

A composite image of several exoplanets in space, with a bright star in the background. The planets are shown in various colors and sizes, suggesting diverse environments. The background is a dark, star-filled space.

ESPECIAL

Exoplanetas

SCIENTIFIC
AMERICAN™

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

ESPECIAL Exoplanetas

CONTENIDO



Una selección de nuestros mejores artículos para ahondar en la ciencia de los **exoplanetas**.

La vida en el universo

Guillermo González, Donald Brownlee y Peter D. Ward
Investigación y Ciencia, diciembre 2001

Hacia el primer exoplaneta con vida

Jonay I. González Hernández, Rafael Rebolo López y Enric Pallé
Investigación y Ciencia, marzo 2014

A la caza de gigantes gaseosos

Lee Billings
Investigación y Ciencia, octubre 2015

Planetas ectópicos

Michael W. Werner y Michael A. Jura
Investigación y Ciencia, agosto 2009

INCLUYE EL ARTÍCULO

La búsqueda de más Tierras

Donald Goldsmith

Mundos con dos soles

William F. Welsh y Laurance R. Doyle
Investigación y Ciencia, enero 2014

Exoplanetas habitables

Dimitar D. Sasselov y Diana Valencia
Investigación y Ciencia, octubre 2010

El amanecer de los exoplanetas

Michael D. Lemonick
Investigación y Ciencia, septiembre 2013

Más acogedores que la Tierra

René Heller
Investigación y Ciencia, marzo 2015

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1ª, 08021 Barcelona (España)
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

Copyright © Prensa Científica, S.A. y Scientific American, una división de Nature America, Inc.

ESPECIAL n.º 18 ISSN: 2385-5657

En portada: iStock/sdecoret | Imagen superior: iStock/Igor Zhuravlov



La vida en el universo

*Sólo una parte de nuestra galaxia
reúne las condiciones necesarias para albergar
formas complejas de vida*

Guillermo González, Donald Brownlee y Peter D. Ward

En los relatos de fantasía científica, el protagonista acostumbra ser un viajero interesante que visita lugares exóticos de la Vía Láctea habitados por otros seres inteligentes. Cualquiera que sea el lugar, siempre encuentra una civilización desarrollada. Da lo mismo que sea el centro galáctico, un cúmulo globular, una región de formación estelar, un sistema de estrellas binarias o una estrella enana roja.

Los escritores del género deben en parte el estímulo de su creatividad a los científicos, que persisten en arruinarles la trama. Tenía cierto aire de verosimilitud la presencia de individuos en la Luna, Marte, Venus, Júpiter e incluso en el Sol, pero los marcianos constructores de canales y los oasis frescos del interior solar no lograron resistir la seguridad de la ciencia. Si los novelistas sitúan ahora más lejos sus fabulaciones, la investigación no se queda atrás. Y ésta se muestra escéptica sobre las posibilidades de vida inteligente en la Vía Láctea. Si la mayor parte del sistema solar resulta hostil para los organismos, lo mismo puede predicarse de la galaxia.

Dentro de un sistema planetario, los astrónomos llaman zona de habitabilidad circunestelar (ZHC) a los lugares idóneos para el desarrollo de la vida. Indica, en general, la región en torno a una estrella

1. PANORAMA DESOLADOR de un mundo golpeado por cometas, achicharrado por supernovas y a punto de ser enviado al espacio profundo por una masa gigante de gas. Así ha visto el artista un planeta estéril, asimilado a los cuerpos rocosos de nuestra galaxia.

donde puede persistir agua líquida en la superficie de un planeta terrestre, al menos durante algunos miles de millones de años. Esta zona tiene forma de anillo, cuyo borde interior representa la máxima proximidad que un planeta puede alcanzar en su órbita alrededor de su estrella sin perder los océanos en el espacio; en el caso más extremo, el efecto invernadero podría retener los océanos en ebullición (así ha ocurrido con Venus). El borde exterior de dicha zona señala la máxima lejanía que un planeta puede ocupar antes de que los océanos se congelen. Los astrónomos estiman el tamaño de la ZHC en torno a una estrella de cualquier masa a partir de principios elementales de física estelar.

Cierto es que en la habitabilidad de un planeta intervienen también la elipticidad de su órbita, la compañía de lunas grandes y la presencia de planetas gigantes, por no hablar de los detalles de su biología. Pero si un planeta orbita fuera de la zona, ningún factor de éstos importa. Tampoco interesa mucho saber dónde se encuentra la ZHC de un sistema planetario si éste reside en la parte hostil de la galaxia.

Con tales prenotandos, en 1999 propusimos la noción de equivalente galáctico de la ZHC: la zona de habitabilidad de la galaxia (ZHG). La ZHG define las regiones más hospitalarias de la Vía Láctea, vale decir, las que no caen ni muy próximas ni muy alejadas del centro galáctico. No fuimos los primeros en abordar la habitabilidad en este contexto más amplio. A lo largo de los últimos diez años, Virginia Trimble, de la Universidad de Maryland y de la de California en Irvine, ha venido escribiendo sobre la relación entre la composición química

Los autores

GUILLERMO GONZALEZ, DONALD BROWNLEE y PETER D. WARD comparten un interés común en la habitabilidad de los planetas, un campo donde convergen astrofísica y geofísica. Los tres participan en el programa de astrobiología de la Universidad de Washington. González, profesor de la estatal de Iowa, se doctoró con una tesis sobre las composiciones químicas de estrellas muy evolucionadas de cúmulos globulares. Brownlee, especialista en cometas y meteoritos, dirige las investigaciones de la misión *Stardust*, que regresará a la Tierra con muestras de polvo cometario en 2006. Ward, paleontólogo, estudia las extinciones en masa a escala planetaria.

mica galáctica y las condiciones necesarias para la vida. Pero en fechas recientes se produjo un avance espectacular con el descubrimiento de planetas gigantes del tamaño de Júpiter alrededor de otras estrellas similares al Sol.

No todas las estrellas de tipo solar tienen planetas de ese tenor. Los planetas gigantes descubiertos hasta la fecha se encuentran principalmente alrededor de estrellas ricas en elementos químicos más pesados que el helio, “metales” en la jerga de los astrónomos para irritación de los químicos. Esta correlación nos sugiere que el contenido metálico constituye un factor decisivo a la hora de formar planetas gigantes. (Con la técnica disponible no podemos detectar planetas del tamaño de la Tierra.) Al propio tiempo, los astrónomos están adquiriendo conciencia de cuán letal puede resultar nuestra galaxia, repleta de estre-

Resumen/Zona de habitabilidad

- ¿Qué es lo que un planeta necesita para mantener formas de vida compleja? Los astrónomos se han centrado en la estabilidad del agua superficial; fenómeno este que sólo es posible dentro de cierto intervalo de distancias del planeta a la estrella, es decir, en la zona de habitabilidad circumestelar. Sin embargo, tras los descubrimientos recientes de los planetas extrasolares, los investigadores han comenzado a tomar en cuenta un conjunto más amplio de condiciones.
- Idealmente, la estrella y su séquito planetario deberían orbitar a determinada distancia del centro de la galaxia. Si demasiado lejos, la nebulosa en la que la estrella nace carecerá de los elementos pesados que forman los planetas. Si demasiado cerca, las inestabilidades orbitales, las colisiones cometarias y las estrellas que explotan, entre otras adversidades, harán fracasar los ecosistemas en la misma cuna. La posición del Sol es justo la correcta.
- De todo lo anterior se desprende que la vida compleja constituye un acontecimiento raro en la galaxia.

llas que explotan y choques estelares. Incluso allí donde existen planetas, éstos podrían ser refractarios a la aparición de formas complejas de vida.

¿Dónde está lo que hace falta?

Para determinar las fronteras de la zona galáctica de habitabilidad deben satisfacerse dos criterios: disponibilidad del material para crear el planeta habitable y aislamiento adecuado, libre de amenazas cósmicas. La historia de la evolución de los elementos químicos y su agrupación en la formación de la Tierra halla explicación en la cosmología moderna, la astrofísica estelar y las ciencias planetarias. En la gran explosión (big bang) se creó hidrógeno, helio y poco más. A lo largo de los siguientes 10.000 millones de años, se produjeron en las estrellas las reacciones de las que salió un conjunto rico de elementos. En el medio interestelar, la razón entre el número de átomos de metales y el número de átomos de hidrógeno —es decir, la “metalicidad”— aumentó gradualmente hasta alcanzar su valor actual.

Estos metales vienen a ser los bloques de construcción de los planetas terrestres. Su concentración condiciona el tamaño de los cuerpos planetarios, tamaño que, a su vez, determina si un planeta es capaz de retener una atmósfera y de experimentar actividad geológica. Es más, sin una cantidad suficiente de metales, no se pueden formar planetas gigantes, porque éstos se agrupan alrededor de un núcleo rocoso de un tamaño mínimo. Las observaciones de los planetas extrasolares comienzan a definir la metalicidad necesaria para erigir planetas gigantes. No se ha encontrado alrededor de una estrella ningún planeta de estas características con metalicidad inferior al 40% de la solar. Según se publicó hace un año, el telescopio espacial Hubble no ha detectado ningún planeta en el cúmulo globular 47 Tucanae, cuyas estrellas tienen metalicidades un 25% inferiores a la del Sol.

En el polo opuesto, una metalicidad muy alta plantea sus propios problemas. Los planetas terrestres serán mayores y, en razón de su gravedad más intensa, se hallarán enriquecidos en compuestos volátiles y ofrecerán un relieve topográfico empobrecido. Esta combinación de propiedades obliga a que el planeta entero se halle cubierto de agua, lo que labora contra el desarrollo de la vida. En nuestro planeta, la mezcla de tierra y mar resulta determinante para el control de la temperatura atmosférica y otros procesos. Una metalicidad elevada también aumenta la densidad del disco protoplanetario y, por tanto, provoca que los planetas gigantes cambien de posición. En razón de esa migración orbital se arrojarán los cuerpos menores, de tipo terrestre, fuera del sistema o se lanzarán contra el Sol.

En una investigación reciente Charles H. Lineweaver, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, exploró la dependencia de la formación de planetas y la migración con respecto a la metalicidad. Dio por sentado que la probabilidad de formar un planeta

terrestre era proporcional a la metalicidad de la estrella progenitora, pues estrella y planeta surgieron de la misma nube de gas y polvo. De la estadística de los planetas extrasolares infería Lineweaver que la probabilidad de migración de los planetas gigantes crecía de una forma significativa con el aumento de la metalicidad, siendo la migración inevitable cuando el valor de ésta se cifraba en un 300 por ciento de la metalicidad solar. No obstante la provisionalidad de tales cálculos, sugeríase que una metalicidad próxima a la solar podría ser óptima para la formación de planetas (de la masa de la Tierra) en órbitas estables.

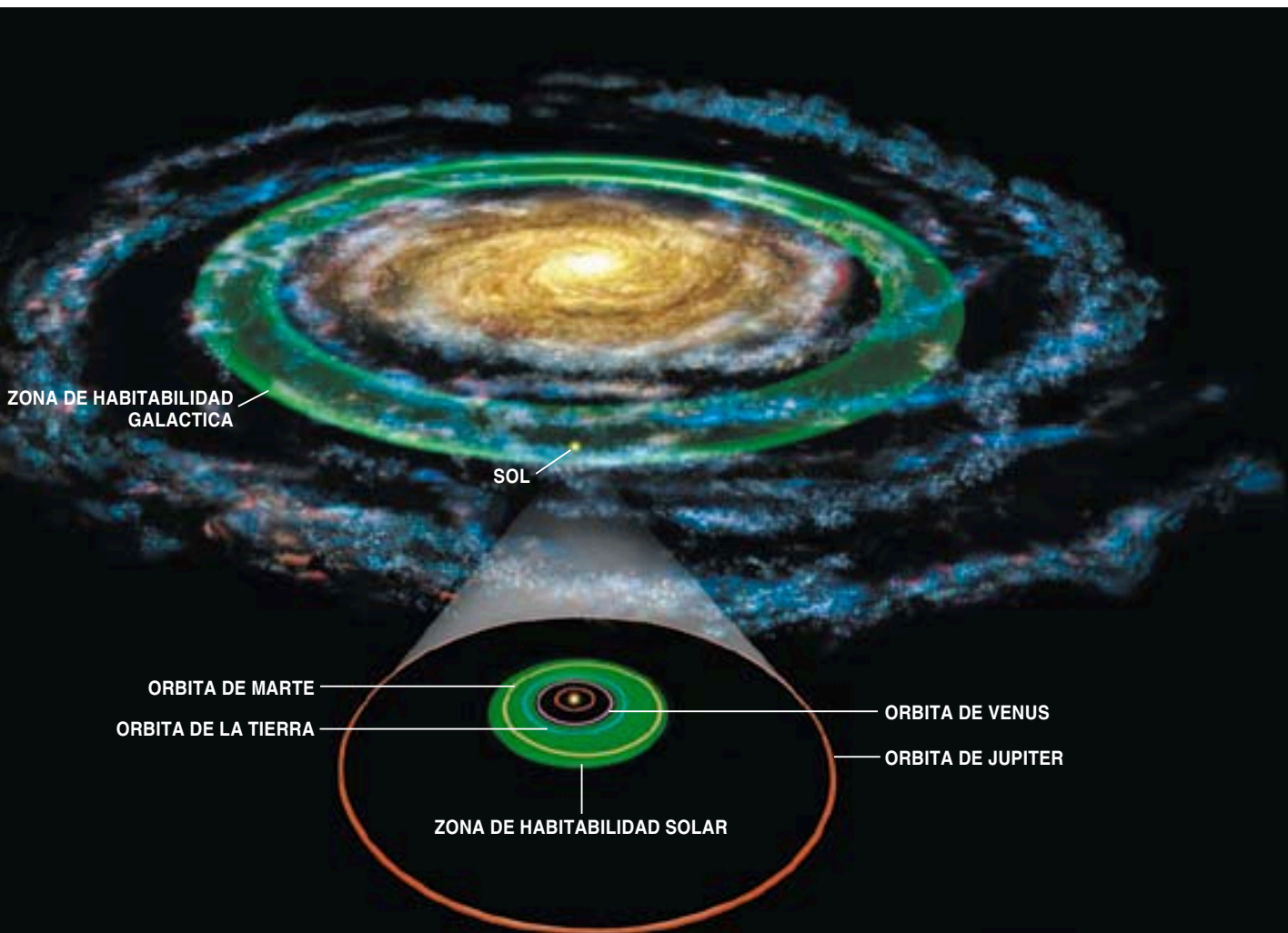
En el filo de la navaja

Sólo una parte de la Vía Láctea satisface ese criterio. Nuestra galaxia consta de cuatro regiones traslapantes: halo, bulbo, disco grueso y disco delgado. Las estrellas componentes de cada región giran alrededor del centro galáctico, a la manera en que los planetas del sistema solar dan vueltas en torno al astro. El halo y el disco grueso contienen estrellas pobres en metales y de una edad avanzada; es improbable que se hayan formado planetas terrestres del tamaño de la Tierra alrededor de dichas estrellas. Las estrellas del bulbo tienen un amplio rango de metalicidades, pero la radiación cósmica alcanza en esta zona niveles muy altos.

En el disco delgado se aloja nuestro Sol. La metalicidad del gas disminuye con la distancia al centro galáctico. Allí donde se sitúa el Sol, a unos 8,5 kiloparsecs (28.000 años-luz), la metalicidad decrece a un ritmo del 17% por kiloparsec. El logaritmo de la metalicidad, parámetro cuya unidad es el “dex” (por definición el Sol tiene un valor de 0 dex), decae linealmente con la distancia, en una pendiente de $-0,07$ dex por kiloparsec. Para calcular el gradiente de metalicidad se atiende a los rasgos espectrales de cada uno de los tipos de estrellas y de nebulosas. Los distintos indicadores empleados comenzaron a converger hacia un mismo resultado hace apenas tres o cuatro años; hoy sabemos que las galaxias similares a la Vía Láctea presentan también parecidos gradientes de metalicidad en el disco.

El gradiente es un efecto de las variaciones en el ritmo de formación estelar. Lejos del centro de la galaxia existe proporcionalmente menos gas y, por

2. LA ZONA DE HABITABILIDAD de la Vía Láctea (*verde*) excluye las regiones interiores peligrosas y las regiones exteriores pobres en metales. Es análoga a la zona de habitabilidad de nuestro sistema solar (*panel interior*), salvadas las escalas. Ninguna de las dos zonas tiene bordes definidos. El bulbo galáctico se presenta en color amarillo; en azul y rosado, las regiones activas de formación estelar de los brazos espirales.

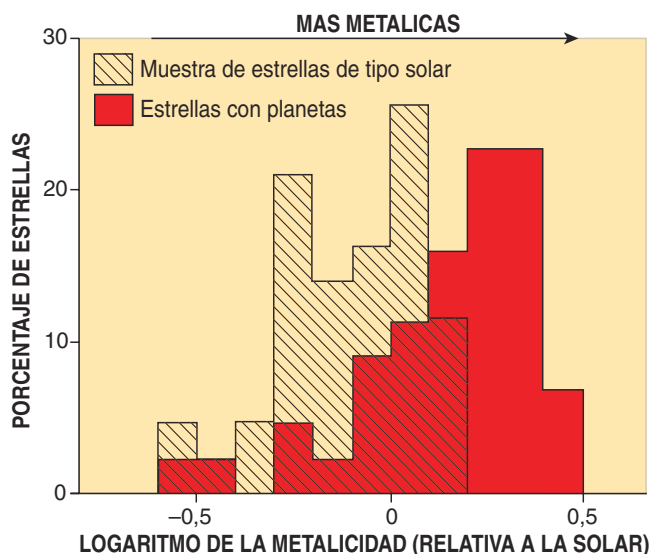


tanto, menos formación de estrellas. En consecuencia, los bordes exteriores galácticos no se han enriquecido como el interior. En el conjunto de la galaxia, el ritmo de formación estelar alcanzó su máximo hace de 8000 a 10.000 millones de años; desde entonces está decayendo. Hoy, la metalicidad en la vecindad solar aumenta un 8% cada 1000 millones de años. Conforme vaya remitiendo el suministro de gas, la metalicidad crecerá a un ritmo más lento.

Conocidos el gradiente de metalicidad del disco y su evolución, podemos establecer los límites de la ZHG en el espacio y en el tiempo. Las estrellas que nacen ahora con una metalicidad entre el 60 y el 200% del valor solar aparecen, por lo general, en un intervalo de distancias de entre 4,5 y 11,5 kiloparsecs del centro galáctico, en una región que contiene el 20% de las estrellas de la galaxia. Sépase, además, que una estrella normal de la vecindad solar no alcanzó el límite del 60% hasta hace 5000 o 6000 millones de años. El Sol mismo es un 40% más rico en metales que otras estrellas contemporáneas que se formaron en el mismo lugar del disco. Este incremento del contenido metálico podría haber dado a la vida en la Tierra un fuerte impulso.

Telón de hierro

Una objeción plausible es que la correlación entre la metalicidad y los planetas detectados no indique un proceso de "causa a efecto". Quizá la causalidad opera en sentido opuesto: una alta metalicidad estelar no explicaría la presencia de planetas gigantes, sino que la presencia de planetas gigantes justificaría la alta metalicidad de la estrella. Tal acontecería si los planetas tendieran a caer hacia las estrellas, enriqueciéndolas en contenido metálico. La mayoría de los astrónomos admiten que las estrellas degluten planetas y cuerpos menores. Pero las capas estelares convectivas más externas alcanzan tal masa y se hallan tan mezcladas, que las estrellas necesitarían devorar una cantidad irracional de material pla-



netario para dotarse de las altas metalicidades que se observan entre las estrellas con planetas.

Podría aducirse también que tal correlación resulta quizá de un sesgo observacional. Es harto difícil detectar planetas alrededor de estrellas deficientes en metales; el método más depurado para la observación de planetas se basa en las líneas espectrales, que son más débiles cuando una estrella tiene menos metales. No obstante, el rendimiento de la detección no cae de un modo reseñable hasta que la metalicidad de la estrella no está por debajo del 10% del valor solar, inferior a todas luces al 40% necesario para la formación de planetas gigantes. La correlación obtenida entre metalicidad y planetas parece ser bastante real.

La habitabilidad planetaria no depende sólo de la metalicidad. Importa la concentración relativa de los diferentes elementos. Los elementos más abundantes de la Tierra se produjeron, de manera principal, en las explosiones de supernova. Las hay de dos tipos. Los sucesos de tipo I, que resultan del estallido de una estrella enana blanca, originan sobre todo hierro, níquel y cobalto. Las supernovas de tipo II, que exigen la implosión de una estrella masiva, sintetizan oxígeno, silicio, magnesio, calcio y titanio. Reviste máximo interés que los sucesos de tipo II constituyan la única fuente natural para la creación de los elementos más pesados, como torio y uranio.

Puesto que el ritmo de formación de estrellas está decayendo en nuestra galaxia, el cómputo total de explosiones de supernova decrece, como disminuye la relación entre los sucesos de tipo II y los de tipo I. Las supernovas de tipo II van asociadas a estrellas masivas de corta vida, razón por la cual el ritmo de sucesos coincide más o menos con el ritmo de formación estelar. La frecuencia de supernovas de tipo I, por otra parte, depende de la producción de estrellas de masa intermedia de larga vida; presenta, pues, una respuesta más lenta a los cambios en el ritmo de formación estelar.

En virtud de esta variación en la relación de tipo de supernovas, las nuevas estrellas de tipo solar abundan más en hierro que las estrellas nacidas hace 5000 millones de años. Suponiendo que todo lo demás sea igual, eso significa que un planeta terrestre que se formara hoy tendría un núcleo de hierro proporcionalmente mayor que el de la Tierra. También mostraría, dentro de 4500 millones de años, un 40% menos de temperatura a consecuencia de la desintegración del potasio, torio y uranio. El calor generado por estos isótopos radiactivos impulsa el movimiento de las placas tectónicas, que desempeñan una

3. LA BUSQUEDA DE PLANETAS EXTRASOLARES acometida por los astrónomos revela la importancia del suministro de material en la creación de planetas. Tal y como muestra el histograma, las estrellas que tienen planetas gigantes (*zona de color rojo*) encierran una concentración mayor de elementos pesados ("metales") que la media de las estrellas de tipo solar (*negro*).