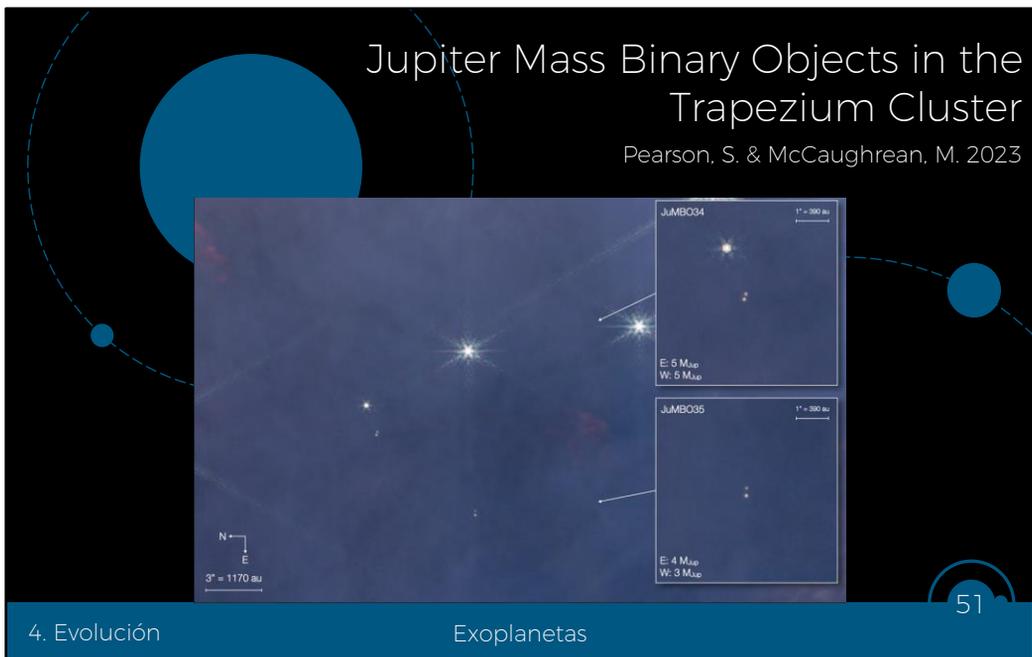
Según la definición de la UAI, no son propiamente exoplanetas, por lo que también se les llama **FFP** o **iPMO**.

Actualmente se conocen cientos de ellos, con varias hipótesis sobre su **formación**.





Artículo original: <https://www.nature.com/articles/s41550-021-01513-x>



Artículo original: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023arXiv231001231P/abstract>

# Exoplanetas extragalácticos



Consecuencia de extrapolación

Muy difíciles e improbables de detectar

Todavía ninguno confirmado directamente y varios refutados, aunque existen varios candidatos y evidencias



5

# HABITABILIDAD



Zona de  
habitabilidad

Región alrededor de la estrella en la que es posible  
la existencia de **agua en estado líquido** en superficie.

Depende de varios **factores**: temperatura de la estrella  
huésped, actividad cromosférica, condiciones planetarias...

Exoplanetas en HZ 361\*

5. Habitabilidad Exoplanetas 53

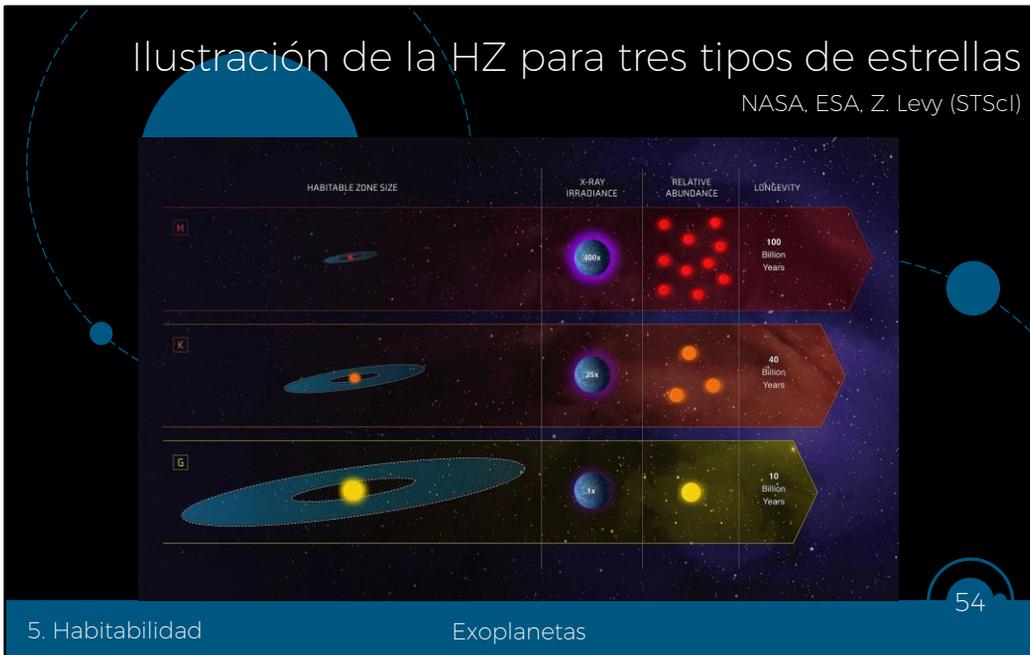
La habitabilidad de un exoplaneta es un parámetro fundamental en la búsqueda de la vida fuera de la Tierra. El concepto principal para su estudio es la zona de habitabilidad de una estrella. Que un planeta se encuentre en la zona de habitabilidad no quiere decir que esté habitado, pero sí que se pueda habitar. En otras palabras, que un planeta se encuentre en la zona de habitabilidad es condición necesaria, pero no suficiente, para que exista la vida tal y como la conocemos.

Más información sobre habitabilidad:

<https://exoplanets.nasa.gov/search-for-life/big-questions/>

# Ilustración de la HZ para tres tipos de estrellas

NASA, ESA, Z. Levy (STScI)



5. Habitabilidad

Exoplanetas

54

Fuente:

<https://science.nasa.gov/exoplanets/habitable-zone/>

Existencia por extrapolación del sistema solar

Ninguna evidencia directa, pero sí candidatas

Muy difíciles de detectar actualmente

Posibles mundos habitables

¿Existen las exolunas?

HD 189733 b I\*

Kepler 1625 b I\*

Kepler 1078 b I

WASP 76 b I\*

55

5. Habitabilidad Exoplanetas

Si bien la mayoría de exoplanetas descubiertos en la zona habitable de una estrella son gigantes gaseosos (cuyas condiciones son incompatibles con la vida), sus lunas serían posibles lugares habitables. Aun así, todavía no se ha descubierto ninguna exoluna, aunque existen varios candidatos.

Debate sobre la existencia de exolunas:

<https://www.space.com/exomoon-discovery-scientists-debate-kepler-hubble-study>

# Índice de similitud con la Tierra

Número que indica lo parecido que es un  
exoplaneta con respecto a la Tierra.

Se basa en el radio del exoplaneta y la radiación que este  
recibe de su estrella.

Exoplanetas con  $0,9 < ESI < 1,5$

$$ESI(S, R) = 1 - \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{S - S_{\oplus}}{S + S_{\oplus}} \right)^2 + \left( \frac{R - R_{\oplus}}{R + R_{\oplus}} \right)^2 \right] \right\}^{1/2}$$

5. Habitabilidad

Exoplanetas

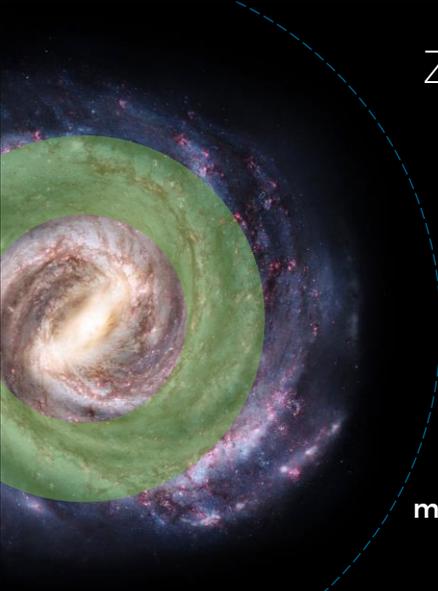
56

Más información sobre el ESI:

<https://phl.upr.edu/projects/earth-similarity-index-esi>



Artículo original: <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2019/07/aa35460-19.pdf>



# Zona de habitabilidad ¿galáctica?

Región de la galaxia en donde se **debería** favorecer la existencia de **vida**.

Depende de factores como la **distribución química** de la galaxia, su **morfología** o la ratio de **eventos extremos**.

5. Habitabilidad Exoplanetas 58

Artículo: <https://www.universetoday.com/articles/the-galactic-habitable-zone>



6

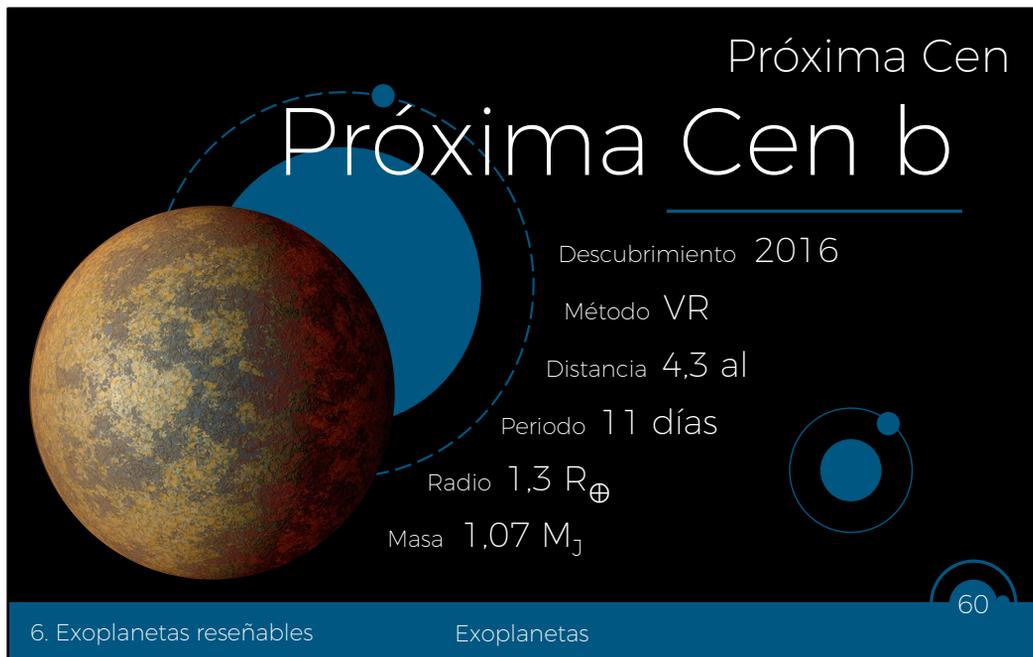
# EXOPLANETAS RESEÑABLES

---



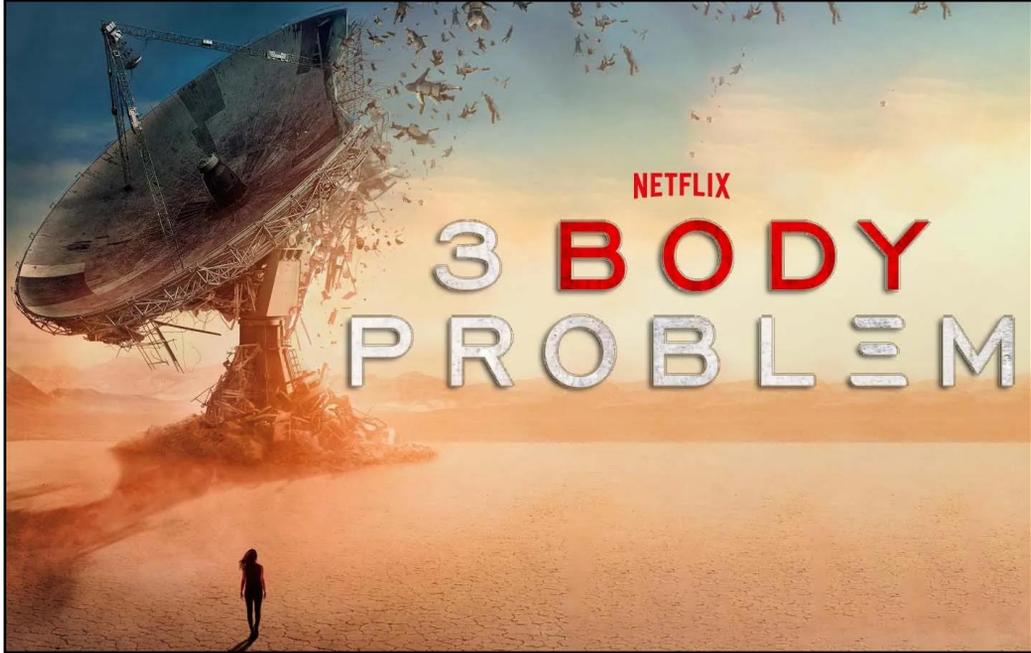
La estrella más cercana al Sol es Próxima Centauri (Alfa Centauri C), una enana roja perteneciente al sistema triple Alfa Centauri. Se localiza a 4,3 al en la dirección de la constelación de Sagitario.

Próxima Centauri es también hogar de dos exoplanetas confirmados, los dos más cercanos a la Tierra, El primero de ellos, Proxima Centauri b, lo descubrió en 2016 el astrofísico español Guillem Anglada-Escudé:  
<https://www.nature.com/articles/nature19106>



Próxima Centauri b es el exoplaneta más cercano a la Tierra. Lo descubrió el astrofísico español Guillem Anglada-Escudé en 2016.

Más información sobre Próxima Centauri b:  
[http://exoplanet.eu/catalog/proxima\\_centauri\\_b/](http://exoplanet.eu/catalog/proxima_centauri_b/)



Del sistema Alfa Centauri es de donde provienen los extraterrestres que amenazan a la Tierra en El problema de los tres cuerpos.

Más información sobre El problema de los tres cuerpos:  
<https://www.filmaffinity.com/es/film459562.html>

# Sistema de Barnard

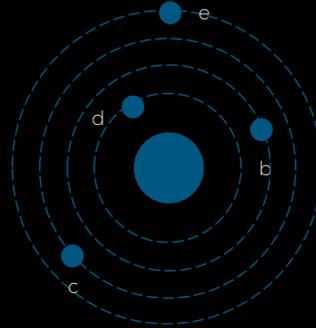
**Tipo de sistema:** simple

**Constelación:** Ophiuchus (Oph)

**Distancia:** 6 al

**Tipo espectral:** M4V

**Exoplanetas:** 4 confirmados



6. Exoplanetas reseñables

Exoplanetas

61

El sistema exoplanetario alrededor de una única estrella es el que orbita en torno a la estrella de Barnard, la estrella con el movimiento propio más alto conocido.

Sistema exoplanetario de la estrella de Barnard:

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/adb8d5>

HD 160691

# Mu Arae

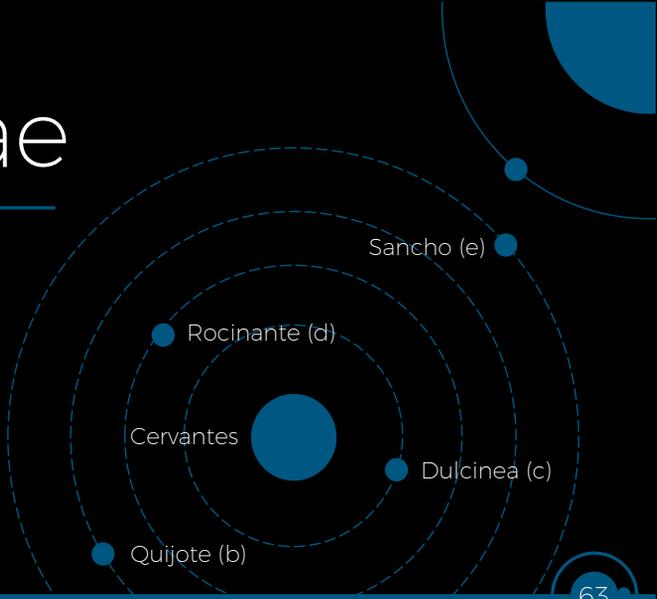
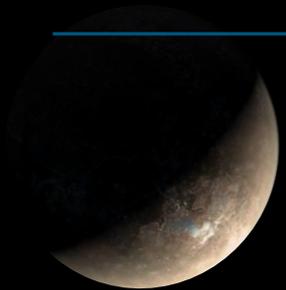
RA 17h 44min 08,70"  
DE -51° 50' 02,59"  
Paralaje 64,09 mas  
Tipo espectral G3IV-V  
Planetas 4 (2001, VR)

6. Exoplanetas reseñables Exoplanetas 62

El sistema Mu Área (conocida como estrella Cervantes) es famoso por llevar el nombre de personajes de la obra Don Quijote de la Mancha.

Más información sobre el sistema:  
[http://exoplanet.eu/catalog/mu\\_ara\\_b/](http://exoplanet.eu/catalog/mu_ara_b/) y sucesivos

# Sistema Mu Arae



6. Exoplanetas reseñables

Exoplanetas

63



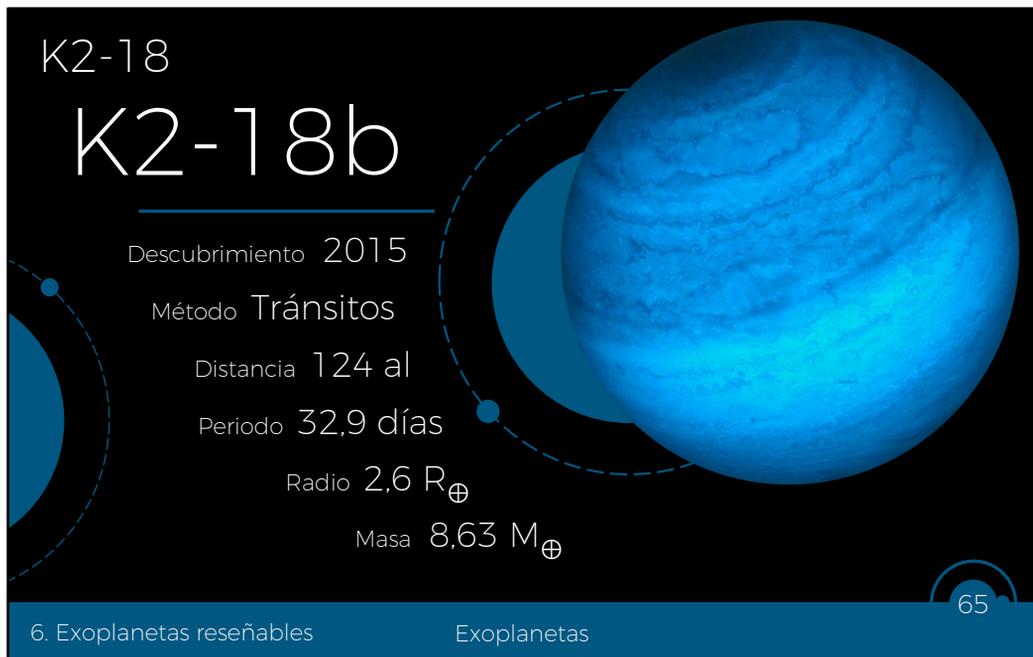
Kepler-22b es el primer exoplaneta descubierto dentro de la zona de habitabilidad.

Más información de Kepler-22 b:  
[http://exoplanet.eu/catalog/kepler-22\\_b/](http://exoplanet.eu/catalog/kepler-22_b/)



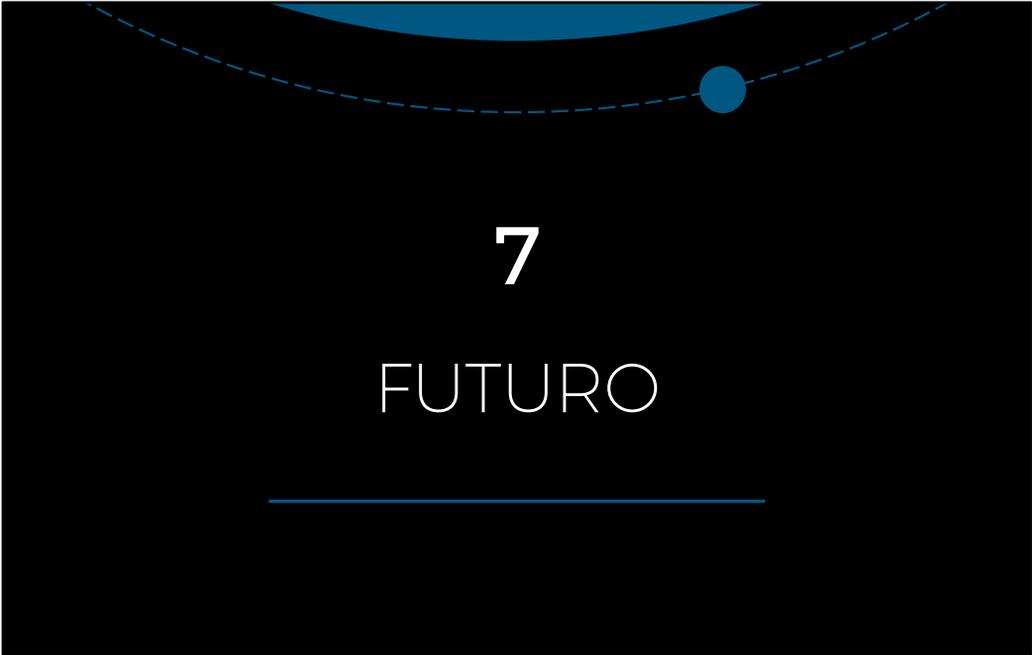
En Kepler-22b se desarrolla la serie de ciencia ficción Raised By Wolves (HBOmax)

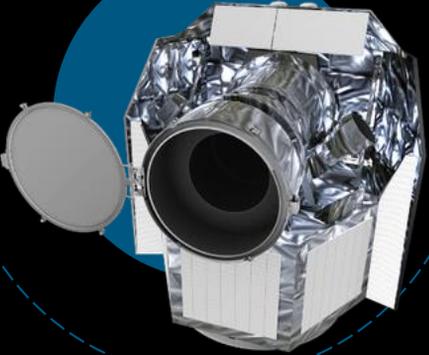
Información sobre Raised By Wolves:  
<https://www.imdb.com/title/tt9170108/>



Supertierra, posiblemente oceánica, donde se ha detectado vapor de agua, metano y dióxido de carbono dentro de la zona de habitabilidad de su estrella.

K2-18b: <https://science.nasa.gov/exoplanet-catalog/k2-18-b/>





**CHEOPS** Characterizing  
ExoPlanets Satellite

Método Tránsitos (caracterización)  
Lanzamiento 2019  
Órbita Geocéntrica  
Operador ESA  
Periodo de actividad Hasta 2026

7. Futuro Exoplanetas 66

La misión CHEOPS es la iniciativa actual de la ESA en la caracterización de exoplanetas (obtención de sus parámetros) ya conocidos.

Más información sobre CHEOPS:

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Cheops](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Cheops)

# Telescopio Espacial James Webb

Método Tránsitos + Imagen

Lanzamiento 25 diciembre 2021

Periodo de actividad 20 años

Espejo primario 6,5 m

Rango Rojo-Infrarrojo

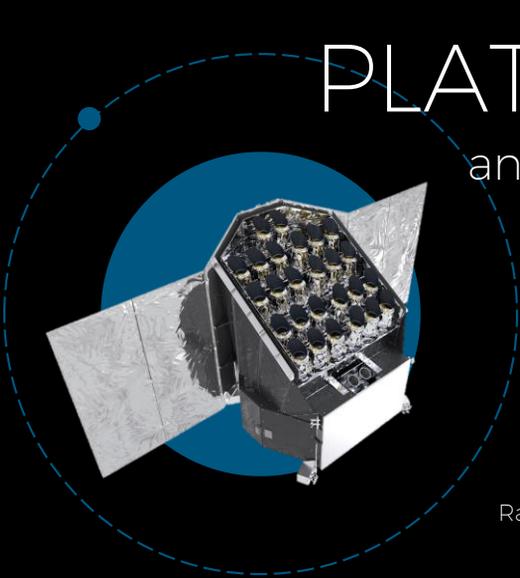
7. Futuro Exoplanetas 67

El Telescopio Espacial James Webb es un observatorio espacial operado por NASA, ESA y CSA situado en el punto de Lagrange L2 que opera en el régimen visible rojo e infrarrojo. Actualmente es el telescopio espacial con el espejo primario más grande (6,5 m, el triple de su predecesor, el Telescopio Espacial Hubble). Del JWST se espera que revolucione las concepciones actuales de astrofísica y cosmología, haciendo descubrimientos asombrosos.

Más información:

<https://www.jwst.nasa.gov/>

<https://cab.inta-csic.es/proyectos/telescopio-espacial-james-webb-jwst/>



PLATO Planetary Transits  
and Oscillations of stars

Método Tránsitos  
Lanzamiento 2026  
Órbita Punto L<sub>2</sub>  
Operador ESA  
Rango Visible

7. Futuro Exoplanetas 68

The image shows a detailed illustration of the PLATO satellite, a large rectangular spacecraft with two large solar panel wings extended. The top surface of the satellite is covered with a grid of numerous small, dark, circular instruments. The satellite is set against a dark blue circular background with a dashed white orbital path and a small blue dot representing a planet. The overall design is clean and futuristic.

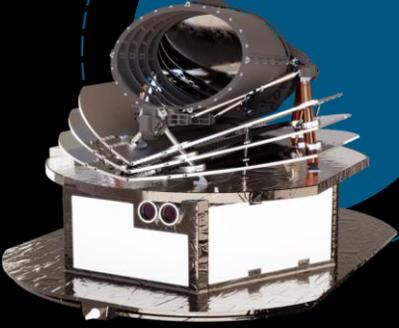
La misión PLATO es la gran apuesta de futuro de la ESA en cuanto a exoplanetas se refiere. Buscará exoplanetas en estrellas brillantes por el método de los tránsitos, centrándose en planetas habitables en torno a estrellas de tipo solar, así como exolunas y anillos exoplanetarios.

Más información sobre PLATO:

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Plato](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Plato)

# Telescopio Espacial Ariel

Método Tránsitos (caracterización)  
Lanzamiento ¿2029?  
Órbita Punto L<sub>2</sub>  
Operador ESA  
Rango Visible + NIR

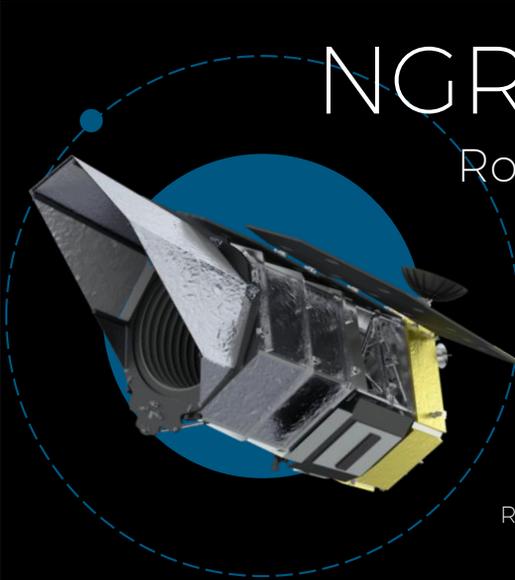


7. Futuro Exoplanetas 69

The image is a promotional graphic for the Ariel space telescope. It features a central 3D model of the telescope's instrument, showing its complex lens and mirror assembly. The background is black with a large blue circle and a dashed blue line representing an orbit. The text is in white and blue, providing key mission details. At the bottom, there is a blue bar with the text '7. Futuro Exoplanetas' and a small circle containing the number '69'.

Por su parte, la misión ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey) se centrará en la caracterización de 1.000 exoplanetas ya conocidos para estudiar su atmósfera y composición.

Más información: <https://arielmission.space/>



**NGRST** Nancy Grace  
Roman Space Telescope

Método ML, ID y tránsitos  
Lanzamiento 2027  
Órbita Punto L<sub>2</sub>  
Operador NASA  
Rango IR

7. Futuro Exoplanetas 70

Por su parte, la próxima gran apuesta de la NASA en cuanto a telescopios espaciales es el Nancy Grace Roman Space Telescope (NGRST). Si bien no estará totalmente dedicado al estudio de exoplanetas, parte de su tiempo de observación garantizado se centrará en el descubrimiento de exoplanetas utilizando microlente, imagen directa y tránsitos.

Más información: <https://roman.gsfc.nasa.gov/>  
<https://science.nasa.gov/mission/roman-space-telescope/>

Observatorio de  
**Mundos habitables**

Método Imagen directa  
Lanzamiento ¿2040s?  
Órbita Punto L<sub>2</sub>  
Operador NASA  
Rango UV - IR

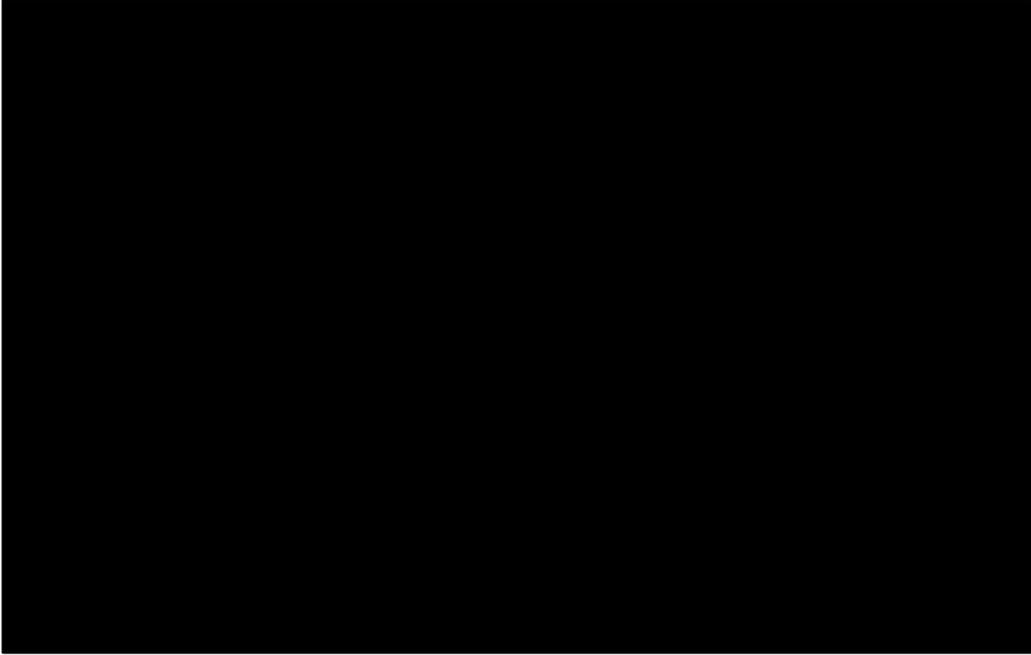
7. Futuro Exoplanetas 71

Tras el JWST y el NGRST, el próximo gran telescopio de la NASA será el HWO u Observatorio de Mundos Habitables. Aún en fase muy temprana de diseño, su objetivo será el estudio de exoplanetas similares a la Tierra en su zona de habitabilidad por el método de la imagen directa. Este proyecto, pensado para la década de 2040, es una fusión entre dos proyectos anteriores: LUVOIR y HABEX.

Más información sobre HWO:

<https://habitableworldsobservatory.org/home>

<https://danielmarin.naukas.com/2024/04/21/definiendo-el-observatorio-de-mundos-habitables-un-telescopio-espacial-para-buscar-la-tierra-2-0/>



El proyecto HABEX, de donde nace HWO.

Vídeos:

<https://exoplanets.nasa.gov/resources/1058/blocking-light-to-see-planets-beyond-the-solar-system/>

[https://www.youtube.com/watch?v=i\\_Mt8MVb1sU](https://www.youtube.com/watch?v=i_Mt8MVb1sU)



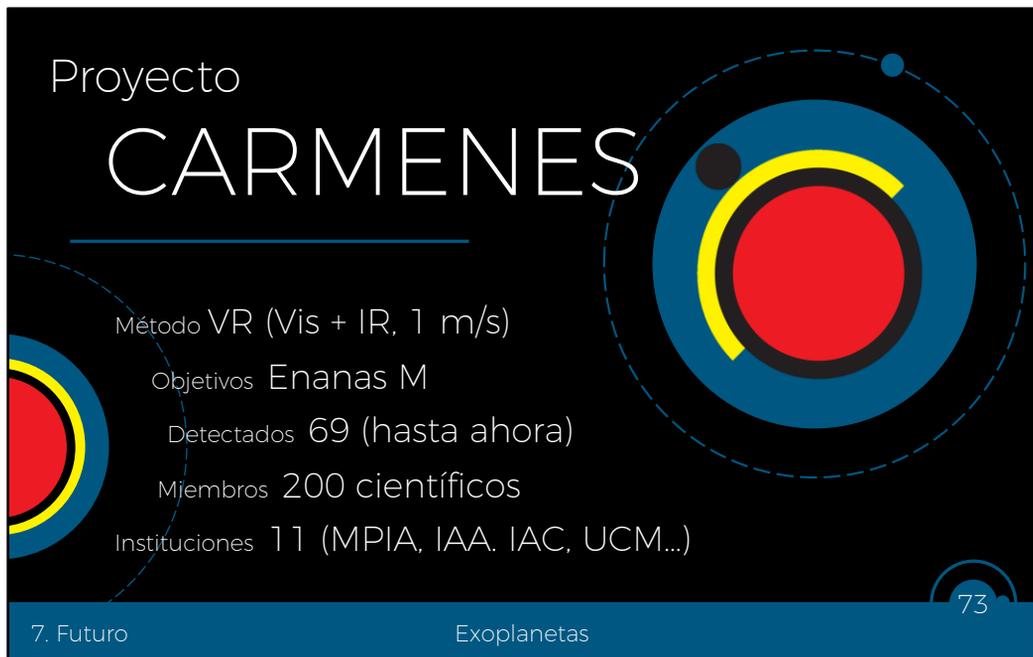
Centro Astronómico Hispano en Andalucía CAHA

# Observatorio Calar Alto

Latitud  $37^{\circ} 13' 25''\text{N}$   
Longitud  $2^{\circ} 32' 46'' \text{O}$   
Altitud 2168 msnm  
Telescopios 4 (3,5 metros)  
Espectrógrafo CARMENES  
Operador IAA-CSIC

7. Futuro Exoplanetas 72

En España también tenemos observatorios dedicados al estudio y descubrimiento de exoplanetas. El más importante se sitúa en el Centro Astronómico Hispano en Andalucía (CAHA), en Almería. El proyecto se denomina CARMENES.

The infographic features a dark blue background with stylized celestial diagrams. On the right, a large diagram shows a red central star surrounded by a yellow ring, a blue ring, and a dashed blue orbital path with a small blue planet. On the left, a smaller version of this diagram is partially visible. The text is white and blue, providing key project statistics.

Proyecto  
**CARMENES**

Método VR (Vis + IR, 1 m/s)

Objetivos Enanas M

Detectados 69 (hasta ahora)

Miembros 200 científicos

Instituciones 11 (MPIA, IAA, IAC, UCM...)

7. Futuro Exoplanetas 73

CARMENES es un consorcio hispano-alemán que opera el espectrógrafo del mismo nombre situado en el telescopio de 3,5 metros del Observatorio de Calar Alto. Su objetivo es el estudio y descubrimientos de exoplanetas en torno a enanas M debido a sus claras ventajas. Hasta ahora ha logrado detectar 69 exoplanetas, algunos muy importantes como Teegarden b o Barnard b.

Más información sobre el proyecto CARMENES:  
<https://carmenes.caha.es/ext/science/index.html>

Highlights de  
**CARMENES**

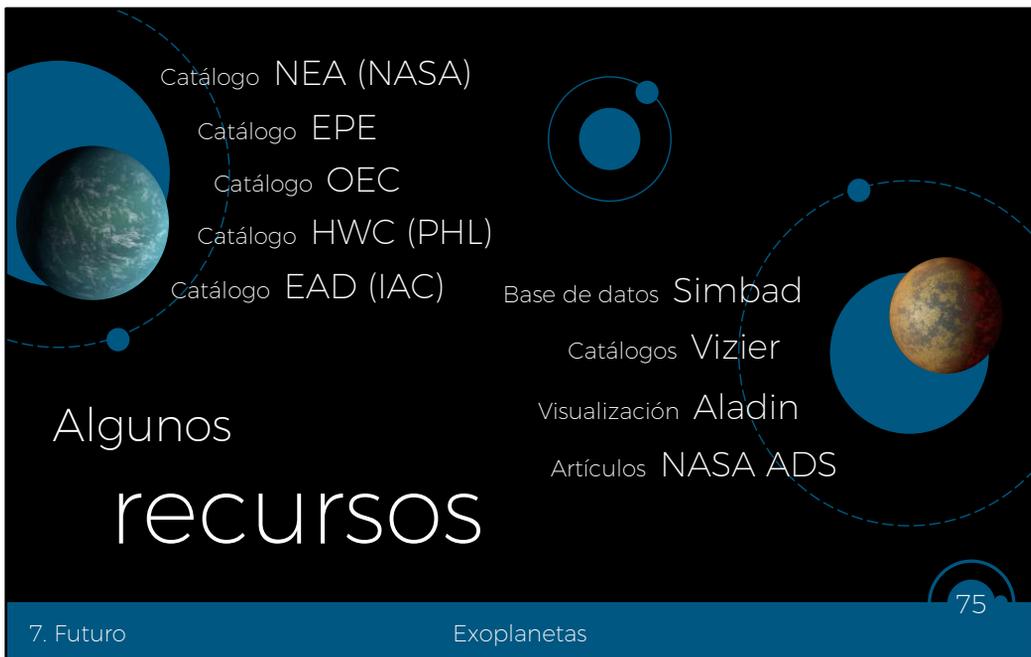
Dos exoplanetas del **sistema Teegarden**  
(Teegarden b posee el ESI más alto) (2019)

Exoplaneta **potencialmente habitable** a 31 años luz  
(2023)

Dos **exoplanetas rocosos** a 10 pc (2023)

7. Futuro Exoplanetas 74

Los exoplanetas de CARMENES:  
<https://carmenes.caha.es/ext/science/index.html#anchor:planets>



Recursos sobre exoplanetas y visualización de datos astronómicos:

Catálogo de la NASA: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>  
Catálogo Extrasolar Planet Encyclopaedia: <http://www.exoplanet.eu/>  
Catálogo Open Exoplanet Catalogue: <https://www.openexoplanetcatalogue.com/>  
Catálogo Habitable Worlds Catalogue: <https://phl.upr.edu/hwc>  
Catálogo ExoAtmospheres Database:  
<https://research.iac.es/proyecto/exoatmospheres/index.php>

Base de datos Simbad: <https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>  
Catálogos Vizier: <https://vizier.unistra.fr/>  
Visualización Aladin: <https://aladin.cds.unistra.fr/>  
Artículos: <https://ui.adsabs.harvard.edu/>



Más información sobre Cosmos: Possible Worlds:  
<https://www.imdb.com/es-es/title/tt11170862/>



Más información sobre Alien Worlds:  
<https://www.imdb.com/title/tt13464340/>



Curso de astronomía y astrofísica “Del Planetario al Cosmos 2025”.

Sesión 5: Exoplanetas. 3 de abril.

Rodrigo González Peinado.