

**DOS INTERESANTES INVENTOS PARA LA
OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA**

GALAXIAS DE BICARBONATO

**¿QUÉ FUE ANTES, EL ARTE O LA
ASTRONOMÍA?**

**MINERÍA CON DATOS REALES DE
EXOPLANETAS, EN EL AULA (3ª PARTE)**



ApEA

NaDiR es una revista de la Asociación para la Enseñanza de la Astronomía (ApEA) www.afea.es

Presidente:

Carolina Clavijo Aumont

Vicepresidente:

Sebastián Cardenete García

Secretario:

Fernando Sánchez Gil

Tesorero:

Xavier Benlliure i Perales

Vocal de Publicaciones:

Ricardo Moreno Luquero

Vocal página web:

Eva Dominique Ibarra

Vocal FAAE:

Ángel Gómez Roldán

Vocales de Encuentros:

Antonio González Hernández

Fernando Ordóñez Monteagudo

Vocales:

Sensi Pastor Rodríguez

Joaquín Álvaro Contreras

Edición de la revista Nadir:

Ricardo Moreno Luquero

rmluquero@gmail.com

Comité de Redacción:

Joaquín Álvaro Contreras y

Sebastián Cardenete García

Depósito Legal: Z-2513-98

ISSN: 1575-7528

Marzo 2023

Foto de portada: Galaxia de bicarbonato.
©R.M.

SUMARIO

MATERIALES

DOS INTERESANTES INVENTOS PARA LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA

Ederlinda Viñuales et al. 3

ACTIVIDADES

GALAXIAS DE BICARBONATO

Ricardo Moreno Luquero 8

CENTROS

¿QUÉ FUE ANTES, EL ARTE O LA ASTRONOMÍA?

Sarai de la Hoz y Mario López 12

EXOPLANETAS

MINERÍA CON DATOS REALES DE EXOPLANETAS, DE APLICACION AL AULA (3ª PARTE)

Joaquín Álvaro Contreras 16

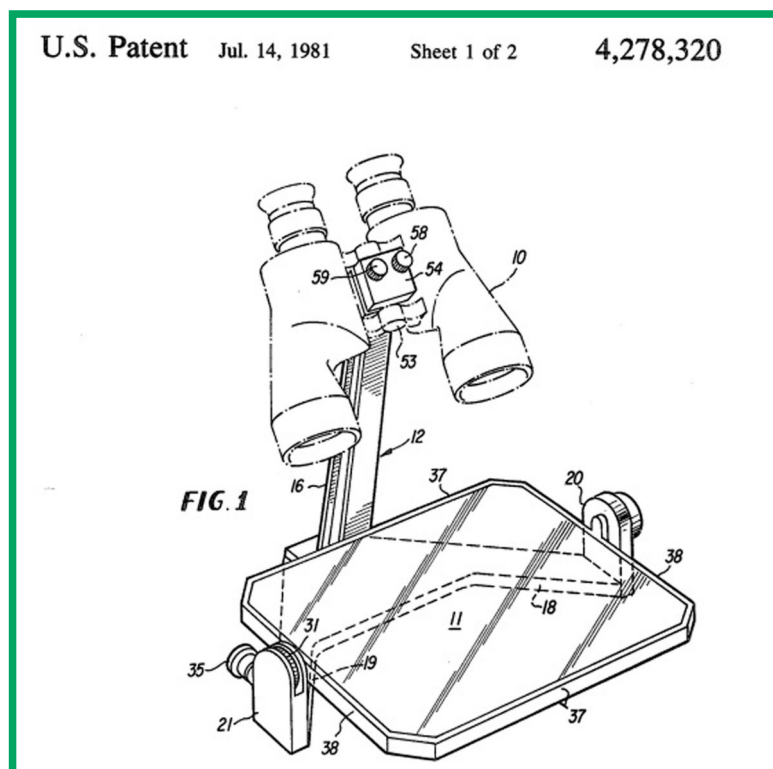
NaDiR no se hace responsable de las opiniones expresadas en los artículos. Si no se indica otra cosa, las imágenes son propiedad de los autores de los artículos.

La distribución de NaDiR es gratuita entre los socios de ApEA, y se puede descargar de su web.

Se autoriza la difusión del contenido de la revista, citando la fuente.

DOS INTERESANTES INVENTOS PARA LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA

Ederlinda Viñuales¹, Carlos Viscasillas², Adriana de la Calle³



En este artículo se presentan dos originales inventos que pueden ayudar a la observación astronómica amateur: el Sky Windows y el Drum Scope. Son ideas de Manuel Carreira Véz (1931-2020), astrofísico español, quizá poco conocido dentro de nuestras fronteras, a pesar de su alto nivel científico.

Manuel Carreira impartió clases de astronomía en las universidades de Washington y de Cleveland, y trabajó en el Observatorio Vaticano. Llegó a ser asesor en varios proyectos de la NASA. Impartió numerosas conferencias en universidades de Estados Unidos, Hispanoamérica y España, sobre ciencia y filosofía, que fueron recogidas

en varias publicaciones, e incluso en una serie de TV^[1] que recoge esas ideas. Manuel Carreira, sacerdote jesuita, fue un defensor a ultranza de la compatibilidad entre ciencia y fe. Consideraba que son dos maneras parciales de conocer la realidad, que se complementan entre sí, y entre las que no hay oposición, si se entienden bien.

[1] <https://eukmamie.org/es/de-la-ciencia-a-dios>

¹ Grupo de Mecánica Espacial, Universidad de Zaragoza.

² Inst. de Física Teórica y Astronomía, Univ. de Vilnius, Lituania.

³ Universidad de Georgetown, Washington, EEUU.

Nació en Vilarrube, Valdoviño (La Coruña) y murió el 3 de febrero de 2020 en Salamanca. Su madre, maestra nacional, era una mujer con una amplia cultura, que transmitió a sus ocho hijos su pasión e inquietud por el conocimiento. Gracias a su madre, Manuel Carreira tuvo la oportunidad de leer poesía, mineralogía, historia del arte, libros sobre viajes e incluso de caballería. Fue Premio Extraordinario de Bachillerato. En 1957 se trasladó a los Estados Unidos para continuar sus estudios. Fue ordenado sacerdote en 1960 y en 1966 hizo un máster de Física en la Universidad John Carroll (Cleveland) en la que permaneció como profesor durante muchos años. Se doctoró en 1971 con una tesis sobre rayos cósmicos, dirigida por Clyde Cowan, codescubridor del neutrino y premio Nobel de Física en 1995.

Fue miembro del Observatorio Vaticano, a cuya junta directiva perteneció durante quince años. Participó en un proyecto para explorar la atmósfera de Titán durante la ocultación de la estrella 28 Sgr en 1989. Los importantes resultados se publicaron en la revista *Nature*. Además escribió 16 libros, y desarrolló dos inventos que facilitan la observación astronómica, que son los que vamos a describir en este artículo. Uno de ellos fue calificado por la revista *Sky & Telescope* como uno de los productos más importantes del año 2001 (Figura 1).

El Sky Window

Con este aparato, Carreira pretendía evitar algunos problemas que surgen a la hora de realizar observaciones astronómicas con prismáticos, que él clasificaba de la siguiente manera:

a) Se produce una gran incomodidad después de un período de tiempo relativamente corto porque se debe inclinar la cabeza hacia atrás para mirar hacia arriba.



Fig. 1. Portada de *Sky & Telescope*, con el Sky Window como Hot new product of 2001

b) Si los prismáticos se sujetan con la mano, tienden a moverse por el pulso, dificultando la visión de los detalles. Además, cuando una persona sostiene los binoculares, sus manos no están libres para realizar otras tareas (p. ej. escribir datos o hacer un dibujo de lo observado).

c) El usuario no tiene medios para controlar y comprobar la dirección en la que apunta el instrumento.

Este invento proporciona un soporte fijo para los prismáticos que permite una observación en una postura de máxima comodidad, mirando hacia abajo. La imagen es totalmente estable, y se permite prolongar la observación y apreciar muchos detalles. Además, se puede identificar con facilidad el objeto celeste que se está observando.

Como se ve en la Figura 2, el dispositivo consta de una base y un espejo plano



Fig. 2. El Sky Window, fabricado por Trico Machine

horizontal que puede variar su inclinación para ir recorriendo las diferentes áreas del cielo. Hay un mástil donde se fijan los prismáticos, que miran hacia abajo, hacia el espejo, formando un cómodo ángulo cercano a los 30° con la vertical. El dispositivo se puede colocar sobre una mesa o acoplar a un trípode convencional.

La única dificultad para su construcción es que el espejo debe ser de los llamados de primera superficie, con la parte reflectante por delante del cristal, no como los ordinarios, que la tienen detrás del cristal, para evitar el doble reflejo de los objetos.

Carreira patentó este invento en EE.UU. en 1981, y en España en 2004. *Trico Machine Products* (Bedford Heights, Ohio) compró la patente en 2001 y vendió el producto con el nombre comercial de Sky Window. Fue muy bien recibido en las críticas de revistas astronomía. Así, apareció en la portada de *Sky & Telescope* en diciembre de 2001 como uno de los mejores productos de astronomía de 2001, y en la revista del mes siguiente recibió una crítica entusiasta de *Dennis di Cicco*.^[3] También recibió elogios de otros expertos

como *Don Pensak* en "*Cloudy Nights*"^[2]. Sin embargo, comercialmente no fue rentable y la producción se interrumpió después de unos años. Hoy en día está bien valorado en el mercado de segunda mano, y algunos aficionados se fabrican su propio instrumento.

2. EL Drum Scope

Su otro invento es el Drum Scope (podríamos traducirlo como telescopio tambor). Con este dispositivo, M. Carreira quería evitar los telescopios de tubos largos y lograr un dispositivo que fuera estable y fácil de usar, montar y transportar.



Fig. 3. Manuel Carreira y su Drum Scope, abierto.

[2] <https://www.cloudynights.com/articles/cat/user-reviews/mounts/binocular-mounts/trico-machine-products-sky-window-r797> (consultado el 2 de febrero de 2023)

[3] <http://cmcrm1bach.blogspot.com/2023/02/dos-inventos-de-m-carreira-para-la.htm0l> (consultado el 2 de febrero de 2023)

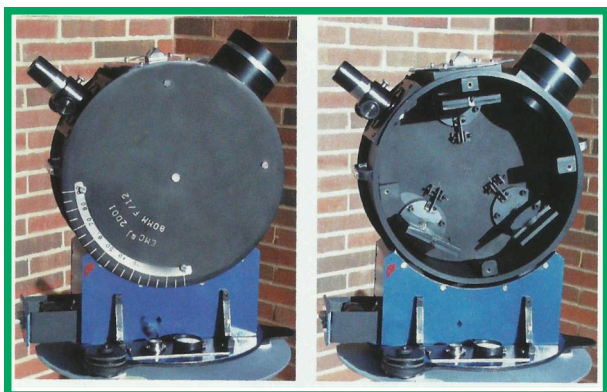


Fig. 4. El Drum Scope cerrado y abierto

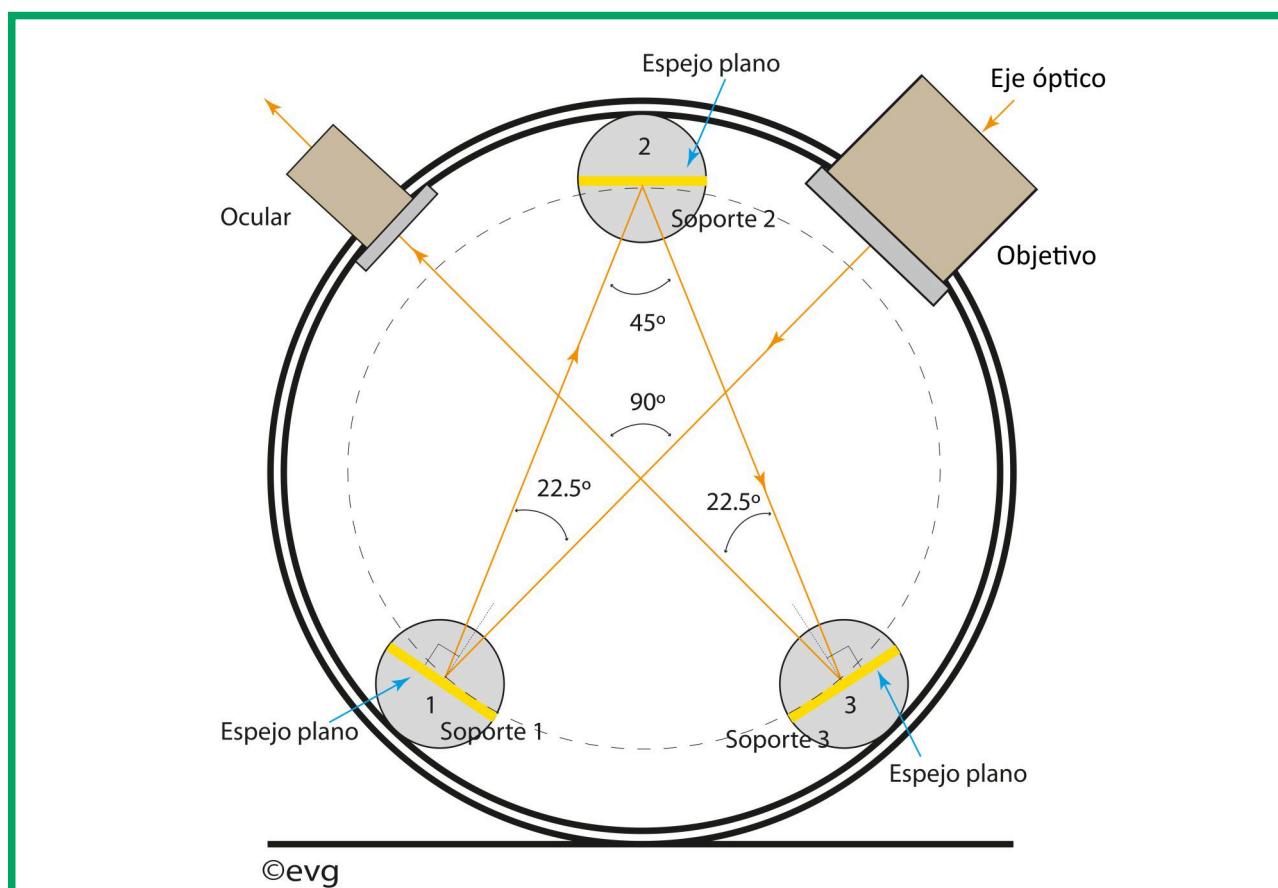
En el Drum Scope, la luz se captura en la lente objetivo y es redirigida por varios espejos en el interior de un tambor redondo hasta que llega al ocular (Figura 4). M. Carreira explica su Drum Scope en el artículo '*A Refractor in the Round*' en la revista *Sky & Telescope* (octubre de 2002)^[4], que es casi

una guía para cualquiera que quiera construir su propio telescopio: da consejos sobre qué tamaño de tambor elegir, la relación del radio interior de los espejos, la distancia focal del objetivo, etc.

Básicamente, utiliza una caja cilíndrica en forma de tambor, y en su interior, tres pequeños espejos planos (Figura 4).

Decide que el objetivo y el ocular formen un ángulo recto. La luz que entra por el objetivo llega a un pequeño espejo plano situado en la prolongación óptica del objetivo, el cual refleja el rayo con un ángulo de 22.5° . La luz reflejada llega a un segundo espejo colocado en el soporte 2, el cual la refleja con un ángulo de 45° . Finalmente el haz de luz llega a un tercer espejo colocado en el soporte 3, que lo refleja de nuevo con un ángulo de 22.5° y lo envía al ocular (Figura 5).

Fig. 5. Esquema del interior del Drum Scope, con el recorrido de los rayos de luz.



[4] <http://cmcrm1bach.blogspot.com/2023/02/dos-inventos-de-m-carreira-para-la.html> (consultado el 2 de febrero de 2023)

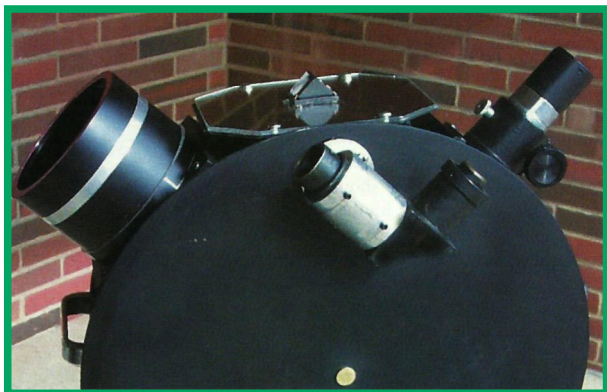


Fig. 6. Prisma y buscador en ángulo recto.

Para ayudar a apuntar el telescopio, el Dr. Carreira utiliza un prisma en la parte superior, y un buscador de ángulo recto de 25 mm (Figura 6). Agrega algunos elementos adicionales al propio instrumento, como un pequeño cajón para guardar pequeñas cosas necesarias para la observación como: oculares, manijas exteriores de metal para facilitar el transporte, un nivel de burbuja, una brújula magnética y una escala.

El propio Carreira concluye finalmente que su Drumscope tiene el rendimiento de un telescopio grande en un paquete pequeño.

Bibliografía

- Carreira Vérez, M. "A Refractor in the Round". *Sky & Telescope*. Octubre 2002.
- Cicco, Dennis di. "Sky Window". *Sky & Telescope*. Diciembre 2001.
- Hanson and Hanson. "Emmanuel Carreira SJ, PhD Renaissance Man of Philosophy and Light". Cleveland Seniors, 2002.

- Pérez García, A. "Necrológica P. Manuel Carreira Vérez", en InfoSJ, de febrero de 2020.
- Viscasillas Vázquez, C. "In memoriam. Manuel Carreira Vérez (1931-2020)". *Revista Española de Física*, Vol. 34, 2 (2020).
- Viscasillas Vázquez, C. "Manuel Carreira Vérez", en Real Academia de la Historia, Diccionario Biográfico electrónico.
- Viscasillas Vázquez, C. "En memoria del P. Carreira: astrofísico, astrofotógrafo, divulgador científico". *Astronomía*, 256 (2020).
- Viscasillas Vázquez, C., Viñuales Gavín, E. y Moreno Luquero, R. "The scientific publications and astronomical inventions of the astrophysicist Dr. Emanuel Carreira". *Journal of Astronomical History and Heritage* (en publicación) 2023.
- Consolmagno, G. "In Memoriam Manuel Carreira Vérez". *Vatican Observatory Annual Report*, 2020.
- Pensak, D. en "Cloudy Nights" (<https://www.cloudynights.com/articles/cat/user-reviews/mounts/binocular-mounts/trico-machine-products-sky-window-r797>) (consultado el 2 de febrero de 2023)
- Serie de HM Tv en: <https://eukmamie.org/es/de-la-ciencia-a-dios/10439-el-origen-del-universo>

GALAXIAS DE BICARBONATO

Ricardo Moreno Luquero



Fig. 1. Galaxia M 51 (HST-NASA-ESA)

En este artículo se describe cómo hacer un modelo sencillo de galaxias espirales con bicarbonato. Puede ser una actividad para que los alumnos hagan en casa, investiguen cómo hacerlo mejor, registren sus resultados e incluso hacer algún tipo de concurso. Todas las fotografías del modelo son del autor.

Llevaba tiempo buscando una forma de hacer modelos sencillos de las galaxias. Me fijaba en la espuma del café espreso, pero duraba muy poco. Sobrellevando el Covid encerrado en mi habitación, veía los polvos en que se transformaba una pastilla de

paracetamol al disolverse en un vaso de agua, y que al removerlo describía unas espirales, pero quedaban tiempo en suspensión y no se posaban.

Eso me dio la pista. Probé con arena dentro de un vaso de agua, pero, como vivo

en Madrid, donde no hay playa, los granos que conseguí eran demasiado grandes y al remover, caían rápidamente sin formar ninguna galaxia. Sin embargo, sentía que me iba acercando.

Se me ocurrió probar con bicarbonato, que tiene un grano muy fino. Y por fin conseguí un montoncito central y unos brazos espirales, que podía ir modelando a base de remover el agua y dejar posar los granos. Probé varios recipientes, y varias formas de remover. Concluí que lo mejor eran los vasos de agua normales, bastante llenos de líquido, removiendo primero el agua con un lápiz, dejando de remover al tiempo que se echa de golpe una cucharada de bicarbonato. al posarse los granos, quedan formas como las de las Figuras .

Fig. 2. NGC 1566 (HST-NASA-ESA)



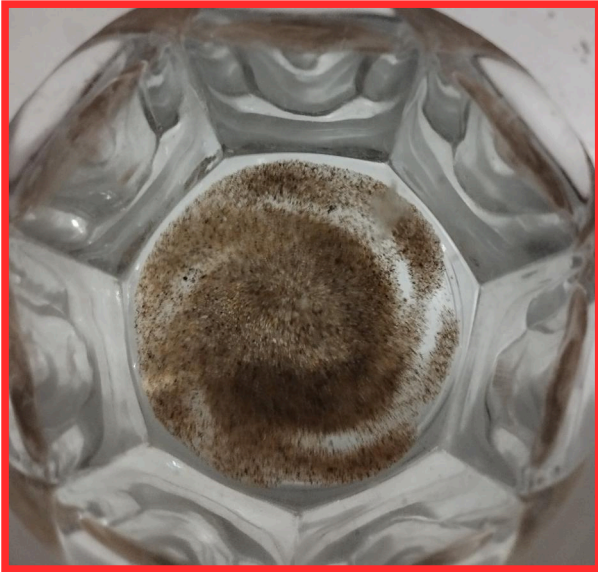


Fig. 3. Modelo con arena. Foto de Rosa M. Ros

Probé con sal fina, y también quedan bien, aunque se disuelve más rápidamente que el bicarbonato. Y por último, probé con arena fina de playa, incluso pasada por un tamiz, y también queda muy bien.



Fig. 4. NGC 1232 (ESO).

Se puede practicar modificando la velocidad con que remueves el agua, la cantidad de polvos que usas, se puede perfilar más o menos las formas que salen, removiendo a media altura, sin llegar al suelo del vaso, etc. Y por supuesto, registrar los resultados con fotos.



Fig. 5. M 31 (IAC) a la izquierda) y modelo con bicarbonato a la derecha.



Dos cosas más que se pueden obtener con este modelo, que se le ocurrieron a Rosa M. Ros: mirando de canto al vaso, en el centro se ve un pequeño montículo, que simula bien el bulbo central de una galaxia (Figura 6). Y removiendo el agua, puedes ir obteniendo algo semejante a los tipos de galaxias de la secuencia de Hubble (Figura 7). Faltan obtener las galaxias barradas: ahí queda el reto.

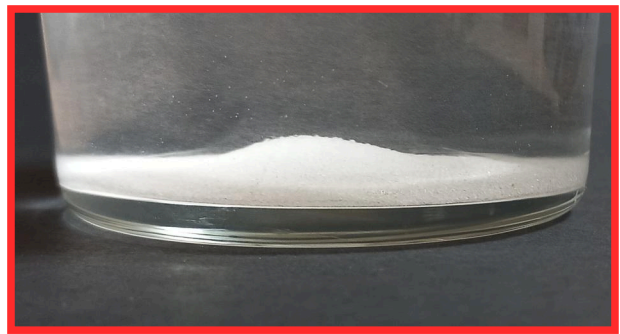
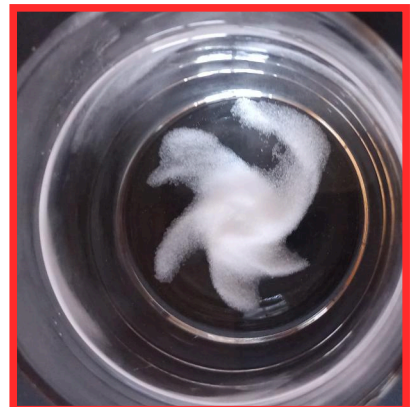
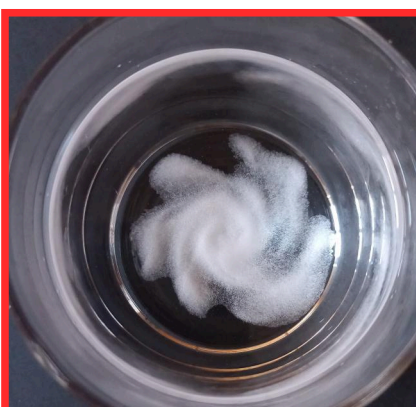


Fig. 6. NGC 4565 (Roth Ritter), una galaxia vista de canto, a la izquierda, y modelo con bicarbonato a la derecha.



Fig. 7. Secuencia de Hubble (arriba) y modelo de algunas de esas galaxias (abajo).



¿QUÉ FUE ANTES, EL ARTE O LA ASTRONOMÍA?

Sarai de la Hoz Hernández y Mario López Rodríguez, cofundadores de [El Nocturnario](#)



Figura 1. Fragmento de "Alegoría a la Vista", de Jan Brueghel el viejo y Pedro Pablo Rubens, con instrumentos astronómicos.

En este artículo los fundadores del Nocturnario plantean una interesante pregunta, sobre el arte y la astronomía. Al final del artículo presentan lo que es y lo que hacen en [El Nocturnario](#).

Cuando el Homo Sapiens se convirtió, hace unos 28.000 años, en el único representante de la especie Homo tras la extinción del Homo neanderthalensis, el cielo estrellado que reina sobre nuestras cabezas ya estaba ahí. Con casi total seguridad esa visión nocturna de la bóveda celeste provocaba en ellos la misma fascinación que nos sigue provocando hoy en día. Solo hay que hacer un breve repaso al arte rupestre y arte mueble paleolítico para encontrar ejemplos donde el cielo se convierte en el protagonista.

Por nombrar tan solo algunos, descubrimos ya en época auriñaciense (hace unos 25.000 años) la plaqueta de Abri Blanchard, actualmente en el Museo de Sergeac, en Francia (Fig. 2), donde se grabaron 69 marcas que hacen referencia a las fases lunares. Sin salir de Francia, en la cueva de Lascaux, de época magdalenense (hace unos 18.000 años) observamos entre sus pinturas a las Pléyades y la constelación de Tauro (Fig. 3). Más reciente, en la Edad de Bronce, podemos mencionar al disco de Nebra, el primer planisferio celeste descubierto.

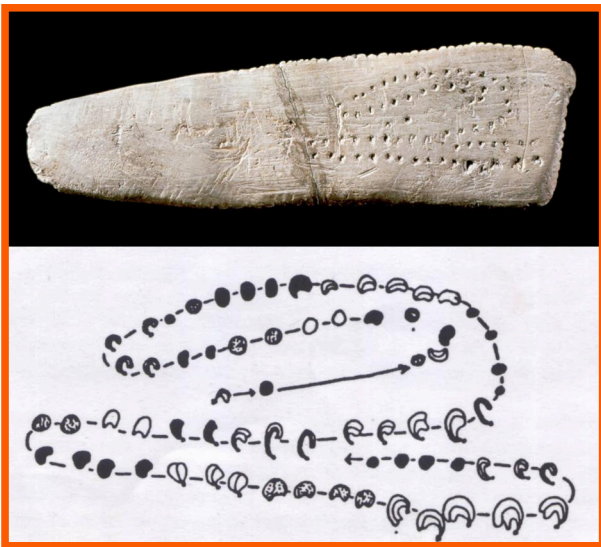


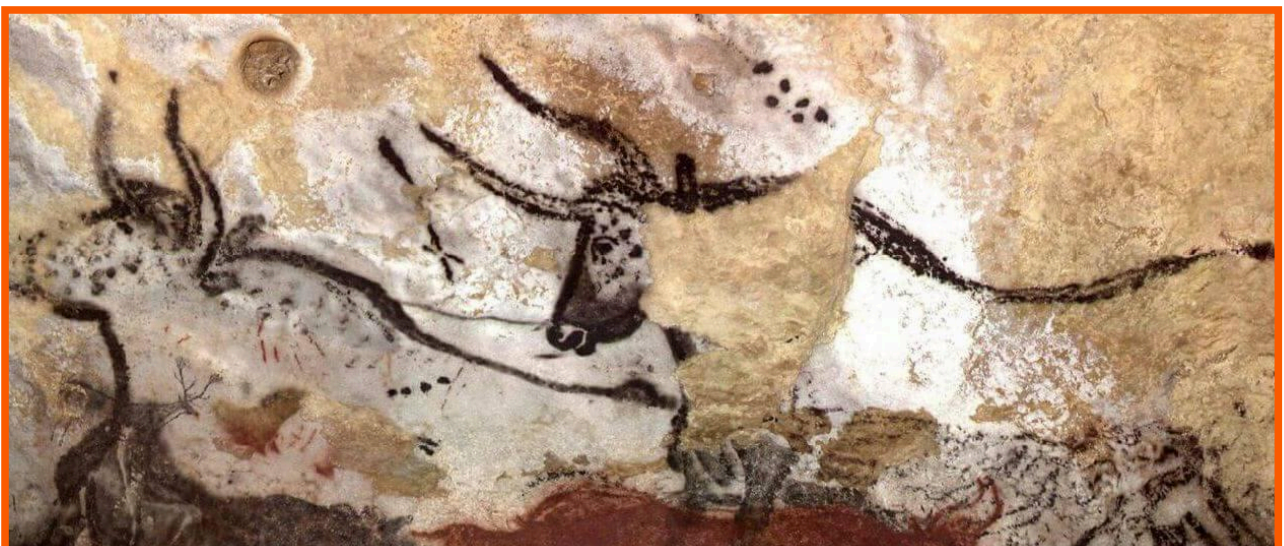
Figura 2. Plaqueta de Abri Blanchard, donde se grabaron 69 marcas que hacen referencia a las fases lunares.

Sin duda la astronomía resulta un rico campo de conocimiento para el arte pero, haciendo una mención especial a la famosa dicotomía del huevo y la gallina ¿Qué fue antes, el arte o la astronomía? Según los estudios etnológicos actuales, el concepto de arte no existía para nuestros antepasados más remotos. El arte no era más que una herramienta al servicio de otras materias, como algo práctico, a modo de autoafirmación del ser humano, o con vínculos místicos. Además, debemos tener en cuenta que algunas de esas obras paleolíticas que hoy en día catalogamos sin lugar a dudas

como “obras de arte”, no fueron concebidas como tal, y durante mucho tiempo tampoco se consideraron como tales. Es la mente evolucionada de nuestra actual sociedad la que las ha imbuido dentro del gran abanico que recoge las materias artísticas, por su exclusividad y valor estético. En el momento actual podemos afirmar que el arte surge hace milenios aunque los primeros sapiens no lo entendieran como nosotros lo hacemos hoy en día.

Si hablamos de astronomía, sin embargo, es más fácil identificar la curiosidad que el ser humano primitivo sintió por los fenómenos astronómicos. Antes, mucho antes de conocer la escritura, el ser humano observó la periodicidad de las fases lunares, creó calendarios, observó el retorno periódico de las estaciones y los planetas, constató los lazos entre los fenómenos terrestres y celestes... Evidencias que le permitieron controlar el mundo en el que vivía y dar un paso más en la evolución. Pero a pesar de que hoy día podamos contemplar con admiración el nivel de sapiencia al que llegaron nuestros antepasados, esta gran cúpula oscura con brillantes luces, era al mismo tiempo una gran desconocida. Esa inaccesibilidad colocó en el cielo seres sobrenaturales que daban explicación y sentido a las cuestiones que de otra forma no tenían respuesta... aún.

Figura 3. Pintura de la constelación de Tauro y las Pléyades, en la Cueva de Lascaux, de hace unos 18.000 años.



Entendiendo, por tanto, que no hay un antes o un después entre el arte y la astronomía, podemos sostener que ambas materias han ido de la mano desde el origen de nuestra especie. Sabemos que la única forma de perpetuar el conocimiento a lo largo del tiempo es modelarlo sobre un soporte físico, y para ello es necesario traducir un pensamiento abstracto en una imagen que lo represente, bien con un código compartido al que llamamos escritura o bien con dibujos, pictogramas y esquemas. Esta traducción del pensamiento a lo material puede hacerse desde un punto de vista práctico, simplista; sin embargo el ser humano, por nuestra propia naturaleza creativa, ha elegido hacerlo en la mayoría de los casos con valor estético, cuidando que además de transmitir el conocimiento, se haga de una forma atractiva, hermosa... en definitiva, artística.

Aunque esta reflexión la podríamos extrapolar a casi cualquier materia, la naturaleza abstracta de la astronomía la liga aún más al concepto artístico. ¿Cómo representar una bóveda en una superficie plana? ¿Cómo catalogar las estrellas? ¿Cómo simbolizar el movimiento de los planetas? Cada cultura y cada artista en su época, ha dado respuesta a estas preguntas de formas diversas, influenciados por el conocimiento científico del cielo pero también por la cultura popular y, en gran medida, las doctrinas religiosas.

Esto nos lleva a observar que entre arte y astronomía hay distintas ramas de estudio. Quizás, la más abundante y popular es la que acabamos de mencionar, la que relaciona los fenómenos astronómicos con deidades superiores. Si nos fijamos, por ejemplo, en las cosmogonías de las distintas culturas, vemos que son un reflejo del hombre mirándose a sí mismo al contemplar el firmamento. Sin respuestas absolutas, las religiones han sido las canalizadoras de las grandes cuestiones científicas y humanas en general.

El planisferio de Dendera (Fig. 4) nos sirve para ejemplificar esta cuestión. Se trata de una magnífica cúpula que decoraba el techo de la capilla número 2 del templo de Hathor, la deidad egipcia del cielo (actualmente en el Museo del Louvre de París). En ella vemos una completísima representación del cielo nocturno del siglo I a.C. De esta cúpula podemos extraer una gran cantidad de datos para el estudio de la astronomía y para ello es necesario entender el código del plano artístico. La iconografía de esta cúpula, importada de la antigua mesopotamia, está repleta de deidades y simbología popular, elaborada con gran valor estético. Es decir, una traducción religiosa del conocimiento científico.



Figura 4. El planisferio de Dendera, en el templo de Hathor, la deidad egipcia del cielo, representa el cielo nocturno del siglo I a.C.

Más próxima a nosotros, la cultura greco-latina es otro buen ejemplo. Las deidades que habitan el cielo han acabado siendo parte de nuestro vocabulario astronómico: Orión, Perseo, Hércules, etc. Sus relatos mitológicos no son casuales. Muchos de ellos relatan hechos científicos, como el por qué de las constelaciones circumpolares o, por qué las estrellas y el Sol se alternan cada día.

Dando un paso temporal hacia delante, tenemos que mencionar el dibujo astronómico como disciplina científica propia, es decir, el uso del arte subordinado a la ciencia. El dibujo astronómico es más riguroso. Busca reflejar lo más fielmente posible los fenómenos del firmamento para dejar constancia de ellos. Dibujo astronómico fueron, por ejemplo, las anotaciones de Galileo en sus cuadernos al observar por el telescopio, o las representaciones de eclipses o cometas que se han creado a lo largo del tiempo en todo tipo de publicaciones. Como muchas otras cosas, el dibujo astronómico quedó relegado a un plano más romántico y menos práctico con la llegada de la tecnología, pero no por ello debemos dejar de otorgarle su gran importancia histórica, y ¡artística!

En una tercera categoría podríamos mencionar al arte por el arte, la astronomía como materia subordinada al arte. Hablamos por ejemplo del maravilloso cuadro “Alegoría a la Vista” de Jan Brueghel el viejo y Pedro Pablo Rubens (Fig. 1), actualmente en el Museo del Prado de Madrid. Su concepción original es la obra artística como tal, pero su contenido refleja un tesoro del conocimiento científico astronómico del momento. El cuadro está repleto de utensilios dedicados al estudio del firmamento, una “fotografía” cuyo estudio nos revela una valiosísima información sobre la evolución tecnológica. Como este, basta pasearse por los pasillos de cualquier museo nacional de arte para encontrar multitud de ejemplos.

EL NOCTURNARIO

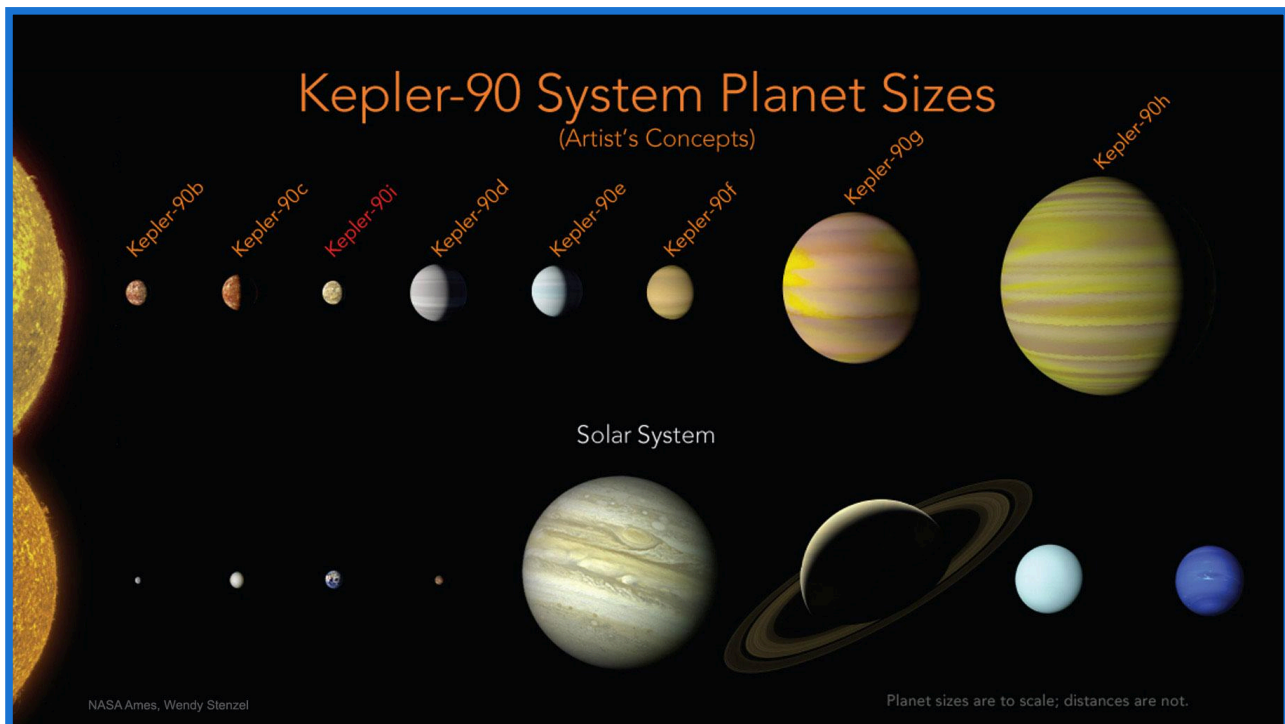
Dentro de este crisol de conocimientos tanto artísticos como astronómicos, nace [El Nocturnario](#), un proyecto dedicado a la divulgación de la astronomía desde una perspectiva diferente. Nos dedicamos a recoger ese conocimiento astronómico tradicional, traducirlo y transmitirlo a través de las redes de comunicación actuales. En definitiva sí, divulgamos astronomía, y sí, fomentamos el astroturismo, pero recogiendo, actualizando y transmitiendo a todos los públicos ese conocimiento histórico, cultural y artístico relacionado con la astronomía.

El Nocturnario nace en febrero de 2022 como resultado natural del camino que nuestras carreras tomaron hace más de 10 años. Somos dos, Mario López, comunicador y astrónomo y Sarai de la Hoz, comunicadora y estudiante de historia del arte. Tras años de dedicación profesional al mundo audiovisual y al astroturismo, decidimos crear un proyecto que uniera nuestras pasiones. En apenas un año, hemos construido las bases de una empresa que aspira a ser canalizadora y movilizadora de la cultura astronómica. Celebramos nuestro primer año de vida felices de poder dedicarnos a lo que realmente nos apasiona y con muchas ganas de compartirlo con todos aquellos que deseen acercarse a nuestras experiencias, o leernos en nuestra revista digital. Nos sentimos parte de una comunidad que ama la astronomía, el arte y la cultura ¡Sois todos bienvenidos a compartirla con nosotros!



MINERÍA CON DATOS REALES DE EXOPLANETAS, DE APLICACION EN EL AULA (3ª PARTE)

Joaquín Álvaro Contreras



En esta tercera y última parte del trabajo con datos reales a partir del fichero “[Planetary Systems Composite Data](#)”^[1] entraremos en un mayor nivel de detalle con ejercicios que pretenden acercarnos a un mejor conocimiento de lo que una base de datos de estas características, estadísticamente ya muy significativa, puede ofrecernos sobre las relaciones entre la masa, la densidad y el radio.

La relación masa – radio

Una de las propiedades más importantes a considerar en el estudio de los exoplanetas es la relación entre la masa y el radio. No debe olvidarse que estos dos parámetros

están relacionados entre sí y definen su densidad:

$$d = \frac{3}{4\pi} \frac{M}{R^3}$$

^[1] "This research has made use of the NASA Exoplanet Archive, which is operated by the California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration under the Exoplanet Exploration Program."

La densidad de un planeta es un indicador de su carácter '*rocoso*', tipo terrestre, o '*gaseoso*', tipo Júpiter. Véase, como referencia, las densidades de la Tierra y Júpiter⁽²⁾:

$$d_T = 5,515 \text{ g/cm}^3$$

$$d_J = 1,336 \text{ g/cm}^3$$

Como se puede ver, parece haber una separación clara en el valor de las densidades que reflejaría la estructura y composición material de los planetas. Pero ¿se puede mantener esta caracterización con una base estadística más amplia como la que ofrecen los 5.030 exoplanetas confirmados?⁽³⁾ ¿Hay un umbral nítido que separe los tipos de planetas en función de sus densidades? ¿Puede hablarse solo de planetas rocosos y planetas gaseosos?

Sabemos que una condición importante para que un planeta sea habitable es que éste

retenga una capa atmosférica gaseosa, pero al mismo tiempo parece fundamental que también tenga una base rocosa con agua líquida en superficie. Al margen de lo que esto signifique en cuanto a las condiciones de habitabilidad, caracterizar esta tipología es fundamental también para comprender mejor los mecanismos de formación y evolución de los sistemas planetarios. Estas condiciones por ahora son difícilmente observables con las técnicas de observación y detección disponibles. Tal vez el [telescopio espacial James Webb](#), o la futura [misión Ariel \(ESA\)](#), puedan aportar información más determinante al respecto en los próximos años.

Con los datos disponibles actualmente intentaremos responder a alguna de estas preguntas analizando la distribución de los exoplanetas en base a la relación masa/radio. Empezaremos por representar esta distri-

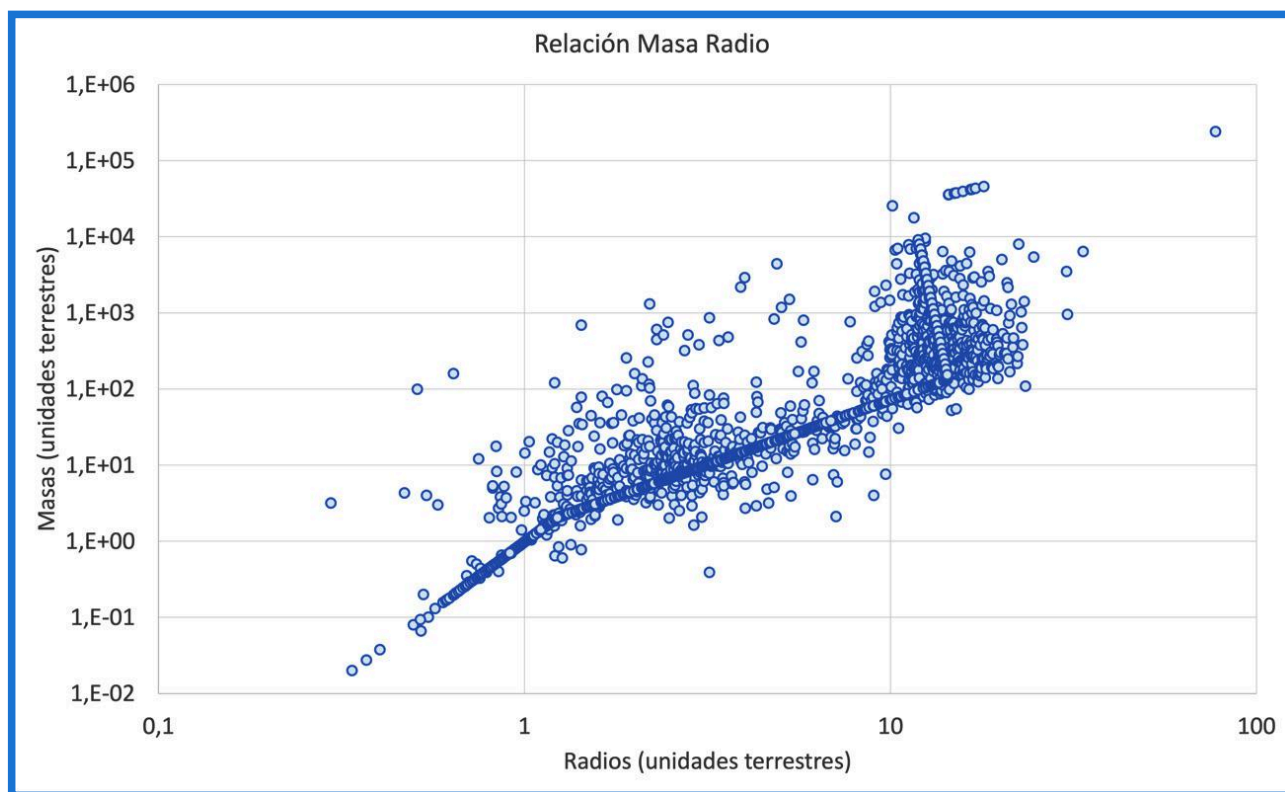


Fig. 3.1 – distribución de exoplanetas en función de sus radios y masas. Ejes en escala logarítmica para hacer más comprensible el gráfico⁽⁴⁾.

⁽²⁾ Otros planetas del sistema solar: rocosos > Mercurio: $d_m=5,43 \text{ g/cm}^3$, Venus: $d_v=5,24 \text{ g/cm}^3$, Marte: $d_m=3,933 \text{ g/cm}^3$; gaseosos > Saturno: $d_s=0,690 \text{ g/cm}^3$, Urano: $d_u=1,274 \text{ g/cm}^3$, Neptuno: $d_n=1,64 \text{ g/cm}^3$

⁽³⁾ A fecha de 9 de mayo de 2022.

⁽⁴⁾ En el anexo puede verse otra representación de este mismo gráfico con el eje de 'radios' en escala de valores absolutos, no logarítmico, también en unidades de radios terrestres.

bución haciendo uso de los valores contenidos en las columnas '*pl_rade*' y '*pl_bmasse*', esto es radios y masas de los exoplanetas en unidades terrestres, (fig. 3.1).

Lo primero que llama la atención en esta representación es una línea en *zig-zag* ascendente con tres segmentos nítidos y que aglutinan el 77% de los exoplanetas representados. Este porcentaje se detallará en breve.

Cuando uno se encuentra con una *regularidad* de esta naturaleza, si no está sobre aviso, se corre el riesgo de sufrir una taquicardia, porque algo así puede indicar la posibilidad de haberse topado inesperadamente con algo con un posible significado físico más o menos inmediato. La alternativa es poner en duda la calidad o naturaleza de los datos, especialmente por la ausencia de dispersión de estos en torno a esa línea bien marcada, como correspondería a una serie normal de datos empíricos.

Pero lo que ocurre aquí es fácil de explicar. Mientras que el método de detección por tránsito puede medir con cierta facilidad el radio planetario no ocurre lo mismo con la masa. Por el contrario, el método de *velocidad radial* puede determinar las masas, pero no es capaz de medir radios. De manera que en nuestro fichero "[Planetary Systems Composite Data](#)" tenemos tres tipos de registros:

A. Exoplanetas de los que se conoce empíricamente el radio pero no la masa.

B. Exoplanetas de los que se tiene una medida de la masa pero no del radio.

C. Exoplanetas en los que ambos parámetros tienen una estimación empírica porque han sido observados con dos o más métodos.

Lo primero que vamos a hacer es separar estas tres clases en nuestro fichero. Para ello necesitamos echar mano de la columna '*pl_rade_reflink*' que tiene la información acerca de cómo o quién ha hecho la medida/estimación del radio. Los exoplanetas para los que no se tiene esta medida arrastran en este campo la cadena '*Calculated Value*'.

Paralelamente, los registros que corresponden a exoplanetas para los que no se tiene estimación de su masa, llevan en la columna '*pl_bmassprov*' el valor '*M-R relationship*'.

1. Para facilitar el tratamiento de estas tres clases se recomienda añadir sendas columnas a *pl_rade_reflink* y *pl_bmassprov* con algún indicador sencillo que sustituya las cadenas de caracteres de las anteriores, (por ejemplo, 1 = valores calculados, 0 = valores empíricos). De esta manera tendremos las tres clases identificadas fácilmente:

$$\begin{aligned}(\text{radio}, \text{masa}) &\equiv (0, 1) \rightarrow \text{clase A} \\ (\text{radio}, \text{masa}) &\equiv (1, 0) \rightarrow \text{clase B} \\ (\text{radio}, \text{masa}) &\equiv (0, 0) \rightarrow \text{clase C}\end{aligned}$$

El caso (1,1) no se da salvo para un puñado escaso de planetas, (ver nota al pie [5] de la página siguiente). Hecho esto, podemos representar de nuevo la fig. 3.1 con las tres series diferenciadas (fig 3.2).

Como ya tenemos separadas las tres clases, podemos contabilizar fácilmente el número de sus respectivos integrantes:

Clase A – 2.785 exoplanetas

Clase B – 1.097 exoplanetas

Clase C – 1.134 exoplanetas⁽⁵⁾

Esto es, de sólo el 22,61 % de los exoplanetas se tienen radios y masas medidos empíricamente, mientras que el 77,39 % tienen alguno de estos dos parámetros calculados por falta de una estimación directa a partir del método empleado en su detección.

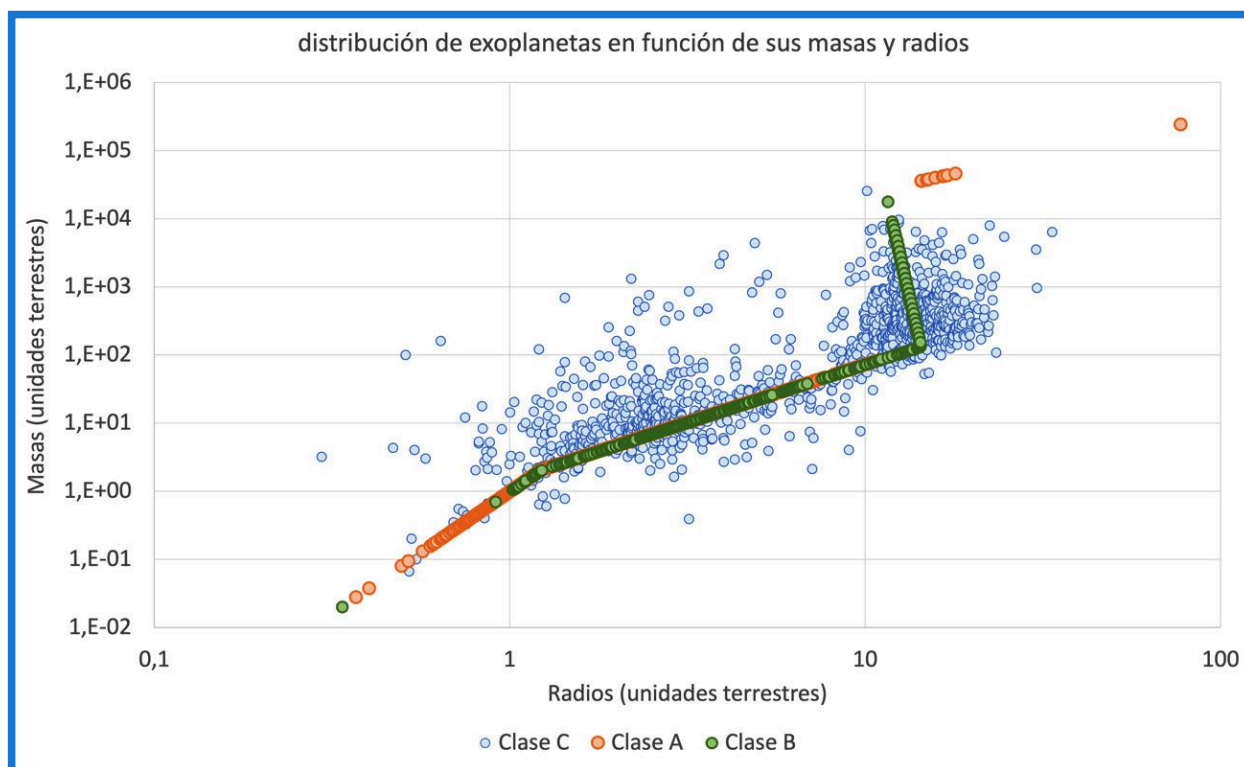


Fig. 3.2 - distribución de exoplanetas en función de sus radios y masas. Ejes en escala logarítmica. La abundancia de la población de la clase A queda parcialmente enmascarada en el gráfico por encontrarse superpuesta sobre ella la población de la clase B.

La pregunta ahora es ¿cómo se han calculado estos valores desconocidos?

Entraremos en ello en breve. Antes será interesante hacer una representación de la distribución de densidades.

Distribución de densidades.

Con las densidades recogidas en el fichero que estamos tratando pasa lo mismo. Hay densidades estimadas empíricamente y otras calculadas. La información en cada caso está presente en la columna '*pl_dens_reflink*'. Como para algunos exoplanetas el valor correspondiente a la densidad falta⁽⁵⁾ y en otros está directamente calculado a partir de los radios y las masas, optaremos por añadir a nuestra tabla una nueva columna en la insertaremos siempre un valor calculado para la densidad, que será el que utilizemos en

adelante para los gráficos correspondientes. Esto no desvirtúa el dato en sí mismo⁽⁶⁾ y puede servir de ejercicio en clase para entender las relaciones masa, radio, densidad y la transformación de unidades relativas en unidades del sistema CGS.

Dado que tanto las masas como los radios están en unidades terrestres, para pasar las densidades (también relativas al planeta Tierra) a unidades de g/cm^3 habrá que multiplicar por $5,515 \text{ g/cm}^3$, que es la densidad de la Tierra en unidades CGS. Por tanto este nuevo campo calculado será:

$$[1] \quad dc_p = \frac{M_p}{R_p^3} \cdot 5,515 \text{ g/cm}^3$$

La distribución de densidades se presenta en la fig. 3.3 a continuación.

⁽⁵⁾ Hay 14 exoplanetas que no tienen informado el radio (de los cuales 5 tampoco informan sobre la masa), ni tampoco ofrecen referencias. Estos 14 registros (todos de la clase C) los retiraremos de los análisis que hagamos desde aquí. Nuestro fichero tendrá finalmente 5016 exoplanetas.

⁽⁶⁾ Ver en el Anexo.

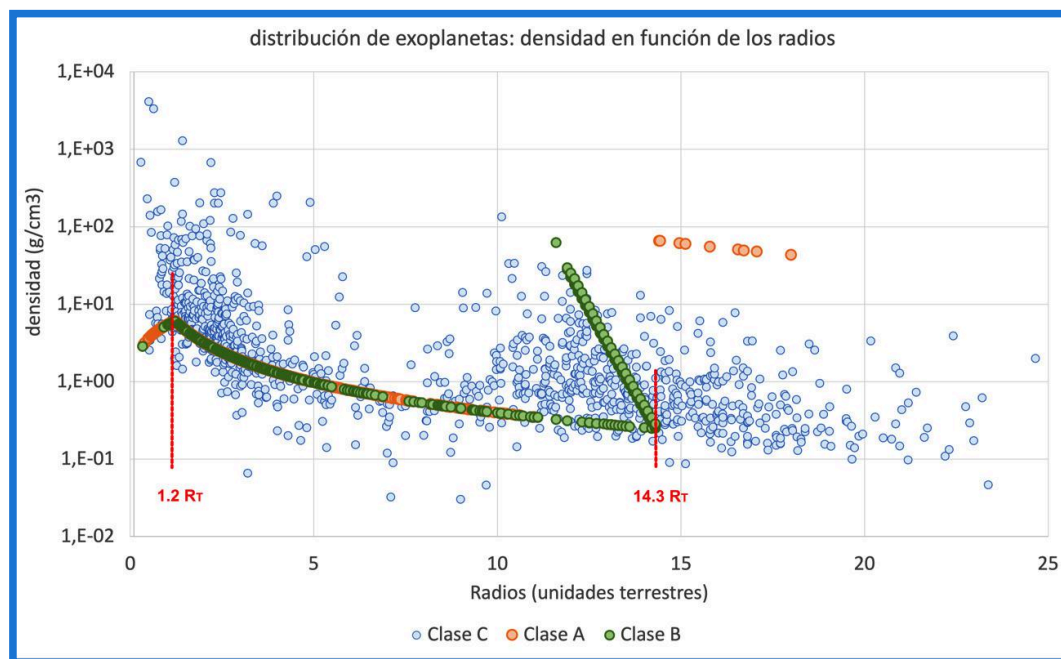


Fig. 3.3: Densidad frente a radio. Eje de ordenadas en escala logarítmica. Se aprecia igualmente el efecto artificioso de los planetas que aportan radio o masa calculado.

También aquí se aprecian los tres segmentos ya reseñados en las figuras 3.1 y 3.2, siendo mucho más llamativos los puntos de inflexión (o ruptura) que aparecen en torno a $1.2 R_T$ y $14.3 R_T$.

Ya es el momento de hablar sobre la forma de asignar valores calculados a la masa cuando sólo se conoce el radio y viceversa que, como queda claro, debería explicar la distribución de ese 77,39 % de exoplanetas en cualquiera de las distribuciones presentadas hasta aquí.

El algoritmo de 'Chen & Kipping' ⁽⁷⁾.

Se trata de un procedimiento desarrollado por Chen y Kipping a finales de 2016 en base a la aplicación de una estadística bayesiana ⁽⁸⁾ sobre los exoplanetas de la clase C, es decir, aquellos que sí tienen medidas para los radios y las masas. A partir de los parámetros derivados de este análisis se proyectan los valores desconocidos, masas para la clase A y radios para la clase B.

A pesar de que el algoritmo en sí, que ahora veremos con más detalle, extrapola los resultados que nos han llamado la atención y que podríamos considerar como poco naturales, es el procedimiento que aún se sigue utilizando para resolver el problema planteado. En 2016 el número de exoplanetas que formaban lo que hemos llamado clase C era sólo de 316, y ésta fue la base estadística que da lugar al algoritmo. Posteriormente, con una base extendida a una clase C más amplia, este tipo de método para estimar un mejor algoritmo se mantiene más o menos inalterado, salvo pequeñas correcciones en las posiciones decimales del orden de las centésimas en las leyes de potencia que lo definen.

El algoritmo, que puede verse en la [documentación del fichero](#) que estamos tratando, asume que la relación entre la masa y el radio de los planetas debe ser del tipo de la ley de potencia siguiente:

$$[2] \quad R_p = Cte M_p^\delta \Leftrightarrow M_p = Cte' R_p^{1/\delta}$$

⁽⁷⁾ "Probabilistic Forecasting of the Masses and Radii of Other Worlds" - Jingjing Chen, David M. Kipping – nov 2016

⁽⁸⁾ A las estadísticas bayesianas se las suele considerar como 'estadísticas de probabilidad esperada'. Un ejemplo de problemas que se enfocan bajo estos modelos puede ser: si cuando tengo gripe tengo una probabilidad xx de tener fiebre, cuál será la probabilidad de que, si tengo fiebre, ésta se deba a que tengo gripe.

Si tomamos logaritmos en las expresiones anteriores, tendremos:

$$\mathcal{R} = \mathcal{C} + \mathcal{M} \mathcal{S} \Leftrightarrow \mathcal{M} = (\mathcal{R} - \mathcal{C})/\mathcal{S}$$

siendo $\mathcal{M} = \log_{10} M_p$, $\mathcal{R} = \log_{10} R_p$ y $(\mathcal{C}, \mathcal{S})$ los parámetros a determinar por la estadística.

Una vez ajustados estos, los valores que definen el algoritmo son:

$$[3] \quad \{\mathcal{C}, \mathcal{S}\} = \begin{cases} \{0.00346, 0.2790\} & \text{if } R_p < 1.23 R_T \\ \{-0.0925, 0.589\} & \text{if } 1.23 \leq R_p < 11.1 \\ \{-2.85, 0.881\} & \text{if } R_p \geq 14.3 R_T \end{cases}$$

Si se toman las masas como referencia, la equivalencia de las expresiones [2] se traduce en:

$$[4] \quad \{\mathcal{C}, \mathcal{S}\} = \begin{cases} \{0.00346, 0.2790\} & \text{if } M_p < 2.04 M_T \\ \{-0.0925, 0.589\} & \text{if } 2.04 \leq M_p < 132 \\ \{1.25, -0.044\} & \text{if } 132 \leq M_p < 26600 \\ \{-2.85, 0.881\} & \text{if } M_p \geq 26600 M_T \end{cases}$$

A simple vista éste resulta un algoritmo feo, ya que el tramado (visible en las representaciones de las figuras 3.1, 3.2 y 3.3), está presente en el mismo desde su propia base y los ajustes correspondientes a los parámetros $\{\mathcal{C}, \mathcal{S}\}$ asumen los límites marcados en los condicionantes respectivos como zonas donde es posible encontrar correlaciones razonables, independientes y no aplicables fuera de dichos límites. Ver en el anexo para mayor detalle, (fig. 3.3.1 y 3.3.2).

Al margen de lo que nos parezca, éste es el procedimiento que se sigue aplicando para asignar los valores desconocidos (de radios y masas) a falta de otro mejor. Pero lo importante ahora es centrarnos en su interpretación y significado.

A partir de los rangos de aplicación del algoritmo [3], que define tres umbrales para los radios: (1.23, 11.1 y 14.3 R_T *respectivamente*), el espectro de distribución de los planetas se fragmenta en cuatro zonas (1, 2, 3 y 4) a las que los propios Chen y Kipping asignan una posible interpretación. Así, los exoplanetas con $R_p < 1.23 R_T$ serían *planetas rocosos*, los comprendidos en el intervalo $1.23 \leq R_p < 11.1 R_T$ los consideran gaseosos '*tipo Neptuno*' y para aquellos cuyo radio está por encima de $14.3 R_T$ reservan la posibilidad de mundos estelares, o sea proto-estrellas en las que es posible que se haya iniciado la combustión de hidrógeno, (pero sólo para los de mayor densidad en esta franja).

La zona 3, sólo contemplada en [4] y que alojaría exoplanetas con masas en el intervalo $132 \leq M_p < 26600 M_T$, es considerada propia de los planetas *gaseosos 'tipo Júpiter'*, (ver fig. 3.5). Como puede verse, en esta región el algoritmo tiene un comportamiento singular ya que parece haber un retroceso en el tamaño del radio a medida que aumentan las masas. Esto, físicamente, puede interpretarse fácilmente, puesto que la acumulación de masa, (gas), produce un aumento del potencial gravitatorio del planeta, que se contrae aumentando drásticamente su densidad. A esta región se la llama de '*radio degenerado*', debido a la multiplicidad de valores que puede tomar la masa para un mismo valor del radio, (véase que la serie de exoplanetas proyectados aquí dibujan una línea que se acerca a la vertical en el gráfico).

En este último gráfico, donde en el eje de abscisas se representan masas, vemos que en la zona 3, (planetas tipo Júpiter y mayores), la masa sigue creciendo como era de esperar a pesar de que los radios se contraigan como se ve en la fig. 3.4.

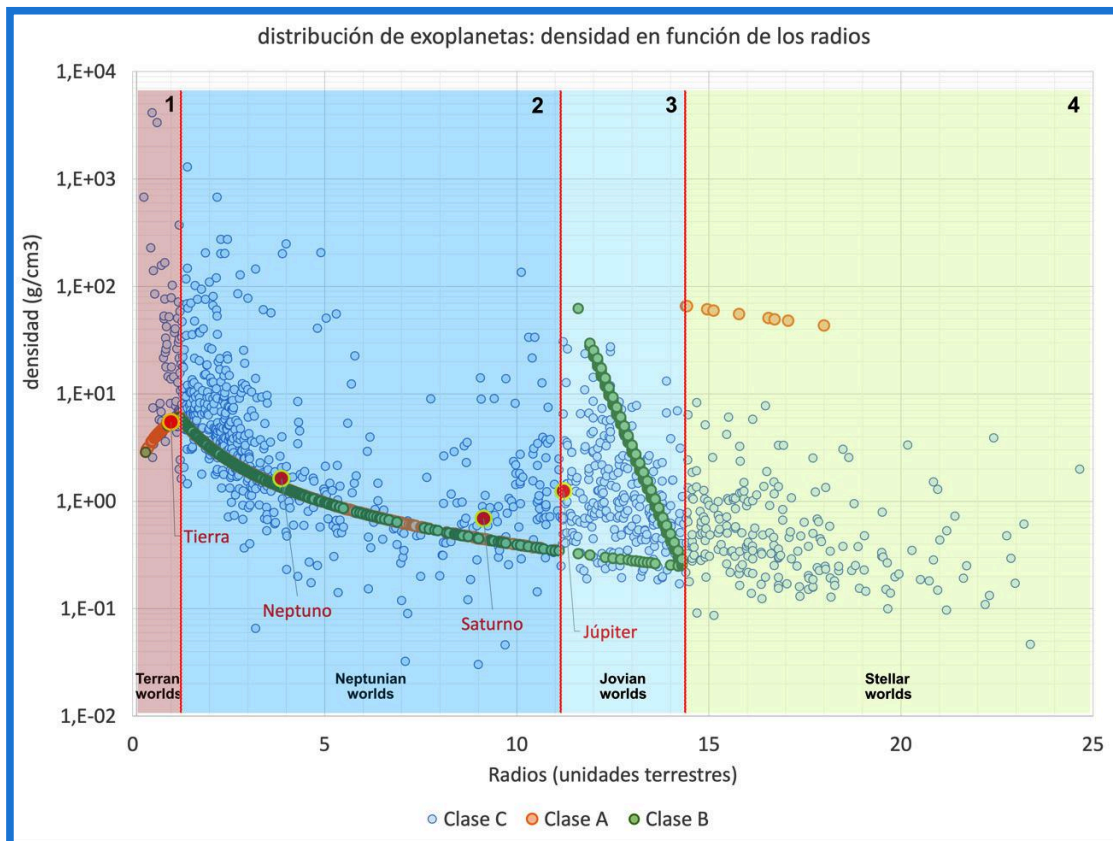


Fig. 3.4 Es la misma representación de la fig. 3.3 pero se han añadido algunos elementos para su mejor interpretación. También se han incorporado las posiciones de los planetas Tierra, Júpiter, Saturno y Neptuno, como referencias interesantes a considerar.

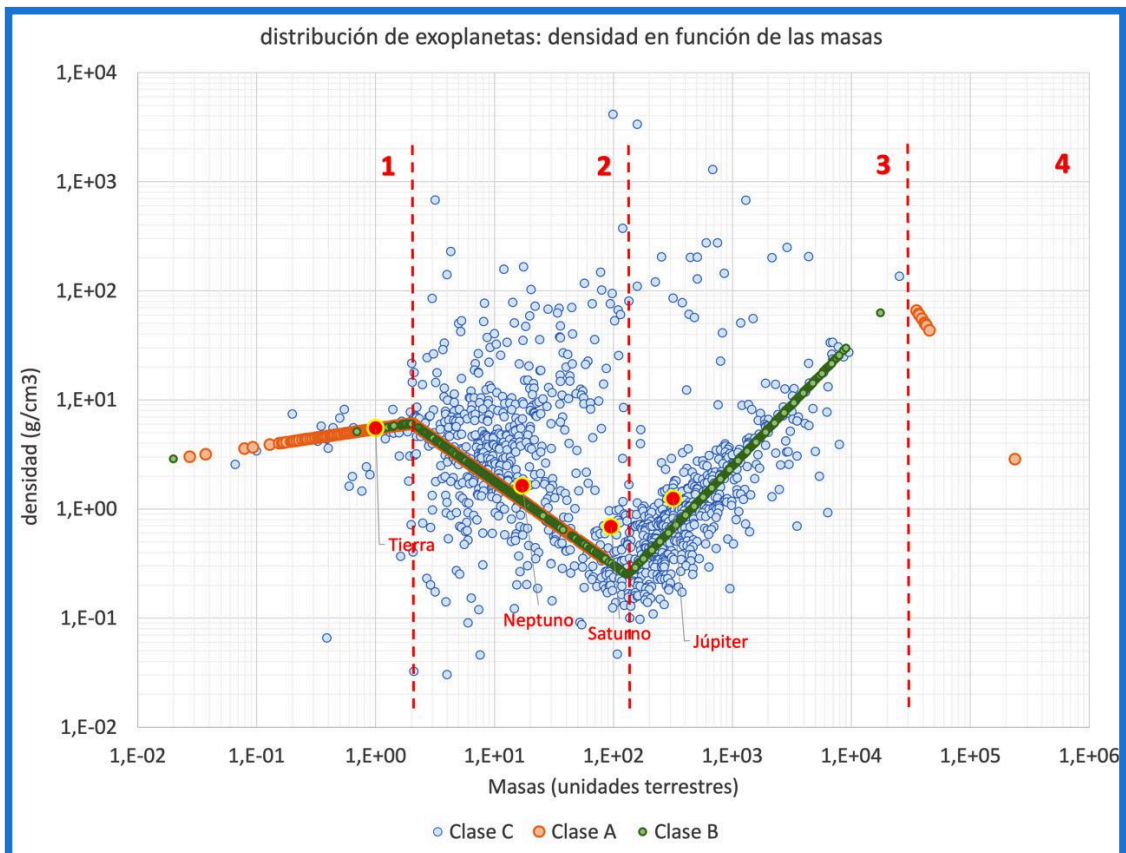


Fig. 3.5 – Distribución de densidades en función de la masa.

Lo más significativo, no obstante, es el punto de inflexión que separa los planetas rocosos de los gaseosos tipo Neptuno, en valores muy próximos a los que tiene el planeta Tierra, ($1.23 R_T$, $2.04 M_T$). Significa esto que, bajo las premisas derivadas del *algoritmo de Chen & Kipping*, la Tierra sería un *gran planeta rocoso* casi en el límite de la región de los gaseosos tipo Neptuno, (ver fig. 3.4). Incluso los propios Chen y Kipping vienen a decir en las conclusiones de su artículo "*nuevamente (se) argumenta a favor de la escasez de Súper-Tierras. Puede ser, entonces, que La Tierra es la Súper-Tierra que hemos estado buscando todo el tiempo*"⁽⁹⁾.

Más adelante discutiremos todo esto un poco más en profundidad. Por ahora puede parecer un poco confuso las diferentes representaciones hechas sobre unos mismos datos, alternando ejes y/o escalas logarítmicas con naturales, pero es totalmente intencionado. Primero, porque normalmente un único gráfico no agota las diferentes perspectivas que los datos en sí pueden presentar. Por otra parte, hay un objetivo subyacente en estos ejercicios propuestos: el de manejar con cierta soltura las herramientas de análisis empleadas y, también, el de ser conscientes de que la interpretación de estos análisis a veces requiere verlos desde diversos puntos de vista.

Modelos mejorados. Alternativas.

A pesar de lo comentado sobre el modelo propuesto por Chen y Kipping, y que éste fuera desarrollado sobre una base estadística todavía escasa (316 planetas confirmados en su momento), este modelo es el que se sigue utilizando todavía hoy como el menos malo, (o único posible *hasta nueva orden*), para proyectar la variable desconocida en cada caso, dado que el método basado en la estadística bayesiana mantiene los parámetros sin apenas variación a pesar de

haber aumentado el número de exoplanetas significativamente.

De todas formas hay que resaltar algo que parece evidente en los gráficos que ya hemos desarrollado aquí:

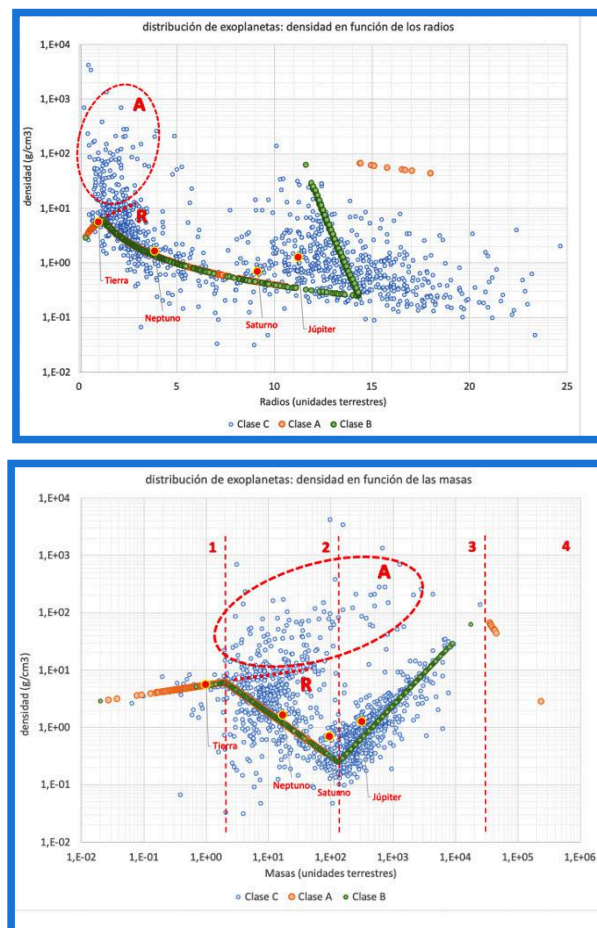


Fig. 4.1 – gráficas 3.3 y 3.5 con dos anotaciones marcadas como R y A

Como se puede contemplar en ambas imágenes, la rama de planetas rocosos parece tener continuidad más allá del drástico límite impuesto por el algoritmo Chen & Kipping, (línea R), llegando hasta planetas con radios próximos a $4 R_T$, (figura superior) y masas del orden de las $40 M_T$, (figura inferior).

Por otra parte, el modelo comentado no dice nada de la nube de exoplanetas de altas y muy altas densidades, marcados en la zona A. Tal vez habría que pensar aquí en planetas con

⁽⁹⁾ "This is also compatible with our determination and again argues for effectively a paucity of Super-Earths. It may be, then, that the Earth is the Super-Earth we have been looking for all along" – Chen & Kipping - "Probabilistic Forecasting of the Masses and Radii of Other Worlds" - nov 2016

una gran atmósfera gaseosa pero con un núcleo rocoso también grande y muy denso. En cualquier caso, se hacen precisas sendas funciones de estado para estas configuraciones, así como esperar a que observaciones más precisas aporten información más determinante.

Mientras estas cuestiones se aclaran, podemos presentar algunos resultados a partir de la aplicación de técnicas de inteligencia artificial (AI) basadas en *machine learning* sobre correlaciones múltiples con los datos existentes a la fecha.

Exoplanetas e Inteligencia Artificial

Ya escapa de los propósitos de esta serie de artículos ensayar en el aula las técnicas de análisis propuestas en este apartado pero, para completar todo lo expuesto aquí, se dan unas breves pinceladas de los resultados obtenidos con estas metodologías recogidos en un artículo de Carlos D. Álvaro y yo mismo^[10].

Lo primero que se aprecia como resultado de este análisis bajo el modelo AI desarrollado es una variedad más rica en el espectro de los exoplanetas que la que se deriva del algoritmo de Chen & Kipping. Aparecen 5 grupos de los

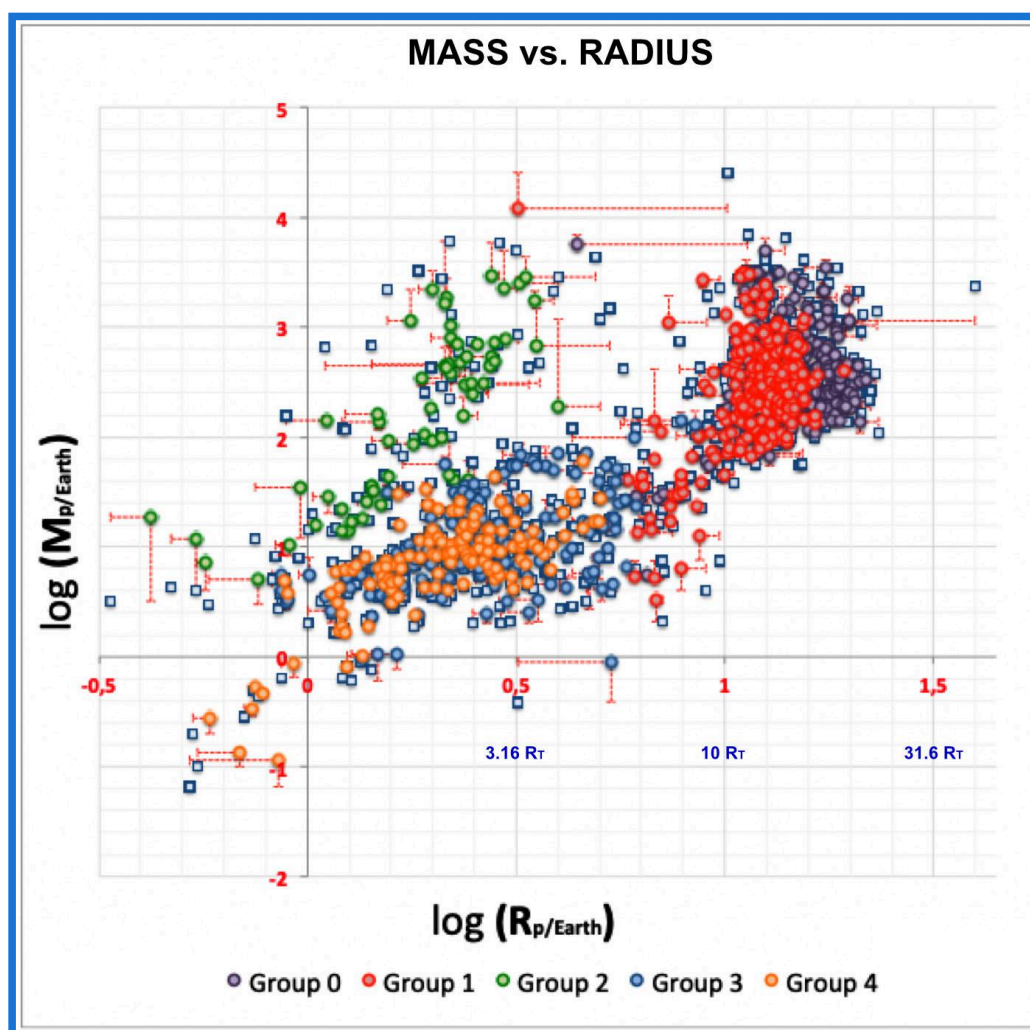


Fig. 4.1 – Representación de masas frente a radios (ejes en escala logarítmica). La figura revela 5 grupos diferenciados después de un *clustering* por *K-Means* sobre el que se aplica posteriormente un modelo de *Random Forest* que incluye la variable 'grupo' del paso anterior.

[10] "Extension of the standard radius-mass relationship of exoplanets using machine learning methods. A population of high-density planets is revealed by machine learning methods in the Planetary Systems Composite Data" – J. Álvaro & Carlos D. Álvaro – Feb 2020 – [Data updated to May 2022].

que el grupo 4 puede interpretarse como una población de planetas rocosos, cuyo rango va más allá del límite $1.23 R_T$, $2.04 M_T$, siendo razonable pensar que puede extenderse hasta una frontera próxima a los $4 R_T$ en una región, en el espacio de parámetros (masa, radio), que parecen compartir con planetas de otra naturaleza, (posiblemente los llamados ‘planetas de agua’, con un núcleo de hielo comprimido y denso), como zona de transición hacia los planetas gaseosos tipo Neptuno (grupo 3), grupo éste último en el que seguramente tampoco es descartable un núcleo rocoso bajo las grandes envolturas gaseosas.

Los grupos 1 y 0 corresponden evidentemente a los llamados ‘gaseosos tipo Júpiter’ y la separación en dos ramas puede estar diferenciando entre los que acceden a la región de radio degenerado por la izquierda y por la derecha respectivamente.

Pero lo más interesante, a nuestro entender, es la revelación de una región de planetas de pequeño radio y muy densos (grupo 2), sobre los que hay escasa o nula literatura científica y cuya estructura interna es sin duda un reto para los modelos físico-matemáticos que deben explicar tanto su composición material como su génesis.

Conclusión

La conclusión finalmente es que, a pesar de que el número de exoplanetas conocido es ya notorio, se sigue sabiendo poco acerca de la rica variedad vislumbrada sobre las estructuras internas, su composición material y los procesos de formación inherentes. Los métodos actuales tienen un sesgo, ya comentado, que favorecen la detección planetas muy próximos a sus estrellas anfitrionas y/o planetas muy masivos, quedando un rango amplio de espectro por cubrir, (véase como ejemplo la figura 3.1b en el anexo, donde la franja entre 5 y $10 R_T$ se encuentra poco poblada).

Por otra parte, la falta de información sobre la naturaleza de las atmósferas ayuda poco para responder estas preguntas. Esta falta de conocimiento fundamental justifica que el esfuerzo a medio plazo se esté poniendo en nueva instrumentación más sensible, con espectrógrafos incorporados, que puedan aportar información sobre la composición de los gases de dichas atmósferas. La misión *Ariel*, que será lanzada en 2029, pretende contar antes de su lanzamiento con un inventario de *exoplanetas objetivo*, cuyo estudio ayude a resolver en lo posible parte de estas incógnitas. El proyecto *ExoClock*, que solicita de manera especial la colaboración de observadores amateurs y facilita herramientas para ello, pretende definir en este periodo un conjunto de unos 1.000 exoplanetas que integren ese inventario de *planetas objetivo*.

Con este artículo terminamos la serie dedicada a los exoplanetas. Al margen de que los contenidos pueden considerarse en sí mismos propios de la divulgación en un área muy activa de la Astronomía, se ha pretendido ofrecer un repertorio de ejercicios, que son fáciles de desarrollar en el aula con herramientas sencillas y que no agotan otros posibles. Lo importante aquí es poner de manifiesto que los datos con que trabajan los investigadores están accesibles sin restricciones y que son un excelente material para introducir a los alumnos en el método científico, dado además su marcado carácter didáctico.

El trabajo desarrollado en estos tres artículos forma parte de un proyecto llamado ‘*Museos Ampáticos*’ que, bajo la tutela del Museo de las Ciencias de Castilla La Mancha, estaba previsto llevar a cabo con alumnos de altas capacidades de los centros educativos de la Región a lo largo de un curso escolar. La irrupción de la pandemia, justo cuando iba a dar comienzo este programa, postpuso sine die su desarrollo junto con otros proyectos similares en otras áreas de competencias.

ANEXO

1. Otra representación de la distribución masa/radio de los exoplanetas.

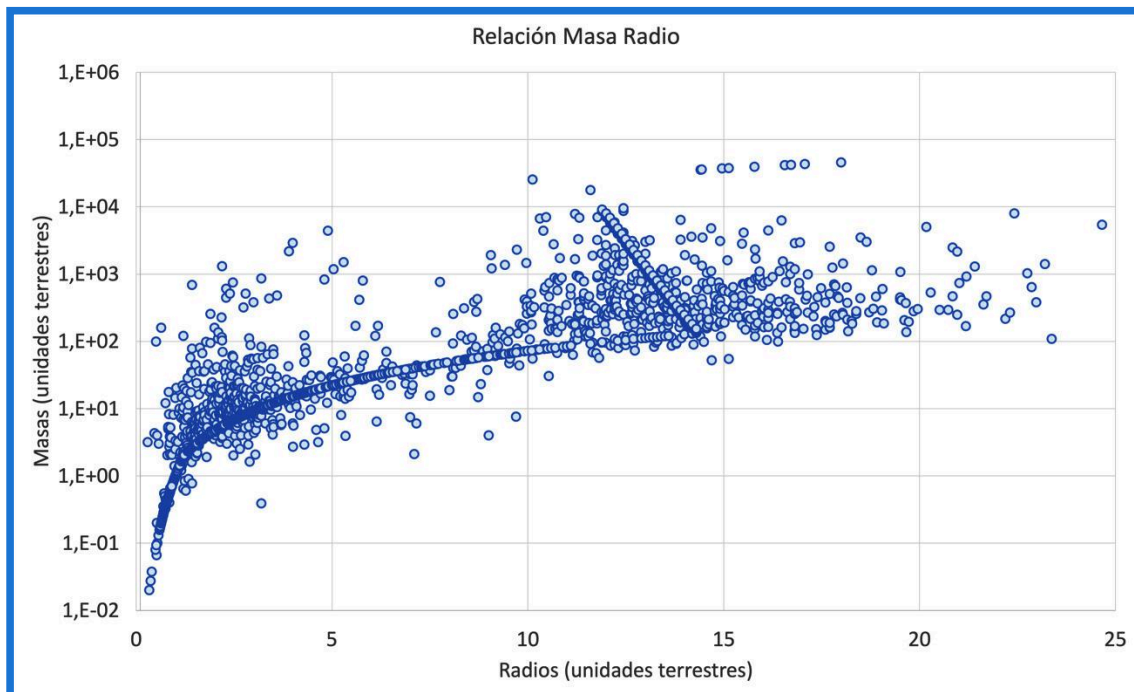


Fig. 3.1b – distribución de exoplanetas en función de sus radios y masas. Eje vertical en escala logarítmica y eje horizontal en unidades naturales. Además de la concentración en una línea sin dispersión, ya apreciada en la fig. 3.1, se hacen más visibles aquí dos poblaciones diferenciadas: a) con radios $< 5R_T$ y b) con radios $10 R_T < R < 20 R_T$

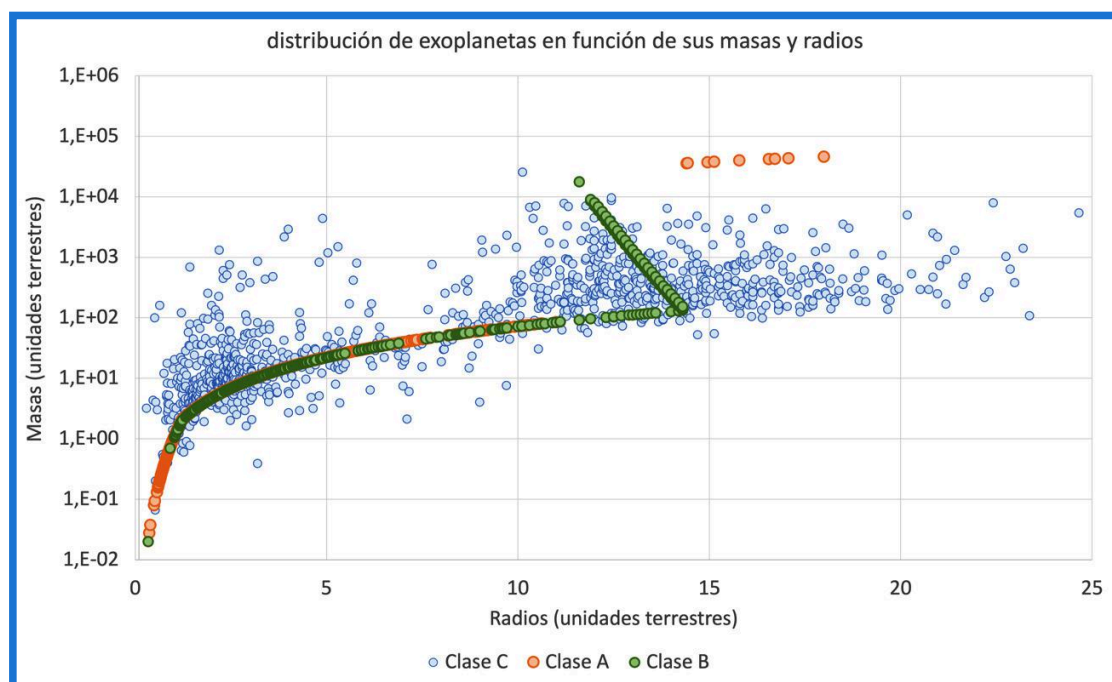


Fig. 3.2b – Distribución de exoplanetas en función de sus radios y masas. Eje vertical en escala logarítmica y eje horizontal en unidades naturales. Se diferencian en colores las respectivas clases A, B y C.

2. Comparación entre las densidades informadas en el fichero de referencia y las densidades calculadas según [1] a partir de los radios y las masas del fichero.

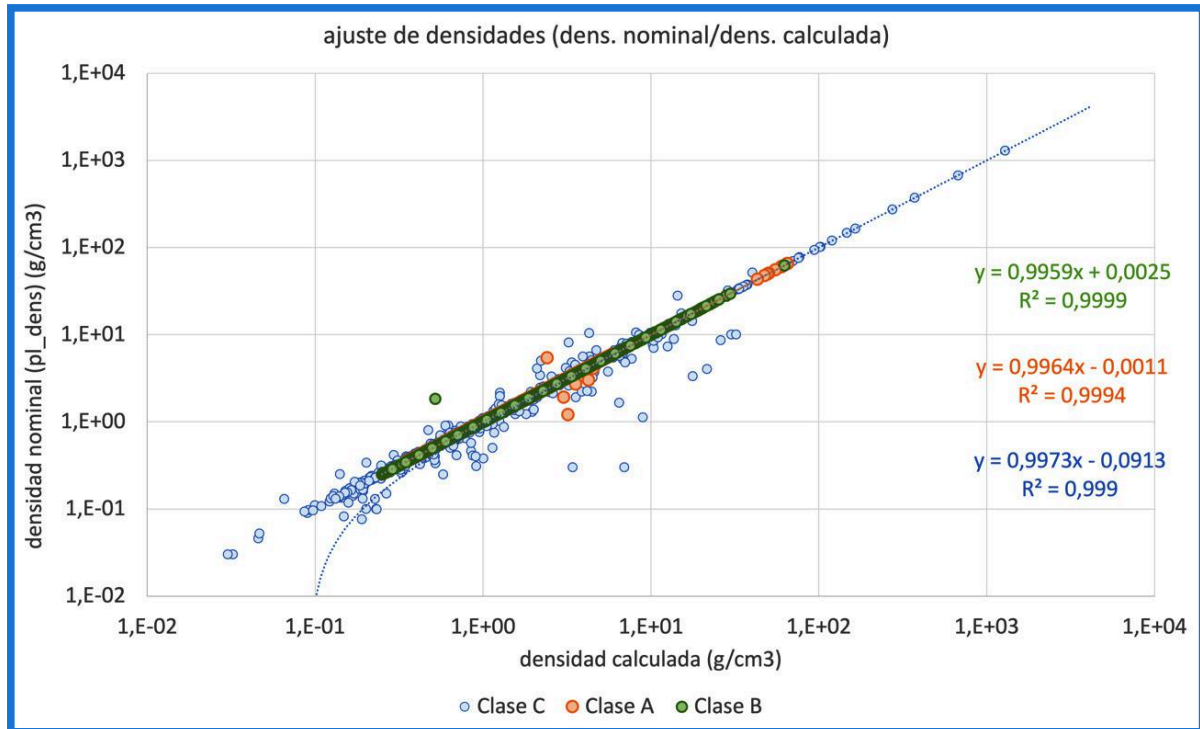


Fig. 3.3b – el ajuste entre los valores calculados para las densidades y los valores nominales presentes en el fichero 'Planetary Systems Composite Data' indica que es muy buena la aproximación de tratar sólo con los valores calculados, evitando los registros que no tienen el dato empírico y también las incertidumbres en las medidas reflejadas en los planetas de la clase C especialmente, que explican la pequeña desviación sobre $y = x$.

3. Representación de las clases A, B y C por separado.

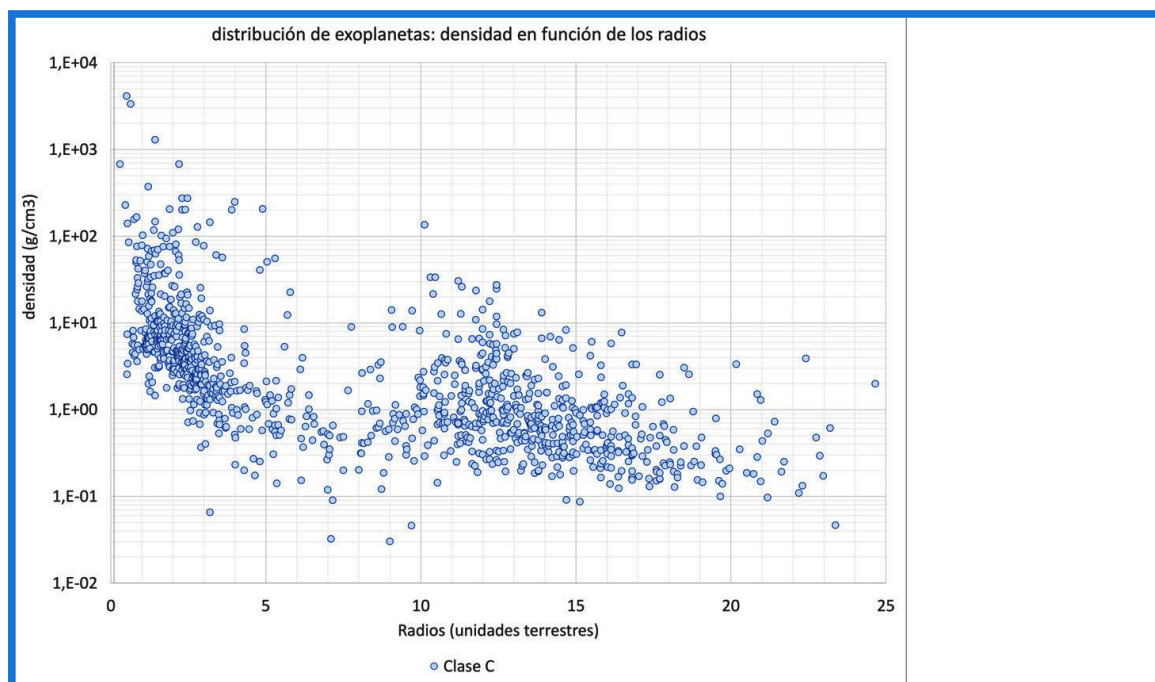


Fig. 3.3.1 – Exoplanetas con medidas en radios y masas. Clase C

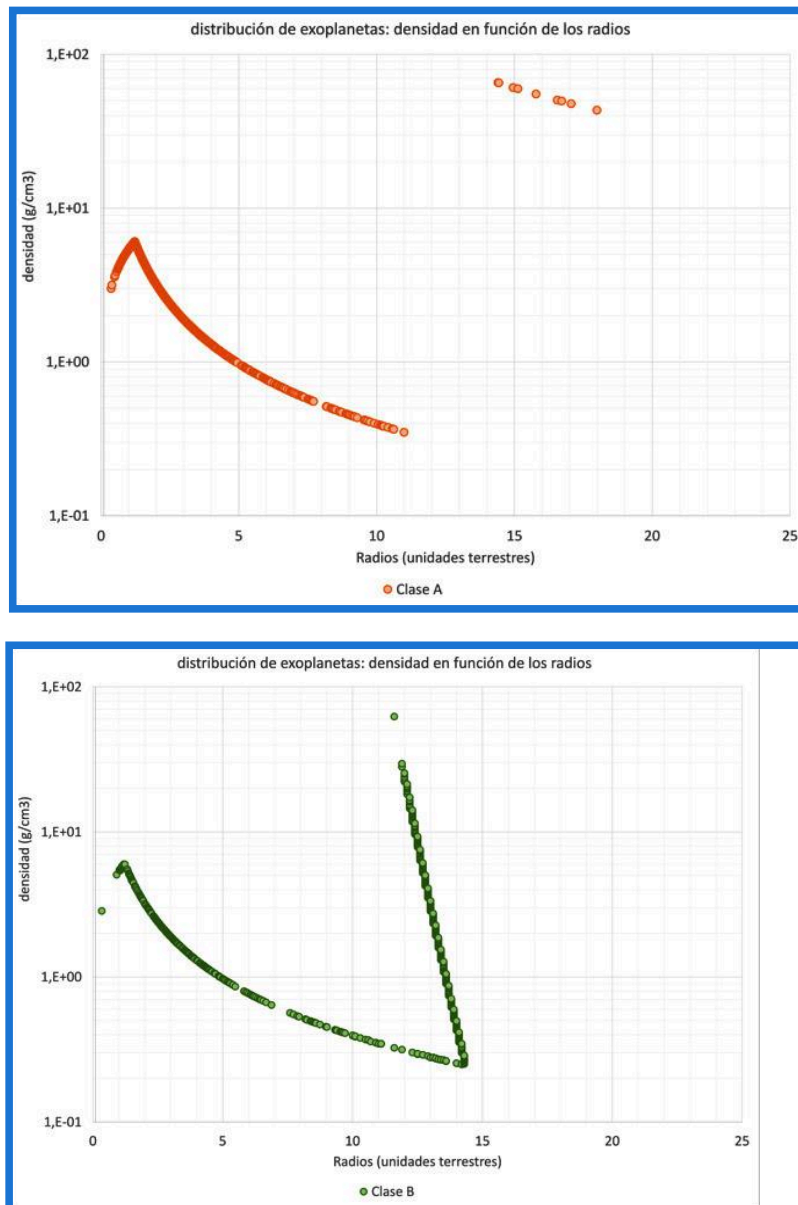


Fig. 3.3.2 – Representación de las clases A y B. En el primer caso se tiene una estimación empírica del radio y la masa se calcula a partir de éste con el algoritmo Chen & Kipping. En la parte derecha de la figura se representa la clase B, (masa conocida y radio calculado).

Estas tres figuras ilustran perfectamente lo que es una distribución natural (fig. 3.3.1) con datos empíricos de las variables radio y masa, frente a la extrapolación calculada según el procedimiento ya comentado para la variable desconocida. Básicamente la clase A corresponde a exoplanetas descubiertos por el método de tránsito, con radio medido, mientras que la clase B la integran planetas detectados por 'velocidad radial'.



ApEA, la Asociación para la Enseñanza de la Astronomía, nació en 1995 para acoger a todas las personas que se dedican a la enseñanza de la Astronomía en centros educativos, planetarios, museos de la ciencia, agrupaciones de aficionados y clubes de estudiantes.

ApEA engloba a todos los interesados en la enseñanza de todos los niveles educativos reglados -desde la enseñanza primaria hasta la universitaria- así como los no reglados.

También organiza reuniones de formación para sus socios y publica materiales de interés didáctico, como la presente revista.

Más información en www.apea.es

