

CARLOS BRIONES

¿ESTAMOS SOLOS?

EN BUSCA
DE OTRAS VIDAS
EN EL COSMOS

Prólogo de Javier Armentia

se

Lectulandia

¿Estamos solos en el Universo? Esa es la gran pregunta que los humanos nos hemos planteado desde que comenzamos a mirar al cielo estrellado. Durante las últimas décadas asistimos a un extraordinario desarrollo científico y tecnológico que ha revolucionado la exploración espacial y la búsqueda de otras vidas en el Cosmos: seres vivos que podrían ser parecidos a los que habitan en la Tierra... o tal vez muy diferentes. El reto, en cualquier caso, es ser capaces de detectarlos.

Actualmente, la investigación en astrobiología busca señales de vida en Marte y otros planetas, en varios satélites, entre ellos Europa y Titán, y en los cuerpos menores del Sistema Solar. Fuera de nuestro vecindario cósmico, cada día se descubren nuevos planetas extrasolares: ya conocemos miles de ellos y varias decenas se consideran habitables. En esos mundos lejanos podría haber triunfado algún tipo de biología, y quizás también existan otras formas de vida inteligente. Si realmente están ahí, ¿lograremos establecer contacto? Además de la ciencia, también participan de estas inquietudes otros ámbitos de la cultura como la filosofía, la literatura, las artes plásticas, la música y por supuesto la ciencia ficción.

Todo ello forma parte del fascinante viaje, en el tiempo y el espacio, que propone este libro: el más completo y actualizado que se ha escrito en nuestro idioma sobre el gran interrogante que nos rodea.

Carlos Briones

¿Estamos solos?: en busca de otras vidas en el cosmos

ePub r1.0

Un_Tal_Lucas 29-09-2023

Carlos Briones, 2020
Prólogo: Javier Armentia

Editor digital: Un_Tal_Lucas
ePub base r2.1

*A Diego y Miriam,
mis otras vidas*

Prólogo

No somos los únicos en el abrazo del aire

No es fácil hacer un preámbulo a una obra tan suma, con la responsabilidad que se ha de tener hacia quienes la lean y en el futuro puedan, si ésta se ha compuesto de manera honrada y sagaz, reconocer lo que sabíamos al terminar la segunda década del siglo XXI. Porque estamos ante un libro que plantea la pregunta más relevante de la ciencia actual y además la aborda desde varios puntos de vista, integrando las humanidades y las artes, interpretando los hallazgos con reflexiones a partir de los datos y los modelos, proponiéndonos el viaje más sugerente posible por esa cartografía de un Universo que desconocemos, pero en el que vamos reconociendo territorios.

Empiezo de nuevo. Para conmemorar el quincuagésimo aniversario de la llegada de los primeros humanos a la Luna, Carlos Briones compuso una obra audiovisual que se representó en septiembre de 2019 en el palacio Euskalduna de Bilbao: cerraba el noveno evento *Naukas Bilbao*, una maravillosa locura en torno a la ciencia que concita allí a miles de personas. Su *Luna* era un recorrido a través de la poesía, la música y la imagen, que iba paralelo al viaje real de la nave *Apolo 11* y sus tripulantes. Tuve la fortuna de poder colaborar con el proyecto aportando imágenes y vídeos, que se superponían a las notas y las palabras en directo. Y fue tan bello ese viaje que quedé en deuda eterna hacia quien me había permitido ser parte de ello. Para colmo, pocos meses después me propuso hacer un prólogo para la obra que había escrito durante los últimos años —robando tiempo a sus vacaciones y a las noches estrelladas — sobre la búsqueda de vida extraterrestre. Y acepté antes de que acabara de contármelo. De haber sido una solicitud le debía evidentemente el sí, pero se trataba de algo más: era la invitación a volver a ser parte de un proyecto maravilloso.

Porque esta obra es maravillosa. Lo es en ese sentido homérico de viaje que a uno le cambia la vida. Y quien la ha concebido y realizado es, sin duda, la persona más adecuada para hacerlo en este país, en este tiempo. Carlos es un tipo encantador, científico de referencia en los temas del origen y la evolución de la vida en el contexto interdisciplinar de la astrobiología, y además un apasionado de la exploración espacial. Investiga en el campo de la bioquímica, el idioma en el que se expresa el mundo vivo, y sabe como nadie trasladarlo a los otros lenguajes que habitamos. De la poesía a la divulgación,

del arte a la ciencia. Aquí nos propone viajar para tratar de encontrar respuestas a las preguntas que nos hacemos, que nos hemos hecho siempre, en torno a la posible vida fuera de nuestro planeta... y por supuesto dentro de él.

No es un tema que este científico aborde por vez primera para el gran público, tanto con el lenguaje de la comunicación amena de la ciencia como con el de la poesía, y se nota su mano experta en las navegaciones por estos mares. Pero sí es la primera ocasión en la que lo plantea en un libro, trabajado y reposado, apasionante y apasionado, escrito para todos. En este viaje lo acompaña la gran ilustradora María Lamprecht, que introduce los capítulos de forma muy sugerente y también nos regala algunas de las imágenes que éstos contienen en su interior. Además, el autor aporta otra novedad muy interesante: al final de cada etapa del viaje transcribe una amena y a la vez profunda conversación de café con amigos y colegas suyos que investigan —en distintos ámbitos de la ciencia, la tecnología o la filosofía— sobre el tema tratado en cada caso.

No voy a contarles en este prólogo nada sobre la temática de la obra, que a mí, como astrofísico, siempre me ha fascinado también. La pluralidad —o no— de los mundos habitados está aquí diseccionada de manera precisa y a veces sorprendente. No esperábamos menos de un autor que, desde el Centro de Astrobiología y fuera de él, tantas veces se ha preguntado si estamos solos en el Universo. Como me dedico a la divulgación de la ciencia desde hace muchos años, sé que este tema es muy popular y atractivo para todos: constituye *la gran pregunta*, ésa sobre la que siempre hay oportunidad de reflexionar o especular. No sé, descubrir un mundo que orbita en torno a otra estrella está bien, pero pensar que puede ser otra Tierra dispara algo que los humanos encontramos increíblemente atractivo. En estos tiempos en los que afortunadamente ya no hay demasiado riesgo de acabar en la hoguera por decirlo en público, merece la pena hacerlo. Y, a la vez, es necesario desmentir con datos a quienes creen en ovnis y abducciones, o a los conspiranoicos de distinto pelaje... ya que este campo se presta a pseudociencias y visiones más que ningún otro.

Por eso se agradece una obra en la que tales cuestiones se abordan de forma pausada y contenida, con el rigor del científico y con la creatividad del poeta, permitiendo sin duda que la imaginación vuele, que la pasión nos acompañe, pero atendiendo a lo que *es* más que a lo que nos gustaría que *fuerá*. Y este compromiso resulta fundamental. Ensoñarse es sencillo y la ciencia ficción —muy presente en esta obra— es buena muestra de ello. Pero soñar con los pies en la tierra es más complejo. Complejo y necesario. Como es siempre necesario viajar, y más en este tiempo en el que por primera vez en nuestra historia reciente hemos tenido que vivir encerrados en casa, pues a la orgullosa especie humana le ha puesto en su sitio un virus: una de esas entidades replicativas —veremos si vivas o no— que también aparecen en las

próximas páginas. Gracias, Carlos, por hacer posible todo esto y por invitarnos a acompañarte en un viaje maravilloso.

He tenido la suerte de leer este libro antes que los demás, y he podido comprobar que sus trece capítulos encajan como las piezas de un *puzzle*, con una unidad temática bien planteada. Esto no siempre pasa en los textos divulgativos, que abordan muchos temas de forma un tanto desestructurada, sin visión de conjunto o sensación de unidad al leerlos. Tengo para mí que, investigando el autor en temas de bioquímica y biología molecular, le resulta natural disponer elementos que se ensamblarán necesariamente en otro lugar, conformando así una nueva función. Cuando vas leyendo esta búsqueda y reflexión en torno a la vida extraterrestre piensas en esas proteínas que forman una estructura aquí pero que luego, de manera precisa, se acoplarán con la complementaria allá... disparando nuevos sucesos. El método bioquímico de la divulgación, podríamos llamarlo. Funciona, porque te da la sensación de que constantemente estás uniendo piezas para tener una visión más amplia de un tema que desconocías y ahora percibes de forma adecuada. Y, así, lo acabas disfrutando como nunca habías imaginado.

El autor ha incorporado en este texto numerosas citas y reflexiones sobre los temas que aborda, salidas de la pluma de otros científicos y escritores. Realmente el libro tiene una segunda lectura, un poco en plan *Rayuela*, saltando entre charlas amenísimas y referencias a la cultura que, lo sabemos, nuestro autor vive tan intensamente. Yo quería también añadir una cita para concluir, aunque me resultaba difícil porque cada vez que recordaba frases que podían acomodarse a este prólogo, Carlos ya se me había adelantado en algún lugar de la obra. Pero me he acordado de una que no sé de dónde robé y que recogía algo escrito por Lucrecio un siglo antes de comenzar esa cuenta que nos coloca, hoy, en la extraña primavera del 2020: «Le digo una y otra vez que más allá de nuestro mundo existen, en otros lugares, otras combinaciones de la materia conformando otros mundos. Ah, el nuestro no es el único en el abrazo del aire». ¡El abrazo del aire! Valga como una metáfora de la vida, esa vida que es el eje sobre el que se construye esta novela de la ciencia que ahora, afortunadamente para quien me lea, comienza ya.

Vale.

JAVIER ARMENTIA

Javier Armentia es astrofísico y divulgador de la ciencia. Pertenece a varias sociedades científicas y colabora con numerosos medios de comunicación. Desde 1993 dirige el Planetario de Pamplona, donde realiza una constante labor de divulgación que trasciende los límites de la astronomía para acercar a los estudiantes y al público general a las grandes preguntas sobre el Cosmos.

1. Preparativos del viaje



•

La vida es una combinación de química y estupor.

Emil Cioran

El 20 de julio de 2019, para conmemorar el 50 aniversario de la llegada a la Luna, varias personas habíamos sido invitadas a participar en una velada organizada por los Veranos de la Villa en colaboración con el Planetario de Madrid, en la que ciencia, poesía y música volarían juntas desde el Parque Tierno Galván hasta nuestro satélite. Una hora antes de comenzar, quienes íbamos a pilotar esa nave charlábamos tranquilamente en el Planetario gracias a la hospitalidad de su director, Telmo Fernández. Allí estaban otros amigos, la astrofísica Eva Villaver y el dramaturgo y traductor José Luis Checa, y dos invitados rusos muy distinguidos. El primero de ellos era Sergey N. Samburov, especialista jefe de la empresa aeroespacial Energía y presidente del Fondo Tsiolkovski, que además es bisnieto del propio Konstantín E. Tsiolkovski, padre de la cosmonáutica y autor de aquella frase tan premonitoria: «La Tierra es la cuna de la humanidad, pero no se puede vivir en una cuna para siempre».

El segundo era el famoso cosmonauta Alexandre I. Lazutkin, que vivió 184 días en la estación espacial *Mir* y precisamente estaba allí cuando se produjeron los dos accidentes más graves de su historia: un importante incendio a bordo el 23 de febrero de 1997, y la colisión el 25 de junio con una nave de carga no tripulada *Progress M-34*, que produjo un agujero en el fuselaje del módulo *Spektr* de la *Mir* y su consiguiente descompresión. Afortunadamente, gracias a la pericia y rapidez de reflejos de su tripulación, ninguno de ellos tuvo consecuencias graves. Pero la realidad había sido aún más emocionante que las películas de ciencia ficción.

En un momento de mi conversación con este experto cosmonauta, después de comentar algunos momentos delicados que había vivido durante dichos incidentes, me estaba describiendo la sensación de paz que sentía cuando observaba nuestro planeta desde su privilegiado mirador, a 400 km sobre la superficie terrestre, y veía un mundo sin fronteras en el que todos los seres vivos están conectados entre sí. Entonces le pregunté: «Alexandr, ¿tú crees que hay vida fuera de la Tierra?». Él reflexionó por un momento y sus ojos azules se humedecieron fugazmente: «Tiene que haberla. Cuando miras al Cosmos desde el exterior del planeta comprendes su inmensidad y te das cuenta de que realmente somos un grano de arena entre el enorme número de estrellas, y por tanto de mundos, que nos rodean. Y entre los miles de millones de galaxias que hay ahí fuera, la vida no puede ser algo que sólo

haya ocurrido en la Tierra. Además, yo creo que también tiene que haber otros seres inteligentes en algún lugar».

Escuchar esta reflexión de alguien que nos ha observado *desde fuera*, poniéndonos en el contexto del Universo, fue realmente emotivo. Y, evidentemente, sentí una mezcla de admiración y envidia sana por quien puede realizar ese tipo de comentarios... mientras el resto de los mortales no hemos pasado de la altura a la que vuelan los aviones. Pero no hace falta ser cosmonauta, ni científico, para pensar algo parecido al contemplar la inmensidad del cielo desde la superficie de nuestro planeta. Precisamente esa misma pregunta que hice a Alexandr se la he planteado muchas veces a personas de todas las edades, con distintas formaciones científicas, ocupaciones e inquietudes. Y el resultado es que casi todos creemos que puede haber otras vidas, que los habitantes de este planeta azul no estamos solos en la inmensidad del Universo. Además, muchos suponen que, si existen seres vivos en distintos lugares, parte de ellos habrán desarrollado algún tipo de inteligencia y podrían comunicarse con nosotros. Necesitamos sentirnos acompañados. Como decía Carl Sagan, de cuyo famoso libro y mítica serie de televisión de trece capítulos, *Cosmos*, se cumplen ahora cuarenta años: «Si estamos solos en el Universo, sin duda sería un terrible desperdicio de espacio».

Esa es la cuestión fundamental planteada en la obra que el lector tiene entre sus manos: ¿puede haber otras vidas fuera de la Tierra, en los planetas y satélites más prometedores del Sistema Solar o en los innumerables mundos que trazan sus órbitas en torno a tantas estrellas? Y esto nos lleva a otra pregunta clave: en caso de que existieran seres vivos en algún lugar al que lleguen nuestros robots o nuestros astronautas, pero fueran muy diferentes a los que conocemos... ¿seremos capaces de detectarlos? Por el contrario, si la vida que podamos encontrar en algún planeta o satélite se parece mucho a la terrestre... ¿estaremos seguros de que realmente surgió en ese entorno y no la hemos llevado en nuestras naves sin darnos cuenta?

Para acotar algunas de estas inquietantes cuestiones, aunque probablemente no llegaremos a responderlas, a lo largo de las siguientes páginas vamos a recorrer juntos varios escenarios donde los seres vivos tal vez pudieran haber surgido y evolucionado. Nos asomaremos a la orilla del océano cósmico y subiremos a bordo de las principales misiones espaciales que han llegado a los lugares más prometedores del Sistema Solar. Porque éste es, sobre todo, un libro de viajes. Cuentan que un día, poco después de la llegada del hombre a la Luna, preguntaron al gran escritor argentino Jorge Luis Borges: «Maestro, ¿qué piensa usted de los viajes espaciales?». Y él respondió: «Ah, pero ¿es que hay otros?». Los humanos, nómadas desde nuestros orígenes, sentimos la irrefrenable necesidad de adentrarnos en

nuevos territorios. Y la última frontera, esa que ya hemos traspasado, es la exploración espacial.

Comenzaremos nuestro recorrido reflexionando sobre el lugar que ocupamos en el Cosmos, qué entendemos por «vida» o «ser vivo» y en qué consiste ese nuevo campo de investigación que llamamos astrobiología. Los siguientes capítulos repasarán brevemente lo que sabemos sobre la vida en la Tierra y los límites de las condiciones físico-químicas en las que se pueden desarrollar los seres vivos conocidos. También nos aproximaremos al concepto de habitabilidad en el Universo, discutiremos si podrían existir organismos no basados en el agua y el carbono, y repasaremos qué tipo de señales de vida o biomarcadores podemos detectar. A continuación comienza la auténtica exploración en busca de otras vidas, para lo que necesitamos conocer los fundamentos y las restricciones de la «protección planetaria», una disciplina imprescindible en este ámbito para intentar que los cuerpos explorados (planetas, satélites, asteroides o cometas) no se contaminen con microorganismos terrestres llevados inintencionadamente en nuestros robots.

El capítulo más extenso del libro estará dedicado a Marte: el lugar en el que, con gran diferencia sobre los demás, se han centrado hasta ahora los principales esfuerzos de la exploración planetaria y la búsqueda de condiciones de habitabilidad. Precisamente este año, el 2020, va a ser clave para la investigación del planeta rojo porque entre finales de julio y primeros de agosto está previsto que despeguen tres misiones diferentes, de otras tantas agencias espaciales, rumbo a este destino tan prometedor para la astrobiología. A ellas les seguirá otra en 2022, y varias más están programadas para los próximos años. Nuestros robots ya son exploradores expertos de ese territorio y en un par de décadas quizás lleguen allí misiones tripuladas: ¿podremos encontrar evidencias de vida, pasada o presente, en Marte?

Posteriormente vamos a visitar las lunas de Júpiter y Saturno que se consideran «mundos oceánicos», en cuyas aguas subsuperficiales podrían existir actualmente seres vivos: Europa, Ganimedes y Calisto en el sistema joviano, así como Encélado y Titán en torno al planeta de los anillos. Nos esperan grandes sorpresas en estos satélites. Los demás cuerpos del Sistema Solar también podrían esconder claves fundamentales sobre la química necesaria para la vida, por lo que los dos capítulos siguientes estarán dedicados a resumir lo que sabemos sobre ellos: viajaremos desde Mercurio hasta los asteroides, y desde Urano a los confines de nuestro sistema planetario. A continuación, esta búsqueda nos llevará más allá de nuestro vecindario cósmico, a mundos que podemos observar con los telescopios pero que probablemente nunca alcanzaremos: los planetas que orbitan en torno a otras estrellas. Ya se han detectado más de 4100 planetas extrasolares, un número que crece día a día, de los cuales varias decenas se consideran

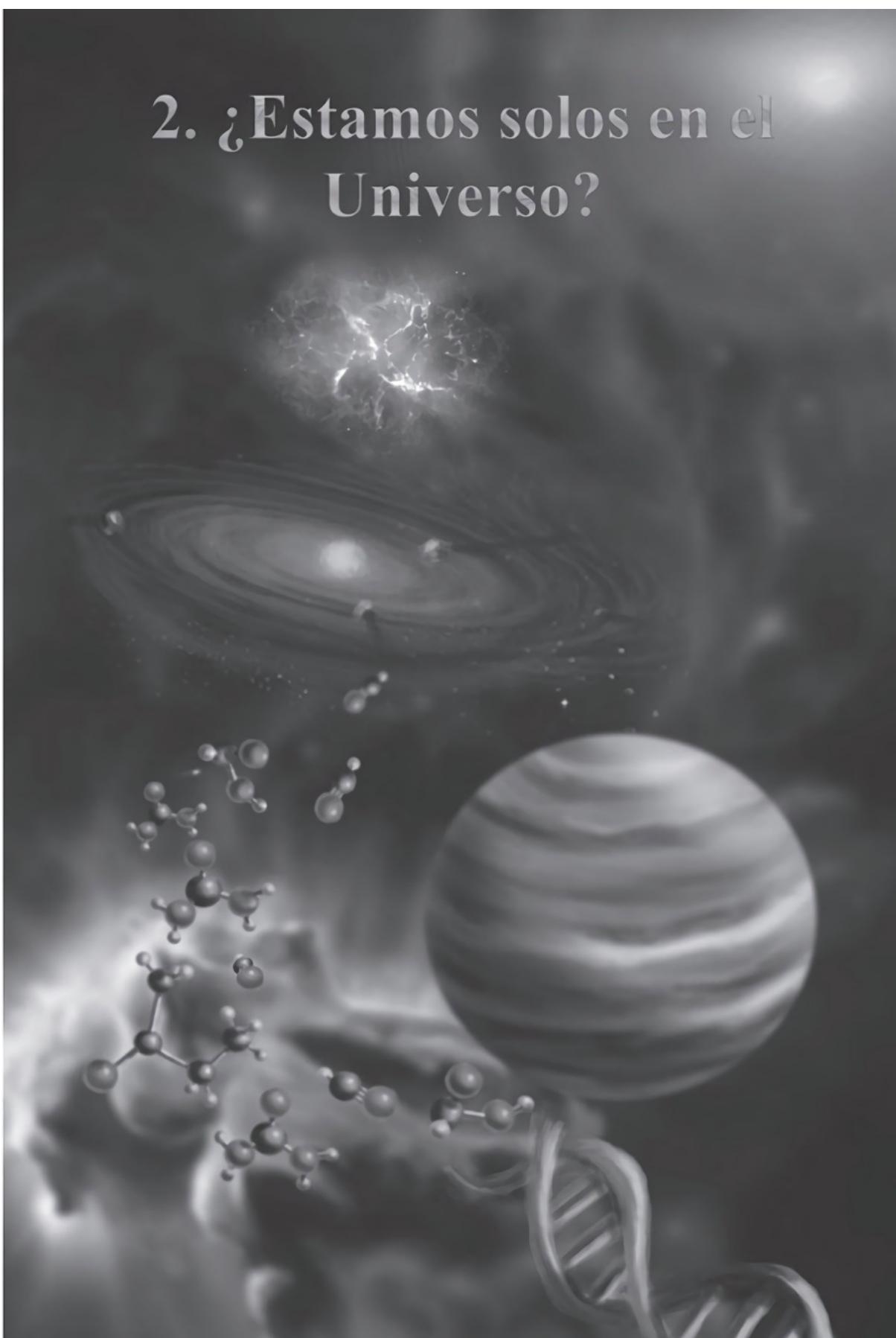
habitables. Por tanto, quizá el Universo esté lleno de lugares propicios para que se desarrolen otras vidas. Tal como nos enseñó el biólogo y filósofo Thomas H. Huxley: «Lo conocido es finito; lo desconocido, infinito».

Y terminaremos este recorrido reflexionando sobre la posible existencia de vida inteligente fuera de nuestro planeta, una de las posibilidades que más interés e inquietud despierta en nuestros cerebros ávidos por comunicarse. Analizaremos la probabilidad de que la evolución a partir de algún sistema biológico extraterrestre haya conducido a la aparición de criaturas pensantes en otros lugares: seres que quizá ahora mismo nos estén observando con sus telescopios... y que hayan escrito libros parecidos a éste preguntándose si están solos en el Universo.

Cada capítulo está encabezado por una sugerente ilustración realizada por María Lamprecht, y terminará con la transcripción de algunas de las conversaciones más interesantes que he mantenido durante los últimos años con colegas y amigos que trabajan en distintos países e instituciones, investigando en diferentes campos de la ciencia, la tecnología o la filosofía. Todos ellos, de una u otra forma, buscan otras vidas fuera de nuestro planeta. Así, esas distendidas charlas de café nos van a permitir adentrarnos en lo que varios expertos estudian, piensan... y sueñan.

En el fascinante viaje que ahora iniciamos iremos de la mano del conocimiento científico y tecnológico más actual. Pero en varios momentos también reflexionaremos sobre el Cosmos y la posible existencia de vida extraterrestre a través de otras manifestaciones de la cultura, como la filosofía, la literatura, las artes plásticas, la música o el cine. Y, por supuesto, sin olvidar la ciencia ficción, que se agazapa detrás de muchas de las siguientes páginas y saltará a nuestro encuentro cuando menos lo esperemos. De hecho, una de las reflexiones más inspiradoras que se han realizado en este campo se la debemos a un gran escritor de ficción que además tenía una sólida formación científica, Arthur C. Clarke: «A veces creo que hay vida en otros planetas y a veces pienso que no. En cualquiera de los dos casos, la conclusión es asombrosa».

2. ¿Estamos solos en el Universo?



Cuando además materia en abundancia
Está dispuesta, y un espacio pronto
A recibirla, ni su movimiento
Impide algún estorbo, es claro deben
Formarse seres; y hay tan grande copia
De principios, que no pueden contarlos
Aunque se junten mil generaciones:
Y si para juntarse en otra parte
Tienen la fuerza y la naturaleza
Igual a los principios de este mundo,
Es preciso confieses que las otras
Regiones del espacio también tienen
Sus mundos, varios hombres y animales.

Tito Lucrecio Caro,
De Rerum Natura, Libro II

En el siglo IV antes de nuestra era, el filósofo griego Epicuro de Samos, seguidor de la corriente atomista de Demócrito de Abdera e inspirado también por las ideas previas de Anaximandro de Mileto, dirigió una epístola a su discípulo Heródoto. En ella, entre otras cosas le decía: «Hay un número infinito de mundos, algunos como éste, otros diferentes. Los átomos de los que se forman no se acaban en un mundo o en un número finito de mundos, sean o no parecidos al nuestro. Por lo tanto, no habrá nada que impida una infinidad de mundos».

Tres siglos después de Epicuro, el poeta y filósofo romano Lucrecio retomó tales ideas en el poema *De la naturaleza de las cosas*, dividido en seis libros, del que hemos extraído los versos que encabezan este capítulo. En lo que se considera el primer ejemplo conocido de «poesía científica», su autor asume que en el Universo puede haber un gran número de mundos y que, además, el movimiento y las agrupaciones de los átomos que componen todo lo que existe en la naturaleza deberían generar otras vidas allá donde fuera posible, en los lugares que compartieran unas condiciones similares a las de la Tierra. Por tanto, allí podría haber seres vivos, incluso humanos como nosotros.

La idea de que existen otros planetas, probablemente habitados, ha prevalecido a lo largo de la historia y ha sido reformulada por distintos pensadores y científicos, como veremos en el penúltimo capítulo del libro. En 1995 se descubrió el primer planeta en torno a otra estrella de tipo solar y

desde entonces se han detectado muchos más, hasta superar los cuatro mil. Pero seguimos sin saber si alguno de ellos puede contener seres vivos, una duda que también planea sobre varios cuerpos del Sistema Solar. Por el momento, estamos solos. Para comprender si realmente habitamos en un lugar especial del Universo, que disfruta de unas condiciones irrepetibles para que se haya originado la vida, era necesario vernos desde fuera del planeta: algo que los avances de la tecnología hicieron posible hace poco más de medio siglo.

NUESTRO LUGAR EN EL COSMOS

El día de Navidad de 1968, los astronautas del *Apolo 8* Frank Borman, James Lovell y William A. Anders habían descrito su cuarta órbita alrededor de la Luna, en lo que estaba suponiendo un hito para el programa espacial norteamericano. Al superar su cara oculta terminó otro período de unos 20 minutos en el que no habían tenido conexión con la Red de Espacio Profundo de la NASA («Deep Space Network», DSN), formada desde pocos años antes por tres complejos de antenas situados en Estados Unidos, Australia y España. Así, pudieron restablecer el contacto con nuestro planeta. Pero, a la vez que aquí se celebraba una nueva conexión exitosa, ellos estaban disfrutando de una vista incomparable, porque la inclinación de esa órbita les había hecho salir justo en línea de visión a nuestro planeta.

Frente a ellos, la Tierra en cuarto creciente se elevaba sobre el horizonte gris de nuestro satélite. Ese *Earthrise* o «amanecer terrestre», nunca hasta entonces observado en directo por unos ojos humanos, era sobrecogedor: el planeta azul y blanco que compartían todos los seres vivos, incluida la humanidad al completo excepto a ellos tres, aparecía como un cuerpo de gran belleza y a la vez de extrema fragilidad, que flotaba en un espacio negro e inmenso. Anders afirmó, conmovido: «Hicimos todo este camino para explorar la Luna y lo más importante que descubrimos fue la Tierra». Cuando poco después se difundió su fotografía, era evidente que se iba a convertir en una de las más icónicas de la historia. Y en un año como aquél, marcado por las revoluciones sociales y el deseo de paz en el mundo, vernos desde fuera supuso el inicio de la conciencia planetaria que luego estaría en la base del movimiento ecologista. Nunca hasta ese momento una imagen astronómica había tenido tal repercusión científica, filosófica, sociológica y política.

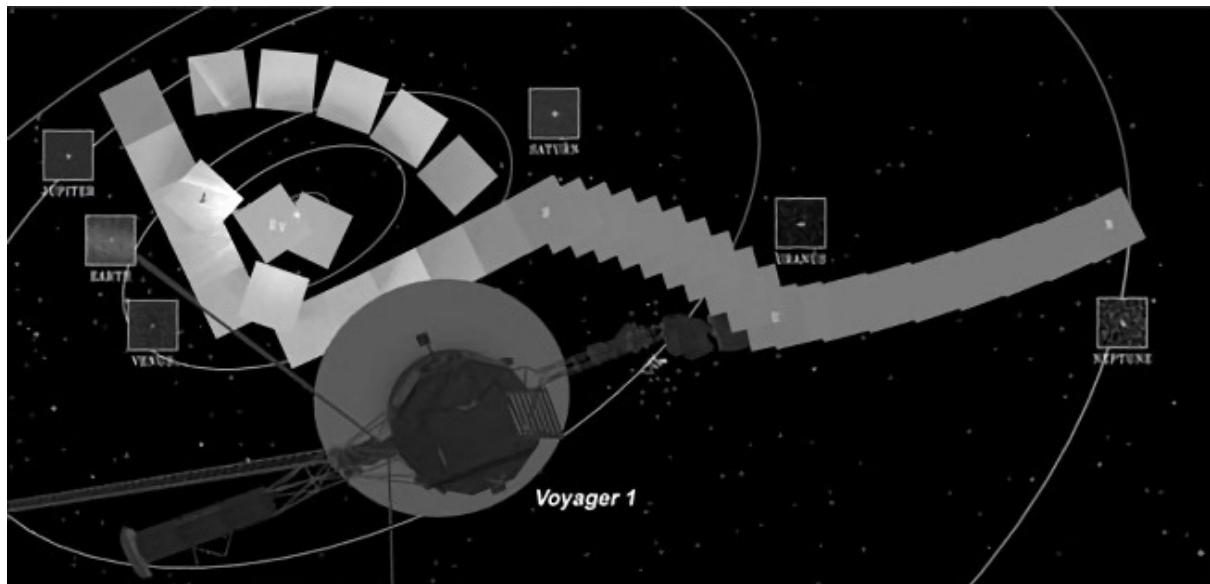
De hecho, pocos meses después comenzó a trabajar en su «hipótesis Gaia» el químico James Lovelock, que pronto sería apoyado por la bióloga Lynn Margulis. Según esta provocativa idea, la biosfera terrestre en su conjunto (superficies emergidas, océanos, atmósfera y los seres que la habitamos) se comporta como un organismo vivo y autorregulado. Para referirse de forma global a este «planeta vivo» el escritor William Golding, amigo de Lovelock, le propuso denominarlo Gaia, uno de los nombres de la Madre Tierra en el panteón griego.

Durante el último viaje de los humanos a la Luna hasta el momento, el 7 de diciembre de 1972 los tripulantes del *Apolo 17* obtuvieron la primera fotografía del disco de nuestro planeta completamente iluminado por el Sol: una «Tierra llena» en la que África, la península Arábiga y la Antártida aparecían rodeadas por el azul de los océanos, bajo blancos jirones de nubes que cubrían buena parte del hemisferio sur. En esa imagen, que comenzó a conocerse como «la canica azul», estaba la mitad del hogar que compartimos.

Casi dos décadas después, el 14 de febrero de 1990, la sonda *Voyager 1* se encontraba más allá de la órbita de Plutón, a unos 6000 millones de km del Sol (cuarenta veces más lejos que la Tierra de nuestra estrella, es decir, a 40 «unidades astronómicas», ua), y aproximadamente 32 grados por encima del plano de la eclíptica, en el que se desplazan los planetas. Había sido lanzada el 5 de septiembre de 1977, un año después de la llegada de las *Viking* a Marte, con un objetivo muy ambicioso: sobrevolar Júpiter, Saturno y varios de los satélites de estos dos gigantes de gas, y tomar también imágenes de Urano y Neptuno. Llevaba un curioso disco de cobre bañado en oro, con dibujos, sonidos e imágenes, del que hablaremos en el último capítulo. La *Voyager 1* había cumplido con éxito su misión. Pero aquel día de San Valentín, mientras se alejaba de nosotros a 65 000 km/h, recibió un comando que materializaba la idea propuesta años antes por el astrofísico y divulgador Carl Sagan, miembro del equipo científico de la misión: debía girar las cámaras y apuntar hacia el interior del sistema planetario del que se estaba alejando, para intentar fotografiar todos los planetas de nuestro vecindario cósmico. Obediente, ese viajero de 722 kg «miró hacia atrás» y realizó un barrido de 64 fotografías que incluían las posiciones ocupadas por ellos. Cada imagen, de formato cuadrado y con 800 píxeles de lado, fue almacenada en la memoria de la sonda y el conjunto se envió a la Tierra durante los tres meses siguientes.

Cuando las antenas de la DSN (entre ellas las situadas en Robledo de Chavela, cerca de Madrid) terminaron de recibir aquel gigantesco «retrato de familia» del Sistema Solar, el único jamás obtenido, se comprobó que tal mosaico de fotografías contenía imágenes claramente identificables de seis planetas: Venus, la Tierra, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Estos dos últimos recibían tan poca luz del Sol que para captarlos fue necesario utilizar

un tiempo de exposición de quince segundos mientras la sonda seguía moviéndose, por lo que sus imágenes aparecen borrosas. Por su parte, el diminuto Mercurio no podía distinguirse en ninguna de las imágenes al estar demasiado cerca de la deslumbrante luz del Sol, mientras que Marte no era visible con los filtros utilizados y Plutón (entonces considerado un planeta) aparecía tan poco iluminado que apenas se podía intuir.



Retrato de familia del Sistema Solar tomado por la *Voyager 1* el 14 de febrero de 1990, con la propia sonda superpuesta en la imagen. Figura de Wikimedia Commons, modificada por el autor.

La fotografía más deseada era, lógicamente, la de nuestro planeta. Lo habíamos visto ya desde fuera gracias a las imágenes tomadas por las misiones con destino a la Luna que hemos comentado. Pero en ellas la Tierra estaba muy cerca en términos astronómicos: a unos 400 000 km la del *Apolo 8* y a 60 000 km la del *Apolo 17*. Por tanto, había gran curiosidad por comprobar qué aspecto tendría nuestro planeta desde una distancia cien mil veces mayor a aquella del *Apolo 17*. Como el propio Sagan escribió: «Los científicos y filósofos de la antigüedad clásica comprendieron correctamente que la Tierra es un mero punto en la inmensidad del Cosmos, pero nadie la había visto nunca como tal. Ésa era nuestra primera oportunidad, y quizá también la última en décadas y décadas».

La espera tuvo su recompensa. En la famosa imagen, resultante de la composición de las fotografías tomadas usando tres filtros diferentes (violeta, azul y verde) y tiempos de exposición menores de un segundo con cada una, la Tierra aparece efectivamente como un único píxel azul claro: de hecho, su señal únicamente equivale a 0,12 píxeles, porque desde la perspectiva de la *Voyager 1* se nos veía en cuarto creciente. Por casualidad, ese punto quedó situado en el interior de un rayo difuso y amarillento, que era un artefacto producido en el objetivo de la cámara por la luz del Sol. En vez de quitarle

valor a la imagen, este efecto óptico parecía dar más relevancia a la posición ocupada por la Tierra sobre la oscuridad del fondo. En muy poco tiempo, dicha fotografía se convirtió en una de las más reproducidas de la historia de la exploración espacial. Su significado icónico quedó fijado para siempre en nuestra cultura y conciencia común como especie, gracias a las inspiradoras palabras con las que Sagan se refirió a ella al final del primer capítulo de un libro publicado en 1994 y titulado, muy acertadamente, *Un punto azul pálido. Una visión del futuro humano en el espacio*.

Merece la pena reproducir parte de esas frases, que resultan emocionantes cada vez que se leen: «Mira de nuevo ese punto. Eso es aquí. Eso es nuestro hogar. Eso somos nosotros. En él, todas las personas que amas, todas las que conoces, todas de las que alguna vez escuchaste hablar, cada ser humano que ha existido, vivieron su vida. La suma de todas nuestras alegrías y sufrimientos, miles de religiones seguras de sí mismas, ideologías y doctrinas económicas, cada cazador y recolector, cada héroe y cobarde, cada creador y destructor de civilizaciones, cada rey y campesino, cada joven pareja enamorada, cada madre y padre, niño esperanzado, inventor y explorador, cada profesor de moral, cada político corrupto, cada “superestrella”, cada “líder supremo”, cada santo y pecador en la historia de nuestra especie, vivió ahí —en una mota de polvo suspendida en un rayo de luz solar». Unas líneas más adelante, Sagan añadía algo que sigue resultando válido para el tema que nos ocupa: «Nuestro planeta no es más que una solitaria mota de polvo en la gran envoltura de la oscuridad cósmica. Y en nuestra oscuridad, en medio de esa inmensidad, no hay ningún indicio de que vaya a llegar ayuda desde algún lugar capaz de salvarnos de nosotros mismos. La Tierra es el único mundo conocido hasta ahora que alberga vida. No existen otros lugares a donde pueda emigrar nuestra especie, al menos en un futuro próximo. Visitarlos sí, pero establecernos en ellos aún no. Nos guste o no, la Tierra es por el momento nuestro único hábitat».

Aquella fotografía de la Tierra y el resto de la serie fueron las últimas imágenes tomadas por la *Voyager 1*: tras enviárnoslas, se procedió a la desconexión de sus cámaras para ahorrar energía y no se han vuelto a encender desde entonces. En agosto de 2012 esta histórica sonda fue la primera en abandonar el Sistema Solar y comenzar a viajar por el espacio interestelar. Actualmente se encuentra a unas 142 ua del Sol y es el objeto construido por los humanos más distante de nosotros. Por tanto, cada día define el radio de la esfera que engloba nuestra presencia robótica en el Universo. Si hoy pudiera volver a encender sus cámaras y mirar hacia atrás, el lugar en el que vivimos, la suma de todas nuestras alegrías y sufrimientos, sería diez veces más pálido: un punto ya imperceptible sobre el fondo de estrellas de esta galaxia.

¿QUÉ ES LA VIDA?

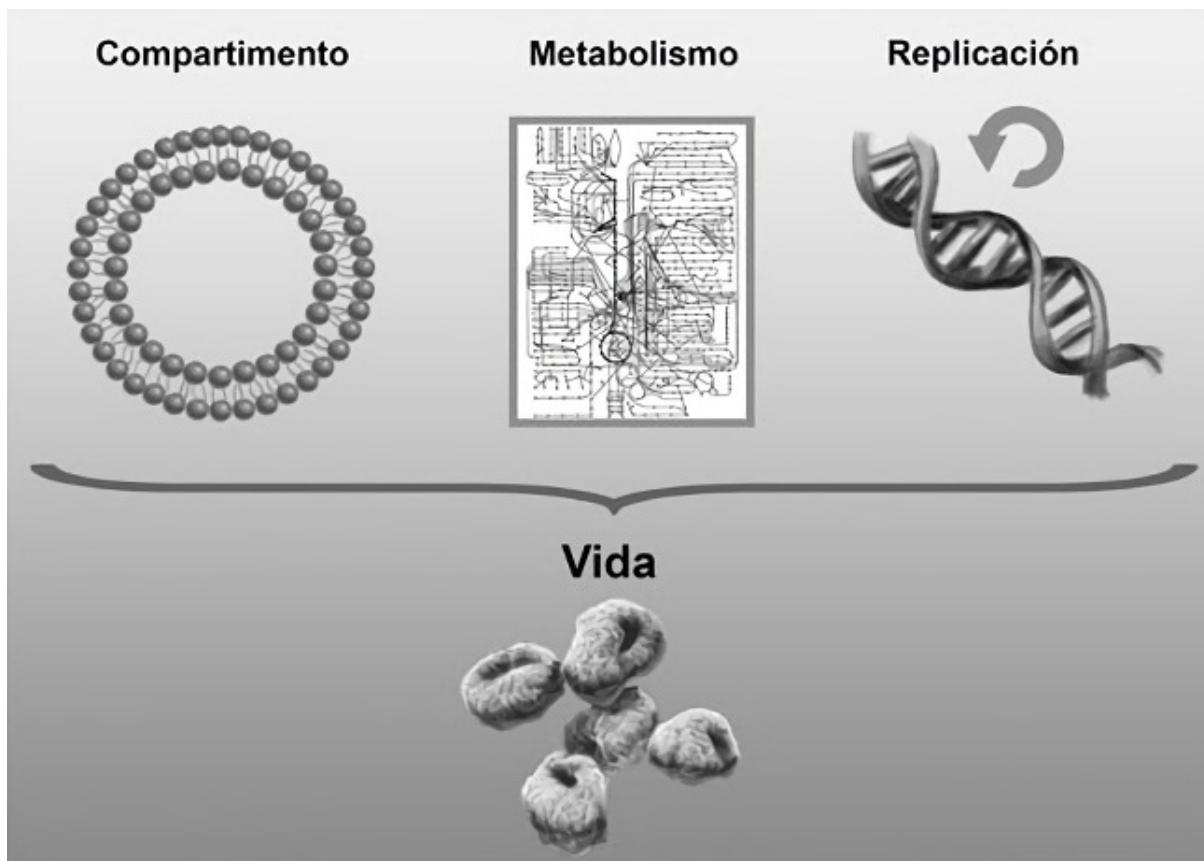
Hasta donde sabemos, sólo en este punto azul pálido existen seres vivos. Pero nos hemos visto desde fuera y somos conscientes de que no ocupamos ningún lugar especial en el Cosmos. En nuestro propio Sistema Solar hay otros planetas y satélites en los que la química podría haber dado el salto a la biología, como iremos repasando a lo largo de las siguientes páginas. Y en el penúltimo capítulo de este libro nos asomaremos fuera de los límites de este vecindario cósmico, para tratar de imaginar la cantidad de planetas que puede contener el Universo: sin duda, es muy probable que existan otras formas de vida ahí afuera.

Pero ¿a qué nos referimos al hablar de vida? ¿Es posible definir científicamente este concepto, habitualmente utilizado en contextos tan diferentes como se comprueba al buscar la entrada «vida» en un diccionario? De hecho, ¿merece la pena consensuar una definición, o para estudiar la vida no es necesario hacerlo? Desde la época de Aristóteles (que nos decía: «Vida es aquello por lo cual un ser se nutre, crece y perece por sí mismo»), numerosos filósofos han reflexionado sobre el fenómeno vital, observando las características que diferencian a los seres vivos del mundo inanimado. Siglos después, a partir del Renacimiento, científicos de distintos campos (con aportaciones posteriores de ingenieros e informáticos) comenzaron a estudiar la vida de forma sistemática, tratando de explicar en qué consistía. Entre otras cosas, se fue descubriendo que los elementos químicos que constituyen los seres vivos no son exclusivos de ellos: como mostraremos en el capítulo 5, también están presentes en la materia inerte, si bien en proporciones muy diferentes y con una organización radicalmente distinta. Además, pese al auge del «vitalismo» durante el siglo XVIII, con los trabajos de Friedrich Wöhler (que en 1828 logró sintetizar una molécula orgánica, la urea, a partir de compuestos inorgánicos) se demostró que la materia viva no posee ninguna fuerza o «impulso vital» que la diferencie de la inanimada.

Definir la vida (o un ser vivo) no es tarea fácil, pues supone identificar un conjunto limitado de propiedades que han de ser a la vez necesarias y suficientes para distinguir lo viviente de lo inerte. En tal definición debería quedar incluida toda la vida que nos rodea (asombrosamente diversa pero derivada, como veremos en el siguiente capítulo, de un antepasado común) y además tendría que ser tan abierta como para poder acomodar otras formas de vida que quizás lleguen a descubrirse (y que tal vez sean radicalmente distintas a las que conocemos en nuestro planeta). De hecho, algunos científicos y filósofos argumentan que es imposible definir la vida ya que en realidad sólo conocemos un ejemplo de ella.

En cualquier caso, si proponemos definiciones, no es adecuado que estén ligadas a los componentes moleculares concretos de los organismos que nos rodean (por ejemplo, proteínas, ácidos nucleicos o azúcares) ya que otros tipos de vida podrían no utilizarlos. Una opción mejor es pensar en las propiedades generales de los seres vivos, que van ligadas a los procesos que realizan y no están presentes (o no todas ellas simultáneamente) en la materia inanimada: i) requieren un cierto grado de complejidad, tanto en su composición química como en cuanto a su organización interna: ii) están compartimentados, gracias a la existencia de una estructura (como la membrana plasmática en el caso de las células conocidas) que diferencia el ser vivo de su entorno y garantiza la homeostasis (el mantenimiento de su composición interna), pero a la vez le permite funcionar como un «sistema abierto» desde el punto de vista termodinámico e intercambiar materia y energía con el exterior; iii) ese intercambio permite al sistema funcionar alejado del equilibrio de la termodinámica, con lo que va construyendo sus propios componentes (aumentando por tanto su orden interno y disminuyendo su entropía a costa de aumentar la del entorno), y está acoplado a una serie de reacciones (fundamentalmente catalizadas por proteínas en la biología terrestre) que constituyen su metabolismo; iv) almacenan y procesan información codificada (en forma de un genoma de ácido desoxirribonucleico, DNA, en la vida que conocemos), que coordina el funcionamiento del ser vivo y es transmitida a la descendencia; v) se reproducen, dando lugar a copias de sí mismos con un cierto grado de diversidad; y vi) gracias a ello, su progenie puede adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno... y por tanto evolucionar.

Teniendo esto en cuenta, durante las últimas décadas se han ido proponiendo numerosas definiciones de vida o de seres vivos, que son de utilidad en diferentes ámbitos de investigación. En astrobiología, una de las «definiciones operativas» más utilizadas fue acuñada por el bioquímico Gerald F. Joyce a principios de la década de 1990: «Un ser vivo es un sistema químico y automantenido que puede realizar evolución darwiniana». En este enunciado tan sintético quedan incluidas las principales propiedades listadas en el párrafo anterior, y su referencia a la evolución por selección natural engloba la reproducción del sistema y la adaptación al medio en el que se desarrolla. Dado que además no menciona ningún componente molecular concreto de los seres vivos, esta definición fue adoptada por el Instituto de Astrobiología de la NASA (del que más tarde se hablará) para consensuar a qué nos referimos al ir en busca de vida en el Universo.



Los tres sistemas fundamentales de los seres vivos: compartimento, metabolismo y replicación.
Ilustración de María Lamprecht.

En cualquier caso, aunque tal definición es muy genérica e incluye todos los seres vivos, en nuestra biosfera existen otras entidades replicativas que se situarían dentro de la escala de grises que separa los sistemas vivos de los inanimados, como son los virus o los viroides. Dado que estos parásitos celulares contienen información genética (en forma de DNA o de ácido ribonucleico, RNA, como más tarde veremos) pero no un metabolismo propio, la mayoría de los investigadores no los consideran seres vivos. No obstante, sabemos que resultan fundamentales para la vida en nuestro planeta... y quizá versiones análogas a ellos puedan existir en otros mundos habitados. Por otra parte, pensando en la búsqueda de vida extraterrestre, algunos científicos (entre ellos, el químico Steven A. Benner) han argumentado que la definición operativa de la NASA resulta poco útil, pues para poder considerar «vivo» un sistema molecular que encontramos (por ejemplo, empleando un biosensor embarcado en un robot de exploración) sería necesario esperar a verlo evolucionar.

En este sentido, merece la pena destacar que la morfología nunca debería ser un criterio suficiente para definir la vida, ya que ciertos procesos geológicos y reacciones químicas pueden originar estructuras con formas y tamaños similares a las células, pero que nada tienen que ver con la biología. La posibilidad de encontrar tales «biomorfos abióticos» (como los producidos

y estudiados por el grupo del geólogo Juan Manuel García-Ruiz en su laboratorio del CSIC y la Universidad de Granada) nos obliga a ser muy cautelosos al proponer que se han descubierto «evidencias de vida» en rocas muy antiguas, en entornos extremos de nuestro planeta... o por supuesto en muestras extraterrestres. El capítulo 7 nos mostrará un ejemplo concreto de la magnitud de este problema.

Terminemos con una definición de vida muy sugerente, entre la ciencia y la poesía, que nos regaló la bióloga Lynn Margulis: «La vida es un proceso físico que cabalga sobre la materia como una ola extraña y lenta. Es un caos controlado y artístico, un conjunto de reacciones químicas abrumadoramente complejas». Aunque, si buscamos reflexiones poéticas, hemos de recordar que tres siglos antes Pedro Calderón de la Barca ya nos había dicho que es un frenesí... pero también «que toda la vida es sueño, / y los sueños, sueños son».

LA ASTROBIOLOGÍA: EN BUSCA DE OTRAS VIDAS

La astrobiología es una disciplina científica relativamente joven, cuyo objetivo principal es el estudio del origen, evolución y distribución de la vida en el Universo. Dentro de este planteamiento general se incluyen numerosas preguntas relevantes, entre ellas en qué contexto astroquímico puede aparecer la vida, cuál pudo ser la secuencia de procesos que permitieron la emergencia de seres vivos en la Tierra, cómo han coevolucionado la vida y nuestro planeta, hasta dónde llega su capacidad de adaptación y cuáles son sus límites, qué tipos de seres vivos podrían existir en entornos extraterrestres, qué hace habitables algunos cuerpos que forman parte de los sistemas planetarios, cuáles serían las tecnologías necesarias para detectar actividades biológicas fuera de la Tierra, o cómo nos enfrentamos al reto de las futuras misiones tripuladas a lugares donde la vida podría estar desarrollándose.

Para intentar responder a cuestiones tan complejas, la astrobiología realiza una investigación interdisciplinar o transdisciplinar en la que colaboran distintas ramas de las matemáticas, la física, la geología, la química, la biología, la ingeniería y la filosofía. Esto requiere la participación de decenas de instituciones públicas en todo el mundo, incluidos centros de investigación, universidades, observatorios, sociedades científicas y empresas privadas. Por su relación cada vez más estrecha con la exploración del Universo, también implica a agencias espaciales nacionales [como es el caso

de la de Estados Unidos (NASA), Rusia (Roscosmos), China (CNSA), Japón (JAXA), India (ISRO), Israel (IAI) o Corea del Sur (KARI), entre otras] y a una de carácter internacional, la agencia espacial europea (ESA).

Recientemente, este entorno se ha dinamizado debido al interés de empresas como SpaceX, Blue Origin, Virgin Galactic o Boeing en las misiones espaciales, lo que añade nuevos actores a esta obra colectiva. Gracias a ello, por ejemplo, hemos podido contemplar en nuestras pantallas imágenes tan espectaculares como aquella del 6 de febrero de 2018: el aterrizaje vertical y simultáneo, en las plataformas previstas en Cabo Cañaveral, de los dos propulsores laterales que acababa de utilizar el cohete *Falcon Heavy* de SpaceX en su lanzamiento inaugural. Mientras tanto, un *Tesla Roadster* conducido por el maniquí *Starman* (ataviado con su traje espacial de diseño), llevando en la guantera una copia de la *Guía del autoestopista galáctico* de Douglas Adams y una toalla, con el mensaje «DON'T PANIC!» escrito en la pantalla de su navegador, y con *Space Oddity* de David Bowie (no) sonando en su equipo de alta fidelidad... volaba hacia más allá de Marte. Tras el coche rojo, nuestro planeta azul nos recordaba a aquel que había aparecido por encima del horizonte de la Luna exactamente cincuenta años antes. Centenares de millones de personas (incluidos los decepcionados terraplanistas) lo vimos en directo. Y volvimos a soñar con viajes espaciales y con la búsqueda de vida en otros mundos.

Aunque las principales preguntas de la astrobiología son tan antiguas como la propia humanidad, y buena parte de sus temas de investigación ya estaban estudiándose en diferentes países desde mediados del siglo XX, la fundación del NASA Astrobiology Institute (NAI) en 1998 supuso un gran estímulo en este campo. El NAI se planteó como un instituto virtual que agrupaba diferentes centros y universidades norteamericanas con gran experiencia en sus respectivos ámbitos científico-técnicos. En nuestro país, el Centro de Astrobiología (CAB) fue fundado por el físico Juan Pérez Mercader en 1999 como un centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), siendo el primero fuera de Estados Unidos en conseguir el estatus de Centro Asociado al NAI. Desde entonces, un número creciente de científicos e ingenieros realizamos en el CAB una investigación interdisciplinar sobre los aspectos más básicos y aplicados de la astrobiología (incluidos entre estos últimos la robótica, la ciencia de materiales, la biotecnología o la biomedicina). En 2019, cuando el NAI estimó que había cumplido sus objetivos de crear el necesario tejido científico y tecnológico, se reconvirtió en el NASA Astrobiology Program (NAP), organizándose en forma de redes de colaboración o Research Coordination Networks (RCN) centradas en temas de investigación concretos a los que diferentes grupos e institutos aportamos nuestra experiencia.



Primavera en el Centro de Astrobiología, centro mixto CSIC-INTA asociado al NASA Astrobiology Program. Fotografía del autor.

Paralelamente, en 2019 se fundó el European Astrobiology Institute (EAI), que recoge la tradición de lo que en Europa se denominaba «exobiología» durante las últimas décadas del siglo xx. Su núcleo central está formado por instituciones como el Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNRS, Francia), el Fondo de Investigación Científica (Bélgica), el Instituto Nacional de Astrofísica (Italia), el Centro Nacional de Estudios Espaciales (Francia), el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) y el CAB. Los grupos de trabajo constituidos en el EAI reflejan bien las inquietudes científicas de sus integrantes: i) formación y evolución de sistemas planetarios, y detección de mundos habitables; ii) el camino a la complejidad, de las moléculas simples a las primeras formas de vida; iii) ambientes planetarios y habitabilidad; iv) evolución y huellas de la vida temprana, y vida en condiciones extremas; y v) biomarcadores y detección de vida fuera de la Tierra. Además, el EAI está coordinado con otras plataformas de investigación europeas como la European Astrobiology Network Association (EANA) y la red Europlanet.

LA DIMENSIÓN SOCIAL DE LA ASTROBIOLOGÍA

En conjunto, el trabajo que realizamos en astrobiología se plasma, como el de cualquier otro ámbito científico-tecnológico, en proyectos, artículos de investigación, documentación técnica, libros, patentes, instrumentos, trabajo

de campo, congresos, actividades de docencia y divulgación científica. Pero la astrobiología está también profundamente conectada con la sociedad, ya que trata de responder a las grandes preguntas que los humanos nos hemos hecho desde que comenzamos a observar el cielo estrellado. Tal como escribía el poeta Ernesto Cardenal en su sugerente libro *Cántico cósmico*: «La finísima retina del universo mirándose a sí mismo, / eso somos». Por ello, con frecuencia se tienden lazos a la filosofía y a otros ámbitos de la cultura como la literatura, el cine, la música o la pintura.

Los aspectos éticos de la astrobiología son también relevantes, pues ya se están planteando cuestiones como la forma en que deberíamos comportarnos con otra potencial vida que pueda descubrirse, qué obligaciones morales tendríamos con esos seres vivos, las limitaciones a la propagación de nuestra vida fuera de la Tierra, bajo qué condiciones podría ser permitida la eventual terraformación de otro cuerpo planetario, o cuáles son los retos ambientales y políticos de la minería espacial en entornos extraterrestres. Estos temas irán apareciendo a lo largo de los próximos capítulos.

Desde el punto de vista epistemológico, la astrobiología supone la última frontera del conocimiento humano, ya que en cierta medida representa el deseo de llegar hasta donde nadie lo ha hecho antes: ¿qué sabemos?, ¿qué podemos saber?, ¿qué tipos de experimentos o modelos computacionales podrían permitirnos conocer todo lo que sea posible?, ¿qué procesos pueden (o alguna vez pudieron) ocurrir y cuáles no?, ¿cómo nos enfrentamos a lo que nunca llegaremos a saber? La astrobiología, como suma del trabajo de miles de profesionales que sin duda será continuado por las siguientes generaciones, es una forma científica de aproximarnos a los límites del conocimiento. Supone un reto a nuestra propia imaginación. Y va en busca de otras vidas para poder entender mejor el origen y los límites de la nuestra.

Por último, una reflexión desde el ámbito de la economía. Como hemos comentado, las empresas privadas están espoleando este sector y continuarán haciéndolo. Pero la financiación pública siempre va a ser necesaria en todos los países realmente interesados en el avance de la exploración espacial y la búsqueda de vida fuera de la Tierra. A veces se nos pregunta si es necesario invertir en ello (aunque en cualquier caso es un porcentaje mínimo del PIB, incluso en países como Estados Unidos) y si de ahí se obtiene algún beneficio real para la humanidad. Es tentador responder a esta cuestión, que con toda legitimidad se plantea cualquiera que pague sus impuestos, en función de las aplicaciones prácticas que se han derivado de la ciencia básica relacionada con estos temas y de la investigación espacial durante el último medio siglo. En tal caso hablaríamos de los miles de productos y desarrollos tecnológicos que tuvieron ese origen y hoy en día forman parte de nuestras vidas: sistemas de comunicaciones, avances en electrónica y en óptica, nuevos combustibles y pilas, nanotecnología, materiales más resistentes y ligeros, tejidos con

propiedades novedosas, el famoso velcro, desarrollos en medicina y en sistemas de soporte vital, biosensores y dispositivos de diagnóstico clínico, nuevos fármacos y un largo etcétera. Como ejemplo, en el capítulo 4 conoceremos una tecnología revolucionaria y muy rentable surgida de algo tan aparentemente «poco aplicado» como el estudio de microorganismos que viven en ambientes extremos.

Pero la respuesta a esa pregunta que se nos hace va mucho más allá: históricamente, la investigación básica y la exploración del Cosmos nos han proporcionado conocimiento, nos han llevado a plantearnos grandes interrogantes, nos han hecho más críticos y por tanto más libres, nos han permitido viajar en el tiempo y en el espacio hasta más lejos de lo que soñábamos. Gracias a ello hemos podido convertir una herramienta de hueso en una nave espacial.



Un café con... Muriel Gargaud



Doctora en Astrofísica. Directora de Investigación en el Laboratorio de Astrofísica de Burdeos, del Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, Francia).

Hace ya bastante tiempo que nos conocemos y desde entonces hemos compartido muchas iniciativas en el ámbito de la astrobiología. ¿Por qué crees que este campo de investigación, y en concreto lo relativo a la búsqueda de vida extraterrestre, es tan atractivo para el público?

Sin duda lo es. La astrobiología es un ámbito muy interdisciplinar que comprende desde la investigación sobre la formación de estrellas y planetas hasta el análisis de la biodiversidad actual, pasando por el estudio de la Tierra primitiva, la transición de los sistemas no vivos a los vivos, y la aparición de los primeros rastros de vida. Las preguntas sobre cómo se inició la biología en nuestro planeta y si hay vida fuera de él no son nuevas: de hecho, los antiguos griegos ya estaban tratando de responderlas. Y ambas son sin duda fascinantes para todos nosotros, desde los jóvenes hasta los más mayores. Si estamos solos en el Universo da miedo imaginar nuestro pequeño planeta perdido entre miles de millones de estrellas y galaxias sin vida. Y si no lo

estamos, también puede ser aterrador imaginar cómo y por qué esas otras «criaturas» podrían venir a visitarnos. Esto produce una mezcla de fascinación, inquietud y excitación que desata la imaginación y las creencias de todo tipo.

Teniendo esto en cuenta, ¿es la ciencia ficción una buena herramienta para aumentar el interés de los jóvenes (y de los que no lo son tanto) en la exploración espacial y la astrobiología? ¿Podrías recomendar algunos libros y películas de ficción relacionados con estos temas que te parezcan relevantes y estén bien fundamentados científicamente?

La ciencia ficción (y la ficción en general) es sin duda una gran herramienta, aunque por supuesto ciertos libros y películas son mejores que otros desde el punto de vista estrictamente científico. No es fácil recomendar sólo algunas de estas obras. Pero dado que, como profesora, suelo utilizar películas con mis estudiantes y tras visionarlas tenemos debates acerca de ellas, enumeraría cuatro que nunca faltan en estos cine-fórum: *Contact* (1997), *Solaris* (la original soviética, de 1972), *La llegada* (2016) y *La amenaza de Andrómeda* (1971).

Entre los libros de ciencia ficción, recomendaría aquellos que han inspirado las películas que acabo de mencionarte: *Contacto* de Carl Sagan, *Solaris* de Stanislaw Lem (del que también me gusta mucho la novela *La voz de su amo*), *La historia de tu vida* de Ted Chiang, y *La amenaza de Andrómeda* de Michael Crichton (cuya obra más famosa es *Parque Jurásico*, también muy interesante). Además, no puedo dejar de recomendar la *Trilogía de Marte* de Kim Stanley Robinson. ¡Pero está claro que hay otras muchas novelas de ciencia ficción también muy sugerentes!

Durante más de una década has estado involucrada en la formación de las nuevas generaciones de astrobiólogos. ¿Por qué es esto tan importante? ¿Podrías resumir las principales iniciativas transdisciplinares que actualmente están disponibles a nivel internacional para quienes tengan interés por formarse en la búsqueda de otras vidas en el Universo?

Creo en el valor de la educación, sea cual sea el ámbito del que estemos hablando. La astrobiología es un campo muy amplio, y para entenderla es necesario tener una sólida formación en muchas disciplinas: desde la astronomía hasta la biología, pasando por la química y la geología, pero también en historia y filosofía. Yo diría que uno en realidad no puede llegar a «ser un astrobiólogo», pero ciertamente nos podemos formar para entender cuáles son las grandes preguntas a las que nos enfrentamos.

Desde mi punto de vista, un estudiante que quiera trabajar en astrobiología primero tiene que adquirir una sólida formación (a través de un

Grado y un Máster) en uno de los grandes campos ya mencionados, y después aprender los fundamentos de otras disciplinas para poder comprender dónde están las principales cuestiones interdisciplinares relacionadas con los orígenes y la posible distribución de la vida. Esto generalmente requiere diez años, por no decir una vida entera, así que cuanto antes se empiece, mejor. ¡En ese sentido es parecido al aprendizaje de un idioma extranjero! Por tanto, formar a las generaciones más jóvenes desde el principio (incluso en la escuela primaria) es sin duda nuestro deber, con el fin de disponer en el futuro de científicos capaces de proponer escenarios originales basados en el conocimiento actual y en los últimos descubrimientos que se vayan produciendo en estos campos.

Como decías, se están llevando a cabo muchas iniciativas en todo el mundo, por científicos individuales o por grupos de ellos, y sin duda necesitamos la participación de todos. Por supuesto, puedo mencionar a la Unión Astronómica Internacional (IAU), que ha liderado numerosos proyectos y ha desarrollado herramientas educativas a disposición de todos los países, en especial de los menos favorecidos económicamente. Además cada país, a nivel individual, también está haciendo mucho por la astrobiología. El recientemente fundado Instituto Europeo de Astrobiología (EAI) va a dedicar mucho tiempo y energía a la educación y formación de estudiantes, pero también a la divulgación enfocada al público general.

En tu opinión, Mu, ¿deberían la ESA, la NASA y otras agencias espaciales participar más en la investigación enfocada hacia la astrobiología?

Muchas agencias espaciales nacionales, y en particular el Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) en Francia, participan en investigaciones centradas en la astrobiología y las están apoyando. La NASA solía fomentar esa investigación a través de su Instituto de Astrobiología (NAI), que está ahora mismo en reconfiguración. Por su parte, la ESA se involucra profundamente en misiones espaciales, pero en menor medida en la ciencia astrobiológica. Esperemos que el nuevo EAI mejore esta situación, ya que ciertamente necesitamos que las agencias espaciales apoyen la investigación y la educación en astrobiología.

En mayo de 2019 fuiste elegida vicepresidenta del EAI, que ya has mencionado. Se fundó como una nueva estructura europea para agrupar a la creciente comunidad de científicos, ingenieros y otros profesionales interesados en el origen, evolución y distribución de la vida en el Universo. ¿Cuáles son los principales objetivos de esta institución y qué retos tiene por delante?

Como bien sabes, Carlos, el EAI aspira a convertirse en el principal foro para el desarrollo de la astrobiología en Europa y tratará de que este campo de investigación se establezca en todo nuestro continente. Entre sus muchos objetivos, el Instituto llevará a cabo investigaciones innovadoras sobre cuestiones científicas clave en astrobiología, a través de un enfoque interdisciplinar y cooperativo. En segundo lugar, difundirá los resultados de dichos esfuerzos en investigación de manera efectiva y para toda la comunidad científica. Además, proporcionará educación y formación interdisciplinar desde las escuelas hasta nivel universitario, y también coordinará las actividades de divulgación enfocadas al público general.

Pasando ahora a tu experiencia como astrofísica, ¿eres optimista sobre la posibilidad de encontrar signos de vida en otros sistemas planetarios utilizando la tecnología actual? ¿Cuáles son los enfoques más prometedores y por qué?

El campo de los planetas extrasolares «explotó» durante la última década, y desde entonces ya no te despiertas ningún día sin que se haya descubierto un nuevo exoplaneta. Pero encontrar vida en alguno de ellos requiere haber definido previamente lo que estamos buscando: «¿Qué es la vida?» es una pregunta que toda nuestra comunidad de científicos y también de filósofos trata de responder. Además, debemos ponernos de acuerdo sobre cuáles son las evidencias de vida (o, en nuestro argot, las «biofirmas») que sería necesario encontrar en un planeta para considerarlo «vivo». Hasta ahora creo que sólo podemos buscar vida tal como la conocemos porque, aunque probablemente haya otras muchas formas de originar sistemas químicos autorreplicativos distintos, no resulta fácil saber cómo identificarlos. Por el momento sólo nos es posible ir en busca de «pistas de la vida», de forma que si en un lugar acumulamos un número suficiente de ellas podremos sospechar que contiene seres vivos.

¿Crees que debería redefinirse el concepto de «zona de habitabilidad» alrededor de una estrella, dado lo que actualmente conocemos sobre los microorganismos extremófilos y teniendo también en cuenta el potencial de algunas lunas heladas para albergar vida extraterrestre en los océanos de agua líquida que existen bajo sus superficies?

El concepto de «zona de habitabilidad» o «zona habitable» realmente tiene que ser reformulado o, al menos, mejorado. La vida, tal como la conocemos, requiere la presencia de agua líquida. Pero esto no quiere decir que un planeta con agua líquida necesariamente albergue vida. Por tanto, si uno encuentra un exoplaneta a una distancia de su estrella adecuada para que en su superficie haya agua líquida, esto por supuesto no implica que esté habitado: sólo

significa que su probabilidad de estarlo es mayor que si no contuviera agua en estado líquido. Por otro lado, no podemos excluir la posibilidad de encontrar vida en el océano subsuperficial de un satélite helado que esté lejos de su estrella. Con el descubrimiento de miles de sistemas planetarios, toda una comunidad de planetólogos está trabajando en este concepto de «zona habitable», que a primera vista es simple... pero en realidad resulta bastante más complicado.

De todos modos, para muchos (tanto científicos como no científicos), el verdadero descubrimiento no sería encontrar vida microbiana en otros lugares (por ejemplo, en Marte, Europa o un planeta extrasolar), sino detectar una vida inteligente fuera de la Tierra, con la cual pudiéramos comunicarnos de alguna manera. ¿Qué opinas sobre esa posibilidad, y también sobre los programas que tratan de encontrar inteligencias extraterrestres mediante el análisis de las señales electromagnéticas que podrían llegarnos desde diferentes regiones del cielo?

Esta pregunta es bastante personal y lo que voy a responderte sólo refleja mi opinión. Encontrar vida microbiana en Marte, en Europa o en un exoplaneta me parece estadísticamente posible, y como investigadora profundamente involucrada en la astrobiología creo que sería un descubrimiento fantástico. Por su parte, detectar «vida inteligente» más allá de nuestro planeta es algo que puedo imaginar, aunque a la ya esquiva definición de vida estamos añadiendo la de «inteligencia», que es algo tan difícil de definir como la propia vida. En cualquier caso, me parece muy improbable que nos podamos comunicar con una civilización extraterrestre. Te daré dos ejemplos. Supongamos que en algún lugar de otro planeta viven hormigas. Como todos sabemos, las hormigas son extremadamente «inteligentes» y sus comunidades están muy organizadas, pero ¿cómo podríamos comunicarnos con ellas, empleando señales electromagnéticas o de cualquier otro tipo, si no sabemos cómo hacerlo con las hormigas terrestres?

Por otro lado, nuestro Sol tiene unos 4600 millones de años y en esta u otras galaxias podemos encontrar miles de millones de estrellas más jóvenes o más antiguas que el Sol, si tenemos en cuenta que el Universo surgió hace unos 13 800 millones de años. Si asumimos (¡pero qué suposición es ésta!) que la vida se hubiera desarrollado en otro lugar siguiendo el mismo proceso que en la Tierra (lo que para mí es bastante improbable, ya que seguramente la vida emergió tras miles de intentos, fracasos y caminos frustrados), ¿cuál sería la probabilidad de encontrar una civilización que esté exactamente en el mismo nivel de desarrollo tecnológico que nosotros, y que por tanto sea capaz de responder a nuestras señales electromagnéticas?

Esa es la clave...

Claro que sí. Estamos hablando de miles de millones de años de evolución de la vida en un planeta, y a la vez vamos buscando civilizaciones que deberían ser tecnológicamente equivalentes a la nuestra, lo que requiere coincidir en un margen de unos cien años... Siempre me he preguntado cómo podría comunicarme con una civilización que vive en un planeta más joven que la Tierra, de forma que ellos sólo hubieran llegado por ejemplo a un tiempo equivalente a nuestro Jurásico, o incluso análogo a nuestro siglo XVIII, con un desarrollo tecnológico aún muy limitado. A pesar de esta mínima diferencia temporal en comparación con la edad del Universo, no podríamos establecer ningún contacto. Por el contrario, puede que nos lleguen todos los días señales de una civilización que vive en un planeta más antiguo que el nuestro, y que por tanto esté un siglo (o muchos) más adelantado tecnológicamente que nosotros. No seremos capaces de descifrar su mensaje y nunca recibirían nuestra respuesta. Todo esto podemos imaginarlo, y de hecho es emocionante... pero a tal actividad se le suele llamar ciencia ficción y no ciencia.



3. La vida en la Tierra



Allí, en las quietas aguas de color oro vino, había una jungla en miniatura. Por el fondo iban de caza las mortíferas larvas de libélula, depredadores astutos como el tigre, que centímetro a centímetro se abrían paso entre el detrito de un millón de hojas del año anterior. Los renacuajos negros, cual bruñidas y relucientes pastillas de regaliz, retozaban en el agua somera como manadas de rollizos hipopótamos en algún río africano. Por las verdes frondas de algas vibraban y revoloteaban las turbas multicolores de animales microscópicos cual bandadas de aves exóticas, y entre las raíces de las frondas se desenroscaban los tritones, las sanguijuelas como grandes serpientes en la penumbra, estirándose implorantes, siempre hambrientas.

Gerald Durrell,
Bichos y demás parientes

Lo más maravilloso es que todos los seres vivos que habitamos en la Tierra descendemos de un antepasado común. Los animales, los hongos, las plantas, las algas, los microorganismos que nos rodean y se reproducen dentro de nosotros... somos realmente parientes. Formamos parte de una misma familia que lleva más de 3500 millones de años (Ma) evolucionando y diversificándose. Un árbol cuyas profundas raíces se hunden en la química que existía en un planeta rocoso situado en la zona de habitabilidad en torno al Sol.

DE DÓNDE VENIMOS

Los cosmólogos nos dicen que hace unos 13 770 Ma una fluctuación cuántica en el vacío, en la *nada* primigenia, lo originó *todo*: el tiempo y el espacio, la materia y la energía. Sin entrar a comentar los trascendentales procesos que ocurrieron durante los primeros instantes tras el *Big Bang*, se ha calculado que 3 minutos después de esa singularidad la temperatura y densidad del Universo habían disminuido lo suficiente como para que se iniciaran las reacciones de «nucleosíntesis primordial». Así, a los 20 minutos de su origen, un 75 % de la

masa del Cosmos formaba núcleos de hidrógeno (H), casi el 25 % restante eran núcleos de helio (He), y existían también trazas de sus isótopos, de núcleos de litio (Li) y de berilio (Be). Unos 380 000 años más tarde, el progresivo enfriamiento permitió que los electrones comenzaran a interaccionar electrostáticamente con los núcleos, formando átomos. En ese proceso, llamado «recombinación», el Universo se volvió transparente y la radiación pudo viajar sin obstáculos. Así se produjo el fenómeno más poético de la historia del Cosmos: el origen de la luz.

A partir de las irregularidades existentes en la distribución inicial de materia, hace algo más de 13 300 Ma se formaron las primeras estrellas, compuestas por H y He. En las siguientes generaciones que se fueron sucediendo, las reacciones de «nucleosíntesis estelar» originaron progresivamente todos los elementos de la tabla periódica, hasta llegar al hierro (Fe). Para estrellas de entre 0,5 y 9 masas solares, dichos elementos se acabarían dispersando por el espacio en la fase de su evolución conocida como «gigante roja», originando nebulosas: regiones heterogéneas de gas y polvo con diferente contenido en elementos distintos del H y el He (que en astrofísica se llaman genéricamente «metales»). Entre los elementos sintetizados estaban los cinco que, junto al H, son fundamentales para formar las moléculas de la vida tal como la conocemos: carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O), fósforo (P) y azufre (S): el famoso grupo «CHONPS», del que hablaremos. Sin duda, como decía Carl Sagan, somos polvo de estrellas. Por su parte, de forma simplificada podemos decir que en la explosión de las supernovas resultantes de la evolución de las estrellas más masivas se formaron los elementos de número atómico mayor que el Fe, mientras que los más pesados que el oro (Au) fueron originados principalmente en colisiones de estrellas de neutrones.

En las nebulosas, los granos de polvo tienen dimensiones micrométricas. Sus núcleos, formados por silicatos (fundamentalmente compuestos por O y silicio, Si) y grafito (una de las formas estables del C), están recubiertos por hielos de agua (H_2O) y también de otras moléculas como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) o metanol (CH_3OH). El calentamiento de dichos gránulos producido por la actividad estelar, así como la incidencia sobre ellos de radiación cósmica, aportan la energía necesaria para que estas pequeñas moléculas (y los radicales derivados de ellas, con uno o más electrones desapareados y por lo general muy inestables) adquieran movilidad y reaccionen entre sí, dando lugar a compuestos de mayor tamaño. Con ello, la química puede comenzar a desplegar todo su potencial. En el medio interestelar y circumestelar, los investigadores del campo de la astroquímica ya han detectado más de 200 moléculas con un número de átomos típicamente entre 4 y 12, junto a hidrocarburos lineales y cíclicos e incluso fullerenos de 60 y 70 átomos de C. Entre estos compuestos, algunos

como el formaldehído (HCHO), glicolaldehído ($\text{CH}_2\text{OH}-\text{CHO}$, el azúcar más sencillo que existe), cianuro de hidrógeno (HCN), cianoacetileno ($\text{HC}\equiv\text{C}-\text{CN}$), cianamida (NH_2CN), formamida ($\text{CHO}-\text{NH}_2$), urea ($\text{NH}_2-\text{CO}-\text{NH}_2$) o monóxido de fósforo (la molécula $\text{P}-\text{O}$) son especialmente interesantes, ya que pueden funcionar como precursores de las reacciones de química prebiótica.

En paralelo al progresivo enriquecimiento de su diversidad química, en las nubes moleculares aparecen algunas regiones más densas que el resto, en las cuales se forman núcleos de condensación de tamaño creciente. Cuando la masa de estos núcleos es suficientemente grande se inicia el colapso gravitacional que conduce a la formación de nuevas estrellas. En torno a ellas, el material remanente origina discos protoplanetarios, como ocurrió en las inmediaciones del Sol (una estrella que se considera de tercera generación) hace aproximadamente 4570 Ma. Dentro de los discos, al irse agregando los granos de polvo que hemos descrito se forman glóbulos milimétricos, éstos dan lugar a rocas... y ellas a cuerpos llamados «planetesimales» cada vez más grandes. En los capítulos 10 y 11 veremos cómo los meteoritos de tipo condrita y los cometas nos informan sobre la composición química de esos materiales primigenios del Sistema Solar. Continuando el proceso de interacción gravitatoria, la «acreción» progresiva de planetesimales acaba originando planetas de diferentes tamaños y composiciones químicas.

En nuestro caso, en la región más interior del Sistema Solar se formaron planetas pequeños y rocosos, mientras que a mayores distancias del Sol se originaron los gigantes de gas, con Júpiter a la cabeza. Todos ellos serán visitados en los siguientes capítulos, junto a algunos de sus satélites. El tercer planeta que se formó alrededor del Sol, y que había ido aumentando su masa mediante ese proceso de acreción, recibió hace unos 4540 Ma el impacto de un gran protoplaneta del tamaño de Marte, denominado Tea (como la titánide madre de Selene, diosa de la Luna). Esa enorme colisión extrajo gran cantidad de material de la corteza y el manto de la Tierra, que quedó orbitando nuestro planeta como un disco de escombros. Las interacciones gravitatorias entre esos fragmentos irían generando cuerpos progresivamente mayores, hasta formarse la Luna. Así, el sistema Tierra-Luna se stabilizó hace unos 4510 Ma: desde entonces Gea y Selene están gravitacionalmente unidas, influyéndose mutuamente y mirándose día y noche... aunque cada año 3,8 centímetros más lejos.

LA TIERRA PRIMITIVA

Durante más de 100 Ma, la Tierra y la Luna estuvieron sometidas a un intenso bombardeo por los fragmentos de roca y hielo que seguían presentes en un Sistema Solar aún en construcción. Además, nuestro planeta mantenía un elevado calor interno debido a la desintegración radiactiva de algunos de los materiales que lo habían originado. El efecto combinado de ambos procesos generaba una temperatura superficial que hacía imposible la existencia de agua líquida en ella, por lo que tanto el agua contenida en los planetesimales originales como la aportada masivamente por los meteoritos y núcleos cometarios se iba evaporando y formaba gruesas capas de nubes alrededor de la Tierra.

La progresiva disminución de la intensidad del bombardeo meteorítico hizo que la superficie y la atmósfera terrestres se fueran enfriando. Se estima que hace unos 4400 Ma ya se había formado una corteza sólida en la Tierra, al cristalizar el océano de lava fundida presente durante el comienzo del eón Hadeico (un nombre muy adecuado, sin duda). La enorme cantidad de vapor de agua existente en las nubes fue condensándose, lo que produjo lluvias torrenciales durante millones de años: se formaron ríos, torrentes y cataratas, el agua fue disolviendo y arrastrando muchas de las moléculas presentes en las superficies de las rocas, y las zonas más bajas de la corteza acabaron acogiendo un inmenso océano. La Tierra comenzaba a ser un planeta habitable. Y todo indica que en esa época también lo eran Venus y Marte, nuestros vecinos en el Sistema Solar, aunque como veremos su historia fue muy diferente. Existe una notable discrepancia sobre las características físico-químicas de esa hidrosfera terrestre primitiva, que comenzó a interaccionar con la litosfera y con la atmósfera: su temperatura media podría haber sido de entre 40 °C y 80 °C, su salinidad se estima entre 1,5 y 2,5 veces mayor que la de los océanos actuales, y su nivel de acidez o basicidad podría corresponder a valores de pH entre 4 y 9 (recordemos, sobre una escala que va de 0 a 14, con la neutralidad en el pH 7). En cualquier caso, hemos de pensar que el planeta tendría entornos geológicos cada vez más diferenciados, en los que se podrían producir diferentes reacciones químicas, tanto en medio líquido como en su interfase con las rocas.

La atmósfera de aquella Tierra primitiva (una vez perdida en el espacio la envuelta inicial de hidrógeno molecular, H₂, y con el agua ya condensada desde su fase vapor a líquida) era el resultado de la desgasificación de los magmas de la corteza y de las reacciones promovidas en los gases por la radiación solar, que en el rango del ultravioleta era de 5 a 10 veces más intensa que la actual. Así, se estima que hace entre 4400 y 4000 Ma la

atmósfera terrestre estaría formada principalmente por nitrógeno molecular (N_2) y dióxido de carbono, con presencia de otros gases como vapor de agua y monóxido de carbono, o en menor proporción sulfuro de hidrógeno (H_2S), metano (CH_4) e hidrógeno molecular. Durante ese período, la frecuencia de impactos meteoríticos y cometarios que recibió nuestro planeta disminuyó notablemente, por lo que la mayor estabilidad de las aguas y tierras emergidas permitió a la química explorar diferentes escenarios y probar los sistemas catalíticos disponibles. Así pudieron irse sintetizando moléculas orgánicas progresivamente más complejas, a partir de los precursores que (como hemos visto) formaban parte de los planetesimales originales, junto a los compuestos aportados por los mensajeros del espacio que nos habían llegado incesantemente durante la época anterior.

Por tanto, la Tierra era un laboratorio de dimensiones planetarias que ya contenía los tres ingredientes imprescindibles para la aparición de los seres vivos: agua en estado líquido, moléculas orgánicas y fuentes de energía. Tal vez los primeros experimentos químicos que dieron lugar a la vida tuvieron éxito en esta época tan temprana. Esa posibilidad se ha visto apoyada por el descubrimiento de gránulos de grafito en rocas de entre 4100 y 3950 Ma de antigüedad, en los que la relación de isótopos del carbono muestra un desbalance hacia el más ligero, el ^{12}C o carbono-12: dado que los seres vivos que fijan C a partir del CO_2 atmosférico (llamados autótrofos) tienen preferencia por este isótopo frente al ^{13}C y al ^{14}C tal hallazgo podría indicar que ya había vida en esta etapa tan temprana. Sin embargo, también se conocen sistemas abióticos (es decir, no biológicos) que podrían explicar dicha relación isotópica, por lo que realmente resulta imposible determinar si la vida terrestre es tan antigua.

Pero, más allá de nuestro propio planeta, el gigante Júpiter seguía condicionando la dinámica de los cuerpos que formaban el Sistema Solar. Los datos disponibles y los modelos computacionales indican que hace unos 4100 Ma su órbita sufrió una importante fluctuación, y como resultado «empujó» a un gran número de asteroides hacia el interior del sistema, alcanzando de pleno las órbitas de Marte y la Tierra. Así, nuestro planeta volvió a sufrir un intenso bombardeo meteorítico, que para diferenciarlo del inicial suele denominarse «tardío» (o «Late Heavy Bombardment», LHB), desde hace aproximadamente 4000 Ma hasta hace unos 3850 Ma. Si la vida ya se había iniciado en la Tierra, quizás fue eliminada por el efecto «esterilizador» de las temperaturas y presiones asociadas a tantos impactos. Es imposible saberlo. Pero sí está claro que el LHB aportó un repertorio aún mayor de moléculas orgánicas, que desde su llegada se irían combinando con las previamente formadas en nuestro planeta. Cuando tal proceso terminó la Tierra adquirió su tamaño definitivo, con un diámetro medio de

aproximadamente 12 740 km, y su órbita se estabilizó a unos 150 millones de kilómetros del Sol (este valor, correspondiente al semieje mayor de la órbita elíptica terrestre, se define como una «unidad astronómica», ua). Comenzaba una época más tranquila en la historia de un planeta que pronto mostraría toda su creatividad.



Un recorrido por el origen y algunas etapas de la historia del Universo, la Tierra primitiva y la evolución de la bioquímica y la biología. Ilustración de María Lamprecht.

El lienzo estaba listo, la paleta rebosaba de colores y la química había ido preparando sus pinceles: ya podían comenzar a darse los primeros trazos hacia la bioquímica, en lo que se acabaría convirtiendo en el retrato de un ser vivo. Pero, sin un pintor ni un plan de trabajo establecido, la naturaleza probaría numerosas combinaciones de tonos, pinceladas con distintas formas y texturas, se confundiría, lo emborronaría todo, encontraría soluciones valiosas sin haberlo previsto, superpondría capas una y otra vez. No había ningún objetivo. Y tampoco prisa. Pero sobraban energía, colores y disolvente para seguir pintando sin parar. Al cabo del tiempo, entre los muchos lienzos inacabados que se amontonaban en el estudio, podríamos reconocernos en al menos uno de los cuadros que allí quedaron expuestos.

EN BUSCA DEL ORIGEN DE LA VIDA

El origen (u orígenes) de la vida es una de las cuestiones más relevantes que nos podemos plantear desde la ciencia y la filosofía. No contamos con evidencias directas sobre ello, y aunque las leyes de la física y la química nos ayudan a diferenciar entre lo que pudo y no pudo ocurrir en el amanecer de la biología, las dudas superan ampliamente a las certezas. De hecho, siendo honestos, nunca podremos saber cómo empezó la vida. Eso sí, cada vez vamos acotando mejor el repertorio de preguntas clave que salen a nuestro paso en este fascinante camino: ¿cuándo ocurrió?, ¿cómo se produjo esa transición entre lo no vivo y lo vivo?, ¿cuál fue el papel del azar y la necesidad en ese proceso?, ¿hubo un origen único o pudo haber varios orígenes?, ¿la vida comenzó en la Tierra, o su origen fue extraterrestre? Incluso, durante las dos últimas décadas nos estamos planteando algo aún más inquietante: ¿seremos capaces de reproducir un posible origen de la vida en los laboratorios, lo que supondría crear un ser vivo a partir de sus constituyentes químicos?

Las primeras aproximaciones a la naturaleza de la vida y su posible origen fueron planteadas por los filósofos presocráticos, cuya hipótesis de la «generación espontánea» sería posteriormente apoyada por Aristóteles y su escuela desde el siglo IV antes de nuestra era. Según esta intuitiva idea, los seres vivos surgen espontáneamente a partir de la materia no viva en determinadas condiciones: por ejemplo, los pulgones parecían nacer del rocío que se deposita sobre las plantas de madrugada, o las moscas y gusanos aparentemente se originaban desde la carne en descomposición. A pesar de que esta hipótesis carecía de cualquier base científica, los intentos de refutarla no comenzaron hasta el siglo XVII. Y fue el microbiólogo Louis Pasteur quien, en una serie de elegantes experimentos realizados entre 1859 y 1864, demostraría, en sus propias palabras, que «la generación espontánea es una quimera». Pero, si toda vida proviene de otra vida, quedaba flotando en el aire una pregunta fundamental: ¿cómo pudo surgir el primer ser vivo?

En aquella época dorada de la ciencia, un ilustre contemporáneo de Pasteur que nos va a acompañar a lo largo de este libro fue el naturalista Charles R. Darwin, y es a él a quien debemos las primeras reflexiones genuinamente científicas sobre el origen de la vida. En su libro más justamente famoso, *El origen de las especies*, demostró con gran nivel de detalle y profundidad algo que Alfred R. Wallace también había descubierto en paralelo: la selección natural es el motor de la evolución biológica. Pero quizás lo más original de Darwin fue incluir en el sugerente párrafo final de esta obra una frase que pasaría a la historia: «Hay grandeza en esta

concepción de que la vida, con sus diferentes fuerzas, ha sido alentada inicialmente en un corto número de formas o en una sola». Así lo escribió en su primera edición, publicada el 24 de noviembre de 1859 y agotada ese mismo día, aunque para la segunda se vio obligado (entre otros, por su esposa Emma) a introducir la expresión «por el Creador» a continuación de la palabra «inicialmente». En cualquier caso, sin censura o con ella, proponer que toda la biodiversidad que observamos proviene de un origen común era revolucionario, e inauguraba una línea de pensamiento que hoy en día conocemos como «del presente hacia el pasado» o *topdown*: estudiando comparativamente los seres vivos actuales (y los fósiles de formas de vida extintas) podemos encontrar pistas sobre su origen común. Ese es el postulado que nos ha ido permitiendo construir árboles evolutivos a partir de datos morfológicos, bioquímicos o genéticos de los seres vivos.

Poco después, el propio Darwin fue quien sentó las bases de la aproximación complementaria para llegar al origen de la vida, en una inspirada carta que envió a su amigo, el botánico Joseph D. Hooker, el 1 de febrero de 1871. En ella le planteaba que la vida podría haberse originado en «una pequeña charca de agua templada que contuviera todo tipo de sales de fósforo y amonio, luz, calor, electricidad, etc., en la cual un compuesto proteico se formara químicamente, quedando listo para sufrir cambios aún más complejos». Hoy denominamos a esta línea de investigación «del pasado al presente» o *bottom-up*, y consiste en proponer y realizar reacciones químicas viables en las condiciones de la Tierra primitiva que puedan llevar a la aparición de los seres vivos.

El campo del origen de la vida apenas avanzó durante el medio siglo siguiente, hasta que dos grandes científicos, de manera independiente, consolidaron la aproximación *bottom-up* al plantear los primeros modelos sobre la emergencia de los seres vivos desde la química existente en la infancia de nuestro planeta: el bioquímico Alexander I. Oparin en 1924 (a quien, entre otras muchas ideas inspiradoras, le debemos la cétera metáfora de la «sopa primitiva») y el biólogo evolutivo John B. S. Haldane en 1929. Sus modelos, similares en algunos aspectos pero con diferencias notables, elevaban la investigación sobre el origen de la vida a la categoría de disciplina científica. Todos los que trabajamos sobre estos temas somos, en cierta medida, sus herederos.

LA QUÍMICA PREBIÓTICA

Tomando como base los modelos de Oparin y Haldane, el siguiente protagonista fue el químico Stanley L. Miller, quien en 1953 realizó en el laboratorio de Harold C. Urey un experimento cuyos resultados se hicieron rápidamente famosos. Su idea era comprobar si de una mezcla de gases como la supuesta para la atmósfera de la Tierra primitiva (que en esa época se consideraba muy reductora, con compuestos ricos en hidrógeno) podría surgir alguna biomolécula relevante para la vida. Con ese objetivo diseñó y construyó un sistema experimental de vidrio, cerrado y previamente esterilizado, que contenía dos matraces: en uno puso agua y la llevó a ebullición, y en el otro recreó la atmósfera mezclando el vapor de agua con metano, amoníaco (NH_3) e hidrógeno molecular. Sometió dicha mezcla a descargas eléctricas de 60 000 voltios que simulaban las fuentes de energía presentes en la Tierra primitiva, entre ellas las tormentas, el vulcanismo y los impactos de meteoritos o cometas. Al cabo de unos días pudo comprobar que el interior del matraz de reacción se había teñido de color marrón, lo que sugería la formación de compuestos orgánicos en esas condiciones experimentales. Tras analizar dicho material, Miller descubrió que su fracción soluble contenía gran número de aminoácidos (entre ellos, tres de los que constituyen las proteínas: glicina, alanina y ácido aspártico), y otras muchas moléculas orgánicas hoy presentes en los seres vivos. En variantes posteriores del experimento se produjeron más aminoácidos de los contenidos en nuestras proteínas, aunque algunos (como arginina, glutamina, triptófano y tirosina) nunca se han obtenido de esta forma y probablemente fueron biosintetizados empleando ya rutas bioquímicas desarrolladas en los seres vivos.

La aproximación experimental de Miller demostraba que algunas de las primeras biomoléculas en el camino hacia la vida se pueden originar de forma abiótica y a partir de moléculas muy sencillas, siempre que se disponga de una fuente de energía. Una prueba a favor de la validez de este tipo de síntesis (en principio, posible tanto en la Tierra como en entornos extraterrestres) llegó con la caída en 1969 del meteorito Murchison, una condrita carbonácea de la que hablaremos con detalle en el capítulo 10: cuando se analizó su materia orgánica, mostró una composición química muy similar a la obtenida en los experimentos de Miller (el original de 1953 y otros posteriores). Sin embargo, como hemos visto, desde hace medio siglo se propone una atmósfera primitiva mucho menos reductora, y se ha comprobado que experimentos similares al de Miller utilizando esas mezclas de gases producen mucha menor cantidad y variedad de biomoléculas. Por tanto, si nuestra atmósfera inicial era oxidante quizás parte de los aminoácidos que forman nuestras proteínas nos tuvieron que llegar a bordo de meteoritos y núcleos cometarios. En cualquier caso, este trabajo pionero de Miller demostraba que el origen de la vida es abordable por la ciencia experimental, por lo que las preguntas podían trasladarse desde los despachos y bibliotecas

a los laboratorios. Con ello, además, se inauguraba una nueva disciplina científica: la química prebiótica.

El segundo pionero de la investigación experimental sobre el origen de la vida fue el bioquímico Joan Oró, quien, trabajando en Houston, demostró en 1961 que cinco moléculas de ácido cianhídrico (la molécula HCN que ya conocemos, en disolución acuosa) podían combinarse entre sí para formar adenina, una de las cuatro bases nitrogenadas presentes en los nucleótidos de cuya polimerización surgen los ácidos nucleicos, RNA y DNA. Por tanto, si Miller había propuesto una posible vía de síntesis para los monómeros que forman las proteínas, Oró estaba mostrando cómo pudo surgir uno de los componentes clave de los ladrillos estructurales de los polímeros biológicos que almacenan y transmiten la información genética.

Desde entonces, la química prebiótica es una disciplina en constante desarrollo. Gracias al trabajo de muchos científicos se ha descubierto un buen número de reacciones que, partiendo de las moléculas sencillas y las condiciones que podrían existir en la Tierra primitiva, dan lugar a biomoléculas como aminoácidos, nucleótidos, azúcares o lípidos simples. Una de las preguntas abiertas en este campo es el origen de la «homoquiralidad», es decir, por qué la vida escogió una de las dos formas estructurales (que llamamos L y D, simétricas entre sí como nuestras manos izquierda y derecha) que pueden presentar los aminoácidos, los azúcares y los nucleótidos: aún no sabemos el motivo, pero todas las proteínas están formadas por aminoácidos L, mientras que el DNA y el RNA contienen nucleótidos D. Así, el tipo de homoquiralidad elegida para cada biopolímero es una de las características que definen la vida terrestre, y permitiría distinguirla de otra con un origen diferente.

La aproximación *bottom-up* también está mostrando cómo, utilizando superficies minerales u otros catalizadores inorgánicos, se pudieron comenzar a polimerizar los aminoácidos para formar péptidos, y los nucleótidos para originar cadenas cortas de ácidos nucleicos. Durante los últimos años ha irrumpido con fuerza en este campo la denominada «química prebiótica de sistemas», que plantea escenarios más complejos (y por tanto más realistas) para la aparición de las primeras mezclas heterogéneas de biomoléculas de cuya combinación pudo surgir la vida.

DE LA QUÍMICA A LA BIOLOGÍA

Desde la química prebiótica hasta la aparición de los primeros seres vivos tuvo que recorrerse un largo y complicado camino, pues (como vimos en el capítulo anterior) para que un sistema pueda reproducirse y evolucionar ha de combinar tres componentes fundamentales: un compartimento, una red metabólica y una molécula con información heredable. Por ello, la pregunta clave que se planteaba desde la época de Miller y Oró era cuál de los tres biopolímeros principales de los seres vivos apareció antes. En todas las células, la información genética está codificada en la secuencia de nucleótidos del DNA, y se expresa en el sentido DNA → RNA → proteína. Pero la replicación del DNA es realizada por una proteína (una de las llamadas «enzimas», que catalizan prácticamente todos los procesos que ocurren en las células), por lo que estamos ante una paradoja similar a la del huevo y la gallina, aunque en el ámbito de la biología molecular: sin DNA no pudieron surgir las proteínas... y viceversa.

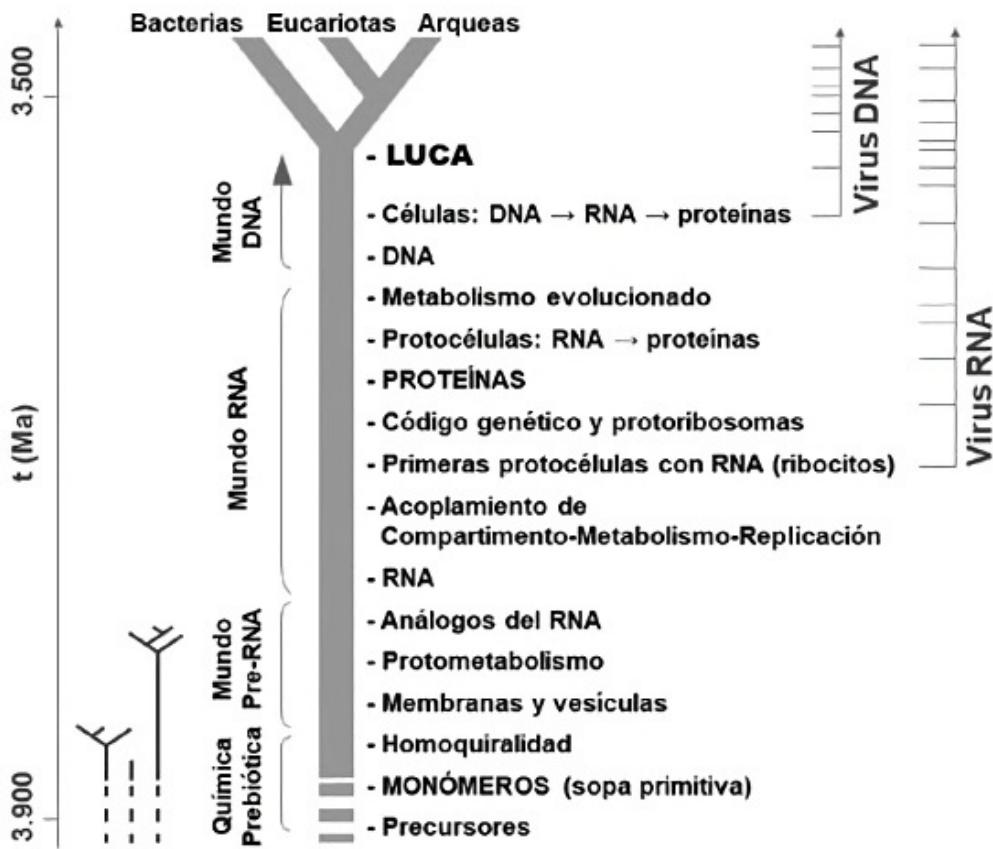
Tras varias décadas de investigación, pensamos que la clave está en la molécula intermediaria entre ambas, el RNA, debido a su versatilidad estructural y funcional. Así, las evidencias experimentales apoyan la hipótesis del «Mundo RNA», según la cual este biopolímero habría sido anterior al DNA y a las proteínas porque podía funcionar simultáneamente como genotipo (archivo de información genética) y como fenotipo (catalizador de reacciones, entre ellas quizá su propia replicación), que son las dos caras de la moneda de la vida. El modelo del Mundo RNA todavía tiene importantes cuestiones que resolver, pero en diferentes laboratorios realizamos experimentos de «evolución *in vitro*» para tratar de identificar distintos tipos de RNA funcionales, como «aptámeros» (que se unen con gran afinidad y especificidad a sus moléculas diana) y «ribozimas» (que catalizan procesos de forma análoga a como lo hacen las enzimas proteicas). Uno de los objetivos sería llegar a encontrar una molécula de RNA capaz de autorreplicarse, similar a las que podrían haber protagonizado la transición entre la bioquímica y la biología.

En paralelo a esta línea de trabajo, que va en busca de la «replicación primordial», otros científicos defienden el «metabolismo primigenio», manteniendo que antes de la aparición de la primera molécula autorreplicativa fue necesario establecer una red de reacciones químicas automantenidas en el interior de un compartimento. Afortunadamente, los avances en química prebiótica de sistemas han aproximado estas dos líneas de investigación, ya que según comentábamos sólo de la combinación exitosa de compartimento, metabolismo y replicación pudieron surgir los primeros seres vivos. Con ello, además, se propone que los escenarios tradicionalmente considerados como alternativos y excluyentes para el origen de la vida (por ejemplo, los pequeños charcos de agua templada en la superficie, las interfasas agua/roca o las surgencias hidrotermales submarinas) pudieron en realidad ser

complementarios en la Tierra primitiva: cada uno de ellos facilitaría la síntesis de una serie de moléculas o de estrategias bioquímicas que más tarde se combinarián en el camino hacia la biología. Merece la pena recordar esta diversidad de escenarios cuando en los próximos capítulos visitemos otros planetas o satélites prometedores para la vida.

Teniendo todo esto en cuenta, la versión actualizada del modelo del Mundo RNA propone que entre la química prebiótica y las primeras células hubo una etapa protagonizada por protocélulas denominadas «ribocitos»: en ellas el RNA funcionaría como genoma, y las reacciones metabólicas necesarias para el mantenimiento del sistema serían realizadas por ribozimas y otras moléculas catalíticas (entre ellas péptidos o determinados compuestos orgánicos presentes en la Tierra primitiva). Probablemente en esa época surgieron los primeros virus con genoma de RNA, como moléculas capaces de utilizar o «parasitar» la maquinaria que se estaba optimizando en los ribocitos: así lograrían que su propia secuencia de nucleótidos fuera replicada (produciendo muchos errores o mutaciones) y podrían migrar entre protocélulas, «infectándolas» y repitiendo el proceso. En los laboratorios, la investigación con virus RNA actuales (formados por un genoma, una cubierta de proteínas y en ocasiones una membrana) y viroides (parásitos más sencillos, sólo encontrados en plantas y que están constituidos por una única molécula de RNA de pequeño tamaño) nos ayuda a entender la dinámica replicativa y las capacidades adaptativas en aquel lejano Mundo RNA.

Sin entrar en detalles, cuando en esos ribocitos comenzara a traducirse a proteínas parte de la información del RNA (lo que implicaría que ya se había establecido el código genético y se habían originado los ribosomas primitivos) pudo darse el paso a un «Mundo RNA-proteínas». Más adelante, algunas proteínas catalíticas comenzarían a copiar la secuencia de nucleótidos del RNA en otro tipo de ácido nucleico, el DNA, cuyos monómeros se podrían haber originado con anterioridad y que resultaría más estable como archivo de información. Surgía así el «Mundo DNA-RNA-proteínas», que desde entonces ha escrito la historia de la vida. En esa época aparecerían los primeros virus con genoma de DNA que, como en el caso anterior, han seguido siendo compañeros inseparables del mundo celular.



Principales eventos ocurridos durante el origen y la evolución temprana de la vida en la Tierra, a lo largo del tronco del árbol que conecta los precursores químicos con LUCA. Los árboles evolutivos más pequeños muestran la posibilidad de que la vida surgiera más de una vez y se diversificara hasta cierto punto en distintos entornos de nuestro planeta. Se indica también las posibles épocas en las que se originaron los virus con genoma de RNA y de DNA. Figura elaborada por el autor.

MI APELLIDO ES LUCA

En la metáfora del árbol de la vida, una de las más sugerentes que habitualmente utilizamos, la química prebiótica forma las raíces que encuentran su sustento en las características físico-químicas de la Tierra primitiva. Las biomoléculas de complejidad creciente y las protocélulas que hemos comentado van ocupando posiciones cada vez más altas a lo largo del tronco del árbol, hasta llegar al punto en el que éste empieza a ramificarse. Justo en ese lugar, antes de que comience la diversificación de la vida, es donde estaría el antepasado universal de todos los seres vivos planteado por Darwin al final de *El origen de las especies*. Pero ¿realmente existió un ancestro común de toda la biodiversidad que nos rodea?

La aproximación *top-down* hacia el origen de la vida se ha basado en la comparación de las características fenotípicas y genotípicas de buena parte de las especies conocidas. Desde finales de la década de 1970, la posibilidad de conocer la secuencia de determinados genes en los genomas de numerosos seres vivos permitió establecer una nueva disciplina, denominada «filogenia molecular». Utilizando sus herramientas bioinformáticas es posible traducir distancias genéticas entre dos especies (medidas como el número de mutaciones que diferencian la secuencia del gen comparado) en el tiempo transcurrido desde la divergencia entre ambas. Si se realiza este proceso de forma sistemática para un gran número de especies, trabajo en el que destacó el biofísico y microbiólogo Carl R. Woese, se obtienen árboles filogenéticos que constituyen el punto de encuentro entre la taxonomía y la evolución. De esta forma, durante la década de 1980 se logró demostrar que sí existió el antepasado global predicho por Darwin casi 130 años antes. Se denominó «progenote» o LUCA (por las iniciales en inglés de *Last Universal Common Ancestor* o «último ancestro común universal») a esa especie celular de la que derivamos todos los seres vivos conocidos. Quizá nuestro nombre no sea Luca, como la protagonista de aquella canción de Suzanne Vega, pero nuestro último apellido sí lo es.

Evidentemente, pensando en ese inmenso laboratorio que era la Tierra primitiva, nada impide que pudieran producirse diferentes orígenes de la vida en distintos entornos, como arbustos y pequeños árboles creciendo en el mismo suelo de nuestra metáfora. Pero LUCA representa el punto culminante del único origen de la vida que resultó suficientemente robusto como para resistir las presiones selectivas que estarían operando, y que logró generar la biodiversidad que ha dominado la Tierra desde entonces.

Cronológicamente, suponemos que LUCA vivió entre hace 3900 y 3700 Ma, cuando se iniciaba esa época más tranquila de la Tierra primitiva que hemos comentado. No se pueden estudiar directamente las características que tuvo LUCA, pero sí sabemos que era una especie unicelular, quizás similar a las actuales bacterias aunque con un genoma (de DNA) muy reducido, y que sus menos de 1000 genes le permitían realizar todas las funciones celulares básicas. Un tema en discusión es si LUCA era autótrofo (es decir, podía extraer energía de los compuestos reducidos presentes en las rocas o bien de la luz solar, fijando carbono desde el CO₂) o heterótrofo (su metabolismo utilizaba los compuestos orgánicos disponibles en el medio). De hecho, muchos autores prefieren hablar no de un LUCA, sino de varios «LUCAs», para referirse a la comunidad de entidades celulares, genética y metabólicamente complementarias entre sí, que pudieron convivir en la parte más alta del tronco común del árbol de la vida.

A partir de LUCA (o de LUCAs), la evolución biológica condujo a la progresiva diversificación de todas las formas de vida, tanto extintas (de las

que en algunos casos tenemos información por sus fósiles) como actuales. Expresando en lenguaje de hoy lo que Wallace y Darwin descubrieron durante la primera mitad del siglo XIX, podríamos decir que la evolución por selección natural se basa en que los errores inevitablemente producidos durante la replicación de los genomas de los seres vivos (mutaciones y otro tipo de reordenamientos genéticos) originan un cierto grado de diversidad fenotípica en su descendencia. Así, los miembros de la progenie responderán de forma diferente a las presiones selectivas que introduzca el ambiente, y los individuos (o las especies) que mejor se adapten generarán más descendencia. Ese proceso, ciego, imprevisible y maravilloso, es el que nos ha traído hasta aquí. Como el genetista Theodosius Dobzhansky tituló en 1973 uno de sus ensayos, «Nada tiene sentido en biología excepto a la luz de la evolución».

AZAR, NECESIDAD... ¿Y PANSPERMIA?

Como acabamos de ver, actualmente pensamos que nuestro planeta comenzó a estar habitado poco después de empezar a ser habitable. Por tanto, el origen de la vida habría sido un proceso muy rápido (a escala geológica), y para algunos autores esto indica que la emergencia de la biología a partir de la química responde a un cierto determinismo o «necesidad» inherente a la materia, que conduciría a dinámicas autoorganizativas y autorreplicativas una vez que se alcanza un determinado grado de complejidad molecular. En ese caso sería probable que la vida hubiese surgido en numerosos lugares del Universo, y además lo habría hecho siguiendo unos principios generales (no necesariamente unas biomoléculas) comunes. Pero, por el contrario, el origen pudo deberse a una sucesión muy afortunada de eventos de azar, casualidades que quizás sólo se habrían podido producir en nuestro planeta y por tanto estaríamos solos en el Cosmos. Recordemos la cita con la que terminábamos el primer capítulo.

Así, desde que Demócrito planteó que «todo lo que existe en el Universo es fruto del azar y la necesidad», cuando algunos científicos han reflexionado sobre el origen de la vida se han mostrado más partidarios de la necesidad (destacando entre ellos el químico Robert Shapiro, el paleontólogo Stephen Jay Gould o el biólogo celular Christian de Duve), mientras que otros han sido firmes defensores del azar (como argumentó el biólogo Jacques L. Monod en su famoso libro *El azar y la necesidad. Ensayo sobre la filosofía natural de la biología moderna*, publicado en 1970). Entre esas dos posturas

extremas, probablemente en el camino hacia la vida se combinaron ambos procesos: a partir de una química compleja con tendencia a autoorganizarse pudieron existir eventos casuales o no deterministas que condujeron a la aparición del primer sistema capaz de autorreproducirse y evolucionar. Y una vez que entra en escena la reproducción (siempre asociada a su correspondiente tasa de error) los caminos que puede seguir la vida (sin desligarse de una cierta necesidad, ya que la selección actúa en cada momento sobre lo que previamente existe) comenzarían a estar fuertemente condicionados por el azar.

Un proceso totalmente dependiente de las casualidades, con el que además se busca resolver la cuestión del poco tiempo transcurrido hasta que apareció la vida en nuestro planeta, es la hipótesis conocida como «panspermia microbiana» o «litopanspermia». Según esta idea, los primeros seres vivos unicelulares se habrían originado fuera de la Tierra, llegando hasta aquí tras un largo viaje a bordo de meteoritos o de núcleos de cometas. Esta hipótesis es muy antigua, pues ya Anaxágoras había sugerido en el siglo V antes de nuestra era que las «semillas o infinitesimales de la vida» podrían formarse en todos los lugares del Cosmos donde las condiciones fueran favorables. En 1865, el biólogo Hermann Richter retomó aquellas ideas para proponer (sin apoyarse en pruebas experimentales) que los microorganismos están presentes en todo el Universo y pudieron «inocular» la vida en nuestro planeta. El químico Svante A. Arrhenius continuó esta corriente a partir de 1908, manteniendo que la vida se había originado en el espacio exterior y los microorganismos viables (o sus esporas) pudieron ser transportados hasta la Tierra gracias a la acción de la presión de la radiación estelar.

Durante el último medio siglo, dicha hipótesis ha sido llevada hasta su extremo por los astrónomos Fred Hoyle y Chandra Wickramasinghe, afirmando incluso que cada vez que nuestra especie sufre una epidemia o pandemia es porque el patógeno correspondiente nos ha caído del cielo. Así, Wickramasinghe no ha dudado en proponer a comienzos de 2020 que la pandemia de COVID-19 se originó con una «lluvia de estrellas» observada desde China en octubre de 2019 (las Oriónidas, fragmentos de la cola del cometa Halley desintegrándose en nuestra atmósfera), que trajo a nuestro planeta el coronavirus SARS-CoV-2. Nada menos. En paralelo, durante la década de 1960 se propuso una variante conocida como «panspermia dirigida», que es aún más imaginativa: la vida terrestre se habría desarrollado a partir de microorganismos formados en otro lugar del Universo, que fueron sembrados deliberadamente aquí por una inteligencia extraterrestre. Aunque algunos investigadores relevantes apoyaron en algún momento esta hipótesis, en la actualidad no tiene ningún sentido hablar sobre ello en un contexto científico.

Más allá de la constatación de que los microorganismos pueden sobrevivir dentro de las rocas (como veremos en el siguiente capítulo), no hay ninguna prueba a favor de cualquiera de las variantes de la panspermia microbiana. Además, en realidad esta hipótesis no responde a las preguntas sobre el origen de la vida: únicamente las cambia de lugar. Por otra parte, si con ella se pretende resolver el problema del tiempo disponible hasta la aparición de los primeros seres vivos, hay que recordar que todo el Sistema Solar (desde donde podrían habernos llegado esos supuestos microorganismos a bordo de meteoritos o núcleos cometarios) se formó a la vez, hace unos 4570 Ma.

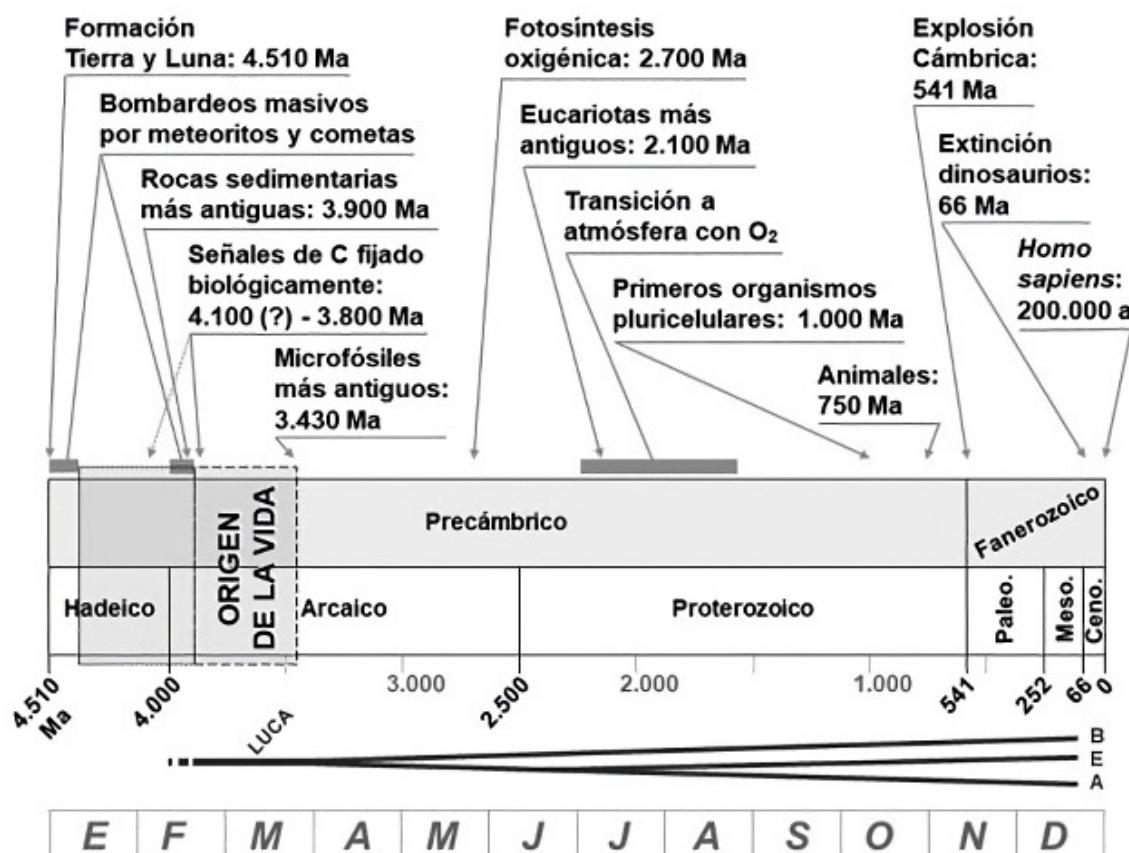
Sin embargo, frente a esta panspermia microbiana altamente improbable, es perfectamente posible que se produjera una «panspermia molecular», es decir, que los mensajeros del espacio llegados masivamente a la Tierra primitiva aportaran una serie de compuestos orgánicos que pudieron ser fundamentales para el origen de la vida terrestre. Lo comentaremos cuando en nuestro viaje aparezcan los meteoritos y los cometas, aunque podemos ir pensando sobre ello con un símil gastronómico. Imaginemos que en un pueblo de Castilla varios cocineros creativos están preparando una sopa (prebiótica, por supuesto) con una mezcla de los mejores ingredientes que tienen a mano... pero el sabor deseado no acaba de conseguirse: en ese momento llega (como caído del cielo) un chef japonés con un frasco de wasabi, producto desconocido en aquellas tierras, y con él le da el toque exótico que convierte esa sopa en una receta que será recordada durante generaciones.

A LA LUZ DE LA EVOLUCIÓN

Volviendo a la historia de la vida, a partir de un origen terrestre (como pensamos) o extraterrestre (mucho más improbable) de LUCA, la primera bifurcación desde el tronco del árbol originó dos grandes ramas de seres vivos unicelulares, que constituyen los dominios filogenéticos Bacteria y Archaea. Bacterias y arqueas son microorganismos procarióticos (es decir, sin núcleo definido) muy diferentes entre sí, y su progresiva diversificación les permitió colonizar numerosos nichos ecológicos del planeta, desarrollando variados metabolismos. Algunos de ellos dejaron los primeros fósiles de los que tenemos constancia, como comentaremos en la conversación final de este capítulo. Aunque continuamente se proponen alternativas, hay un amplio consenso sobre la antigüedad de 3430 Ma para las primeras huellas fósiles

conocidas. Corresponden a «estromatolitos»: capas mineralizadas de comunidades formadas por bacterias (similares a los tapetes microbianos actuales) en las que distintas especies interaccionaban entre sí y establecían relaciones ecológicas.

Mientras tanto, el árbol de la vida seguía creciendo y sus ramas iban divergiendo progresivamente. Pero además de esa diversificación «vertical» existían (y existen) muchas conexiones entre ramas que muestran la transferencia horizontal de genes producida constantemente entre distintos linajes, y a la cual los virus y otras entidades replicativas subcelulares contribuyen decisivamente. Por tanto, aunque al carecer de metabolismo los virus no pueden considerarse auténticos seres vivos, han sido (y seguirán siendo) agentes fundamentales para la evolución de la vida. Si imaginamos los genomas celulares como poemas, los virus serían versos sueltos que entran y salen de ellos. Así, como resultado de esta constante «mezcla» de ramas se ha propuesto que en lugar de la metáfora del árbol deberíamos imaginar la evolución como un arbusto o, mejor, una enredadera.



Representación de la historia de la Tierra, dividida en los correspondientes eones y eras, mostrando algunas de las principales etapas en el origen y la evolución de la vida. Bajo la línea de tiempo aparece el árbol que se diversifica hasta formar los tres dominios filogenéticos: Bacteria, Eukarya y Archaea. En la parte inferior se muestra la equivalencia de los 4510 Ma con un año: las 0:00:00 h del 1 de enero corresponderían al origen del sistema Tierra-Luna, en marzo comenzaría la vida (como la primavera en

un año real) y a las 23:59:59 h del 31 de diciembre estaríamos en el momento actual. Figura elaborada por el autor.

A partir de este punto, abrochémonos los cinturones porque vamos a acelerar al máximo la película de la coevolución biosfera-Tierra. La tectónica de placas se instauró de forma global en nuestro planeta hace entre 3300 y 2500 Ma, por lo que al comienzo del eón Proterozoico ya se había generalizado el reciclaje de materiales que resulta fundamental para el mantenimiento de la vida. Hace unos 2700 Ma algunas bacterias acuáticas comenzaron a realizar fotosíntesis oxigénica, un tipo de metabolismo autotrófico que aprovechaba la luz del Sol para fijar CO₂, y como subproducto generaba oxígeno molecular (O₂). Este era un gas prácticamente inexistente en nuestro planeta, y en primer lugar reaccionó con la gran cantidad de compuestos oxidables que estaban disueltos en los océanos. Finalizado este proceso, el oxígeno que se seguía biosintetizando comenzó a burbujejar desde las aguas y a acumularse en la atmósfera hace unos 2000 Ma. Ante la aparición de ese gas, venenoso para la vida de la época, algunos microorganismos se refugiaron en nichos anóxicos y mantuvieron sus metabolismos anaerobios anteriores, mientras que otros comenzaron a utilizarlo desarrollando una nueva estrategia metabólica, muy eficiente desde el punto de vista energético: la respiración aerobia.

Hace entre 2000 y 1500 Ma aparecieron los primeros representantes del dominio filogenético Eukarya, el tercero en el que se clasifican los seres vivos. Las células eucariotas son estructuralmente más complejas que las procariotas, mostrando un núcleo definido que contiene su genoma, así como un complejo sistema de membranas internas y orgánulos especializados. El origen de los primeros microorganismos eucarióticos es un tema de investigación muy activo en la actualidad, y se han planteado diversos modelos basados en la simbiosis entre bacterias y arqueas, en los que estas últimas originaron el núcleo eucariótico. Sin entrar en detalles, una de las hipótesis se basa en la evolución a partir de un tipo concreto de arqueas (pertenecientes al linaje *Asgard*, cuyo nombre es un guiño a la mitología nórdica), que habrían interiorizado una bacteria (similar a las alfaproteobacterias actuales) de la cual provendrían las mitocondrias, orgánulos clave en el metabolismo energético eucariótico. Un modelo alternativo apunta a la internalización de la arquea dentro del citoplasma de una deltaproteobacteria, seguida de un nuevo evento de endosimbiosis que daría lugar a las mitocondrias. En cualquier caso, somos el resultado de uno o más procesos de fagocitosis o digestión celular que no llegaron a completarse: es decir, el fruto de la indigestión. Posteriormente, en una rama eucariótica del árbol se produjo otra endosimbiosis, esta vez de cianobacterias, que

originó los cloroplastos de los eucariotas fotosintéticos: las algas verdes y rojas, y más tarde las plantas.

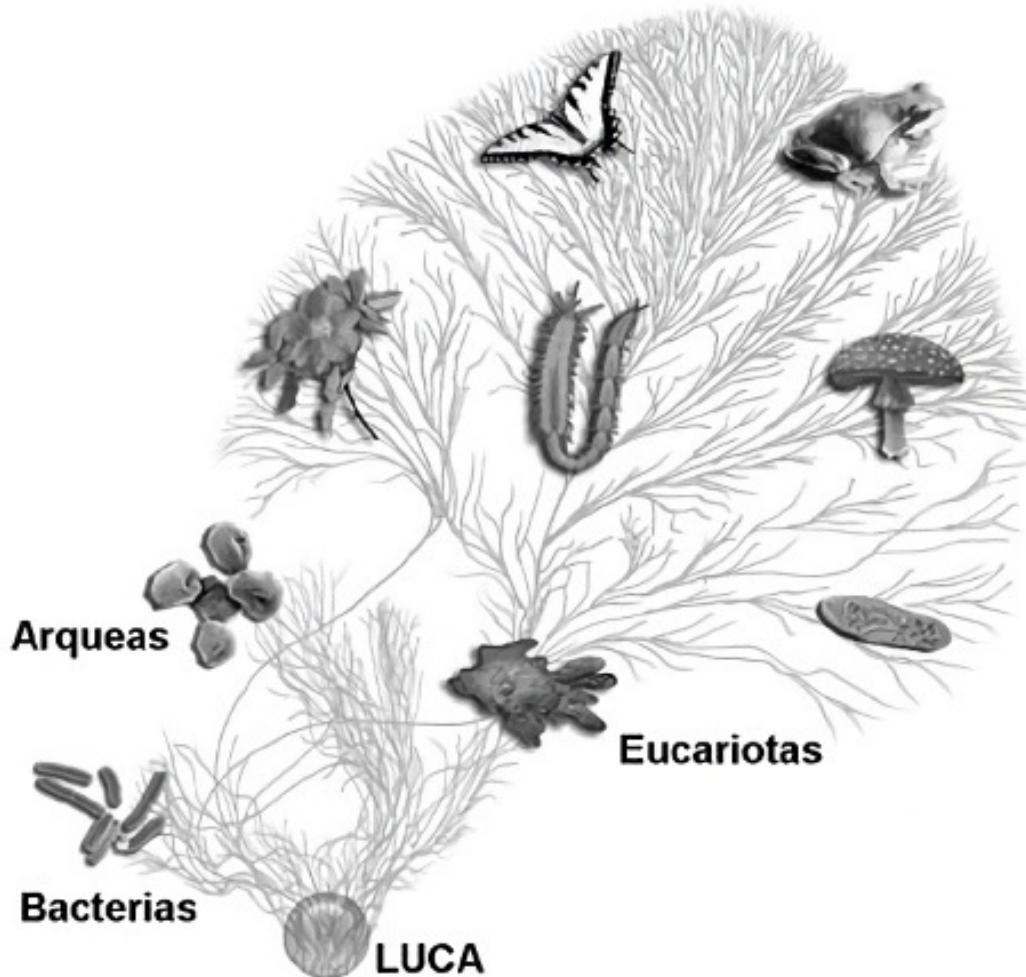
QUIÉNES SOMOS

Hace unos 1000 Ma, la atmósfera terrestre tenía una composición ya muy similar a la actual: 78 % de N₂, 21 % de O₂, 0,9 % de argón y trazas de CO₂ y otros gases. Durante esa época, gracias entre otros factores al O₂ disponible, en diferentes linajes de eucariotas apareció una forma de organización que las bacterias apenas habían explorado: la pluricelularidad. De los cuatro reinos eucarióticos que distinguimos en la actualidad, los protistas siguen siendo unicelulares mientras que los otros tres (plantas, hongos y animales) son pluricelulares. La vida pluricelular es la única que vemos sin ayuda del microscopio (y por tanto la habitualmente considerada cuando se habla de preservar la biodiversidad) pero representa sólo el 15 % de las especies conocidas. Realmente la Tierra es, desde su origen, un planeta dominado por los microorganismos. En cualquier otro lugar donde se pueda haber originado la vida, aunque fuera bioquímicamente similar a la nuestra, su evolución no tendría por qué haber conducido a la aparición de los eucariotas... y mucho menos a los pluricelulares. Pensémoslo a lo largo de este libro.

Convertirse en un organismo pluricelular requiere que las células (inicialmente iguales entre sí) se vayan especializando en realizar distintas funciones. En algunos linajes eucarióticos esto condujo a un sistema de reproducción sexual, muy ventajoso para generar diversidad, en el que las células germinales de los progenitores pervivirán en la siguiente generación, mientras que todas las demás (llamadas somáticas) dejan de ser necesarias una vez que el proceso reproductivo ha terminado. Con ello aparecía en nuestro planeta algo que no era una consecuencia de la vida (iniciada 2500 Ma antes) sino de la pluricelularidad y la reproducción sexual: la muerte.

La evolución posterior de los organismos pluricelulares estuvo condicionada por la Explosión cámbrica, una etapa de diversificación rápida iniciada hace 540 Ma que condujo a la aparición de los planes anatómicos de la mayor parte de los animales actuales, y a la diferenciación clara entre depredadores y presas. Hace unos 66 Ma, la caída de un gran meteorito (del que volveremos a hablar) produjo la extinción masiva de biodiversidad ocurrida a finales del Cretácico, en la que desapareció buena parte de las

especies pluricelulares incluyendo la totalidad de los dinosaurios. Así, aquel impacto (de nuevo, un evento casual) permitió que otros grupos de animales, en particular los mamíferos, se diversificaran y ocuparan numerosos nichos ecológicos. Actualmente, en el último fotograma de esta larga y trepidante película, nuestro planeta acoge cientos de millones de especies unicelulares y pluricelulares, junto a innumerables virus y otras entidades replicativas que las parasitan, conectadas entre sí a través de complejas redes ecológicas.



Representación esquemática del árbol de la vida, mostrando los tres dominios filogenéticos (con un sesgo claro hacia los eucariotas pluricelulares, que sólo deberían suponer el 15 % del total) y algunas ramas que los conectan mediante transferencia horizontal de genes. Figura modificada por el autor a partir de *Tree of Life Web Project*.

Y, entre toda esta biodiversidad, nosotros. Desde el punto de vista biológico los humanos no somos especiales, ni éramos necesarios, ni había nada en la química de aquella sopa primitiva que permitiera predecir nuestro origen... o que «tendiera» hacia él. No ocupamos la cima de una inexistente pirámide evolutiva, sino una más de las ramas que constituyen el árbol de la vida. Otro fruto del azar y la necesidad. Pero los paleoantropólogos nos enseñan que, a lo largo del linaje del género *Homo*, las capacidades de nuestro cerebro se han

ido desarrollando de forma imparable y nos han llevado a protagonizar una rápida evolución cultural. Hemos transformado el mundo, escribimos poemas y miramos al cielo preguntándonos si estamos solos.

Mientras tanto, recordando a Galileo Galilei, «el Sol, con todos los planetas que rotan a su alrededor y dependen de él, sigue haciendo madurar los racimos de uvas como si no tuviese otra cosa que hacer en el Universo».



Un café con... Emmanuelle Javaux



Doctora en Geología. Catedrática de la Universidad de Lieja y Directora del Laboratorio de Rastros Tempranos de Vida, Evolución y Astrobiología (Lieja, Bélgica).

Como experta en micropaleontología que eres, Emmanuelle, me gustaría comenzar esta conversación preguntándote por los fósiles más antiguos que se conocen, ya que algunas de las supuestas evidencias de vida temprana en la Tierra son muy controvertidas: a día de hoy, ¿cuándo podemos decir que los seres vivos habían dejado sus primeras huellas?

Actualmente consideramos que la Tierra ha sido habitable durante unos 4300 millones de años (Ma), es decir, comenzó a serlo poco después de su formación. Pero esto no quiere decir que estuviera habitada tan pronto, claro. Desde esa época, los posibles rastros de vida que se han preservado pueden ser morfológicos o químicos, aunque su interpretación se ve en ocasiones comprometida por los procesos abióticos que los alteran o incluso los imitan, así como por la posible contaminación posterior. A pesar de estas dificultades se ha avanzado mucho gracias a las mejoras en las técnicas analíticas en la

micro y nanoescala, así como por la consideración del contexto geológico en el que aparecen las biofirmas.

Los restos inequívocos y más antiguos de vida que conocemos en la Tierra, como estromatolitos, tapetes microbianos y microfósiles, *combinados* (y esto es importante) con la composición isotópica *in situ* de los materiales o minerales carbonatados, apoyan firmemente la presencia de una biosfera microbiana en entornos marinos desde hace unos 3400 Ma, y en hábitats terrestres desde 200 Ma después.

Y suponemos que esos primeros microorganismos eran bacterias, ¿verdad?

Efectivamente. Sobre la aparición de los tres dominios filogenéticos de la vida, los datos más convincentes indican que los primeros representantes de Bacteria dejaron sus huellas fósiles hace 3430 Ma, los de Archaea hace 2800 Ma, y los de Eukarya hace 1650 Ma. Esto muestra el origen temprano de la vida microbiana, y también marca el punto de partida de la evolución de sus metabolismos e innovaciones biológicas. Señales de vida más antiguas pero muy controvertidas llegarían hasta una antigüedad de 4100 Ma, aunque éstas pueden ser explicadas también mediante procesos abióticos, por lo que no me parecen convincentes, tal como expuse en una revisión publicada en la revista *Nature* en agosto de 2019.

¿Y cómo son las huellas fósiles de esa primera biosfera microbiana conocida?

El caso mejor documentado hasta ahora es el conjunto de estromatolitos de la Formación Streeley Pool (SPF), en Australia, con la antigüedad que indicaba de 3430 Ma. Su biogenicidad ha sido discutida, pero la caracterización del contexto geológico (plausible para la vida: una plataforma marina carbonácea, hipersalina o evaporítica, de poca profundidad), así como los detallados estudios multiescala realizados, suponen una combinación de pruebas que apoya su origen biológico. La evidencia más convincente está en la morfología ramificada y cónica de estos estromatolitos, con capas de espesores variables vinculadas lateralmente a carbonatos laminados planos, ya que hasta ahora no hay pruebas de que estas características puedan tener un origen abiótico.

Dichas morfologías varían a lo largo de varios kilómetros en la plataforma carbonácea, en función de las condiciones hidrodinámicas y la profundidad del agua. Ese mismo patrón se repite en diferentes plataformas, y también verticalmente en respuesta al cambio del nivel del mar, lo que informa sobre la ecología de los arrecifes microbianos. Algunos de los materiales internos de los estromatolitos preservan las capas orgánicas, las firmas isotópicas del C y S compatibles con su fijación biológica y los elementos N y S presentes

en partículas carbonáceas. Todo ello es indicativo de una química consistente con múltiples metabolismos microbianos. Los compuestos orgánicos no se conservan en todos los tipos de estromatolitos, pero cuando lo están se encuentran distribuidos de forma no aleatoria en los domos (las láminas convexas en forma de cúpula): los biopolímeros orgánicos se concentran en las pendientes laterales, pudiendo servir como molde para la precipitación pasiva y la captura de minerales.

¿La forma de esos estromatolitos indica que las capas superiores estaban ya habitadas por microorganismos fotosintéticos?

Si de estos estromatolitos de 3430 Ma se pueden inferir características metabólicas, podríamos pensar que las capas superiores crecieron ascendentemente en busca de la luz, claro... lo que sugeriría que en esa edad tan temprana ya había aparecido un metabolismo autotrófico como la fotosíntesis (anoxigénica u oxigénica). Pero esa curvatura también podría deberse a la competición por nutrientes en otros tipos de metabolismo. En cualquier caso, tales estromatolitos proporcionan una edad mínima para las bacterias en las que se originó el metabolismo correspondiente, por lo que el último ancestro común de este dominio filogenético (el «Last Bacterial Common Ancestor», LBCA) sería anterior a los 3430 Ma. Entonces LUCA habría aparecido aún antes y el origen de la vida se habría producido todavía más pronto.

Por lo que estás comentando, quizá los primeros sistemas que podemos considerar «seres vivos» aparecieron hace unos 3700 o 3800 Ma. En ese caso, ¿la vida tuvo suficiente tiempo para surgir del repertorio químico presente en nuestro planeta hace no más de 4300 Ma, considerando además el efecto potencialmente esterilizante del bombardeo masivo tardío iniciado hace unos 4000 Ma?

Probablemente sí hubo tiempo suficiente para que la vida se originara en nuestro planeta, ya que quizá el proceso no tarda tanto una vez que se dan las condiciones locales y están presentes los ingredientes adecuados. Tal vez lo más difícil viene después: mantener la vida en un planeta que necesita permanecer habitable. El período en el que se produjo el bombardeo masivo tardío (al menos entre 4000 y 3900 Ma) ha sido discutido de nuevo recientemente: quizá duró más tiempo, pero a cambio fue menos intenso y no esterilizante. En ese caso, la vida podría haber sobrevivido al bombardeo si en la corteza se mantuvo suficiente cantidad de agua líquida, como indican algunos modelos en los que los océanos no se vaporizaron por completo. Por el contrario, si el bombardeo tardío realmente fue esterilizante la vida sólo pudo aparecer después de que éste terminara.

Entonces, si el tiempo disponible para la transición entre la química y la biología nos pareciera demasiado corto en nuestro planeta, ¿sería razonable considerar que seres vivos ya formados pudieran haber viajado hasta aquí a bordo de meteoritos o núcleos de cometas, como propone la hipótesis de la panspermia? ¿O esto sólo cambia de lugar el problema sin resolverlo?

Realmente no sabemos cuánto tiempo lleva formar vida a partir de la química. Los cometas y meteoritos contienen moléculas orgánicas pero no seres vivos (que sepamos hasta ahora), y lo que se necesitaba para el origen de la vida ya estaba disponible en la Tierra temprana: agua líquida en contacto con minerales y energía química además de la radiación proveniente del Sol. No ayuda a resolver la cuestión del origen de la vida pensar que surgió en un entorno extraterrestre y después vino hasta la Tierra. Como bien dices, eso no es más que mover el problema a otro lugar. Y si ese fue el caso, no sabemos cuál sería dicho entorno ni qué condiciones tenía, por lo que no podemos probar tal hipótesis. Si encontramos vida en otra parte y tiene las mismas características que la terrestre, será difícil pensar que no se trata de una contaminación en la misión espacial. Esperemos descubrir algún tipo de vida que resulte diferente a la de nuestro planeta, aunque también esté basada en la química del carbono, para poder así asegurar que es extraterrestre.

¿Crees que la combinación de un comportamiento, una maquinaria metabólica y la replicación de un material hereditario es un requisito para cualquier tipo de vida que podamos encontrar en otros lugares, independientemente de la naturaleza de las (bio)moléculas implicadas en la formación y mantenimiento de estos tres componentes básicos?

¡Sí! Así es como definimos la vida, cualquier tipo de vida. También creo que estará basada en carbono y agua líquida. La química orgánica abiótica es rica y común en el Universo, mientras que el silicio construye minerales pero no vida... Por su parte, el agua líquida tiene propiedades únicas, es un medio en el que la química orgánica funciona muy bien y puede evolucionar hacia una materia más compleja que luego dé lugar a la vida.

Volviendo a la Tierra, se han propuesto diferentes hipótesis para explicar el origen de las células eucariotas a partir de sus ancestros bacterianos y arqueanos. ¿Cuál es tu favorita y por qué, Emmanuelle?

Hemos de considerar la naturaleza químérica de la célula eucariota, que contiene genes de origen bacteriano y arqueano. También ha de tenerse en cuenta el reciente descubrimiento del superfilum Asgard dentro del dominio Archaea (que además es cultivable en laboratorio desde 2019), cuyos vínculos genéticos con los eucariotas son claros. Así, parece plausible un modelo simbótico en el que arqueas y bacterias vivían muy cerca porque eran

interdependientes metabólicamente... y luego quedaron asociadas formando un nuevo tipo celular. Estas comunidades mixtas de bacterias y arqueas son conocidas en el mundo microbiano moderno. Sin embargo, todavía hay muchas dudas acerca de la ecología, el metabolismo y la identidad precisa de las arqueas y bacterias (entre ellas, las alfabroteobacterias) de las que provenimos, y sobre el orden de adquisición de características celulares eucarióticas (núcleo, citoesqueleto, endomembranas, mitocondrias) entre el primer y último ancestro común eucariota (conocidos como FECA y LECA, respectivamente, por «First Eukaryotic Common Ancestor» y «Last Eukaryotic Common Ancestor»).

Basándonos en la historia de la vida en la Tierra, ¿crees que la presencia de oxígeno molecular en la atmósfera de un planeta es un requisito necesario para encontrar vida pluricelular compleja?

Bueno, en realidad, la multicelularidad ocurre también en bacterias y en eucariotas del reino Protista que son anaerobios, ya que pueden formar filamentos o colonias. También existen animales anaerobios muy pequeños, encontrados en las zonas anóxicas del fondo de los mares desde 2010. Creemos que la mayoría (o todos) los eucariotas anaerobios se adaptaron secundariamente a la anoxia a partir de un LECA aerobio. Pero sabemos que, aunque las mitocondrias son aerobias, pudieron requerir poco oxígeno para originar las eucariotas o incluso los animales. Por tanto, ¿las escasas fuentes abióticas de oxígeno podrían haber sido suficientes para el origen de las células eucariotas, sin requerir la evolución previa de la fotosíntesis oxigénica? Los modelos de eucariogénesis debaten si las mitocondrias aparecieron pronto (al originarse FECA) o más tarde (entre FECA y LECA), sabiendo que las mitocondrias podrían haber sido anaerobias facultativas y que los primeros eucariotas podrían vivir en diferentes condiciones de óxido-reducción. Sin embargo, es cierto que la vida multicelular macroscópica como la terrestre, con organismos que poseen diferentes tejidos, requiere más concentración de oxígeno molecular. A pesar de ello las esponjas, que son animales aerobios, pueden soportar algunos períodos de anoxia y tienen parte de su cuerpo habitado por microorganismos anaerobios.

Teniendo todo esto en cuenta, una pregunta inquietante es si podría existir algún tipo de vida macroscópica extraterrestre en entornos anóxicos ricos en nutrientes, gracias a su simbiosis con microorganismos... Pero de momento no lo sabemos y actualmente eso es ciencia ficción.

Esto me lleva a fabular que pudieran existir seres similares a animales en los océanos subsuperficiales de Europa, por ejemplo... ¿Eres optimista sobre la posibilidad de encontrar vida en las lunas heladas del Sistema Solar? ¿Y en el planeta Marte?

La vida pudo existir en Marte durante su pasado y podría haber sido preservada en forma de fósiles. Pero hay que tener mucha suerte para encontrarla, sabiendo los problemas ya comentados sobre la identificación inequívoca de vida en la Tierra temprana. ¡Sin embargo, nada nos impide ir a buscar esos fósiles! Soy menos optimista acerca de que actualmente exista vida extraterrestre, microscópica o macroscópica, en algún lugar del Sistema Solar. No hay aquí tantos planetas o lunas donde el agua líquida y los minerales hayan estado en contacto durante millones de años, manteniendo condiciones de habitabilidad el tiempo suficiente.

¿Alguna vez has soñado con ser la primera astronauta micropaleontóloga que busca fósiles en Marte? O, si esto te parece muy arriesgado, ¿te gustaría analizar muestras marcianas en un laboratorio terrestre?

¡Sí lo he soñado, Carlos, y me gustaría mucho si pudiéramos ir y volver con facilidad! Pero en ese caso sería más fácil traer las muestras y analizarlas a escala micro y nano aquí, ¿no crees?, porque no vamos a construir un microscopio electrónico o un sincrotrón en Marte... Analizar aquí muestras recogidas en Marte sería emocionante y también una gran responsabilidad, ya que tendríamos que implementar todas las medidas de protección planetaria para no contaminarlas durante los análisis.

Imagina que, en el futuro, un grupo de investigadores logra encontrar vida extraterrestre. En tu opinión, ¿sería más relevante que los seres vivos descubiertos compartieran un origen común con la biodiversidad que conocemos en la Tierra (sugiriendo así una propagación de la vida basada en la panspermia), o que se demostrara que esa vida alienígena es muy diferente y proviene de un segundo proceso de biogénesis?

Sería mucho más emocionante si la «vida ET» es diferente a la terrestre, demostrando que los seres vivos pueden existir en otro lugar. Además, sería la única forma de estar seguros de que no se trata de una contaminación llevada desde nuestro planeta. Pero si no encontramos vida extraterrestre no significa que no exista en algún otro lugar... ¡así que seguiremos buscando una segunda biogénesis!



4. Los límites de la vida



•

¿Qué significa persistir
en el callejón de la muerte?
¿En el desierto de la sal
cómo se puede florecer?
¿En el mar del no pasa nada
hay vestido para morir?
¿Cuando ya se fueron los huesos
quién vive en el polvo final?

Pablo Neruda,
Libro de las preguntas

Si algo define a los humanos es nuestra necesidad de hacernos preguntas: pequeñas y grandes, con respuesta o sin ella. Nos preguntamos por la vida y por la muerte, porque la evolución nos ha hecho mortales. Y observamos los seres que nos rodean cuando caminamos por el campo, subimos una montaña o buceamos en el mar. Vemos animales, plantas y hongos. Hoy sabemos que todos ellos son muy parecidos a nosotros y se desarrollan en un rango de condiciones físico-químicas muy estrecho: nos gustan las temperaturas moderadas, las aguas neutras y con baja salinidad, el oxígeno y los lugares con poca radiación. Como consideramos que nosotros y nuestros familiares más cercanos ocupamos el centro de la vida (aunque, como vimos, los eucariotas pluricelulares somos sólo el 15 % de la biodiversidad conocida), hemos asumido que los entornos en los que vivimos son los «normales».

Pero la vida es evolución: ha sido capaz de adaptarse a ambientes muy diversos en nuestro planeta... y quién sabe si también en otros. En realidad, vivir requiere pocas cosas: una fuente de energía, agua en estado líquido, materia orgánica o dióxido de carbono disponible, y los elementos CHONPS al alcance. Todo lo demás es accesorio, y depende del gusto del consumidor. Así, existen microorganismos que crecen a temperaturas inferiores al punto de congelación del agua o superiores al de ebullición, a presiones de cientos de atmósferas, soportando niveles de radiación que nos matarían en segundos, en aguas parecidas al ácido sulfúrico o a la lejía, rodeados de muy altas concentraciones de metales, en el interior de las rocas del subsuelo, en desiertos de sal donde no se puede florecer.

Para nosotros, todos esos son entornos «extremos». Habría que preguntarles su opinión a las bacterias y arqueas (y también a algunas eucariotas) que se desarrollan allí. A esos microorganismos los llamamos

genéricamente «extremófilos» o amantes de los extremos, pero para ellos sus medios son los normales... hasta el punto de que muchos no pueden sobrevivir en los lugares que para nosotros resultan «habitables». Todo es relativo, y más cuando hablamos de biología. Sin duda estos extremófilos preferirían, en vez de vivir a nuestro lado, colonizar algunos de los otros planetas y satélites del Sistema Solar. En las próximas páginas vamos a hacer un rápido recorrido por esos sugerentes ambientes y sus protagonistas, algunos de los cuales aparecerán a lo largo de los capítulos siguientes cuando hablemos de mundos en los que tal vez podrían desarrollarse. Persistir en ellos. Porque en eso consiste estar vivo.

UNA VISITA AL PARQUE YELLOWSTONE

A comienzos del verano de 1964, el microbiólogo norteamericano Thomas D. Brock estaba realizando un viaje por carretera desde Indiana, en cuya universidad trabajaba, hasta un laboratorio de la Universidad de Washington en Seattle. En ese largo y relajante trayecto por el llamado *Middle West* y el norte de Estados Unidos fue visitando diferentes paisajes, tomando fotos y recogiendo algunas muestras. Al pasar por Wyoming decidió hacer una parada en un lugar que aún no conocía: el espectacular Parque Nacional de Yellowstone. Quedó sorprendido por su belleza y por los intensos colores rojo, anaranjado, amarillo y verde que se sucedían en los manantiales termales que encontraba a su paso. Por ello, durante el verano siguiente dedicó dos semanas a recorrer con calma esa gran caldera volcánica y a muestrear en numerosos lugares. En una de las surgencias termales de pH neutro que llamó su atención, conocida como Mushroom Spring, tomó algunas muestras de las que posteriormente lograría aislar una especie bacteriana cuya temperatura óptima de crecimiento era de 70 °C, pero que sobrevivía sin problemas entre 50 °C y 80 °C. Con buen criterio, llamó a este microorganismo *Thermus aquaticus*.

El descubrimiento de ese primer ser vivo termófilo fue trascendental, y su publicación en la revista *Science* en 1967 supuso una auténtica revolución en la microbiología. Ya se conocían desde el siglo XIX microorganismos que vivían en algunas salinas o crecían sobre el pescado en salazón (luego llamados halófilos, «amantes de la sal»), y desde la década de 1940 otros que se desarrollaban en aguas de pH ácido (acidófilos). Así, con los termófilos se ampliaba a una variable tan importante como la temperatura la capacidad de

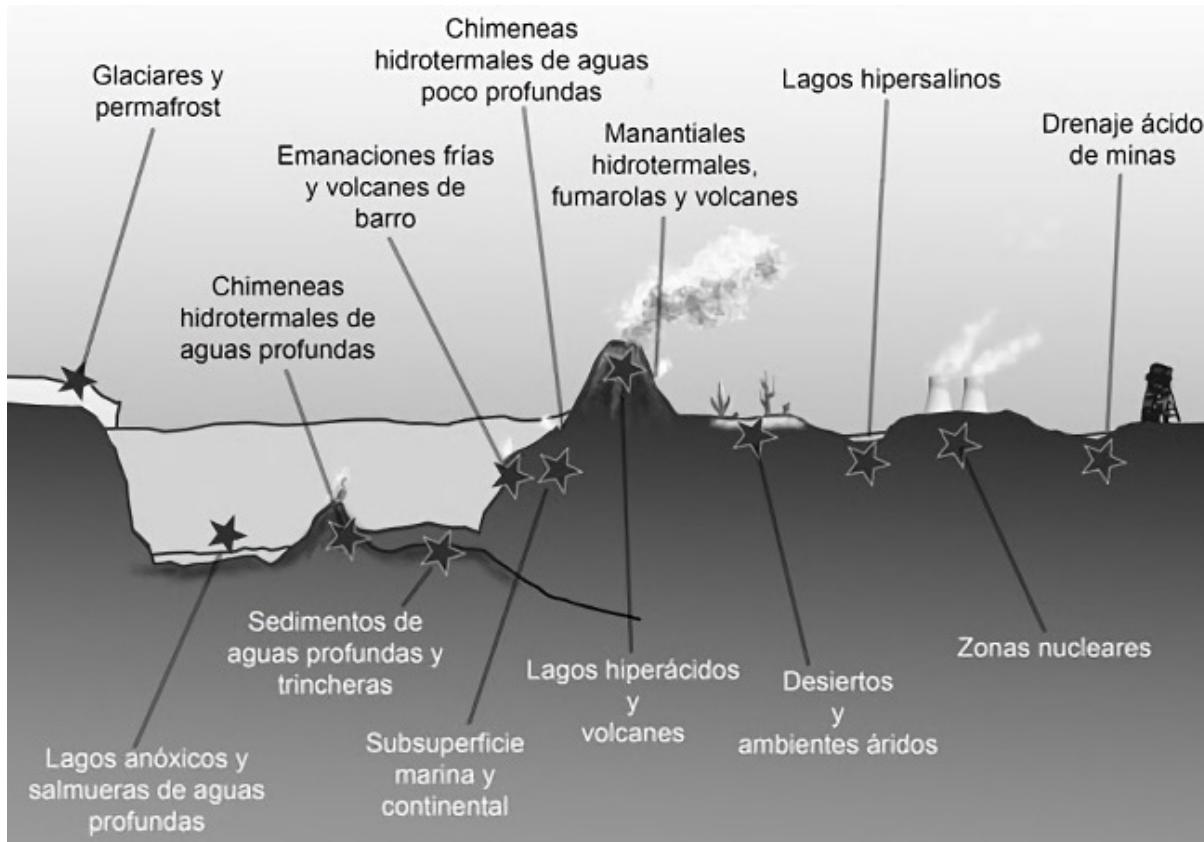
adaptación conocida en los seres vivos. En 1972, el propio Brock caracterizó también en Yellowstone (en un interesante charco de barro burbujeante llamado Mud Vulcano) el primer microorganismo multiextremófilo, que crece a temperaturas de 80 °C y pH muy ácido, entre 2 y 3: la arquea hipertermófila *Sulfolobus acidocaldarius*.

En paralelo, la caracterización molecular de *Thermus aquaticus* había abierto la puerta al uso de sus enzimas (que, a diferencia de «las normales», funcionan a altas temperaturas) en un ámbito que iniciaba su desarrollo en la década de 1960: la genética molecular. Así, la enzima DNA polimerasa que esta bacteria utiliza para replicar su genoma (conocida como *Taq* polimerasa) serviría veinte años después para inventar la técnica más utilizada desde entonces en diferentes campos de la biotecnología y la biomedicina, y por la que Kary Mullis recibiría el Premio Nobel de Química en 1993: la reacción en cadena de la polimerasa (PCR). Desde el comienzo de la pandemia de COVID-19 la PCR ha llegado a los medios de comunicación y está incluso en boca de todos los políticos, ya que una de las variantes de esta técnica es el método más sensible para detectar la infección por el SARS-CoV-2. Muchos lectores lo sabrán por experiencia. Conviene recordar toda esta historia cuando oigamos hablar de la gran diferencia que aparentemente existe entre la ciencia básica y la aplicada... y se nos trate de convencer de que sólo hay que invertir en la segunda.

VIVIR EN LOS EXTREMOS

Durante las últimas décadas, diferentes técnicas de microbiología y ecología molecular han permitido descubrir y caracterizar microorganismos extremófilos en las aguas de fuentes termales, salinas, ríos, efluentes de minas, mares o lagos subglaciares. También en el agua de refrigeración de los reactores nucleares. Se han hallado en superficies sólidas con diferentes composiciones y topografías, como los desiertos más secos y abrasados por el Sol, las cumbres de las montañas, los suelos congelados cercanos al polo norte, o los hielos de la Antártida. El interior de muchas cuevas también ha sido muestreado, y se han investigado los sedimentos existentes bajo las aguas dulces y saladas. Más recientemente, como veremos al final del capítulo, estas técnicas han comenzado a llegar a un territorio tan complejo para extraer muestras como es el subsuelo rocoso, desde decenas a miles de metros bajo la superficie. Y, además, también se ha empezado a analizar el

medio aéreo y las nubes: muy cambiantes, difíciles de muestrear y siempre con bajo contenido en microorganismos.



Representación esquemática de diferentes entornos extremos terrestres en los que se han detectado y caracterizado microorganismos, basada en el artículo «Living at the Extremes: Extremophiles and the Limits of Life in a Planetary Context» (Merino *et al.*, 2019, *Frontiers in Microbiology*). Ilustración de María Lamprecht.

Gracias a todas estas investigaciones se ha descubierto un buen número de bacterias y arqueas (y, en algunos casos, también eucariotas) viviendo en todo tipo de entornos alejados de los que son habituales para nosotros, dados sus parámetros físicos (como la temperatura, presión y nivel de radiación) o químicos (nivel de acidez, salinidad y presencia de metales en disolución). Con ello se han ampliado enormemente los márgenes de habitabilidad que se les suponía a los seres vivos en nuestro planeta, mostrando además que es viable buscarlos en un amplio abanico de lugares realmente extremos, a la par que fascinantes, visitados en los próximos capítulos: los desiertos helados de Marte por los que un día fluyó el agua líquida, el subsuelo rico en hierro del planeta rojo, la corteza de hielo y sal de Europa o Encélado, las grandes masas de agua subsuperficial de estos y otros mundos oceánicos, las nubes altas de la atmósfera de Venus, o incluso los desconocidos paisajes de los planetas extrasolares. Así, las campañas de investigación que continuamente se realizan en entornos de la Tierra que se consideran análogos a ellos nos han

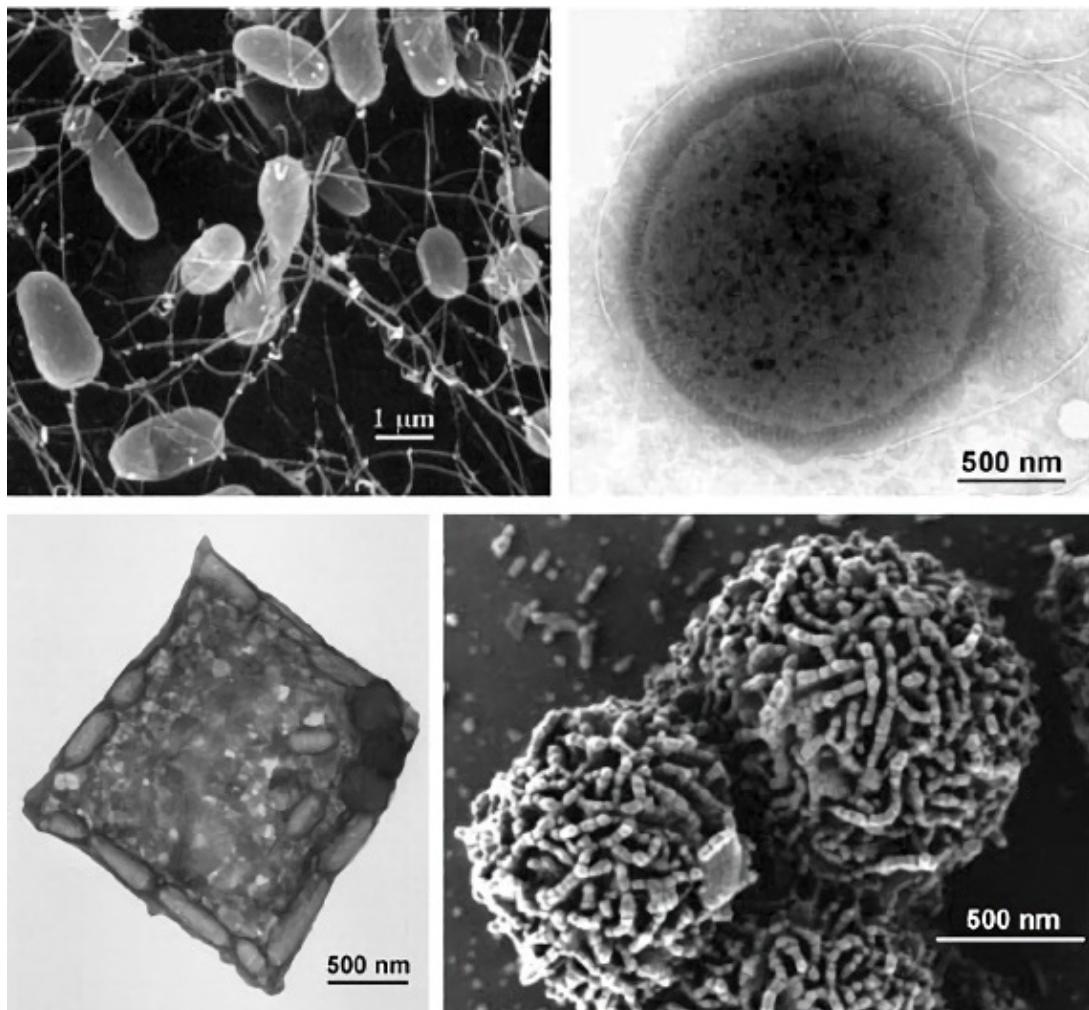
mostrado que, como afirmaba el poeta surrealista francés Paul Éluard, «hay otros mundos, pero están en éste».

En el creciente «zoo» de microorganismos (y algunos organismos pluricelulares) extremófilos que se han ido caracterizando, en cuanto a su resistencia a variables físicas nos encontramos con hipertermófilos (que viven a temperaturas de entre 70 °C y 120 °C), psicrófilos o criófilos (a temperaturas menores de 5 °C, pudiendo llegar hasta -30°C), barófilos o piezófilos (a las muy altas presiones del fondo oceánico, entre 400 y 1200 atmósferas) y radiotolerantes (capaces de soportar altas dosis de radiación ionizante por unidad de masa, mayores de los 10 gray que resultan letales para los humanos). Con respecto a las variables químicas, existen acidófilos (que viven en aguas ácidas, con pH comprendido entre 0 y 5), alcalófilos (en lagos alcalinos con pH entre 9 y 12), halófilos extremos (en ambientes hipersalinos con hasta 360 g de cloruro de sodio, NaCl, por litro de agua), tolerantes a metales (en aguas con alta concentración de distintos cationes metálicos), xerófilos (en entornos desérticos de aridez extrema, medida como un valor de «actividad del agua» entre 0,6 y 0,8) y osmófilos (en medios con alta presión osmótica, por ejemplo con alto contenido en azúcares). Además, también se consideran extremófilos los microorganismos criptoendolíticos (que habitan en el subsuelo, a más de 100 m de profundidad bajo la superficie) y los oligotrofos (capaces de sobrevivir en entornos con muy pocos nutrientes).

Algunos de los microorganismos concretos que hasta el momento ostentan un «récord de vida extrema» son las arqueas *Methanopyrus kandleri* y *Pyrolobus fumarii* (los más hipertermófilos conocidos, que viven en surgencias hidrotermales submarinas a temperaturas de hasta 121 °C y 113 °C, respectivamente, y a presión de cientos de atmósferas), la bacteria *Planococcus halocryophilus* (que se mantiene metabólicamente activa hasta a -25 °C en el permafrost del Ártico), la bacteria *Thermaerobacter marianensis* (que resiste la presión de 1170 atmósferas existente en la Fosa de las Marianas, y además es hipertermófila), la arquea *Thermococcus gammatolerans* (un hipertermófilo que crece en surgencias hidrotermales y que ha demostrado ser el más resistente a la radiación, ya que soporta hasta 30 000 gray de radiación gamma), la arquea hiperacidófila *Picrophilus torridus* (aislada junto a una surgencia hidrotermal ácida superficial en Hokkaido, Japón, a pH de sólo 0,06) seguida de cerca por especies del género arqueano *Ferroplasma* (identificadas en aguas ácidas superficiales y en efluentes de minas de hierro, que crecen a pH entre 0 y 1), la bacteria *Halomonas campisalis* (que vive en lagos alcalinos con valores de pH hasta 12, siendo también halófila), varias arqueas halófilas extremas de los géneros *Halobacterium* y *Haloferax* (que habitan en salmueras con concentración de NaCl de hasta 300 g por litro de agua), o *Haloquadratum walsbyi* (otra arquea

halófila extrema que vive a concentraciones saturantes de cloruro de sodio y magnesio en numerosas salinas, presentando una peculiar forma cuadrada y plana a la que debe el nombre su género).

Como dato curioso, pero recurrente cuando se habla de la resistencia de los seres vivos a determinadas condiciones extremas, merece la pena comentar que existen unos animales absolutamente sorprendentes en este sentido: los tardígrados. El *phylum Tardigrada* agrupa unas mil especies de animales invertebrados diminutos, con un tamaño típico de 0,5 mm, popularmente llamados «ositos de agua» por su curiosa forma y por la manera de desplazarse moviendo sus ocho patitas. Se han hecho muy conocidos porque, aunque viven en condiciones «normales» (típicamente, en la película de agua que cubre los musgos o líquenes), pueden aguantar un amplio rango de condiciones extremas: temperaturas entre -250 °C y +151 °C, períodos de congelación de hasta 30 años (en los que se mantienen en un estado de «vitalidad suspendida» del que pueden ser recuperados), presiones cercanas a 6000 atmósferas, deshidratación casi total (con una reducción del agua en su cuerpo desde el 85 % en masa a sólo el 3 %) durante diez años, inmersión en etanol o éter puros, o enormes dosis de radiación de hasta 5000 gray. Incluso resisten algo que ningún otro animal conocido podría siquiera intentar (aunque sí sobreviven a ello ciertas cianobacterias, líquenes y hongos extremófilos ensayados): la exposición al vacío y la radiación del espacio exterior, como pudo comprobarse en el experimento *FOTON-M3* de la Agencia Espacial Europea, realizado durante diez días de 2007 en el exterior de la Estación Espacial Internacional. Por todo ello, estos animales (y en particular la especie *Hypsibius exemplaris*) se están estudiando en profundidad en los ámbitos de la genética, la fisiología, la astrobiología y la investigación espacial. De hecho, en el capítulo 6 de este libro comprobaremos lo lejos que han llegado recientemente los tardígrados.



Cuatro ejemplos de microorganismos extremófilos visualizados al microscopio electrónico: *Pyrolobus fumarii* (imagen de Wikimedia Commons), *Thermococcus gammatolerans* (Wikimedia Commons), *Haloquadratum walsbyi* (micrografía de Peter Janssen y Mike Dyall-Smith) y *Planococcus halocryophilus* (imagen de McGill University).

DOS APUNTES SOBRE EL AGUA Y LA VIDA

Al investigar sobre los entornos extremos de nuestro planeta, en algunas ocasiones se ha podido comprobar cómo una variación en sus condiciones físico-químicas condiciona aumentos o disminuciones bruscas de biodiversidad. Uno de los casos más interesantes lo estudiaron investigadores del Centro de Astrobiología en la zona central del desierto de Atacama, el más seco y antiguo de nuestro planeta, situado al norte de Chile. Tras más de quinientos años sin haber llovido allí de forma apreciable (de media, sólo una vez cada década se registran precipitaciones en torno a 4 mm/m^2), la inusual

entrada de masas de nubes desde el océano Pacífico durante los otoños de 2015 y 2017 produjo tres episodios de lluvias muy abundantes (con hasta 40-90 mm/m² de precipitación acumulada). Al compararse los niveles de diversidad microbiana del terreno pocos días después de esas lluvias con los datos que se habían acumulado hasta 2014, la conclusión fue clara: las precipitaciones habían introducido un estrés hídrico en los microorganismos extremófilos adaptados a este desierto, eliminando hasta el 85 % de la biodiversidad. Por tanto, en esas ocasiones, el agua trajo consigo la muerte. Este resultado fue muy interesante para comprender hasta qué punto a quienes viven en los extremos no les gustan las condiciones más aparentemente «normales». Además, dado que el desierto de Atacama se considera uno de los mejores análogos de Marte en nuestro planeta, el estudio realizado permite imaginar cómo podría haber sido la dinámica microbiana (si allí llegó a desarrollarse la vida y era similar a la que conocemos) en zonas sometidas a ciclos de desecación e inundación.

Por otra parte, uno de los lugares más fascinantes que se están investigando en la actualidad es el complejo hidrotermal de Dallol, en la depresión de Danakil, al norte de Etiopía. Esta zona, que forma parte del Valle del Rift, es una de las más extremas y espectaculares de nuestro planeta: contiene volcanes, fumarolas, manantiales hipersalinos y ácidos con alto contenido en metales, y diques de sal que delimitan piscinas con colores que van del amarillo al verde y del rojo al marrón oscuro, producidos por los iones que saturan sus aguas. Aunque en algunos entornos extremos de este área se han encontrado arqueas de muy pequeño tamaño y elevada diversidad taxonómica, lo más interesante ha sido identificar (por un equipo liderado por el Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS, que publicó sus resultados en 2019) dos ambientes en los que no se ha detectado la presencia de ninguna especie microbiana: i) salmueras en zonas termales con una concentración de los cationes divalentes magnesio (Mg^{2+}) y calcio (Ca^{2+}) tan alta que desorganiza la red tridimensional del agua (lo que se conoce como «efecto caótropico» o productor del caos) y por tanto desestructura las biomoléculas; y ii) aguas que al combinar su muy alta salinidad (en este caso, producida por cationes monovalentes, principalmente sodio, Na^+) con una acidez extrema (valores de pH cercanos a 0) impiden la adaptación simultánea de algún microorganismo a ambos parámetros (incompatibles desde el punto de vista bioquímico), independientemente de la temperatura. Por tanto, estos ambientes poliéxtremos suponen un auténtico límite para la vida. Y la consecuencia para la astrobiología es clara: no siempre la presencia de agua líquida será sinónimo de habitabilidad.

EL RÍO TINTO: MARTE EN LA TIERRA

Uno de los entornos extremos que más se ha estudiado durante las últimas décadas es el río Tinto, un curso de agua de 92 km de longitud que discurre al suroeste de la península Ibérica, desde su nacimiento cerca de Nerva hasta su desembocadura en la bahía de Huelva. Atraviesa la Faja Pirítica Ibérica, una entidad geológica de origen hidrotermal que se extiende por la provincia de Huelva y el sur de Portugal, y que contiene la mayor concentración de sulfuros metálicos del planeta. Sus aguas son muy ácidas, con un pH en torno a 2 a lo largo de todo su recorrido, lo que permite mantener en disolución una muy elevada concentración de numerosos cationes metálicos, entre ellos el hierro oxidado (catión Fe^{3+}) que produce su característico color de vino tinto... o más bien de pacharán. Otros cationes que en el río Tinto están entre diez y cien veces más concentrados que en el agua potable son el níquel (Ni^{3+}), cobre (Cu^{2+}), zinc (Zn^{2+}) o magnesio (Mg^{2+}). Por supuesto, la acidez y concentración de metales en el agua del Tinto impiden que cualquier animal viva en ella.

A pesar de lo que tradicionalmente se proponía, las características del río Tinto no son fruto de la actividad minera desarrollada en la zona durante los últimos 5000 años, sino el resultado de la actividad de los microorganismos extremófilos que habitan en sus aguas desde hace decenas de millones de años. Así, una de las peculiaridades de este entorno poliextremo es que tiene un origen biológico, a diferencia de otros ambientes extremos que son el resultado de las características geofísicas y geoquímicas (como temperatura, presión, salinidad o radiación) de los lugares donde se encuentran. Las responsables del mantenimiento de este ecosistema tan interesante son menos de diez especies de bacterias quimiolitoautótrofas que viven en el agua (obteniendo su energía de la oxidación de compuestos inorgánicos y fijando CO_2 para sintetizar su materia orgánica): principalmente *Leptospirillum ferrooxidans* y *Acidithiobacillus ferrooxidans* (que, como su apellido indica, oxidan el Fe^{2+} presente en la pirita hasta Fe^{3+}), además de *Acidithiobacillus thiooxidans* [que oxida el azufre existente como sulfuro (S^{2-}) en la pirita a azufre neutro (S^0) o hasta anión sulfato (SO_4^{2-}), una actividad que también puede realizar *A. ferrooxidans*]. A su vez, el propio *A. ferrooxidans* y otras tres especies pueden reducir el hierro (de Fe^{3+} a Fe^{2+}) en condiciones anaerobias (por ejemplo, en los sedimentos del río), con lo que se cierra el ciclo del hierro, clave en el mantenimiento del sistema. Sorprendentemente, las condiciones extremas que estas bacterias producen en las aguas del río Tinto han sido aprovechadas por al menos trescientas especies de eucariotas

(algas y hongos) que se han adaptado a ellas y hoy son responsables de la parte principal de su biomasa. Esto muestra que, al contrario de lo que se suponía, los ambientes extremos pueden contener una biodiversidad muy alta.

La investigación sobre el río Tinto nos ha mostrado, por tanto, un ecosistema extremo producido por la vida y dominado por el hierro y el azufre. Cuando en el pasado hubo abundante agua líquida fluyendo sobre el planeta rojo (como veremos), tal vez diera lugar a un sistema parecido a éste en cuanto a sus características físicas y químicas. Quién sabe si también biológicas. Por todo ello, solemos decir que el río Tinto puede considerarse «Marte en la Tierra». Cualquier lector que dedique unos días a explorar ese espectacular entorno de la provincia de Huelva comprobará que no exageramos.

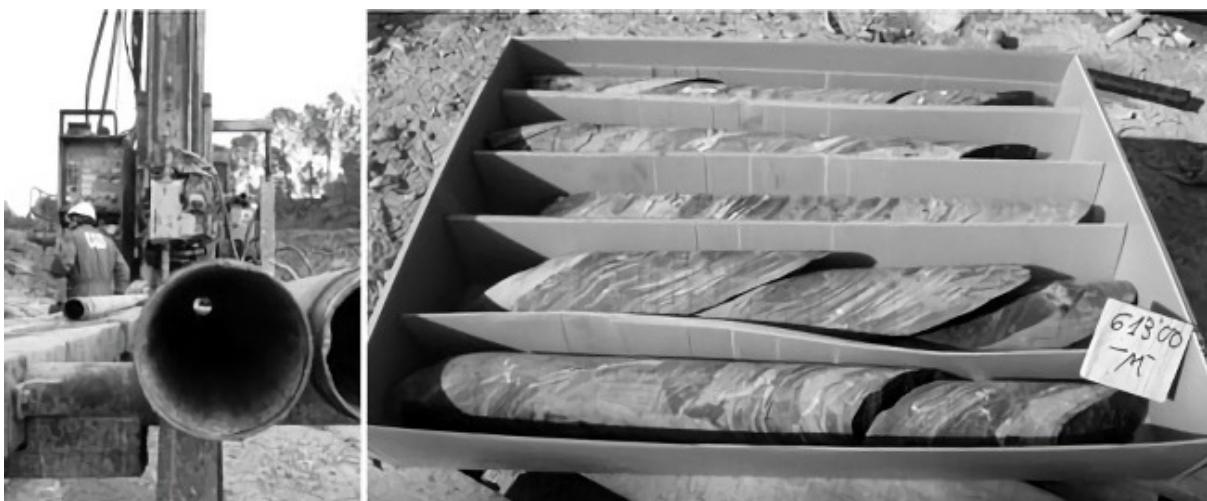
LA VIDA EN EL LADO OSCURO

Durante su viaje en el *Beagle*, Darwin se sintió especialmente interesado por los salares que visitó en Argentina. Al encontrar numerosas especies viviendo en esos entornos escribió en su cuaderno de notas, en agosto de 1833, unas frases premonitorias: «¡Sí, sin duda, puede afirmarse que todas las partes del mundo son habitables! Lagos de agua salobre, lagos subterráneos ocultos en las laderas de las montañas volcánicas, fuentes minerales de agua caliente, profundidades del Océano, regiones superiores de la atmósfera, hasta la superficie de las nieves perpetuas: ¡en todas partes hay seres organizados!». Con ello predecía la existencia de vida en varios de los ambientes extremos comentados a lo largo este capítulo. Y también su presencia bajo el suelo. Lo que hoy conocemos como «biosfera oculta» constituye la última frontera para comprender la adaptabilidad de los seres vivos y para plantear su búsqueda en otros planetas o satélites.

Dando un salto hasta finales del siglo xx, la investigación sobre la microbiología del subsuelo comenzó con el análisis de las muestras que se iban tomando al hacer pozos artesianos, aunque con este método era imposible correlacionar la presencia de microorganismos con su contexto geológico. Posteriormente, los sondeos realizados por las empresas petroleras y gasísticas también aportaron información muy valiosa sobre la biodiversidad que se esconde en los poros y las grietas de las rocas. También se analizó la presencia de vida microbiana en las paredes interiores de cuevas y minas profundas, lo que permitió identificar seres vivos que se desarrollan

en contacto con el aire de esas galerías. Como consecuencia de la cantidad y variedad de especies encontradas, se ha llegado a postular que hasta el 70 % de la biodiversidad microbiana de nuestro planeta podría vivir en el subsuelo. Invisible, bajo nuestros pies.

En ese contexto, hace casi veinte años comenzamos a preguntarnos si las características de las aguas del río Tinto podrían estar producidas por el gran «reactor geológico» que existe bajo él: la Faja Pirítica Ibérica. Para intentar responder a esta pregunta, se han llevado a cabo dos ambiciosas campañas de perforación del subsuelo en la zona del nacimiento del río (en Nerva, Huelva) lideradas por el Centro de Astrobiología (como enseguida comentaremos, tomando un café con Ricardo Amils): la denominada Mars Analog Research and Technology Experiment (MARTE, realizada entre 2003 y 2005, y codirigida por el NASA Ames Research Center), y la Iberian Pyritic Belt Subsurface Life Detection (IPBSL, entre 2011 y 2015). En ellas se han obtenido testigos de roca de hasta casi 200 m y más de 600 m de profundidad, respectivamente, que han sido analizados en toda su longitud empleando diversas técnicas de geoquímica, microbiología y biología molecular. Así, se ha podido detectar y caracterizar una notable biodiversidad microbiana hasta 613 m de profundidad, y estudiar las actividades metabólicas presentes en este entorno anóxico, no influido por la atmósfera ni por la luz solar, casi sin agua y dominado por la pirita. Estos resultados se suman a los previamente obtenidos en otros ambientes subsuperficiales y refuerzan una realidad que sería muy del agrado de Darth Sidious en el universo *Star Wars*: hay mucha vida en el lado oscuro.



En busca de vida en el subsuelo del río Tinto: sistema de perforación utilizado en el proyecto IPBSL y testigos extraídos entre 609 y 613 m de profundidad, listos para ser almacenados una vez caracterizada la biodiversidad microbiana presente en ellos. Fotografías del autor.

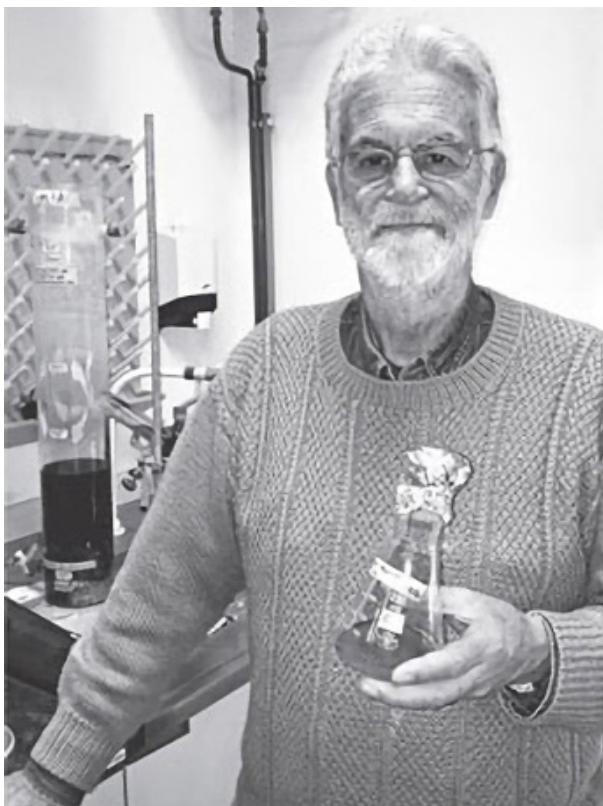
El conocimiento cada vez mayor del entorno extremo del río Tinto es extrapolable al principal objetivo de la astrobiología: Marte. Concretamente,

se ha propuesto que el subsuelo sobre el que discurre este peculiar curso de agua andaluz podría ser comparable al de la región del planeta rojo llamada Meridiani Planum que, como comentaremos en el capítulo 7, ha sido explorada por el robot *Opportunity* de la NASA.

En resumen, hoy sabemos que prácticamente todos los ambientes extremos de nuestro planeta donde se ha buscado vida contienen una biodiversidad más o menos amplia, fundamentalmente de bacterias y arqueas pero también con presencia de eucariotas. Además, se han detectado muchos y muy variados virus capaces de infectar a las especies celulares presentes. Gracias a la extraordinaria diversidad metabólica de los microorganismos y a su capacidad de adaptación a las condiciones físico-químicas extremas, la vida se ha extendido por la Tierra y ha persistido como fenómeno global, a pesar de los eventos de extinción masiva que se han ido produciendo a lo largo de la historia. Nada impide que alguna forma de vida también haya triunfado en otros mundos habitables. El reto, ahora, es intentar encontrarla allí.



Un café con... Ricardo Amils



Doctor en Química. Catedrático de Microbiología de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), Investigador en el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA) y en el Centro de Biología Molecular Severo Ochoa (CSIC-UAM).

Eres un experto internacional en el campo de los microorganismos extremófilos, así que vamos a centrar nuestra conversación en este tema clave para la astrobiología. ¿Cuándo empezaste a interesarte en la extremofilia, tema al que has dedicado tu vida científica?

Bueno, si busco en mi pasado, yo hice mi tesis doctoral en un bacilo Gram-positivo que en aquel momento se consideraba un termófilo... aunque crece a «sólo» 65 °C y hoy en día nadie lo tiene en cuenta en este sentido: *Bacillus stearothermophilus*, o *Geobacillus stearothermophilus* si prefieres el nombre actual. Ese podría ser el origen de mi afición por los bichos raros, pero entonces realmente no interesaba tanto la extremofilia de esta bacteria sino estudiar su metabolismo. Lo siguiente fue trabajar en halófilos: cuando volví a España, como aquí había (y sigue habiendo) muchos grupos de investigación sobre los microorganismos de las salinas me interesé por ellos.

Desde entonces los halófilos siempre han estado ligados a mi vida científica, como sabes bien, Carlos, porque hiciste la tesis en mi laboratorio sobre el RNA ribosomal de *Haloferax mediterranei*.

Hace ya unos cuantos años de eso, sí... y qué arquea tan interesante era nuestra Haloferax. Pero para entonces ya llevabas tiempo trabajando en los extremófilos del río Tinto, desde aquella tesis pionera en tu grupo de nuestra amiga Anabel López-Archipilla, ¿verdad?

Efectivamente, hace más de treinta años que me metí en el río Tinto... y desde entonces no he salido de él.

Un lugar maravilloso en el que hemos pasado muy buenos ratos, por cierto, y los que nos quedan... Desde el punto de vista científico, ¿qué nos han enseñado los microorganismos que viven en el río Tinto sobre la capacidad de adaptación de la vida en nuestro planeta?

Con los extremófilos en general, lo más importante ha sido comprobar que la vida es «muy cabezona»: siempre que tiene opciones en un lugar, por extremo que sea, se desarrolla allí. Eso contradecía la opinión existente hace cincuenta años, cuando pensábamos que los seres vivos eran muy delicados y poco adaptables, sólo capaces de desarrollarse en medios parecidos a los que habitamos las personas. Y tal limitación es cierta para nosotros o para los demás animales, pero no para la mayoría de los microorganismos porque en realidad prefieren vivir en otras condiciones. En este caso, a los seres vivos microscópicos que se desarrollan felices en el río Tinto les gusta la acidez extrema y también las altas concentraciones de metales que son muy tóxicos para casi todos los demás organismos. Tú sueles decir que el agua del Tinto es como la tabla periódica en disolución... y tienes razón. Lo curioso es cuántos habitantes tiene esa disolución.

Las tres décadas largas que llevamos investigando en las aguas y el subsuelo del río Tinto han sido muy fructíferas. Esta zona de Huelva nos ha dado una lección continua, como un libro que se abre despacio y del que cada día seguimos aprendiendo. La primera sorpresa fue que hay muy poca diversidad procariótica, de bacterias y arqueas, pero a cambio encontramos una enorme diversidad de eucariotas. Esto último era algo que no podíamos haber imaginado, pero como sabes esas aguas contienen cientos de especies de algas y hongos unicelulares. Está claro que a la vida le gusta el Tinto. Y a nosotros nos gusta que le guste, ¿verdad?

Sin duda, Ricardo. Y en cuanto a la posible existencia de seres vivos fuera de nuestro planeta, en concreto en Marte, ¿qué nos aporta la investigación

sobre la biodiversidad que se ha ido encontrando y caracterizando en el río Tinto durante todo este tiempo?

Realmente la relación de la extremofilia con la posible vida extraterrestre no era un tema del que se hablara cuando yo empecé en esto. Pero luego, desde el ámbito de la exploración espacial se pensó que un objetivo clave sería la búsqueda de vida por ahí fuera. Y los extremófilos abrían la puerta a poder plantear cómo la vida llega a desarrollarse en condiciones realmente alejadas de las que a nosotros nos parecen «normales», entre las que están las de muchos planetas y satélites del Sistema Solar. Por supuesto, también habrá entornos extremos en planetas que orbitan alrededor de otras estrellas, aunque no podemos tener datos directos sobre su físico-química. Todo lo que hemos ido aprendiendo en muchos laboratorios del mundo sobre extremofilia nos lleva a ser cada vez más abiertos en este tema y a abandonar el antropocentrismo que antes lastraba la ciencia.

En el caso que nos ocupa, lo más interesante es que la geoquímica y la mineralogía del entorno del río Tinto son muy parecidas a lo que han visto en Marte los orbitadores y robots que han llegado hasta allí. Por tanto, lo que aprendemos sobre la vida en este río rojo nos permite imaginar cómo serán los habitantes del planeta rojo, si los hay. Cada vez que vamos a Huelva avanzamos sobre qué conocimientos hay que desarrollar y qué instrumentación tenemos que construir si queremos buscar vida en Marte. Eso sí: está claro que allí no puede haber vida en la superficie, por lo que tendremos que buscarla en el subsuelo.

Así es. Y esto me lleva a un tema que nos interesa mucho a los dos: la búsqueda de vida en las profundidades de las rocas. Durante los últimos quince años has dirigido dos importantes campañas de perforación en el entorno del nacimiento del río Tinto, en las que hemos trabajado un equipo interdisciplinar del Centro de Astrobiología, acompañados por colegas del Instituto de Astrobiología de la NASA en el primero de dichos proyectos. ¿Cómo podrías resumir lo mucho que hemos aprendido sobre «la vida en el lado oscuro»?

La hipótesis de partida que teníamos es que el río Tinto no es un producto de la contaminación minera reciente, sino de la actividad biológica activa durante millones de años. Así que lo razonable era pensar que «el biorreactor» que alimentaba dicha actividad tenía que estar en el subsuelo, bajo las aguas del río. Y para probar esta hipótesis teníamos que perforar allí, en el corazón de la Faja Pirítica Ibérica. Hemos conseguido hacerlo varias veces, hasta los 200 m en la primera campaña y hasta los 620 m en la segunda. Esto suponía un enorme reto tecnológico y científico... pero lo hemos conseguido.

Los resultados muestran que, en efecto, hay muchos microorganismos diferentes en ese «lado oscuro»: una auténtica biosfera subterránea. Nuestro común amigo Charles Darwin ya había propuesto que tenía que existir vida en el subsuelo, y una vez más hemos tardado un siglo y medio en demostrar que tenía razón. Hasta que realizamos estas perforaciones se sabía poco sobre la microbiología del subsuelo, sobre todo al nivel de detalle con el que hemos ido muestreando el material que obteníamos. Y, debido a la extrema dureza del terreno, nuestro caso era más complicado que las perforaciones hechas por otros grupos en sedimentos marinos. Así que hemos necesitado un esfuerzo de años, poniendo juntos a ingenieros, geoquímicos, químicos analíticos, microbiólogos, bioquímicos y biólogos moleculares. Pero ha merecido la pena porque hemos podido ver que «hay mucha gente ahí abajo», y como bien sabes ahora estamos caracterizando esos microorganismos y planteando qué relaciones ecológicas pueden tener entre ellos. Una sorpresa, por ejemplo, ha sido encontrar cianobacterias a cientos de metros bajo el suelo... porque está claro que allí no llega la luz y no podrán realizar la fotosíntesis.

Una consecuencia de este trabajo para la astrobiología es que, si hay tanta vida en el subsuelo de nuestro planeta, también la puede haber en Marte. De hecho, tú eres un firme defensor de que el planeta rojo tiene vida... y hasta sueles decir que en realidad todos somos marcianos.

Exactamente. Una idea divertida es imaginar que en Marte comenzó la vida antes que en la Tierra, llegó aquí a bordo de meteoritos y dio lugar al árbol evolutivo que tanto nos gusta dibujar. Por tanto, todos los seres vivos de este planeta, incluidos nosotros, seríamos marcianos. No tengo ninguna prueba de esto, claro, pero me gusta pensar lo. Más en serio, como sabes yo creo que también en la actualidad hay vida en el planeta rojo, porque su subsuelo tiene las condiciones adecuadas para que así sea, incluso agua líquida. Y esos seres vivos podrían ser parecidos a los que hemos visto bajo el río Tinto, al menos en cuanto a cómo funciona en general su ecología microbiana. Será difícil encontrar vida en Marte, pero igualmente será complicado demostrar que no la hay, ¿verdad?

Por tanto, ¿crees que si encontramos microorganismos en Marte... éstos tendrán DNA, podremos secuenciar sus genes y esas secuencias «encajarán» bien en nuestros árboles filogenéticos terrestres?

Bueno, en realidad no tengo tan claro que los protagonistas individuales de esa «vida marciana» sean iguales o muy parecidos a los de aquí. Creo que los ladrillitos moleculares de esa vida serán los mismos que en la Tierra, pero quizás su evolución allí haya sido tan diferente que ahora no encajen bien en el árbol de la vida terrestre. Aunque también podría ocurrir que haya en Marte

una vida tan distinta a nivel de moléculas básicas que no seamos capaces de identificarla.

¿Y para estudiar la posible vida que pueda haber en Marte es necesario que las misiones sean tripuladas, o los robots podrán seguir haciendo bien su trabajo sin la participación de astronautas?

En mi modesta opinión, la robótica está muy bien y ha permitido grandes logros, pero obviamente las manos y los ojos de los astronautas nos permitirían avanzar mucho más rápido. El problema está en la seguridad durante el viaje y una vez que estén caminando por allí. ¡Aunque voluntarios hay, ya lo sabes!

Pasando a otro ejemplo de extremofilia que conoces bien, muchas veces hemos comentado que a nivel físico-químico las características más alejadas de las que consideramos «normales» son las que soportan las arqueas halófilas extremas, ya que es muy difícil acomodar la bioquímica intracelular a concentraciones salinas tan altas. Y un lugar donde sabemos que hay mucha sal es en las fisuras que aparecen en la superficie de hielo de satélites como Europa. ¿Cuál es tu opinión sobre la posible existencia de seres vivos en ese entorno, o en el océano de agua líquida, también salina, que hay bajo su superficie?

Creo que allí se dan las condiciones para la vida, al igual que en el subsuelo de Marte. De hecho, en lunas como Europa o Encélado sabemos que hay mucha agua bajo su superficie helada. No tengo claro si es más probable que haya actualmente seres vivos en esos satélites o en Marte: lo dirán las próximas misiones.

Miremos ahora a los exoplanetas, que en la actualidad se están investigando muy activamente y con fuerte apoyo de la NASA. ¿Crees que la inversión en la búsqueda de condiciones de habitabilidad en esos mundos lejanos, a los que probablemente nunca podamos llegar con nuestros sensores, está siendo excesiva?

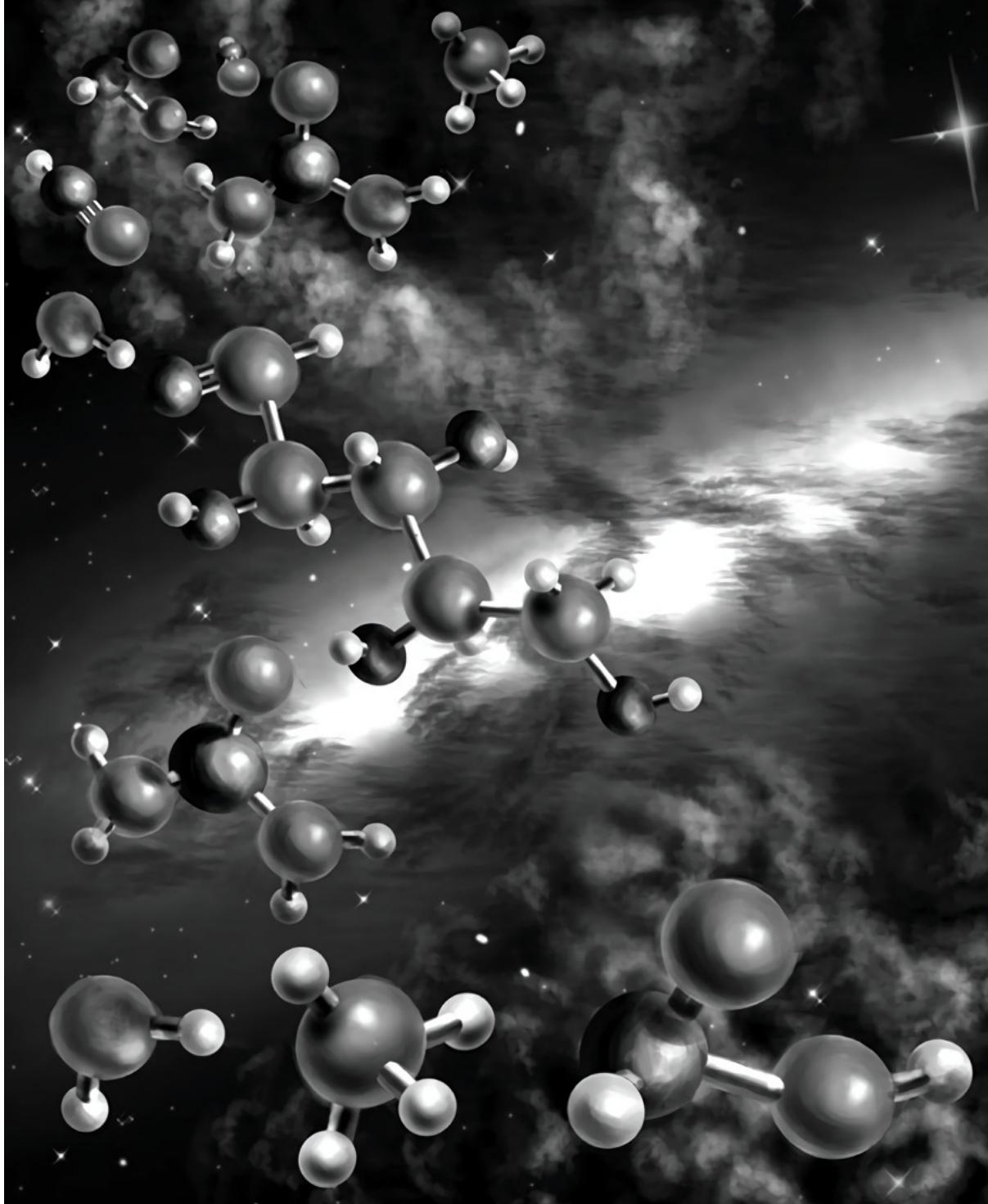
Yo considero que en ciencia todo es interesante, pero lógicamente el problema es la economía. No conozco en detalle el peso que tiene la investigación en exoplanetas en comparación con la que se hace en el Sistema Solar, pero creo que sería un error apostar más por lo que tenemos tan lejos olvidando lo que está más cerca de nosotros, en nuestro barrio. En cualquier caso, hace falta desarrollar mucha tecnología para que observando la atmósfera de los planetas que están en torno a otras estrellas logremos detectar señales de vida.

Por último, Ricardo, te pediría una reflexión personal sobre la astrobiología en nuestro país. En 2019 celebramos el vigésimo aniversario del Centro de Astrobiología, fundado por Juan Pérez Mercader. Entre los científicos más «sénior» (en el buen sentido de la palabra, claro) que le acompañaron en esa aventura estabas tú, y desde entonces has seguido fuertemente vinculado al CAB. ¿Cómo ves nuestro pasado y nuestro presente, y cómo te parece que puede ser nuestro futuro?

Hace veinte años, cuando Juan fundó este centro la astrobiología estaba dando sus primeros pasos en todo el mundo. Gracias al trabajo de todos hemos avanzado mucho. Y se ha sobrevivido, a pesar de los problemas sobre todo de personal, a la crisis económica tan dura de la pasada década. Hoy el CAB es un instituto bien valorado, como indica que hayamos sido reconocidos como Unidad de Excelencia María de Maeztu. El futuro de la astrobiología en España está abierto, pero tenemos gente joven dentro de la casa y también buenos socios fuera, así que hemos de ser optimistas. De todos modos, ese futuro no me toca escribirlo a mí... sino a vosotros.



5. Habitabilidad y biomarcadores



Que eso que es negro o blanco o transparente,
duro o blando, que se tizna o brilla que
aquellos con lo que cortamos, damos brillo, calentamos o escribimos
sea uno y lo mismo,

que eso pueda llevar a cabo 10^6 matrimonios diferentes,
formar pañales, rejas, cadenas, anillos, ovillos,
cordones y tornillos, que lo respiremos,
que con eso volemos, que con eso podamos asfixiarnos,

y que nada de lo que vive viva sin eso
—nadie, excepto aquellos que todo lo quieren saber,
habría caído en la cuenta y ahora no sabemos
lo que con eso queríamos saber

debemos hacer.

Hans Magnus Enzensberger,
«Peso del átomo 12,011» (*Los elixires de la ciencia*)

Hasta el momento sólo conocemos un ejemplo de vida: la que se ha desarrollado en la Tierra y ha generado una biosfera global en este punto azul pálido. Está basada en el agua y el carbono, que conjuntamente constituyen casi el 95 % de la masa de todos los seres vivos. Pero ¿hay alternativas a esa molécula y a ese elemento, o las leyes de la física y la química indican que ambos serían los ingredientes básicos de cualquier vida que pueda existir en otros lugares habitables del Cosmos? De todos modos, aunque nada de lo que vive viva sin eso, a partir del carbono se podrían generar bioquímicas muy diferentes... y finalmente biologías tan distintas de la nuestra que tal vez fuera muy difícil reconocerlas. Esto supone un enorme reto a la hora de buscar biomarcadores o señales de actividad biológica extraterrestre, ya que podrían no parecerse a los que compartimos los descendientes de LUCA.

HABITABILIDAD

Las reacciones de fusión termonuclear que ocurren en el núcleo de las estrellas liberan una gran cantidad de energía, que atraviesa sus capas superficiales y es irradiada hacia el espacio exterior. Esa emisión se produce en forma de radiación electromagnética (en todo el rango de longitudes de onda del espectro, que de menor a mayor energía asociada incluyen las ondas de radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y radiación gamma) y de radiación de partículas (entre ellas núcleos de helio, protones, electrones y neutrinos, lo que en conjunto se conoce como «viento estelar»). Lógicamente, la intensidad de la energía irradiada por una estrella va disminuyendo al alejarse de ella.

Teniendo esto en cuenta, desde comienzos de la década de 1960, en astrofísica (y posteriormente en astrobiología) se trabaja con el concepto de «zona de habitabilidad» (o *habitability zone*, HZ): la región en torno a una estrella en la que la radiación que le llega al planeta o planetas que orbiten dentro de ella produce temperaturas compatibles con la existencia de agua líquida en su superficie, que en teoría podría servir como hábitat para mantener seres vivos durante múltiples generaciones. Esa zona con forma de anillo que existe en todos los sistemas planetarios (más cerca o más lejos de la estrella, como veremos) también se conoce como «zona de habitabilidad circunestelar» (CHZ), «cinturón de agua líquida» o «ecosfera». Además recibe el curioso nombre de *Goldilocks zone* o «zona Ricitos de Oro», en alusión al cuento tradicional de origen escocés *Ricitos de Oro y los tres osos*. En él, la niña protagonista, de cabello rubio y rizado, siempre escoge la opción intermedia entre cada grupo de tres que se le presenta: ni muy grande ni muy pequeño, ni muy duro ni muy blando... o lo que es más relevante para los planetas: ni muy caliente ni muy frío.

Además de la distancia media a su estrella, otras variables que determinan si un planeta se encuentra en la zona de habitabilidad son la excentricidad de su órbita y las características de su rotación. Adicionalmente, para que un planeta resulte habitable debe ser rocoso, tener una masa que le permita retener el agua por gravedad (suele considerarse que entre 0,5 y 10 veces la masa terrestre), y presentar una atmósfera suficientemente densa (que ejerza sobre la superficie la presión necesaria para el mantenimiento de esa agua líquida).

De hecho, la temperatura superficial de un planeta también depende mucho de la densidad y composición de su atmósfera. Por ejemplo, en el caso de la Tierra el balance entre la radiación solar que absorbe y la que refleja muestra que su temperatura de equilibrio sería de -18°C . Sin embargo, actualmente la temperatura media superficial es de 15°C . Esa diferencia de 33°C se debe al efecto invernadero producido por los gases de la atmósfera terrestre, fundamentalmente el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4). Cuando nuestro viaje nos lleve hasta Venus, en el

capítulo 10, comprenderemos mejor la importancia que puede llegar a tener este efecto. Por tanto, la influencia de las atmósferas en las temperaturas superficiales de los planetas modula la anchura de la zona habitable en torno a cada estrella. Este hecho, junto a la variación en la emisión de energía asociada a la propia evolución de cada estrella, hace que la zona de habitabilidad en un sistema planetario pueda desplazarse a lo largo del tiempo. Estamos, por tanto, ante un concepto dinámico y no estático.

Así, cuando se formó el Sistema Solar había tres planetas en su zona de habitabilidad: Venus, la Tierra y Marte, con el nuestro en el centro. Aunque aquel «Sol joven» emitía mucha más radiación electromagnética de alta energía que el actual (entre 300 y 1000 veces más en rayos X, y unas 5-8 veces más en ultravioleta), su luminosidad en el espectro visible e infrarrojo era sólo 0,7 veces la mostrada hoy. A lo largo de la evolución del Sol, su emisión en el infrarrojo ha ido aumentando y con ello la temperatura en su entorno, por lo que el límite interno de la zona habitable se ha desplazado hacia el exterior. Como resultado, actualmente Venus queda ya fuera de ella (un calentamiento que se suma al de mayor intensidad desencadenado por su atmósfera, como veremos) y la Tierra está ahora cerca de su borde interno. Por tanto, llegará un día (que nuestra especie no conocerá) en que el Sol calentará tanto la Tierra que los océanos se evaporarán: el planeta dejará de ser azul... y habitable. La vida terrestre acabará desapareciendo y el árbol evolutivo surgido de LUCA se secará.

En cualquier caso, por supuesto, que un planeta se encuentre en la zona de habitabilidad en torno a una estrella no quiere decir que realmente sea habitable, ni mucho menos que esté habitado. Profundizaremos sobre ello en el capítulo 12, cuando visitemos algunos mundos extrasolares. Por otra parte, la investigación de nuestro propio sistema planetario nos ha mostrado que existen cuerpos habitables que están muy lejos de la zona de habitabilidad en torno al Sol: los satélites de Júpiter y Saturno (y tal vez los de Neptuno) que poseen océanos de agua líquida subsuperficial. De hecho, podríamos decir que el campo magnético y la energía de mareas de los gigantes de gas produce a su alrededor una cierta zona de habitabilidad de la que pueden beneficiarse algunas de sus lunas. Así, el Universo realmente contiene más regiones habitables que las dictadas por su distancia a cada estrella. La clave es que exista agua líquida en ese lugar, ya que ésta nos parece la condición necesaria (aunque no suficiente) para el origen y el mantenimiento de la vida. Veamos por qué.

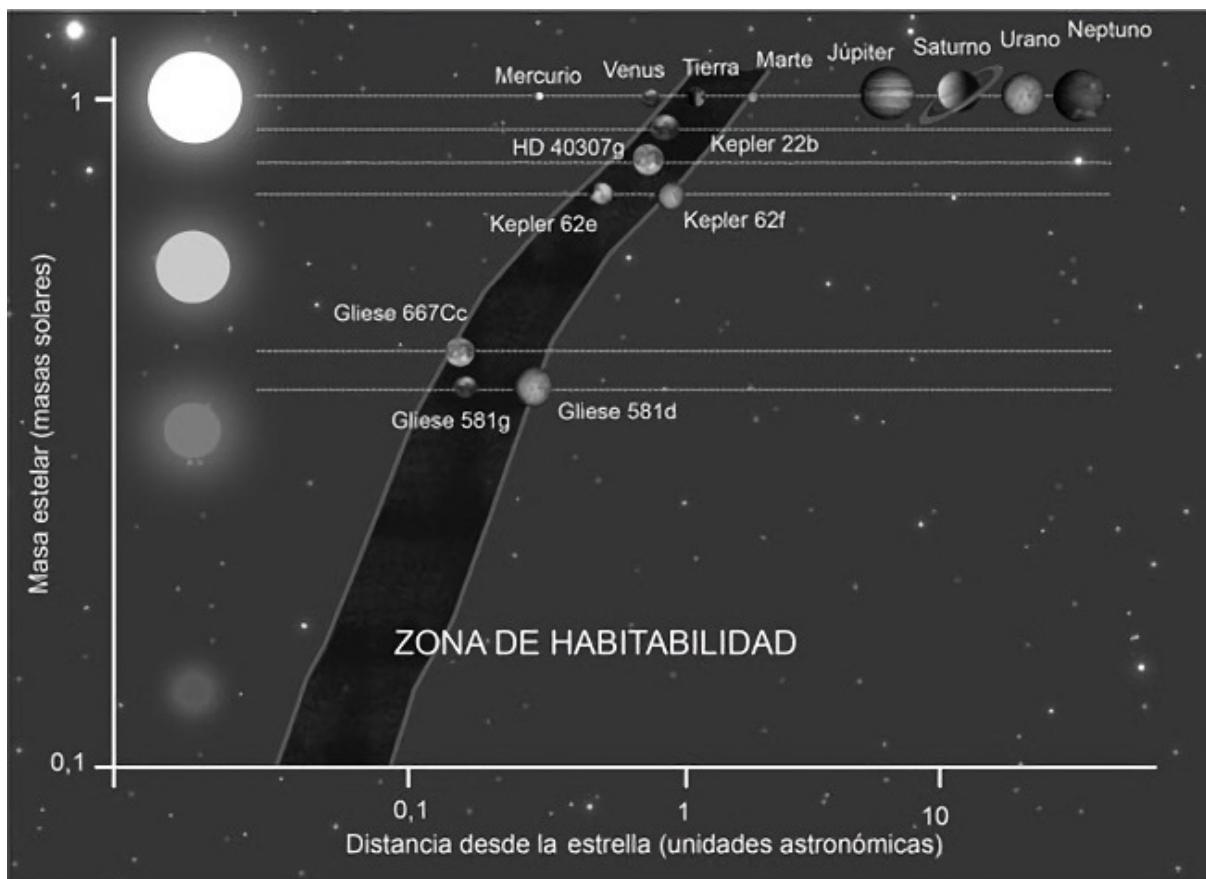


Diagrama que muestra la zona de habitabilidad en función de la distancia (en escala logarítmica) a la estrella, para masas estelares entre 0,1 y 1 veces la del Sol. Se incluyen los planetas del Sistema Solar (sin respetar los tamaños relativos de los planetas exteriores) y algunos exoplanetas como los que se comentarán en el capítulo 12. Ilustración basada en el artículo «Remote life-detection criteria, habitable zone boundaries, and the frequency of Earth-like planets around M and late K stars» (Kasting *et al.*, 2019, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*), realizada por María Lamprecht.

EL AGUA

La molécula H_2O es simple, abundante y maravillosa. El físico y químico Henry Cavendish descubrió en 1782 que se trata de un compuesto y no de un elemento, como hasta entonces se había pensado. Y fue Antoine L. de Lavoisier, el padre de la química moderna, quien comenzó a estudiar su composición y propiedades. Hoy sabemos que en cada molécula de agua los dos átomos de H se unen al de O formando un ángulo de 104,5°, y que dicha molécula se comporta como un dipolo eléctrico: muestra una distribución de carga en la que los H tienen más densidad de carga positiva, y el O más negativa. Debido a esa «polaridad», el agua posee una gran capacidad para

mantener en disolución otras sustancias polares (entre ellas, muchas biomoléculas) y las sales (que en solución acuosa se disocian en sus iones positivos o cationes y sus iones negativos o aniones, como ocurre por ejemplo con el cation Na⁺ y el anión Cl⁻ del cloruro de sodio).

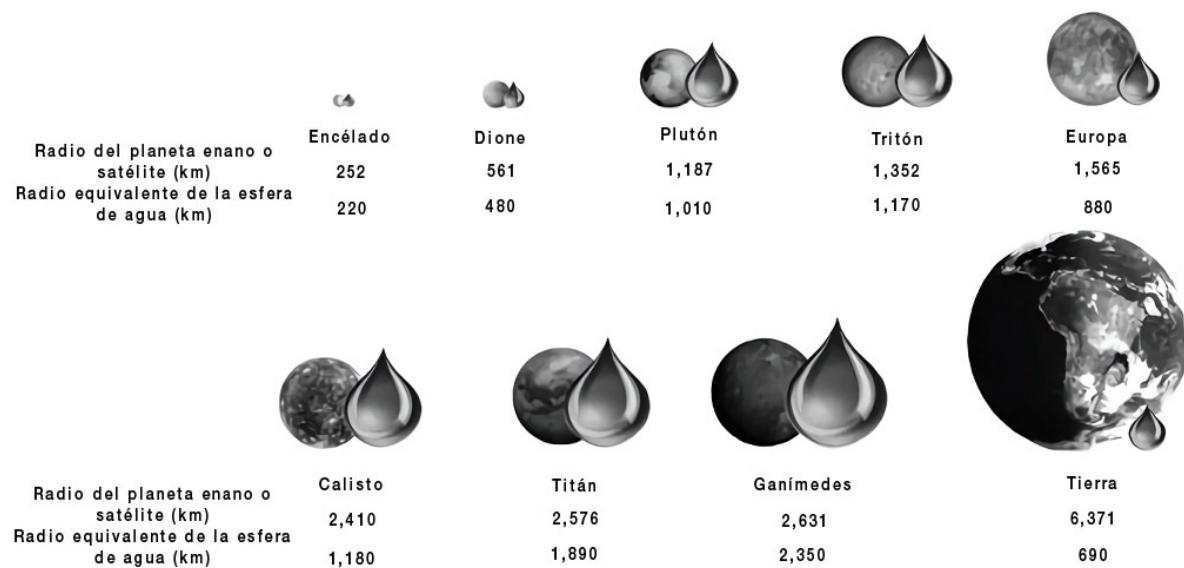
Además, la polaridad del agua da lugar a la formación de enlaces electrostáticos de corta duración llamados «puentes de hidrógeno» entre moléculas cercanas, que al producirse de forma global originan una auténtica red invisible y confieren al agua líquida propiedades como cohesión, tensión superficial y capilaridad. Esto hace que el agua se encuentre en estado líquido en un rango de temperatura muy amplio (entre 0 °C y 100 °C a presión de una atmósfera, un intervalo aún mayor si contiene compuestos disueltos), que incluye las temperaturas a las que son estables y activas las biomoléculas. Además, la densidad del agua varía muy poco en un amplio rango de temperaturas. Otra característica derivada de la estructura electrónica del agua es que, a diferencia de casi todas las demás sustancias, en estado sólido tiene menor densidad que en líquido, por lo que el hielo flota sobre el agua líquida: esto resulta fundamental para mantener masas de agua (y los seres vivos que contienen) por debajo de capas de hielo formadas cuando la temperatura de la superficie terrestre desciende mucho, y para la existencia de océanos bajo las superficies de las lunas heladas del Sistema Solar exterior.

Es también relevante el hecho de que las moléculas de agua se disocian (en una proporción muy pequeña) en protones (cationes H⁺, estables en la forma de H₃O⁺) e hidroxilos (aniones OH⁻), por lo que pueden participar en reacciones entre ácidos (sustancias que liberan protones o aceptan hidroxilos) y bases (las que aceptan protones o liberan hidroxilos). Esto permite definir la escala de pH, inversamente proporcional a la concentración de protones, en la que (como vimos en capítulos anteriores) las disoluciones ácidas tienen valores de pH entre 0 (o incluso menores) y 7, las neutras tienen pH = 7 y las básicas entre 7 y 14. Además de las reacciones ácido-base, en medio acuoso también se pueden producir las de oxidación-reducción, que consisten en la transferencia de electrones entre una sustancia que los cede (y que, por tanto, «se oxida») y otra que los recibe («se reduce»).

Todo lo comentado hasta aquí hace que el agua sea una molécula esencial para la vida: es un disolvente inmejorable (tanto de sales y otros compuestos inorgánicos como de la mayor parte de las moléculas orgánicas que forman los seres vivos), permite que las sustancias llamadas anfifílicas (las que tienen una zona polar que interacciona con el agua y otra apolar que huye de ella) formen espontáneamente estructuras como bicapas (por ejemplo, las membranas constituidas por lípidos) y vesículas (compartimentos de tipo celular definidos por una membrana), acoge muchas reacciones entre biomoléculas e interviene activamente en ellas (promoviendo la formación y rotura de enlaces químicos), interacciona con las superficies de minerales y

rocas generando interfasas activas, es un estabilizador térmico altamente eficiente, supone un medio muy adecuado para el transporte de nutrientes y proporciona flotabilidad. Como consecuencia de ello gran parte de la vida transcurre en el agua, y esta molécula supone aproximadamente el 70 % de la masa de los seres vivos, tanto en microorganismos como en organismos pluricelulares.

Por otra parte, el agua es muy abundante en el Universo y aparecerá recurrentemente en el resto de este libro. Como vimos en el capítulo 3 el hidrógeno que forma parte de la molécula de agua se originó poco después del *Big Bang*, pero su oxígeno es el fruto de la nucleosíntesis estelar: por tanto, además de encontrarse en nubes moleculares está presente en torno a estrellas de, al menos, segunda generación. Así, en estado sólido el agua aparece en los discos protoplanetarios (en forma de hielo que recubre los granos de polvo y planetesimales), en las latitudes polares de varios planetas y satélites (como Mercurio, la Tierra, la Luna o Marte), formando la corteza de hielo de otras lunas (entre ellas Europa, Ganimedes, Calisto, Encélado o Tritón), en los núcleos de los cometas, en los asteroides y en otros cuerpos menores de los sistemas planetarios. El agua líquida existe, al menos, en los océanos subsuperficiales de varias lunas heladas del Sistema Solar (como Europa, Ganimedes, Calisto, Encélado, Dione, Titán y Tritón) y del planeta enano Plutón, en la superficie de la Tierra y muy probablemente en el subsuelo de Marte. A su vez, el vapor de agua forma parte de las atmósferas de varios planetas dentro y fuera del Sistema Solar, y de las (más o menos tenues) de ciertos satélites y algunos cuerpos menores. Además, el agua está presente en rocas, minerales y sales hidratadas, tanto en nuestro planeta como en una gran variedad de entornos extraterrestres.



Esquema comparativo del contenido total de agua (líquida y en forma de hielo) de distintos satélites del Sistema Solar considerados «mundos oceánicos», el planeta enano Plutón y la Tierra. Ilustración de María Lamprecht.

Dentro del Sistema Solar se estima que los «mundos oceánicos» como Calisto, Titán o Ganimedes contienen entre 30 y 50 veces más agua (líquida y en forma de hielo) que la Tierra. De hecho, aunque nos parezca que el agua es mayoritaria en nuestro planeta azul porque cubre casi tres cuartas partes de su superficie, los volúmenes de agua líquida y congelada suponen, respectivamente, sólo el 0,12 % y 0,0024 % del volumen total de la Tierra. Por otra parte, según se comentará más adelante, tanto asteroides como cometas contienen gran cantidad de esta molécula y de ellos proviene buena parte del agua que bebemos. Con todo, resulta evidente que la vida no sólo ha escogido un disolvente excepcional desde el punto de vista físico-químico, sino que además se trata de una sustancia muy común (y por tanto fácilmente disponible) en el Cosmos.

¿DISOLVENTES ALTERNATIVOS?

Suponemos que la química de la vida siempre requiere un medio líquido ya que las reacciones en fase gas solo se producen entre compuestos volátiles de pequeño tamaño, mientras que en el interior de un material sólido habría que recurrir a un proceso tan lento como la difusión de moléculas en su seno. Y, entre los líquidos posibles, la vida que conocemos ha escogido el agua. Hemos visto que sus propiedades son prácticamente imbatibles, pero aun así es necesario considerar la posibilidad de que otros disolventes pudieran reemplazar al agua en ciertos entornos extraterrestres, sirviendo como soporte para formas de vida alternativas. Desde hace algunas décadas se han propuesto líquidos inorgánicos como el amoníaco (NH_3), el nitrógeno líquido (N_2) o el ácido sulfúrico (H_2SO_4), así como otros orgánicos, entre ellos la formamida ($\text{CHO}-\text{NH}_2$) o los hidrocarburos metano (CH_4) y etano (CH_3-CH_3).

Los más abundantes de estos seis compuestos en diferentes cuerpos planetarios son el amoníaco, nitrógeno, metano y etano. El intervalo de temperaturas en que se mantienen en estado líquido a una atmósfera de presión es más estrecho que el del agua, y además éstas son mucho más bajas: entre -78°C y -33°C el NH_3 , de -210°C a -196°C el N_2 , entre -182°C y

–164 °C el CH₄, y de –183 °C a –89 °C el CH₃CH₃. En esas condiciones las posibles reacciones químicas serían muchísimo más lentas, ya que de media la velocidad de reacción se reduce a la mitad por cada 10 °C que disminuye la temperatura. Esto podría impedir que se realizaran de forma eficiente los procesos que requiere el origen y mantenimiento de la vida. Por otra parte, ninguna de estas cuatro moléculas podría acoger la bioquímica conocida, ni siquiera el amoníaco a pesar de que es una sustancia polar. Además, en tales medios el mantenimiento de seres vivos implicaría la formación de un tipo de compartimentos muy diferentes de los que en la Tierra son producidos por las bicapas lipídicas. Así, por ejemplo, en lugares donde existe metano y etano líquido en la superficie (como ocurre en Titán, según veremos en el capítulo 9), se ha propuesto que podrían formarse compartimentos llamados «azotosomas». Estarían compuestos por moléculas con nitrógeno (al que Lavoisier llamaba «azote», del griego *azoé*, que significa «sin vida»), carbono e hidrógeno, que se dispondrían exponiendo al líquido apolar sus extremos apolares y protegiendo sus cabezas polares en el interior de la bicapa: al revés que los lípidos en las membranas que se forman en medios acuosos. En cualquier caso, ésta es sólo una propuesta teórica y aún no se ha probado experimentalmente que tales «vesículas invertidas» puedan funcionar en metano o etano líquido. Adicionalmente, con cualquiera de estos disolventes habría que pensar en un metabolismo y un flujo de información heredable totalmente distintos a los que conocemos.

Por su parte, a una atmósfera de presión la formamida es líquida desde los +2,5 °C a los +210 °C, por lo que en principio sí podría funcionar como un buen disolvente de sustancias orgánicas. Además, es uno de los precursores de la química prebiótica y se forma por reacción de dos moléculas muy abundantes en el Universo: el agua y el cianuro de hidrógeno (HCN). Sin embargo, hasta ahora no se ha encontrado formamida en estado líquido en ningún planeta o satélite, y sólo ha sido detectada como una de las moléculas presentes en algunos cometas y en los hielos que recubren a los granos de polvo en las nebulosas. En cualquier caso, éste es un compuesto prometedor y conviene tenerlo presente.

En cuanto al ácido sulfúrico, el rango de temperatura en que permanece en estado líquido es aún más amplio (de +10 °C a +337 °C). Pero su extrema acidez en un entorno acuoso es incompatible con la estabilidad de casi todas las moléculas, en las que induce reacciones de degradación o hidrólisis. De todos modos, este compuesto volverá a aparecer cuando en el capítulo 10 conozcamos la atmósfera de Venus. El efecto hidrolítico que los ácidos ejercen sobre las biomoléculas también elimina de la lista de disolventes viables otros que en ocasiones se han podido plantear, como el ácido fluorhídrico (HF), el clorhídrico (HCl) o el sulfhídrico (H₂S), que además no aportan ninguna otra ventaja sobre el agua.

En resumen, por el momento no se conocen compuestos que pudieran reemplazar al agua como sustento de otras vidas. Y resulta difícil investigar sobre esta posibilidad en nuestro planeta, ya que ningún organismo terrestre del que tengamos noticia (con la excepción de algunas bacterias extremófilas resistentes a ciertos disolventes orgánicos) son viables en medios no acuosos. Por tanto, como iremos viendo en los próximos capítulos, la búsqueda de vida extraterrestre se ha basado en la detección del agua como condición necesaria (aunque no suficiente) para que la química pueda dar lugar a la biología.

LA TABLA PERIÓDICA DE LOS SERES VIVOS

En cuanto a la composición elemental de los seres vivos, está claro que contenemos una representación muy sesgada de la tabla periódica, que además resulta diferente de los elementos que forman las estrellas y la corteza de los planetas rocosos. Así, el 99 % de la materia viva está constituida únicamente por seis elementos, que en orden decreciente de la masa total son: oxígeno (O, 65,9 %), carbono (C, 18,3 %), hidrógeno (H, 10,2 %), nitrógeno (N, 3,2 %), fósforo (P, 1,1 %) y azufre (S, 0,3 %). Además de esos elementos mayoritarios, el ya mencionado «grupo CHONPS», en el 1 % restante se incluyen otros que resultan imprescindibles en las células, entre ellos sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), cloro (Cl) o yodo (I). En total, de los 92 elementos naturales que existen de forma estable en el Universo, sólo 27 forman parte de los seres vivos conocidos.

Entre los seis elementos CHONPS mayoritarios de la vida, el C es el que resulta central en la construcción de biomoléculas, como veremos. El H y el O forman el agua, y además se enlazan al carbono en un gran número de grupos funcionales (como alcoholes, aldehídos, cetonas o ácidos) que aparecen en buena parte de las moléculas biológicas. El N interviene en varios grupos funcionales (como aminas, amidas y nitrilos), siendo un constituyente fundamental de los aminoácidos que forman las proteínas y de las bases nitrogenadas en los nucleótidos del DNA y el RNA. Por su parte, el P está presente en los grupos fosfato de los nucleótidos y de las moléculas ricas en energía como el trifosfato de adenosina o de guanosina (ATP y GTP, protagonistas del metabolismo celular), así como en los lípidos que forman las membranas celulares. A su vez, el S aparece en dos aminoácidos de las proteínas (la cisteína, que resulta clave para la estructura de algunas de ellas,

y la metionina), y en los agregados Fe-S que incluyen ciertas enzimas implicadas en reacciones metabólicas.

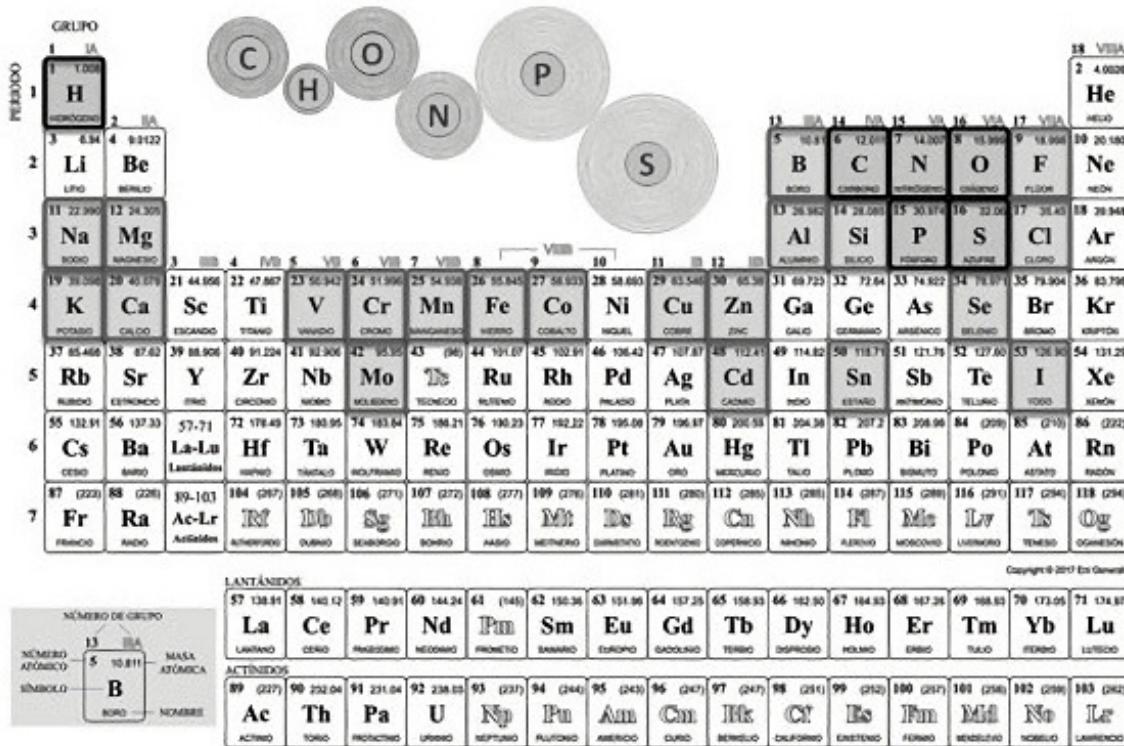
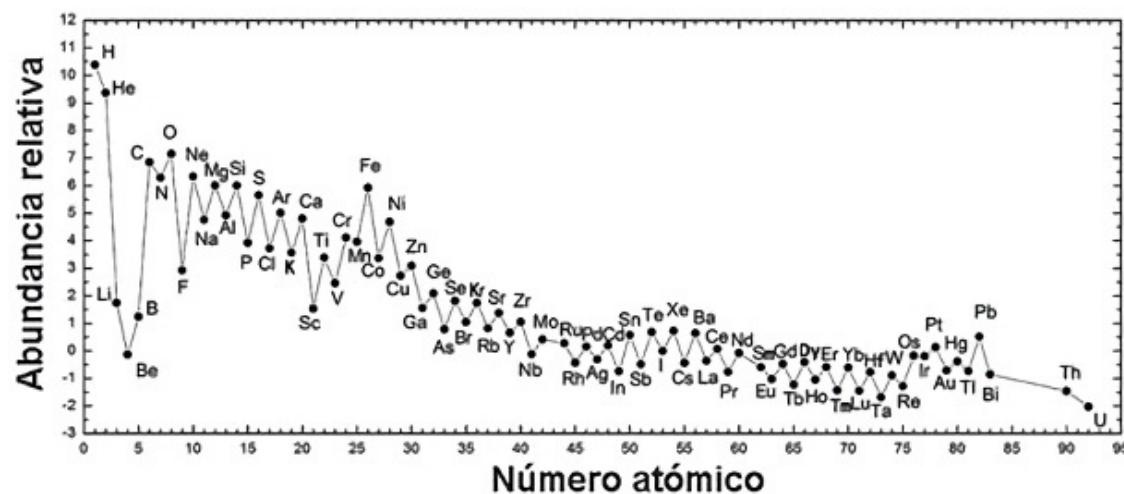


Tabla periódica de los elementos, señalando en negro los seis fundamentales para la vida y en gris los otros veintiuno también presentes en los seres vivos. El tamaño relativo y número de electrones en el «grupo CHONPS» se muestra esquemáticamente en la parte superior. Figura elaborada por el autor a partir de imágenes de www.periodni.com y Wikimedia Commons.

En nuestro planeta resultan fundamentales para el mantenimiento de la vida los ciclos geoquímicos de estos seis elementos, en los que interviene la dinámica atmosférica y el reciclaje superficial mediado por la tectónica de placas. En cuanto a su abundancia en el Universo, las estimaciones hechas en función del porcentaje de su masa en el Sistema Solar y nuestra galaxia indican que el H es el 1.^o, O el 3.^o, C el 4.^o, N el 7.^o, S el 10.^o y P el 18.^o. Por lo tanto, con excepción del P, la vida ha escogido elementos muy comunes en el Cosmos siempre que su reactividad química fuese suficientemente alta (lo que descartó un gas noble como el helio, He, 2.^o en abundancia pero que no se enlaza con ningún otro elemento).

En cuanto al P, en nuestro planeta es también poco abundante y la mayor parte de él se encuentra «secuestrado» en forma de fosfatos de calcio [con fórmulas complejas, tipo Ca₅(PO₄)₃(F,Cl,OH)] en los minerales del grupo de la apatita. Así, uno de los problemas en el campo del origen de la vida es proponer entornos de la Tierra primitiva donde el P pudiera estar suficientemente disponible como para incorporarse a las biomoléculas. Se

cree que los lagos ricos en carbonatos podrían ser buenos ejemplos, ya que en ellos el Ca precipitaría formando CaCO_3 en vez de fosfatos, lo que dejaría el P en solución y disponible para contribuir a la bioquímica. En el caso de Marte esta opción parece más complicada ya que allí se han encontrado pocos sedimentos con carbonatos, lo que quizás pudo dificultar la biodisponibilidad del P para un eventual origen de la vida en ese planeta. De hecho, en todos los meteoritos que nos han ido llegando desde Marte se ha detectado la presencia de apatita. ¿Puede que en el planeta rojo surgiera una vida sin P? Habrá que investigar sobre esa posibilidad.



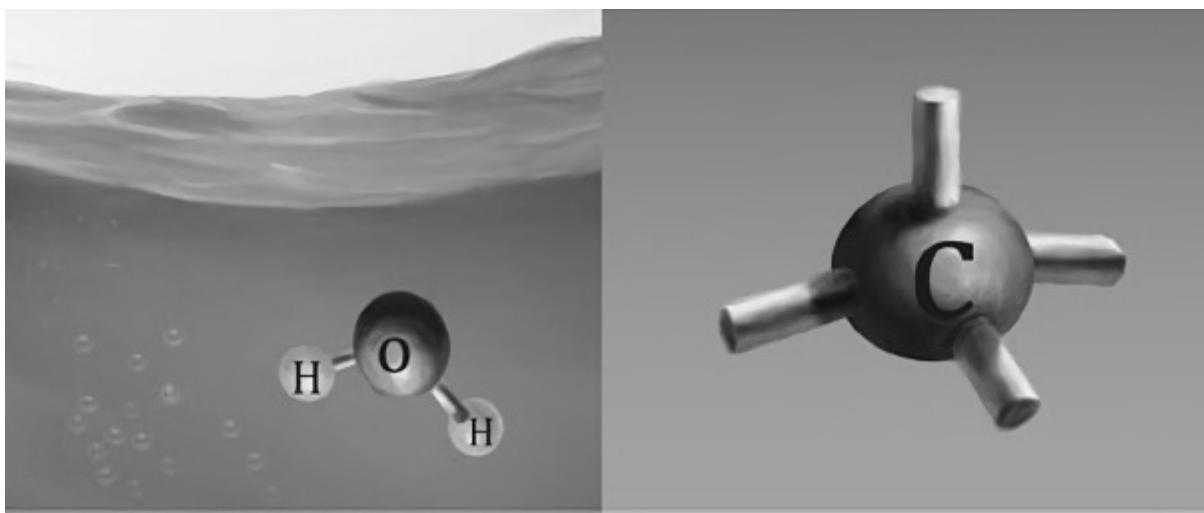
Abundancia relativa de los elementos químicos en el Sistema Solar, utilizando una escala logarítmica y normalizada a una abundancia de 10^6 para el Si. Gráfica tomada de Wikimedia Commons.

Volviendo a la Tierra, merece la pena recordar que en 2010 la NASA anunció el descubrimiento, en el lago Mono de California, de una especie de bacteria halófila que en vez de fósforo utilizaba en sus biomoléculas arsénico (As, su «vecino de abajo» en la tabla periódica y con características electrónicas similares). Una propuesta tan extraordinaria como esa requería pruebas irrefutables, entre ellas demostrar que realmente en el DNA y el RNA de ese microorganismo el As había reemplazado al P, o que su principal molécula energética no era el ATP sino un compuesto hasta entonces desconocido: el triarsenato de adenosina (ATAs). Tales evidencias nunca llegaron, por lo que hoy suponemos que ése es un microorganismo extremófilo muy interesante por ser altamente resistente a un elemento tóxico para el metabolismo celular como es el As... pero ni mucho menos se trata de una excepción al hecho de que el P es un elemento fundamental en todos los seres vivos conocidos.

EL CARBONO Y LA VIDA

Entre los elementos del grupo CHONPS, el protagonista indiscutible de la vida es el carbono. Debido a su pequeño tamaño y a su configuración electrónica tiene una gran facilidad para formar cuatro enlaces covalentes, en los que se comparten electrones entre los átomos enlazados. La molécula orgánica más sencilla es el metano (CH_4) y los enlaces (sencillos, dobles o triples) entre átomos de C dan lugar a una gran variedad de compuestos, tanto lineales como cíclicos, que además contienen grupos funcionales en los que pueden intervenir los otros cinco elementos mayoritarios. Las cadenas de tipo $-\text{C}-\text{C}-\text{C}-$ (en las que cada átomo de C forma además otros dos enlaces con diferentes elementos del grupo CHONPS, o un enlace doble con el O) son muy estables, pero a la vez tienen suficiente flexibilidad como para adoptar estructuras funcionales. En las proteínas, por ejemplo, el biopolímero resultante (por repetición de unidades $-\text{NH}-\text{CHR}-\text{CO}-$, en las que «R» es el grupo característico de cada aminoácido) puede realizar un gran número de funciones diferentes. En el caso de los ácidos nucleicos, por su parte, la clave está en formar polímeros de tipo azúcar-fosfato de naturaleza polianiónica (con cargas negativas en cada grupo fosfato) que por repulsión entre dichas cargas tienden a mantenerse extendidos en vez de plegados: esto ocurre en la doble hélice del DNA, por lo que resulta una molécula óptima como archivo de información genética. El RNA muestra un comportamiento intermedio ya que, como vimos en el capítulo 3, combina su potencial como biopolímero informativo con la posibilidad de plegarse en disolución y generar estructuras funcionales.

Hoy en día se conocen más de quince millones de compuestos orgánicos diferentes (naturales y sintéticos), lo que demuestra que la química basada en el C es extraordinariamente versátil y pudo proporcionar el repertorio molecular que se requería para el origen de la vida. Además, el C también puede formar compuestos inorgánicos que resultan muy importantes en los procesos biológicos, como el monóxido y el dióxido de carbono (CO y CO_2), los carbonatos e hidrogenocarbonatos (con los aniones CO_{3}^{2-} y HCO_{3}^{-} , respectivamente), y otro que es un veneno para nosotros pero que, como vimos, pudo resultar fundamental en las reacciones de química prebiótica que dieron lugar a la vida: el cianuro de hidrógeno (HCN).



Los ingredientes fundamentales para la vida: agua y carbono. Ilustración de María Lamprecht.

Por todo ello, al igual que el agua resulta el mejor medio para que la vida se desarrolle en su seno, es difícil pensar en una opción más ventajosa que el C como soporte material para los seres vivos. Recordemos el poema de Enzensberger al comienzo de este capítulo, y también lo que el escritor y químico italiano Primo Levi decía cuando dedicó a este elemento el último relato de su sugerente libro *El sistema periódico*: «Ocurre, pues, que cada elemento le dice algo a cada uno (a cada cual una cosa diferente), igual que pasa con los valles o las playas visitadas durante la juventud. Y, sin embargo, tal vez convenga hacer una excepción con el carbono, porque a todos se lo dice todo».

¿VIDA BASADA EN EL SILICIO?

Pensando en la vida, si hay otro elemento que pueda decirle algo a alguien, sería el silicio (Si). En la tabla periódica lo encontramos justo debajo del C, lo que implica que la configuración de su última capa electrónica es igual, teniendo cuatro electrones disponibles para formar enlaces covalentes. Además es también muy abundante en nuestra galaxia, ya que resulta el 8.^º en masa. De hecho, es la base de los silicatos que forman buena parte de los granos de polvo en las nebulosas, y dentro del Sistema Solar lo encontramos en los planetas rocosos, satélites y cuerpos menores. En la corteza terrestre es mucho más abundante que el C, lo que podría haberlo convertido en un buen candidato para originar un amplio repertorio molecular. Pero ¿realmente este

elemento puede generar una química comparable a la del C, que hiciera viable una vida basada en Si?

No. A pesar de las similitudes de su última capa de electrones, el mayor tamaño del Si y su menor electronegatividad respecto del C hace que tenga mucha menos capacidad para formar enlaces, y el número de moléculas que puede originar resulta insignificante con respecto a las basadas en C. De hecho, sólo da lugar a dos tipos principales de compuestos. El primero es el silano (SiH_4), que sería el equivalente al metano (CH_4) aunque la mayor reactividad del enlace Si–H hace que esta molécula sea mucho más inestable que el CH_4 . Por ese motivo, y porque además los enlaces Si–Si son más débiles que los C–C, los polisilanos (polímeros lineales formados por unidades $-\text{SiH}_2-$) son mucho menos estables que los hidrocarburos y el resto de moléculas basadas en el grupo $-\text{CH}_2-$. Además, el O tiene gran afinidad por el Si, por lo que los silanos se descomponen fácilmente en presencia de este elemento. En consecuencia, apenas se encuentran polisilanos en la naturaleza mientras que los hidrocarburos son ubicuos en la Tierra y (como veremos en los capítulos siguientes) relativamente abundantes en otros lugares del Universo. De hecho, una bioquímica extraterrestre basada en silanos requeriría que no existiera el elemento O ni la molécula O_2 en el entorno, por lo que debería funcionar en disolventes alternativos al agua como el amoníaco, nitrógeno molecular, metano o etano... que según hemos visto son líquidos a temperaturas demasiado bajas. En principio podría existir algo así, aunque no se conocen evidencias experimentales que lo apoyen.

El segundo tipo de moléculas que origina el Si son, precisamente, las basadas en su unión al O. A diferencia del C, que forma tanto enlaces sencillos como dobles con el O, los enlaces estables Si–O son siempre sencillos. La combinación de estos dos elementos da lugar a dióxido de silicio o sílice, habitualmente escrito como SiO_2 pero que en realidad no es una molécula $\text{O}=\text{Si}=\text{O}$ sino el monómero de unas estructuras extensas y tridimensionales de tipo $-\text{SiO}_2-\text{O}-\text{SiO}_2-\text{O}-$, como el cuarzo y todas sus variedades. Estos minerales son prácticamente insolubles en agua o en cualquier otro disolvente, y sólo pueden encontrarse en estado gaseoso por encima de los 2000 °C. Por tanto, no existen compuestos basados en Si equivalentes al CO_2 (la molécula $\text{O}=\text{C}=\text{O}$), un gas que se disuelve en el agua y permite llevar C a los microorganismos o macroorganismos acuáticos para formar su biomasa (entre ellos, los autótrofos que realizan fotosíntesis). De hecho, el Si no se une a ningún otro elemento con el que pueda originar moléculas gaseosas en condiciones ambientales que sean compatibles con la existencia de algún tipo de vida. Adicionalmente, la ausencia de enlaces dobles en la química del Si es otro motivo por el que no pueden formarse

biopolímeros basados en este elemento que sean equivalentes a los azúcares, las proteínas o los ácidos nucleicos.

Algunos autores han propuesto como polímeros alternativos basados en Si los llamados siloxanos, en los que a partir de una cadena $-Si-O-Si-O-$, el Si podría enlazarse a dos átomos de C y con ello adquirir ciertas funcionalidades propias de la química orgánica. Las siliconas artificiales son ejemplos conocidos de este tipo de moléculas, y aunque resultan muy poco reactivas quizá compuestos análogos (tanto lineales como cíclicos) podrían ser funcionales en algunas condiciones extraterrestres. No obstante, aún no existen pruebas sobre ello. En este contexto, es interesante comentar que en 2016 se publicó un artículo que mostraba cómo en experimentos de laboratorio (que utilizaban ingeniería genética y evolución dirigida) se había logrado que una enzima bacteriana incorporara átomos de Si a moléculas basadas en C, catalizando la formación de enlaces directos C–Si, que no existen en la naturaleza. Tal resultado reforzaba el hecho de que ambos elementos tienen notables similitudes químicas, pero no aumentaba las opciones de que pueda existir una vida basada en Si.

A diferencia de sus claras limitaciones en el mundo biológico, en la geología el Si tiene un gran protagonismo. Precisamente, la elevada afinidad del Si por el O y su tendencia a formar enlaces sencillos con él, hacen que el anión silicato (SiO_{44-}) sea muy estable y haya originado gran variedad de silicatos al unirse a diferentes cationes como el aluminio (Al^{3+}), magnesio (Mg^{2+}), hierro (Fe^{3+}), o calcio (Ca^{2+}). De hecho, los silicatos son los principales componentes minerales de los granos de polvo presentes en las nebulosas, y constituyen las rocas más abundantes de la corteza terrestre, suponiendo el 95 % de su masa. En el campo del origen de la vida, hoy sabemos que los silicatos pudieron proporcionar entornos óptimos (como en el caso de las arcillas de tipo montmorillonita) para la química prebiótica. Además, en ocasiones la biología ha aprovechado la capacidad de los silicatos para formar armazones estructurales rígidos, por lo que el Si es abundante en algunos organismos unicelulares eucarióticos del reino Protista (como las algas diatomeas y los radiolarios), apareciendo también en otros seres vivos, desde los tallos de algunas plantas a los huesos y cartílagos de los vertebrados.

En el Universo, aparte de los silicatos se han detectado menos de 10 moléculas que contienen Si, y la mitad de ellas incluyen también C. Por el contrario, como vimos anteriormente, los compuestos basados en C, tanto orgánicos como inorgánicos, son ubicuos en el Cosmos y ya se han encontrado más de 200 diferentes en nebulosas y otros entornos extraterrestres. Quizá ese repertorio de moléculas pequeñas basadas en C es la única baraja de cartas que puede utilizar cualquier tipo de vida, aunque en

diferentes planetas sirva para practicar juegos muy diferentes, con reglas que van decidiendo los propios jugadores.

Por todo ello, parece claro que el Si resulta fundamental en el mundo geológico... pero no es una buena opción para originar una bioquímica alternativa a la basada en C. Un gran experto en silicatos, el geólogo y cristalógrafo Cristóbal Viedma (que además ha realizado aportaciones fundamentales en el campo de la quiralidad de las moléculas) suele reconocer que «la química del Si es casi inexistente, podríamos decir que miserable, en comparación con la del C».

Esta conclusión, compartida por la mayor parte de los científicos, es tachada de «prejuicio carbonocéntrico» o incluso de «chauvinismo del carbono» desde el ámbito de la ficción, donde las propuestas de vidas basadas en silicio han ido sucediéndose durante el último medio siglo. Así, por ejemplo, en el ya mítico capítulo de la serie *Star Trek* titulado «El diablo en la oscuridad» (dirigido por Joseph Pevney en 1967), en la colonia minera del planeta Janus IV aparece una criatura asesina: se llama Horta, es muy inteligente, excava túneles en el subsuelo segregando un ácido corrosivo, pone huevos... y (como se podía sospechar por su aspecto rocoso) está basada en silicio. En la película *La amenaza de Andrómeda* (Robert Wise, 1971), una extraña forma de vida microbiana llegada a nuestro planeta acaba con los humanos a los que infecta: los científicos la investigan y descubren que crece como una estructura cristalina probablemente compuesta por silicio. Y en *Alien: el octavo pasajero* (dirigida por Ridley Scott en 1979) el monstruo extraterrestre contiene «estructuras polisiliconadas» a modo de venas, que le permiten conducir ácidos en vez de sangre. Es curioso pero, quizá por pertenecer a la misma comunidad de vecinos en la tabla periódica, ninguno de los seres vivos formados por silicio tiene buenas relaciones con los basados en carbono.

Por último, aparte del C y el Si, los demás elementos (que podemos llamar genéricamente «E») que tendrían alguna posibilidad de formar cadenas lineales de tipo -E-E-E-, en las que además les quede uno o dos enlaces disponibles para unirse a otros elementos (X, Y, Z, etcétera) y así introducir funcionalidades químicas o algún tipo de información (en polímeros -EX-EY-EZ- o bien -EXX-EXY-EXZ-, por ejemplo), son sólo 7: boro (B), N, P, arsénico (As), antimonio (Sb), germanio (Ge) y estaño (Sn). Entre ellos, recordemoslo, sólo el N (y en menor medida el P) son abundantes en nuestro entorno cósmico. Y ambos tienen más tendencia a unirse al C, H y O, originando grupos funcionales, que a sí mismos para formar cadenas.

¿BIOQUÍMICAS ALTERNATIVAS?

Como hemos visto, resulta muy difícil plantear alternativas viables al agua y al carbono. Pero, incluso con esa misma base química, las opciones que podría haber encontrado la bioquímica para generar otra vida son muchas y muy variadas, en función de las características ambientales y las restricciones geológicas del entorno donde se hubiera originado. De hecho, a partir del C las posibilidades resultan prácticamente infinitas. Podrían haberse escogido monómeros diferentes basados en CHON (con o sin P y S), otros representantes de las mismas familias que ya conocemos (por ejemplo, un número o repertorio distinto de aminoácidos o de bases nitrogenadas, entre los muchos que se producen por síntesis química y se han encontrado en meteoritos), o bien las mismas moléculas pero con diferente quiralidad (aminoácidos D o azúcares L, como vimos en el capítulo 3). Además, una vez seleccionados los componentes, si a partir de algunos de ellos se forman polímeros (que parecen sistemas óptimos como moléculas funcionales y como archivos de información heredable, pero quizás no resultan imprescindibles) éstos podrían ser distintos en cuanto a sus secuencias de monómeros, estructuras tridimensionales y funciones.

Para plantear un caso concreto, pensemos que pudiera existir un químico orgánico que no supiera nada de bioquímica ni biología molecular (algo imposible en la actualidad), y le pidiéramos que imaginara una molécula basada en C capaz de contener información heredable. Probablemente nos propondría varias opciones, pero ninguna de ellas sería un polímero lineal formado por grupos fosfato y ribosa, de forma que uno de los átomos de C de este azúcar esté enlazado a un heterociclo de C y N del que pueda haber cuatro variantes posibles, y que el conjunto origine una cadena helicoidal que se une mediante puentes de hidrógeno a otra cadena complementaria y antiparalela, formando una doble hélice. Esta molécula tan compleja (e impredecible para nuestro químico orgánico) es precisamente el DNA, el polímero que ya antes de LUCA había escogido la vida para mantener y transmitir la información genética. De hecho, actualmente una de las líneas de investigación en los campos del origen de la vida y la astrobiología es el diseño y síntesis de polímeros alternativos a los ácidos nucleicos de los seres vivos, que podrían haber protagonizado un «Mundo pre-RNA» (anterior al «Mundo RNA» del que ya hemos hablado), y que tal vez proporcionaran opciones para la aparición de moléculas con información heredable en otros planetas o satélites.

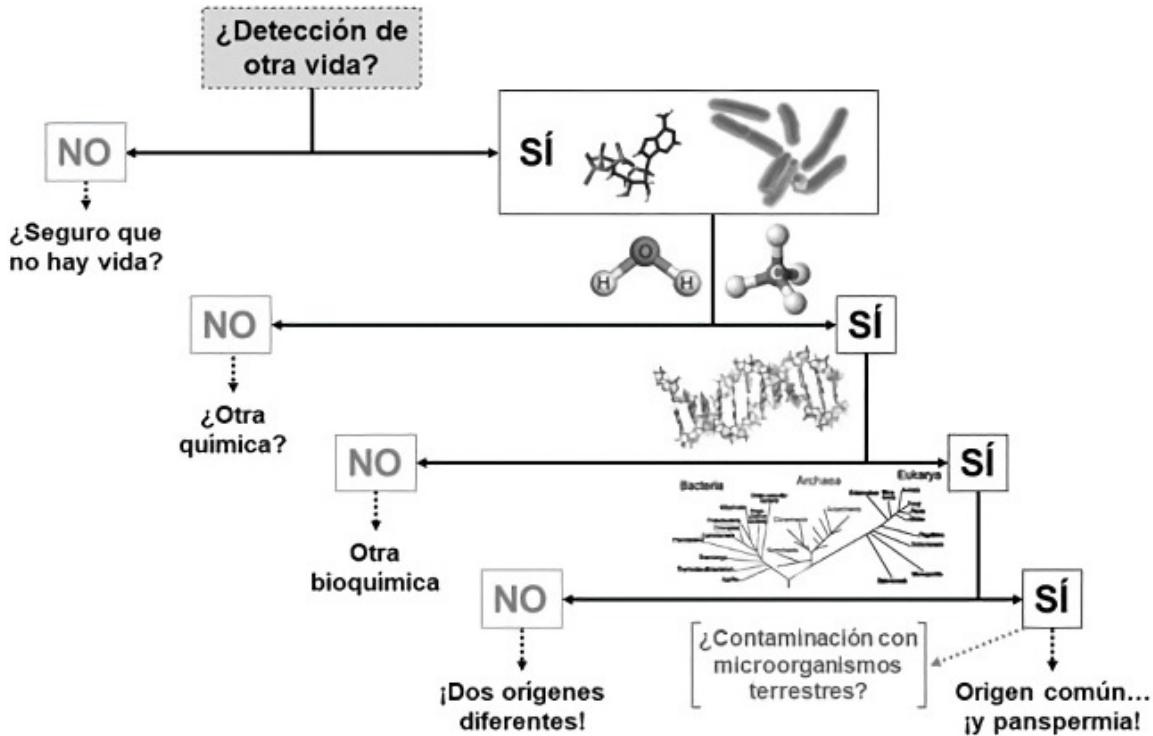


Diagrama de flujo que podría seguirse para la detección de vida extraterrestre. En caso de que una técnica analítica o un biosensor dieran señales positivas para algún biomarcador molecular (en el dibujo, ATP) o sistema replicativo (en el esquema, bacterias), habría que preguntarse si esa vida está basada en agua y carbono. Si la respuesta es afirmativa, deberíamos averiguar si usa la misma bioquímica (en concreto, si tiene DNA), y en ese caso secuenciarlo para comprobar si su secuencia corresponde (o es muy similar) a la de alguna especie presente en los árboles evolutivos terrestres. Salvo que hubiéramos detectado un contaminante llevado desde nuestro planeta (de lo que hablaremos en el próximo capítulo), recordando a Arthur C. Clarke podemos decir que, para cualquiera de los otros casos, la conclusión sería asombrosa. Figura elaborada por el autor.

Hemos de estar abiertos a encontrar otras biosferas en el Cosmos cuya bioquímica se base en el agua y el carbono, tanto si resulta similar a la que conocemos como si es muy diferente de ella. En el segundo caso, necesitaremos proponer métodos de detección que vayan más allá de la vida terrestre: un auténtico reto.

EN BUSCA DE BIOMARCADORES

Buscar otras vidas en el Cosmos supone tratar de descubrir señales de actividad biológica pasada o presente en un planeta, satélite u otro cuerpo extraterrestre. Esos signos de vida podrían encontrarse en la superficie, el

subsuelo o la atmósfera del lugar visitado por las misiones u observado utilizando telescopios. Sin entrar en detalles técnicos, podríamos definir «biomarcador» o «biofirma» (dos términos que en este contexto consideraremos equivalentes) como una señal o proceso que resulte claramente detectable y cuantificable, y cuyo origen sea *inequívocamente biológico*, es decir, que no se pueda producir abióticamente por actividades geológicas o reacciones químicas no relacionadas con la vida. Por tanto, detectar un biomarcador fuera de la Tierra supondría haber descubierto vida en ese lugar. Y para afirmar esto, lógicamente, habrá que descartar cualquier posible origen no biológico de esa señal... además de estar seguros de que no hemos detectado vida terrestre previamente llevada en nuestros robots (importante tema, al que dedicaremos el siguiente capítulo).

Existen distintos tipos de biomarcadores o biofirmas que pueden ser válidos en el contexto de la astrobiología. Los más evidentes supondrían la identificación visual de seres vivos o sus restos: por observación directa de fósiles o del propio organismo (en el improbable caso de que fueran macroscópicos), o utilizando técnicas de microscopía si son microfósiles o microorganismos actuales (aunque, según comentábamos en el capítulo 2, existe la posibilidad de identificar erróneamente ciertos biomorfos abióticos como señales de vida microbiana pasada o presente). También se pueden observar, en vez de los propios seres vivos, las estructuras producidas por ellos: entre los ejemplos terrestres están los estromatolitos formados por fosilización de comunidades microbianas (como comentamos en el capítulo 3), un panal de miel, un termitero o la concha de un molusco.

Otro caso relacionado es el de ciertos minerales cuya composición y/o estructura nos puede indicar que en su origen intervinieron los microorganismos (como en ocasiones ocurre con la pirita o los carbonatos), aunque en el capítulo 7 veremos cómo la magnetita ejemplifica lo complicado que llega a resultar distinguir entre su formación abiótica y un proceso de biomineralización. En este sentido es interesante destacar que, de los cerca de 5300 minerales diferentes que se conocen en nuestro planeta, un pequeño grupo de ellos son auténticos biomarcadores porque sólo se producen en presencia de microorganismos (mientras están vivos, o al descomponerse). Un ejemplo es la hazenita: un fosfato hidratado de sodio, potasio y magnesio, que se ha detectado únicamente en las proximidades del lago Mono en California, y cuyo nombre es un homenaje al astrobiólogo Robert M. Hazen.

El desbalance isotópico en determinados elementos (entre ellos, los del grupo CHONPS y otros como el Fe) presentes en minerales y rocas también puede resultar un biomarcador adecuado, ya que las actividades biológicas tienden a escoger los isótopos más ligeros de cada elemento. Por otra parte, la detección en una atmósfera de un gas que no esté en equilibrio (es decir, que aparezca y/o desaparezca de ella en tiempos cortos en comparación con los

períodos geológicos) también podría considerarse un biomarcador si su origen es claramente biológico, aunque en el capítulo 7 mostraremos lo complicado que está resultando en Marte el caso de las detecciones puntuales de metano u oxígeno molecular. Además, dando un salto al final de este libro, recibir una señal electromagnética con características inequívocamente artificiales supondría un biomarcador de vida inteligente (lo que a veces se conoce como una «tecnofirma»)... pero antes habría que descartar por completo lo más probable: el origen natural de la radiación detectada.

En astrobiología nos interesan especialmente los biomarcadores moleculares: compuestos que sólo pueden ser producidos por el metabolismo de los seres vivos ya que su síntesis química es imposible en las condiciones del lugar en el que aparecen (es decir, en su contexto geoquímico y temporal). Entre ellos estarían, por ejemplo, distintos tipos de lípidos, metabolitos, antibióticos u otras biomoléculas de pequeño tamaño, y por supuesto los polímeros como polisacáridos, proteínas, RNA o DNA. También quedan incluidas aquí las moléculas que se forman como productos de degradación de algunos de dichos biomarcadores, debido a procesos de «diagénesis»: alteraciones físico-químicas como aumentos de presión, temperatura, radiación o exposición a compuestos oxidantes. Un ejemplo de estas moléculas es el hopano, originado por degradación de los hopanoides (lípidos similares al colesterol presentes en las membranas bacterianas), que se ha encontrado en rocas terrestres de hasta 2000 millones de años de antigüedad. Por tanto, constituye un biomarcador de vida extinta muy adecuado: si detectáramos hopano en la superficie o el subsuelo de Marte, por ejemplo, sería una señal de que en el pasado vivieron allí bacterias similares a las terrestres. Además, como se ha comentado, el descubrimiento de homoirregularidad en las moléculas que pueden existir en formas simétricas L y D (como aminoácidos o azúcares) sería en sí mismo un biomarcador, pues cuando estos compuestos tienen un origen meramente químico (por ejemplo, en meteoritos) aparecen en mezclas al 50 % de cada variante (llamadas «racémicas») y son los seres vivos (al menos, eso hacen los terrestres) quienes se han decantado por utilizar sólo una de las dos formas.

Lógicamente, todas las moléculas orgánicas detectadas en el medio interestelar y circunestelar (de las que hablamos en el capítulo 3), asteroides y meteoritos (que aparecerán en el 10) o cometas (en el 11) no pueden considerarse biomarcadores. Entre ellas están incluidos muchos precursores de la química prebiótica, la ribosa y otros azúcares simples, varios aminoácidos, así como moléculas orgánicas que hasta hace poco tiempo sí se habían considerado biomarcadores válidos. Un ejemplo de estas últimas es el cloruro de metilo, CH_3Cl , un gas producido en la Tierra por los seres vivos (incluyendo nuestra especie, que lo sintetiza con el nombre de «Freón 40» para su uso como refrigerante), pero que en 2017 fue detectado alrededor de

una estrella joven y en el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Tampoco son biomarcadores moleculares las mezclas complejas de hidrocarburos y otros compuestos orgánicos que se han descubierto en diferentes entornos extraterrestres, y que aparecen como materiales insolubles de distintos tipos, entre ellos el kerógeno o las tolinas.

La constatación de que muchas biomoléculas pueden ser producidas abióticamente en el Cosmos nos obliga a ser muy cautos. Así, por ejemplo, un *rover* que trabajara en la superficie de Marte o una sonda que sobrevolara los géiseres de Encélado podría detectar formaldehído, urea, ribosa y además los aminoácidos glicina y alanina: a pesar de lo extraordinario que sería descubrir allí tal mezcla de moléculas orgánicas, todas ellas fundamentales en los seres vivos, esto no supondría una prueba irrefutable de que se ha encontrado vida.

Existen distintas técnicas para la detección de biomarcadores, como las espectroscópicas o las basadas en cromatografía de gases y espectrometría de masas (*GC/MS*), que irán apareciendo a lo largo de los próximos capítulos. Y también disponemos de biosensores específicamente diseñados para la detección de biomarcadores moleculares, aunque aún no han sido probados en exploración espacial. Un ejemplo es el instrumento *Signs of Life Detector (SOLID)*, construido en el Centro de Astrobiología, del que hablaremos en la entrevista con la que termina el capítulo. Con este biosensor podría detectarse un rango muy amplio de moléculas orgánicas y de biomoléculas presentes en los seres vivos conocidos, tanto de pequeño tamaño como polímeros e incluso agregados macromoleculares.

Pero, según comentábamos en los apartados anteriores, la bioquímica y la biología, siempre a medio camino entre el azar y la necesidad, pueden haber seguido en otros lugares caminos diferentes de los explorados en la Tierra. Y hemos de estar preparados para ello. Como una forma de ir más allá de la «bioquímica terracéntrica», recientemente hemos propuesto desde el Centro de Astrobiología una aproximación que combina la utilidad de *SOLID* para detectar vida similar a la terrestre con una variante de la espectrometría Raman (que permite detectar vibraciones y rotaciones moleculares) con la cual se podría identificar la existencia de biopolímeros estructurados (y, por tanto, probablemente funcionales) independientemente de qué tipo de monómeros (similares o no a los que utiliza la vida terrestre) los estén formando. Si de esta forma se detectaran otras vidas en el Sistema Solar quizás descubriéramos que nuestra bioquímica, basada en proteínas y ácidos nucleicos, es la excepción y no la regla.

En cualquier caso, no sabemos si la búsqueda sistemática de diferentes tipos de biomarcadores nos permitirá encontrar señales de actividad biológica fuera de nuestro planeta. Los más optimistas piensan que quizás faltan veinte años para descubrir vida extraterrestre... aunque a partir de ese momento se necesitarían otros veinte para analizarla en profundidad... y probablemente

veinte más hasta ponernos de acuerdo sobre si los resultados indican que realmente se había encontrado vida. De todos modos, como afirmaba recientemente Michel Mayor, codescubridor del primer planeta orbitando otra estrella de tipo solar y de quien hablaremos en el penúltimo capítulo: «Es irrelevante si uno cree o no cree en la existencia de vida extraterrestre: lo que debe hacer es investigar para intentar probarlo». En efecto, estamos ante un campo para el que la cultura popular, las creencias y la ciencia ficción han sugerido propuestas a cuál más imaginativa, según iremos viendo. Pero si alguna vez tenemos una respuesta a la gran pregunta, ésta vendrá de la mano de la ciencia.



Un café con... Víctor Parro



Doctor en Biología. Director del Centro de Astrobiología (CSIC-INTA) y Coordinador del Grupo de Biomoléculas en Exploración Planetaria en el Departamento de Evolución Molecular (Torrejón de Ardoz, Madrid).

Desde los comienzos del Centro de Astrobiología, un tema de investigación por el que compartimos gran interés es el de los biomarcadores. ¿Cuál sería, en tu opinión, el biomarcador más convincente para que la comunidad científica pudiera afirmar que se ha encontrado vida en Marte?

Sin duda, lo mejor sería encontrar un microorganismo en una de las muestras que se recojan. Pero no será fácil que eso ocurra, claro. Siendo más realistas, cualquier evidencia inequívoca de que ha habido (o hay) un proceso biológico operando en un entorno del planeta podría valer. En mi opinión, el biomarcador molecular mínimo sería un compuesto que sólo pueda ser sintetizado por un ser vivo. Hasta ahora, el tipo de moléculas más sencillas que se consideran biológicas son ciertos lípidos, en concreto los de la familia de los hopanoides. Estos compuestos son similares al colesterol que forma parte de las membranas de las bacterias, y sólo se pueden originar a través de

reacciones enzimáticas de su metabolismo. En ausencia de vida, la química orgánica no puede sintetizar este tipo de moléculas en un entorno natural.

Sabemos que en la Tierra estos compuestos, o sus formas modificadas, aguantan mucho tiempo en el ambiente, sin degradarse, después de morir la bacteria a la que pertenecían. Por tanto, si encontramos un hopanoide en Marte nos estaría diciendo que allí hay vida... o que la hubo en el pasado. Y también, por supuesto, serían biomarcadores muy adecuados las biomoléculas más complejas y funcionales que forman parte de la vida: péptidos largos, proteínas o ácidos nucleicos. Pero éstas se degradan más rápido, así que sólo si hay vida activa en el momento del muestreo podríamos encontrarlas.

¿Y en Europa o Encélado, donde la bioquímica puede ser diferente a la terrestre?

Claro, quizá si hay vida en esos satélites sea distinta de la que conocemos, y en ese caso resultaría difícil identificarla. Pero, personalmente, yo creo que el agua y el carbono acabarán produciendo una bioquímica no muy diferente de la nuestra en cualquier lugar que se dé el proceso. En mi opinión las moléculas clave no deberían ser distintas, y polímeros como proteínas, azúcares o ácidos nucleicos supondrían soluciones universales para la vida. Otra cosa es cómo se ha organizado después esa bioquímica para formar seres vivos, que podrán ser muy diferentes de los que conocemos.

En cualquier caso, yo creo que a las personas que pagan sus impuestos para financiar (entre otras muchas cosas) la investigación científica les interesaría más que se encontrara vida similar a la nuestra, para poder estudiarla y llegar a comprenderla. Si ya podría decepcionar a la opinión pública encontrar un microbio en vez de un animal, por ejemplo, imagínate si lo que identificamos es una especie de cristal que se replica y de alguna forma evoluciona... y al que los científicos acabamos denominando «ser vivo». Nos quedaríamos todos un poco fríos, ¿no? Por tanto, no descarto que haya vidas diferentes pero creo que merece la pena centrar los esfuerzos en intentar detectar alguna otra vida que sea parecida a la que conocemos.

Pues pasemos a comentar cómo la buscamos. Desde hace ya más de quince años tu grupo de investigación, apoyado por otros del CAB y algunas empresas, está desarrollando biosensores basados en anticuerpos capaces de detectar biomarcadores moleculares de vida extinta o actual, siguiendo una aproximación «terracéntrica». ¿Podrías resumirnos las características fundamentales del biosensor Life Detection Chip (LDChip) que está incluido en el instrumento Signs of Life Detector (SOLID)?

La idea de este biosensor, como sabes muy bien porque estuviste directamente implicado en su origen, era desarrollar un «biochip» capaz de

detectar vida en Marte. Así, con el impulso de Juan Pérez Mercader y colaborando con algunos colegas de la NASA, empezamos a trabajar. Exploramos distintos formatos de sensor, y también diferentes sondas moleculares capaces de reconocer a los biomarcadores. Al final decidimos que lo mejor era usar anticuerpos, ya que son moléculas biológicas que reconocen con gran especificidad muchos tipos de compuestos. De hecho, el sistema inmune de los mamíferos está especializado en detectar microorganismos, que es lo buscado fuera de la Tierra.

Por tanto, durante bastante tiempo compramos y generamos nuevos anticuerpos frente a diferentes biomarcadores que estuvieran conservados en muchos tipos de seres vivos: lípidos, azúcares, polímeros presentes en las paredes de las bacterias, antibióticos producidos por ellas, péptidos, proteínas, etc. Además, decidimos generar anticuerpos frente a muestras complejas tomadas del ambiente, por ejemplo extractos moleculares de distintos tipos de terrenos, tanto «normales» como de entornos extremos. Sabíamos que, si alguna vez estos sensores iban a Marte, intentarían detectar vida en muestras complejas extraídas del suelo o subsuelo de allí.

Así, la colección ha ido creciendo y en la versión actual del biosensor inmunológico *LDChip* podemos imprimir sobre una pequeña superficie de vidrio, en formato *microarray*, hasta casi 500 anticuerpos diferentes. En cualquier caso, en función del tipo de ensayo que queramos hacer usamos más o menos anticuerpos. Hemos visto que no es tan importante poner muchos, sino que los contenidos en el chip funcionen bien, dando reacciones claras y sin efectos de reactividad cruzada. Por tanto, aquí hacemos muchas pruebas... para decidir qué funcionará mejor allí.

¿Qué evoluciones futuras prevés para el instrumento SOLID, de forma que pueda seguir aumentando sus capacidades como biosensor?

En esta pregunta hay dos aspectos: el biosensor en sí y el instrumento que lo contiene. El *LDChip* ha ido optimizándose en la cantidad y variedad de anticuerpos que puede incluir. Pensando en qué grado máximo de evolución biológica pudo producirse en Marte, es posible restringir el número de anticuerpos utilizados. Además, precisamente colaborando con tu grupo vamos a incluir aptámeros: ácidos nucleicos que se pliegan de una forma concreta y reconocen específicamente distintos tipos de dianas. En algunas cosas son mejores que los anticuerpos y en otras peores, así que lo vamos a explorar.

Por otra parte, también actualizamos el instrumento *SOLID* en su conjunto. Este que tengo aquí, sobre la poyata, es el *SOLID 3*, mucho más compacto y optimizado que sus versiones anteriores. Pero aún habría que mejorar varios aspectos para que esté en condiciones de volar formando parte

de la carga útil de una misión espacial. Probablemente tendríamos que miniaturizarlo más, y eso nos llevará a utilizar microfluídica... aunque esta tecnología aún no está puesta a punto para el espacio.

Claro, esto también es novedoso porque estamos intentando combinar la bioquímica con la exploración espacial...

Así es. Recordemos que realmente en las misiones espaciales nunca se manda la última tecnología disponible, sino la que los ingenieros y científicos consideran más robusta porque se ha probado ya en esas condiciones tan difíciles. Aparte de las *Viking* y la sonda *Phoenix*, nunca se han manejado líquidos para hacer experimentos en entornos extraterrestres. Y biosensores como los que estamos comentando, basados en los que usamos en nuestros laboratorios, sería la primera vez que llegarían a otro planeta. Este campo es muy interesante, pero tiene su complejidad.

Durante los últimos años, las diferentes versiones de SOLID se han probado en varios entornos terrestres que se consideran análogos a Marte o a las lunas heladas de los gigantes de gas. ¿A qué lugares ha viajado este instrumento?

Además de probarse en suelos «normales» se ha llevado por supuesto al río Tinto, que es el ambiente extremo que mejor conocemos y más veces hemos visitado. Allí hay varios entornos análogos de Marte: tanto del primitivo, en el que había agua fluyendo, como del Marte actual desértico. Hemos usado *SOLID* con muestras del agua y del subsuelo, con resultados interesantísimos. Y se ha utilizado en otros ambientes ácidos, como en minas de Sudáfrica o el Parque Yellowstone. También se ha trabajado con *SOLID* en el desierto de Atacama, otro entorno parecido al planeta rojo en la actualidad, analizando muestras superficiales y profundas. La última campaña realizada allí fue clave, porque el equipo funcionó, integrado en un *rover*, en aquel desierto... mientras lo manejábamos desde el Centro de Astrobiología. La distancia entre la Tierra y Marte es mucho mayor de 10 000 km, pero no estuvo mal para hacernos una idea.

En cuanto a los lugares más fríos, *SOLID* ha trabajado en el Ártico canadiense, que guarda similitudes con las lunas de hielo. Además, ha estado en la Antártida: inicialmente lo llevamos a zonas volcánicas de la Isla Decepción, y a finales de 2019 se probó también en el plató antártico, gracias a que Ramón Larramendi llevó el chip en su trineo de viento y pudo analizar con él muestras de hielo tomadas a 4 m de profundidad. En fin, una serie de entornos interesantes, en los que ha funcionado muy bien a pesar de sus condiciones extremas.

SOLID es uno de los instrumentos integrados en la propuesta de misión Icebreaker Life, que compitió para volar a Marte en el año 2026. ¿Crees que las agencias espaciales aún no están preparadas para arriesgarse a buscar vida utilizando biosensores... y seguirán prefiriendo instrumentos más geológicos enfocados a ese concepto tan amplio de la «habitabilidad»?

En efecto, *Icebreaker Life* ha sido una propuesta de misión para el programa Discovery de la NASA, que estaba encabezada por NASA Ames (donde trabaja su investigador principal, Chris McKay) y NASA Goddard, en la cual hemos participado activamente. Su objetivo era analizar el hielo que existe a muy poca profundidad de la zona prevista para el amartizaje, determinando si allí aparecen biomarcadores de vida pasada o presente. Contenía tres instrumentos: un laboratorio químico similar al que llevaba *Phoenix*, un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas... y *SOLID*. Con ellos se cubrían los tres niveles de complejidad química que puede haber en Marte: iones, moléculas o biomoléculas pequeñas (incluyendo aminoácidos) y biopolímeros. Y es cierto, se planteaba como una misión específicamente enfocada a la búsqueda de vida. Algo que no se ha hecho en Marte desde las *Viking*.

Pero la competencia era muy dura, con más de veinte propuestas para explorar diferentes planetas y satélites del Sistema Solar, y finalmente *Icebreaker Life* no ha pasado el «primer corte» en febrero de 2020. Podremos volver a intentarlo más adelante, y como sabes también estamos pensando en un desarrollo similar para el satélite Europa. Así que, por el momento, ver nuestro biosensor trabajando fuera de la Tierra es un sueño... pero cuánto nos gustaría que se hiciera realidad, ¿verdad?

Ya lo creo... Además de tu trabajo como investigador, Víctor, desde 2019 eres el director del Centro de Astrobiología. Sigues así la senda iniciada por su fundador y primer director, Juan Pérez Mercader, y de los que continuaron esa labor: Álvaro Giménez Cañete, Javier Gómez-Elvira y Miguel Mas Hesse. ¿Qué balance haces de los más de veinte años de investigación en este centro?

Efectivamente, en 2019 el CAB cumplió veinte años y el balance de todo este tiempo es muy positivo. Al principio, cuando Juan lo fundó, este centro era una auténtica «singularidad» no sólo en España sino en el panorama internacional. Afortunadamente, desde el principio contamos con un apoyo decidido de las dos instituciones de las que dependemos: el INTA, en cuyo campus estamos, y el CSIC. Nunca agradeceremos lo suficiente a ambos organismos y a los ministerios de los que dependen (aunque los Gobiernos hayan ido cambiando durante estas dos décadas) el interés que tuvieron y tienen porque este proyecto tan único e interdisciplinar siga avanzando.

Además, el hecho de ser desde nuestra fundación el primer centro fuera de Estados Unidos que formaba parte del NASA Astrobiology Institute (NAI) nos ha dado mucha fuerza y también capacidad de interacción con nuestros colegas norteamericanos.

Durante este tiempo, entre todos hemos consolidado la ciencia y la tecnología que hacemos aquí, aumentando el número de proyectos obtenidos, publicaciones y patentes. Entre otros hitos, hemos conseguido poner por primera vez un instrumento español sobre Marte. Y luego llegó otro, y seguimos en esa senda.

Como todos los investigadores y el resto de la sociedad de nuestro país, lamentablemente sufrimos la crisis de hace unos años, lo que afectó sobre todo al mantenimiento de contratos y estabilización del personal. Pero lo vamos superando, y ahora hemos alcanzado ya una buena velocidad de crucero. En 2018 el CAB consiguió el reconocimiento de Unidad de Excelencia «María de Maeztu», con un proyecto multidisciplinar que coordina nuestro compañero David Barrado, y esto supone un fuerte apoyo a la investigación que realizamos. En fin, creo que todos los que formamos parte del CAB hemos de sentirnos orgullosos del centro, y también los ciudadanos de este país que lo hacen posible gracias a sus impuestos.

Por último, Víctor, ¿cómo ves el futuro de la astrobiología, dentro y fuera de España?

La astrobiología está cada vez más asentada en la comunidad internacional. Recientemente, la NASA ha dado un paso más en su estrategia y el NAI se ha redefinido en forma de Research Coordination Networks (RCN), estructuras de colaboración entre grupos de investigación a las que ya pertenecemos. Además, como bien sabes en 2019 se ha fundado el European Astrobiology Institute (EAI), de cuyo núcleo central formamos parte. La astrobiología y nuestro centro tienen un futuro muy prometedor por delante.



6. Protección planetaria



Lo he comprobado. La varicela. Atacó a los marcianos como nunca ha atacado a los terrícolas. Supongo que tenían otro metabolismo. Los quemó hasta ennegrecerlos y los secó hasta transformarlos en copos quebradizos. Y, sin embargo, fue varicela. Así que las tres expediciones, la de York, la del capitán Williams y la del capitán Black, tienen que haber llegado a Marte. ¡Sabe Dios qué ha sido de ellos! Pero por lo menos sabemos qué les hicieron ellos involuntariamente a los marcianos.

Ray Bradbury,
Crónicas marcianas

Durante la década de 1960, en plena efervescencia del programa Apolo, el interés por implantar estrictas medidas de control biológico respondía al temor por la posible llegada de microorganismos patógenos o de sustancias tóxicas desde la Luna. Faltaban pocos años para que los astronautas pusieran sus botas sobre ella y, si todo iba bien, regresaran desde nuestro satélite con las primeras muestras extraterrestres traídas intencionadamente a la Tierra.

Con el paso del tiempo, gracias al desarrollo de la exploración espacial, a los investigadores actuales nos preocupa más el problema inverso: que los robots que enviamos a otros planetas o satélites lleven consigo vida microbiana terrestre, quizá capaz de sobrevivir allí y desarrollarse de forma descontrolada.

Si en el lugar visitado existiera alguna forma de vida endógena no sería razonable, ni ética ni científicamente, que resultara modificada o incluso eliminada al interaccionar con los microorganismos llevados desde aquí. Además, esto podría dar lugar a «falsos positivos»: una misión detecta vida, por ejemplo en Marte o en Europa, se anuncia como propia de ese entorno extraterrestre... pero al analizarla en detalle se demuestra que había viajado inadvertidamente a bordo del robot explorador, o de otro anterior que merodeó por la misma zona. Sería un auténtico fiasco. Si miramos hacia el futuro, cuando las misiones tripuladas alcancen diferentes cuerpos del Sistema Solar la probabilidad de contaminarlos con las bacterias, hongos, parásitos o virus que inevitablemente nos acompañan resultará mucho mayor. Ray Bradbury ya lo predijo. Para evitar estos problemas, o al menos para limitar en lo posible su alcance, se ha desarrollado una disciplina a medio camino entre la microbiología y la ingeniería, cuyos procedimientos son estrictos y su nombre impactante: la protección planetaria.

MIEDO A LO DESCONOCIDO

El 29 y 30 de julio de 1964, la NASA organizó una cumbre dedicada a evaluar los riesgos potenciales de contaminación biológica proveniente de otros planetas o satélites. A ella asistieron, además de altos representantes de la agencia espacial y del ejército norteamericano, miembros del Comité de Ciencias de la Vida del Consejo de Ciencias Espaciales, del Departamento de Agricultura, de los Institutos Nacionales de la Salud y de varias universidades. La variedad de profesionales llamados a esa reunión era una muestra clara de la complejidad del problema y de la preocupación existente.

Como resultado de este y otros encuentros, en el año 1967 se firmó en Naciones Unidas el Outer Space Treaty o Tratado del Espacio Exterior, cuyo artículo IX dice literalmente: «Los Estados firmantes de este Tratado desarrollarán estudios sobre el espacio exterior, incluidos la Luna y otros cuerpos celestes, y llevarán a cabo la exploración de forma que se evite la contaminación peligrosa y los cambios adversos en el medio ambiente de la Tierra como resultado de la introducción de materia extraterrestre, adoptando cuando sea necesario las medidas oportunas para ello».

La fatalidad quiso que, mientras el 27 de enero de 1967 estaba discutiéndose este tratado en Washington D.C., se produjera un terrible incendio en la cabina del *Apolo 1* durante una prueba en la plataforma de lanzamiento situada en Cabo Cañaveral, Florida. En él fallecieron sus tres tripulantes: Virgil I. «Gus» Grissom, Edward H. White II y Roger B. Chaffee. Este gravísimo incidente retrasó los planes de la NASA pero no abortó el proyecto Apolo, y de hecho fueron los tripulantes de reserva del *Apolo 1* quienes volaron en la primera misión tripulada con éxito de este programa, el *Apolo 7*, entre el 11 y el 22 de octubre de 1968.

Pero volvamos a la inquietud por la posible contaminación biológica de nuestro planeta con muestras lunares, que se había convertido en auténtico pánico para buena parte de la opinión pública mundial, como queda patente en los artículos periodísticos y libros publicados en muchos países durante esa época. Veamos un ejemplo cercano y curioso, tomado de la popular publicación española *Algo*: se vendía en quioscos a quince pesetas y, a pesar de anunciarse como «Revista quincenal de divulgación científica, técnica y cultural», solía mezclar informaciones reales con truculentas historias de ovnis u otros «expedientes X» para incrementar el interés de los lectores y por tanto las ventas. Ante la excitación por esa inminente llegada del hombre a la Luna, en la segunda quincena de mayo de 1969 el número 130 de *Algo* incluía en su portada, sobre una fotografía de la superficie de nuestro satélite y la recreación artística de un módulo de alunizaje, este titular: «El regreso de la

Luna, problema bacteriológico». A ello dedicaba su breve editorial, con comentarios como el siguiente: «El módulo es ya una realidad y, como sabemos, el próximo “Apolo” se halla ya en la plataforma de lanzamiento. [...] Empero, los problemas no dejan de presentarse, tanto en órbita como en la superficie de la Luna y ahora se habla ya —en esta misma edición— de los posibles contagios bacteriológicos que a pesar de las medidas preventivas pueden traernos los primeros selenautas».

Tras tal introducción, en el interior de la revista se publicaba un artículo firmado por un tal León Imbert, titulado «¿Qué nos traerán los viajeros de la Luna?». Esta pregunta quedaba ya respondida en el sobrecogedor subtítulo: «Microorganismos portadores de epidemias desconocidas —según el profesor Kaminski, quien asegura que las consecuencias podrían ser espantosas». Merece la pena reproducir algunas frases de este artículo, evidentemente no por su valor científico sino porque muestra de primera mano la magnitud del alarmismo generado en la época: «La experiencia espacial *Apolo XI* tendrá lugar, con toda seguridad, el próximo mes de julio. Entonces, tres astronautas norteamericanos intentarán desembarcar en la Luna. Esta aventura no deja de preocupar a muchos científicos, que se preguntan si a su regreso los astronautas no traerán consigo virus, bacterias u otros microorganismos de estructura desconocida, es decir, cuyas propiedades sean completamente diferentes a las de la biosfera terrestre. “En ese caso —dice el profesor Kaminski, director del Instituto de Investigaciones Espaciales del Observatorio de Bochum— las reacciones biológicas terrestres que, en un proceso aislado de casi mil millones de años de duración, se han adaptado, se encontrarían sin defensas posibles. Las consecuencias podrían ser espantosas. En pocas semanas, epidemias desconocidas podrían llevar a la humanidad al borde de la extinción”. [...] La aventura del *Apolo XI* preocupa, con razón, a todos los científicos».

EL REGRESO DESDE LA LUNA

Este tipo de mensajes apocalípticos caló en la cultura popular, lo que es fácil de comprender si pensamos en el nivel de temor y ansiedad que durante 2020 ha generado en la población la pandemia de COVID-19 producida por un nuevo patógeno humano (y eso que era terrestre y además parecido a otros previamente conocidos): el coronavirus SARS-CoV-2. Pero en aquella década de 1960 la comunidad científica en realidad estaba poco preocupada sobre el

posible riesgo asociado a los microorganismos selenitas, dados todos los datos previos que indicaban la muy baja probabilidad de que hubiera vida en nuestro satélite. Además, estrictas medidas de contención habían sido cuidadosamente diseñadas, tanto para los astronautas como para las muestras que trajeran consigo. El procedimiento seguido se resume, por ejemplo, en el capítulo 6 del interesante libro *Apollo: Lunar landing*, escrito por James J. Haggerty y publicado pocos meses después del regreso del *Apolo 11*. Esta obra incluye los datos y fotografías que la NASA decidió hacer públicas porque ya no comprometían su carrera tecnológica contra la agencia espacial soviética. Una información más detallada puede consultarse en el informe sobre la historia del Laboratorio de Recepción Lunar publicado por la NASA casi 35 años después.

Ambos textos muestran cómo las instalaciones de dicho laboratorio, construido en el Johnson Space Center (en Houston, Texas) y con un coste declarado de unos ocho millones de dólares de la época, proporcionaban el entorno adecuado para mantener en rigurosa cuarentena tanto a los astronautas como a las muestras traídas por ellos desde la Luna. Para conseguirlo, la parte principal del edificio estaba sellada y aislada del exterior, y poseía una presión menor que la atmosférica: ante una eventual fuga, el aire tendería a entrar y no a salir, análogamente a lo que ocurre en los laboratorios de alta seguridad donde se trabaja con virus o bacterias patógenos de transmisión aérea. Además, implementaba numerosas medidas de seguridad adicionales, incluyendo filtros especiales en los sistemas de aire acondicionado. Los materiales de trabajo que entraban o salían de ese auténtico búnker biológico debían ser esterilizados mediante radiación ultravioleta, para que el flujo de microorganismos se evitara (o al menos se redujera todo lo posible) en ambos sentidos.

Dentro de ese entorno controlado vivieron durante tres semanas Neil Armstrong y Buzz Aldrin, los dos astronautas que habían pisado la magnífica desolación de nuestro satélite en julio de 1969, y también Michael Collins, porque había estado en estrecho contacto (literalmente) con ellos y con las muestras lunares que traían cuando regresaron al módulo de mando. Así lo harían también los otros quince hombres que regresaron de nuestro satélite entre 1969 y 1972 en las misiones *Apolo 12* a *Apolo 17*, con excepción de la fallida *Apolo 13*. En dichas instalaciones, los astronautas fueron sometidos a exhaustivos y variados controles médicos. Como recordaba el siempre extrovertido e irónico Buzz Aldrin 50 años después de la gesta del *Apolo 11*: «Pasamos 21 días en cuarentena al regresar de la Luna. ¡La NASA necesitaba asegurarse de que la Tierra estaba a salvo de posibles gérmenes lunares! Afortunadamente, no teníamos “bichos de la Luna”: ¡sólo se detectó un caso de aburrimiento!».

En esas instalaciones se mantenían también las muestras cuidadosamente escogidas por los astronautas y traídas en contenedores desgasificados, que habían sido abiertos únicamente en la Luna y desde entonces estaban herméticamente sellados. ¿Qué podría haber en ellos? Una vez transcurrido al menos un mes, las muestras lunares comenzaron a estudiarse cuidadosamente en la propia instalación, dentro de cabinas de vacío aisladas y provistas de todas las medidas de control imaginables en esa época. Así, los microorganismos terrestres no podrían contaminarlas... y, a la vez, si había algún tipo de vida selenita en esas rocas no tendría opciones de escapar y colonizar nuestro planeta. Los primeros análisis que se realizaron a esos materiales extraterrestres incluyeron cuantificaciones de la radiactividad de las rocas, ensayos geoquímicos y observaciones al microscopio. Posteriormente, algunas muestras se estudiaron en varios laboratorios adicionales construidos dentro de las mismas instalaciones, en los que fueron sometidas a todo tipo de ensayos físicos, químicos y biológicos.



Los astronautas del Apolo 11 Armstrong, Collins y Aldrin, en el módulo móvil utilizado para el comienzo de su cuarentena a bordo del portaaviones USS *Hornet*, son saludados por el presidente Richard Nixon el 24 de julio de 1969. Desde él pasarían al Laboratorio de Recepción Lunar en el Johnson Space Center de Houston, Texas. © AFP / NASA.

Al finalizar el período de cuarentena que siguió a cada misión, fragmentos seleccionados de numerosas muestras se distribuyeron entre laboratorios de todo el país (nada menos que 140 para el *Apolo 11*), dirigidos por científicos de gran prestigio en los campos de la ciencia de materiales, el análisis isotópico, la geología, la química orgánica o la bioquímica. Gracias a ese despliegue tecnológico sin precedentes se aprendió muchísimo sobre la composición y propiedades de las muestras lunares, y se comprobó que ninguna de ellas contenía microorganismos o restos de moléculas biológicas. Selene, la hija de Tea, era un lugar de extraordinaria y sobrecogedora belleza... pero estéril.

Por tanto, el miedo desatado antes de llegar a la Luna se fue desvaneciendo al demostrarse que ningún material importado desde allí contenía seres vivos, y que los 21,5 kg de muestras que Armstrong y Aldrin habían recogido en sus contenedores sellados podían manejarse tanto dentro como fuera de las instalaciones de seguridad de Houston sin temor a contraer esas supuestas «enfermedades desconocidas». Tampoco se encontró ninguna evidencia de vida en el resto de rocas y regolito (se llama así al terreno no consolidado típico de la superficie de la Luna o Marte, formado por fragmentos de rocas, micrometeoritos, arenas y polvo) traídos por los demás astronautas, que en conjunto totalizaron 382 kg de muestras (de las cuales, por cierto, hasta 2020 sólo se había analizado el 17 %). Se descartaba así cualquier epidemia que pudieran provocar los temidos microorganismos selenitas.

¿PATÓGENOS EXTRATERRESTRES?

Hoy pensamos que, aunque hubiera existido vida microscópica en las muestras de la Luna, sería prácticamente imposible que pudieran haber infectado a los astronautas de la NASA que visitaron el satélite, o a cualquier otro miembro de nuestra especie. Esto se debe a que los virus, bacterias, hongos o parásitos que nos causan enfermedades lo hacen porque han compartido con nosotros o con los demás animales de la Tierra una buena parte de la historia evolutiva que nos ha traído hasta aquí, lo que hace que a nivel bioquímico seamos muy parecidos: sus moléculas pueden interaccionar con las de nuestro organismo y, en su caso, enfermarnos. Sabemos que hay bacterias y virus con mayor o menor especificidad de hospedador y así, sin entrar en detalles, algunos de los que infectan a determinados animales sí son

capaces de «saltar de hospedador» y adaptarse a nosotros (como ha ocurrido con el SARS-CoV-2, por ejemplo, y seguirá ocurriendo con diferentes virus) y otros no. Pero ningún patógeno de plantas, más alejadas evolutivamente de nuestra especie, nos causa problemas. Ni mucho menos los virus que infectan a las bacterias, a los que llamamos bacteriófagos: son inocuos para nosotros. Por tanto, si hubiera microorganismos en la Luna, estos se habrían desarrollado allí sin ningún contacto previo con la vida terrestre, salvo en el improbable caso de que hace millones de años una representación de ella hubiese llegado a nuestro satélite a bordo de algún meteorito. Así, aunque existieran esos selenitas microscópicos, en principio no deberíamos tener miedo de que pudieran infectarnos. No obstante, podría ocurrir que por casualidad alguna especie (de la Luna o, en general, alienígena) produjera grandes cantidades de una molécula que fuera tóxica para nosotros o para cualquier otro ser vivo terrestre, que aun sin ser infectado podría sufrir los efectos del contacto con dicha toxina.

Dando un salto a Marte y a la ficción, la posibilidad de una «infección cruzada» es precisamente uno de los puntos discutibles de la excelente novela *La guerra de los mundos*, escrita por el prolífico autor H. G. Wells y publicada en 1898. Esta primera obra de ficción sobre una invasión extraterrestre adquirió rápida popularidad ya que, como veremos en el siguiente capítulo, en aquella época estaba muy extendida la creencia de que existía vida (y, además, inteligente) en el planeta rojo. Pero su definitivo lanzamiento a la fama se produjo cuatro décadas después, al ser genialmente adaptada por Orson Welles para la radio y retransmitida en octubre de 1938: aquella angustiosa locución provocó el pánico entre los oyentes de Nueva Jersey, donde aparentemente se estaba produciendo la invasión, al creer que todo lo que oían era cierto. Desde entonces, una historia tan sobrecogedora como ésta se ha adaptado al cine en varias ocasiones, entre ellas la dirigida por Byron Haskin en 1953 o la versión más comercial de Steven Spielberg en 2005.

Pues bien, en la novela original de Wells los extraños seres llegados desde Marte a través de rayos, para desenterrar sus máquinas y conquistar la Tierra, son finalmente derrotados no por una humanidad que ya ha perdido toda esperanza, sino por los microorganismos frente a los cuales nosotros estamos inmunizados pero resultan letales para *ellos*. De hecho, se nos dice que esos seres inteligentes e hipertecnológicos que nos han invadido provienen de un planeta en el que no hay bacterias... lo que nos llevaría a suponer una trayectoria evolutiva realmente extraña allí. Pero, aunque no estemos de acuerdo con la estrategia de eliminación ideada por el maestro Wells en los albores del siglo xx, merece la pena leer un emotivo fragmento del final del libro: «Había sucedido lo que yo y muchos otros podríamos haber previsto si no nos hubiera cegado el terror. Los gérmenes de las enfermedades han

atacado a la humanidad desde el comienzo del mundo, exterminaron a muchos de nuestros antecesores prehumanos desde que se inició la vida en la Tierra. Pero en virtud de la selección natural de nuestra especie, la raza humana desarrolló las defensas necesarias para resistirlos. No sucumbimos sin lucha ante el ataque de los microbios, y muchas de las bacterias —las que causan la putrefacción en la materia muerta, por ejemplo— ya no logran arraigo alguno en nuestros cuerpos vivientes. Pero no existen las bacterias en Marte, y en cuanto llegaron los invasores, en cuanto bebieron y se alimentaron, nuestros aliados microscópicos iniciaron su obra destructora. Cuando los observé ya estaban irrevocablemente condenados, muriendo y pudriéndose mientras caminaban de un lado para otro». Tremendo. Algo equivalente les ocurrió a otros marcianos, medio siglo después y en su propio planeta, con el virus de la varicela que les inoculaba Ray Bradbury al comienzo de este capítulo. En cualquier caso tomemos aire, aire lleno de bacterias y virus terrestres, y continuemos.

EL MANDAMIENTO DE LA PROTECCIÓN PLANETARIA: «NO CONTAMINARÁS»

Desde finales de la década de 1970, la protección planetaria incluye un conjunto de procedimientos y medidas que tienen como objetivo evitar no sólo la contaminación de nuestro planeta por algún tipo de vida extraterrestre traída hasta aquí (lo que se conoce como *back contamination* o «contaminación de retorno»), sino la que podamos producir «hacia afuera» (o *forward contamination*) debido a la llegada no intencionada de polizones microscópicos en los robots de exploración. Tras el Tratado del Espacio Exterior de 1967, el Comité de Investigación Espacial (Committee on Space Research, COSPAR) ha ido actualizando los requerimientos de protección planetaria gracias al avance en la investigación sobre Marte, Europa, Titán y otros planetas o satélites, y también debido al descubrimiento de las capacidades de los microorganismos extremófilos terrestres. Con ello, la política actual del COSPAR sobre protección planetaria se resume como: «*All the planets, all the time*».

Manteniendo el espíritu inicial de la protección planetaria, cuando se planteen misiones de retorno de muestras extraterrestres nuestro planeta debe ser protegido del potencial peligro asociado a las mismas. Esto cobra especial interés en la actualidad porque, como veremos en el siguiente capítulo, varias

agencias espaciales tienen previsto traer muestras del suelo marciano a comienzos de la próxima década. Pero, por supuesto, el COSPAR también establece que la investigación sobre los posibles seres vivos extraterrestres, sus precursores o remanentes, no debe ser falseada por la presencia de vida terrestre llevada inintencionadamente a otros planetas, satélites, asteroides o cometas en nuestras misiones de exploración. Esto incluye variantes con las que nos encontraremos en los próximos capítulos: aterrizadores fijos (*landers*), sondas de penetración, vehículos con capacidad de desplazamiento utilizando ruedas o patas (*rovers*), robots que puedan volar a baja altura sobre su superficie (como helicópteros, drones, dirigibles o globos), sondas de tipo *flyby* que siguen órbitas muy elípticas y realizan sobrevuelos del cuerpo en cuestión, y orbitadores.

Por tanto, es fundamental evitar la contaminación de aquellos lugares en los que la vida pueda haberse originado y desarrollado cuando los visitemos con nuestras misiones, por el momento robóticas y en el futuro tripuladas. En este punto, el lector estará preguntándose si ese riesgo es realmente alto, y qué tipo de microorganismos son los que podrían contaminar las superficies de los materiales usados en la construcción de naves espaciales. Pues bien, tal peligro sí resulta importante, y las bacterias que más problemas podrían producir son las que viven en nuestro cuerpo: las personas (en concreto, los ingenieros y científicos implicados en la construcción o ensamblaje de los instrumentos dedicados a la exploración espacial) son la principal fuente de contaminación biológica de los entornos extraterrestres.

LOS MICROORGANISMOS DE NUESTRO CUERPO

Cada ser humano, como cualquier otro organismo pluricelular complejo, es un auténtico ecosistema. Además de las células de *Homo sapiens* que nos constituyen (en torno a treinta billones, 3×10^{13} , pertenecientes a unos 200 tipos distintos) poseemos otras tantas (o tal vez más) células de microorganismos que habitan en diferentes lugares de nuestro cuerpo. Estos inquilinos que viajan con nosotros no nos perjudican sino que, al contrario, resultan imprescindibles para nuestra vida. Cada vez se conoce mejor la influencia que tiene en nuestra salud el equilibrio y distribución del denominado «microbioma humano»: buena parte de las enfermedades infecciosas que padecemos no se producen porque nos lleguen patógenos desde el entorno, sino por un desbalance entre las poblaciones microbianas

que de forma natural habitan en nuestro organismo, o debido a la colonización de ciertos órganos por especies que habitualmente viven en otros.

¿Y cuáles son esos habitantes microscópicos de un cuerpo humano sano? Fundamentalmente bacterias, pero también hay arqueas, hongos e incluso algas. Y además damos cobijo a una ingente cantidad y variedad de virus, que aproximadamente son diez veces más numerosos que el total de células (humanas o ajena) que tenemos. La mayor parte de nuestros compañeros de viaje viven en el estómago e intestino, donde se han caracterizado más de mil especies diferentes, entre ellas algunas tan conocidas como *Escherichia coli*, *Lactobacillus casei* o *Helicobacter pylori*. En el punto de entrada de nuestro aparato digestivo, la boca, se ha podido cuantificar que tenemos hasta mil millones de bacterias por centímetro cúbico de saliva. No merece la pena pensar en esto cada vez que nos besamos, pero para el tema que nos ocupa sí es relevante porque al respirar emitimos aerosoles que llegan a 2 m de distancia, y cuando estornudamos nuestras partículas de saliva salen disparadas hasta los 4 m. Debido a ello, todo el personal implicado en el ensamblaje de instrumentos que van a viajar a entornos extraterrestres donde puede existir vida ha de usar, como veremos más adelante, mascarillas que cubran por completo boca y nariz. Además, algo que puede resultar sorprendente es que durante el ensamblaje los operarios no deben hablar, ni siquiera en voz baja, si su cara está mirando de frente al equipo sobre el que trabajan en ese momento, para minimizar la posibilidad de que micropartículas de saliva portando bacterias puedan ser proyectadas hacia su superficie. Y, evidentemente, no debe entrar en la sala de ensamblaje el personal que esté resfriado, tenga catarro o sea sospechoso de padecer cualquier enfermedad que pueda hacerle toser.

Pero, en principio, lo más relevante en este contexto son los microorganismos que tapizan nuestra piel. En los aproximadamente 2 m² de epidermis que tiene un humano adulto, las densidades medias son de un millón de microorganismos por cm². Es decir, en cada huella dactilar caben en torno a dos millones de bacterias, por lo que los guantes se hacen absolutamente obligatorios en las labores de ensamblaje de equipos. Los géneros bacterianos más representados en nuestra piel son *Propionobacterium*, *Corynebacterium*, *Staphylococcus* y *Streptococcus*. Por tanto, podríamos plantearnos lo siguiente: si algún día se detectan en Marte células que al ser analizadas resultan pertenecer a la especie *Staphylococcus epidermidis*, por ejemplo... ¿los científicos implicados se arriesgarán a decir que esos microorganismos vivían allí antes de nuestra llegada, o siempre tendremos la duda de si viajaron desde la Tierra en la superficie del robot de exploración, porque una persona la había tocado meses o años antes con las manos desnudas y esa bacteria logró mantenerse allí formando una película o *biofilm* resistente?

CONDICIONES DE TRABAJO EN PROTECCIÓN PLANETARIA

Ante el riesgo evidente de contaminación biológica en nuestros equipos, las salas de ensamblaje de robots dedicados a la exploración de entornos extraterrestres donde podría desarrollarse la vida se tienen que parecer más a los quirófanos donde operan los cirujanos que a los entornos de trabajo convencionales de los ingenieros. Son mucho más restrictivas que las «salas blancas» utilizadas en el montaje de componentes microelectrónicos, ya que además de evitar la deposición sobre las superficies de partículas con tamaños micrométricos o menores, es necesario impedir su contaminación con microorganismos o con moléculas biológicas (producidas por nosotros o por ellos). De hecho, actualmente las salas de ensamblaje de misiones con destino a Marte son los lugares más controlados e impolutos que se han construido jamás. Todas sus superficies son limpiadas constantemente con alcohol isopropílico (IPA), el aire se filtra de forma continua (empleando materiales que impiden el paso del 99,97 % de las partículas mayores de 0,3 micras de diámetro, lo que incluye casi todas las bacterias conocidas) y aun así es muestreado varias veces al día en busca de microorganismos que puedan contaminarlo.

Además, dichas salas tienen sistemas de exclusas controladas para la entrada y salida de herramientas o materiales, que siempre se mantienen en el interior de bolsas especiales estériles hasta el momento de ser usados. Con ello, por ejemplo, en una sala de tipo ISO 7 (también denominada en este campo «de clase 10 000») dotada de controles microbiológicos adecuados se puede mantener un nivel de carga biológica o *bioburden* en torno a 300 esporas de microorganismos (más adelante mostraremos en qué consisten) por cada m² de superficie de trabajo, lo que resulta adecuado para preparar los materiales que han de ser integrados en un instrumento. Además, dentro de dicha sala se sitúan cabinas de flujo laminar que proporcionan un entorno aún más controlado (ISO 5 o «clase 100») en el que se ensamblarán los componentes en los instrumentos correspondientes.

Las operaciones de quienes trabajan dentro de una de estas salas (llamados «los *insiders*» en el argot que se utiliza) requieren una formación específica y son continuamente supervisadas por «los *outsiders*», tanto a través de ventanas o paredes de cristal como mediante cámaras enfocadas a los equipos clave que se están ensamblando en cada momento. Unos y otros se comunican mediante auriculares e interfonos (los *insiders*, como decíamos, sin mirar a los instrumentos en los que trabajan), y el número de personas que permanece dentro en cada turno está habitualmente limitado a cuatro. Las superficies de trabajo se deben limpiar por completo al empezar y terminar

cada jornada, utilizando IPA. En cuanto a las herramientas utilizadas, una medida habitual es que si alguna se cae al suelo o entra en contacto con una superficie cuya limpieza esté en duda, será rápidamente reemplazada por otra igual, previamente preparada y esterilizada. Además, en la sala no hay que caminar rápido ni mover demasiado los brazos, para evitar la producción de corrientes de aire que podrían arrastrar microorganismos y depositarlos sobre los equipos que se están ensamblando. Durante los períodos largos sin actividad (por ejemplo, las noches en las que no se trabaje) es habitual el uso de luces germicidas en las salas, tapando convenientemente los equipos o materiales sensibles a la radiación ultravioleta.

Las «reglas de etiqueta» son también muy claras dentro de las salas limpias. Como se indicaba más arriba, los *insiders* han de llevar siempre guantes (de látex o nitrilo, que lógicamente deben estar estériles), y de hecho se usa un enguantado doble, para que cuando haya que quitarse los exteriores (por ejemplo, si nos hemos tocado la frente, las gafas o una superficie de trabajo sospechosa de estar contaminada) siempre nos queden puestos los que cubren la piel de nuestras manos. No se debe vestir pantalones cortos, faldas, mangas cortas, sandalias ni otras prendas que dejen piel al descubierto. Además, el pelo ha de cubrirse por completo con un gorro desechable. La barba y el bigote están completamente desaconsejados, y en todo caso irán tapados con un cubrebarbas. No se debe llevar anillos, ya que pueden romper los guantes. Por ese mismo motivo, las uñas han de mantenerse cortas.

La secuencia para vestirse por encima de la ropa de trabajo habitual es invariable, y ha de hacerse de forma supervisada en la antesala de la sala limpia (que es habitualmente una ISO 8): primer par de guantes, gorro (que cubra todo el cabello y las orejas), mascarilla (tapando boca y nariz) y cubrebarbas si fuera necesario, mono o bata, patucos (que han de cubrir por completo los zapatos, cuyas suelas se han limpiado previamente pisando en una alfombrilla adhesiva), y segundo par de guantes (por encima de las mangas del mono o bata). Una vez ataviados, resulta recomendable (aunque no suele ser obligatorio) que antes de entrar a la sala limpia se pase por una «ducha» de aire esterilizado. Al final del turno de trabajo, hay que desvestirse usando la secuencia inversa y tirar todo el material desechable que se haya utilizado. Y, por si esto fuera poco, un detalle más: debe evitarse el uso de maquillajes, colonias u otros productos cosméticos que puedan hacer desprenderse más células de la piel de lo habitual, y que además introducirían contaminación molecular con sus compuestos volátiles. Por esto mismo, no se debe fumar antes de entrar a la sala limpia, y huelga decir que dentro tampoco. Evidentemente, no está permitido comer o beber (ni siquiera agua) dentro de la sala. Ni mascar chicle. Ni chupar caramelos.



Trabajo de ingeniería en la misión *InSight* de la NASA, siguiendo las restricciones de protección planetaria. En enero de 2018, varios ingenieros del Jet Propulsion Laboratory (JPL, Pasadena, California) y de Lockheed Martin Space comprobaban, en una de las salas limpias de esta empresa (en Littleton, Colorado), el sistema para desplegar los paneles solares de la sonda. Imagen cortesía de NASA/JPL-Caltech/ Lockheed Martin.

Como el lector estará pensando, no apetece mucho ser un *insider*... Y tampoco resulta sencillo ser el supervisor que se encarga de vigilar el cumplimiento de todas estas normas tan estrictas. De hecho, el nivel de incomodidad y estrés con el que se trabaja en condiciones de protección planetaria es una queja habitual en todas las misiones. Pero merece la pena el esfuerzo. Un caso cercano lo podemos encontrar en los equipos de ingenieros y científicos del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y el Centro de Astrobiología implicados durante años en las labores de protección planetaria o en la fabricación y ensamblaje de instrumentos científicos para las misiones *ExoMars* y *Mars2020* (de las que hablaremos en detalle) con destino a Marte. En conjunto, por ejemplo, para la misión *ExoMars* de la ESA un total de 150 personas han intervenido hasta ahora en labores de protección planetaria en distintos países, coordinadas por Diana Margheritis, experta de la empresa italiana Thales Alenia Space. Como *Planetary Protection System Engineer* de la misión, ella ha supervisado la construcción en Turín de las salas blancas para integrar todos los instrumentos a bordo del rover *Rosalind Franklin*, así como el montaje de los laboratorios de microbiología en los que se han realizado (y se seguirán realizando) múltiples ensayos de cuantificación de carga biológica.

Un dato relevante es que a lo largo de las cuatro fases del desarrollo de un instrumento para exploración espacial [modelo estructural (*Structural*

Thermal Model, STM), modelo de ingeniería (*Engineering Model, EM*), modelo de calificación de ingeniería (*Engineering Qualification Model, EQM*) y modelo de vuelo (*Flight Model, FM*)], sólo las dos últimas deben ensamblarse teniendo en cuenta las restricciones de protección planetaria. Por tanto, el auténtico estrés llega en las etapas finales del proceso.

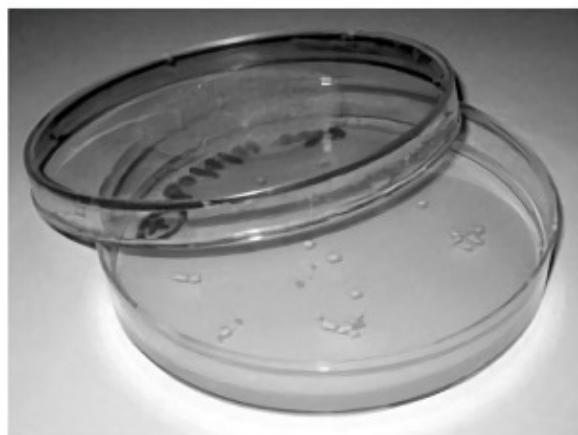
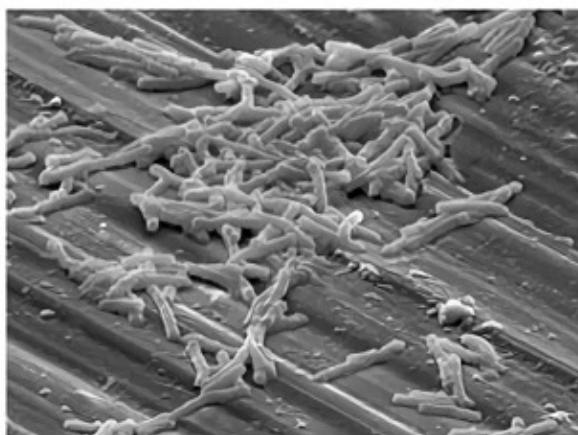
CONTANDO MICROORGANISMOS EN UN INSTRUMENTO

A pesar de las rigurosas medidas de control que acabamos de comentar, en los análisis de los equipos realizados durante los procesos de ensamblaje se detectan con frecuencia microorganismos en sus superficies, casi siempre procedentes de la piel o la boca de los operarios. Una pregunta pertinente es si las bacterias que viven en nuestro cuerpo, u otros potenciales habitantes de las salas de ensamblaje de misiones espaciales, podrían desarrollarse en Marte, Europa o cualquier otro objetivo astrobiológico. Como hemos visto anteriormente, los microorganismos extremófilos resisten condiciones muy diferentes de las habituales para nosotros (de temperatura, presión, radiación, salinidad, etc.) y por tanto sí sería posible que varios de ellos se desarrollaran fuera de nuestro planeta. Pero estos seres maravillosos no viven dentro (ni habitualmente cerca) de nosotros, por lo que en principio no serían contaminantes potenciales en las salas de ensamblaje.

Sin embargo, algunos de los microorganismos no extremófilos (conocidos genéricamente como «mesófilos») también son capaces de resistir condiciones bastante extremas mediante la formación de esporas: estructuras altamente resistentes (al calor, la radiación y la desecación) que, a través de un complejo proceso dura entre 6 y 10 horas, compactan y rodean el genoma del microorganismo. Así, el *software* de ese ser vivo queda preservado, a la espera de que desde él se pueda regenerar su *hardware* cuando las condiciones sean propicias. En ese caso, las esporas podrán «germinar» y revertir a la fase vegetativa (la «normal» del microorganismo) en menos de 2 horas, lo que desencadena su reproducción exponencial. Géneros bacterianos como *Bacillus* y *Clostridium*, respectivamente aerobios y anaerobios, son ejemplos de formadores de esporas muy resistentes, que pueden sobrevivir en ese estado de «vitalidad suspendida» hasta varios millones de años. Los hongos también producen esporas habitualmente, pero éstas son más fáciles de destruir que las bacterianas. En conjunto se considera que, en entornos de

trabajo normales, en torno a un 10 % de los microorganismos presentes forma esporas capaces de resistir las condiciones de un viaje espacial.

Teniendo esto en cuenta, el protocolo establecido por las agencias espaciales para evaluar la contaminación biológica presente en un equipo que va a enviarse a otro planeta o satélite comprende los siguientes pasos: i) se toman muestras de todas las superficies representativas de cada uno de los materiales que constituyen el equipo analizado, mediante torundas o pequeñas gamuzas de poliéster estériles humedecidas en agua también esterilizada, y anotando en las correspondientes hojas de cálculo el área muestreada en cada caso; ii) los microorganismos que puedan haber sido recogidos se pasan, utilizando un baño de ultrasonidos (o, en su defecto, mediante agitación energética durante 2 minutos), a un volumen conocido de un líquido que contiene una solución salina y un detergente especial; iii) dicho líquido se somete a una incubación a 80 °C durante 15 minutos, suponiendo que sólo sobrevivirán a ella las especies capaces de formar esporas; iv) la suspensión resultante (así como otras con los controles establecidos en cada caso) se reparte en varias placas de cultivo (0,5 ml en cada una) similares a las utilizadas habitualmente en microbiología, con agar sólido y un medio de cultivo generalista, que son incubadas a 32 °C (una temperatura adecuada para el crecimiento de los microorganismos esporulantes) durante 24, 48 y 72 h; v) pasados los tres días se hace un recuento de las colonias formadas (cada una de las cuales provendrá de una espora que sobrevivió al tratamiento) y se calcula la cantidad total de microorganismos formadores de esporas que había en el equipo (asumiendo que éstos supondrán el 10 % de la «carga biológica» o *bioburden* total que contenía); vi) en algunos casos, además, se extrae y analiza el DNA de esas colonias, para poder identificar qué especies concretas de microorganismos habían contaminado las superficies muestreadas.



Colonia de bacterias adheridas a la superficie metálica de un instrumento dedicado a la exploración planetaria, antes de su limpieza y esterilización, visualizada por microscopía electrónica de barrido (imagen de Wikimedia Commons). Placa de cultivo obtenida por incubación (a 32 °C, durante 72 horas) de una muestra tomada en 25 cm² de superficie de un instrumento sin esterilizar y antes de ser

ensamblado: aparecen 41 colonias de dos especies diferentes de bacterias formadoras de esporas (fotografía del autor).

Quienes estén familiarizados con las técnicas utilizadas actualmente en los laboratorios de biología molecular echarán de menos sistemas más modernos que los indicados en los puntos iv) y v) para cuantificar los microorganismos totales (y no sólo los cultivables) presentes en una superficie, como son la detección mediante bioluminiscencia del ATP producido, o bien la extracción de DNA y secuenciación masiva con técnicas de metagenómica. Estas posibilidades están en discusión entre los especialistas en protección planetaria y pueden realizarse a nivel de investigación, pero hasta el momento las agencias espaciales sólo permiten utilizar el cultivo en placas y recuento de colonias para cuantificar de forma certificada la carga biológica presente. Algunos datos curiosos proporcionados por los responsables de protección planetaria de la NASA pueden dar una idea de la magnitud de estos procedimientos: a lo largo del ensamblaje de los vehículos *Spirit* y *Opportunity* se tomaron 3766 muestras utilizando torundas y 529 mediante gamuzas, que fueron analizadas en unas 35 000 placas de cultivo; por su parte, para *Curiosity* se utilizaron 3472 torundas y 1283 gamuzas, muestreadas en exactamente 47 997 placas. Todo queda escrupulosamente registrado, como vemos.

LIMPIEZA Y ESTERILIZACIÓN

Para limitar en lo posible la contaminación biológica de los instrumentos ensamblados se hace necesario implementar medidas de limpieza exhaustiva y esterilización. Los métodos de limpieza sirven para reducir los contaminantes (partículas, microorganismos o moléculas orgánicas) presentes en un material. Se realizan habitualmente mediante gamuzas impregnadas en IPA, evitando la recontaminación de los equipos y manteniéndolos empaquetados en bolsas dobles de un plástico especial: con tamaño de poro que impide el paso de microorganismos pero sí es permeable a los gases esterilizantes que se puedan utilizar, como veremos más adelante. Por su parte, las operaciones de desinfección (también llamadas de descontaminación) conllevan el uso de procedimientos generalmente químicos (usando IPA con mayor frecuencia, o bien agentes como el formaldehído) que disminuyen el número de microorganismos, pero sin eliminarlos por completo

Sin embargo, la esterilización es un procedimiento físico o químico que busca destruir, eliminar o inactivar *todas* las formas de vida o entidades biológicas replicativas: bacterias, arqueas o eucariotas viables, esporas, biopelículas y otras formas de resistencia, virus, viroides y priones. La esterilidad no es una situación natural en nuestro planeta, que como hemos comentado se encuentra completamente lleno de vida, y por tanto resulta técnicamente imposible lograrla en los entornos de ensamblaje que nos ocupan... o en otros lugares muy controlados como los quirófanos (donde a veces sobreviven bacterias patógenas que infectan al paciente durante una intervención quirúrgica).

La esterilización de un material requiere que antes haya sido limpiado exhaustivamente. A partir de ahí, la elección del mejor método esterilizante en cada caso depende de dos factores: la eficiencia de reducción de carga biológica necesaria (en función de su contaminación previa) y la compatibilidad de los materiales (elementos estructurales, recubrimientos, adhesivos, componentes electrónicos, etc.). Las técnicas de esterilización se clasifican en función del agente físico (temperatura, radiación, presión, etc.) o químico (gas o líquido tóxico, compuesto altamente oxidante, etc.) utilizado. En general, los sistemas físicos esterilizan tanto las superficies como el interior (la carga biológica «encapsulada», a la que no se tiene acceso) de los materiales, mientras que los químicos sólo actúan sobre las zonas superficiales. La eficiencia esterilizante de los distintos métodos se evalúa utilizando microorganismos de control capaces de formar esporas (por ejemplo, *Bacillus stearothermophilus* o *Bacillus pumilus*) que se depositan sobre el material a densidades superficiales conocidas y son cuantificados al final del proceso.

A día de hoy, el único sistema de esterilización que está calificado por la NASA, la ESA y otras agencias espaciales es uno físico, conocido como «calor seco» o *dry heat microbial reduction (DHMR)*. Consiste en calentar los equipos en hornos especiales (en cuya atmósfera interior el vapor de agua no puede superar la concentración de 1,2 g/m³) a 125 °C durante al menos 30 horas, o el tiempo equivalente a otras temperaturas (por ejemplo, 156 horas a 110 °C). Con ello, los microorganismos presentes en sus superficies e interior (donde difunde el calor a lo largo del proceso) se eliminan por desnaturalización de sus ácidos nucleicos y proteínas, destruyéndose además gran parte de los componentes celulares. Se ha podido establecer que con este tratamiento la carga biológica de los materiales disminuye 10 000 veces (o «4 logaritmos») respecto a la cantidad de partida. Los metales, aleaciones y componentes electrónicos «con especificaciones de vuelo» actualmente utilizados resisten sin problema estas temperaturas mayores de 100 °C, pero varios materiales (entre ellos algunos polímeros químicos, adhesivos, recubrimientos, lubricantes y soldaduras) se degradarían empleando tales

condiciones de esterilización. Por tanto, los componentes que los incluyan han de ser sometidos a sistemas de limpieza más exhaustivos, en ocasiones combinados con métodos alternativos de esterilización, que garanticen la mayor reducción posible de carga biológica sin requerir altas temperaturas.

Entre los métodos físicos alternativos está el uso de rayos gamma (fotones de alta energía emitidos por fuentes radiactivas como el cobalto-60, que pueden penetrar varios centímetros de acero tras una exposición de horas) o radiación beta (electrones generados por fuentes convencionales y aceleradores, que penetran sólo unos milímetros en acero pero de forma más eficiente ya que el proceso de esterilización requiere sólo unos minutos). Un serio inconveniente de la radiación gamma es que afecta a los componentes electrónicos. Además, ambos sistemas requieren instalaciones especiales y altamente controladas, por lo que no son de utilización rutinaria en labores de protección planetaria.

Otra alternativa para los componentes que no resisten la temperatura usada en el *DHMR* son los sistemas químicos de esterilización, utilizando gases bactericidas como los empleados habitualmente en clínica para eliminar los microorganismos presentes en agujas, sondas y todos los materiales usados en intervenciones quirúrgicas. En el ámbito de la protección planetaria, el gas esterilizante más utilizado es el peróxido de hidrógeno (H_2O_2 , un compuesto que en disolución se conoce popularmente como «agua oxigenada») en condiciones muy controladas, y se ha aplicado con éxito a algunos componentes de numerosas misiones con destino a Marte, desde la *Mars96* hasta las lanzadas en 2020. También se ha utilizado óxido de etileno (C_2H_4O), pero dada su toxicidad para los humanos este gas ha sido abandonado en el ámbito de la investigación espacial.

En el caso de las misiones *Viking* (que, como veremos, llegaron a Marte en 1976), la NASA tomó precauciones extraordinarias para esterilizar ambos *landers*. Así, primero se limpiaron a conciencia todos sus componentes hasta dejarlos en niveles de 300 esporas termorresistentes por m^2 , y tras el ensamblaje final se esterilizó cada sonda introduciéndola por completo en un gran horno de *DHMR* durante varios días, con lo que la carga biológica se redujo en un factor 10 000. Después de aquellos aterrizadores pioneros, la agencia norteamericana ha seguido limpiando y esterilizando con rigor los componentes de sus naves con destino a Marte, pero sin realizar el horneado final del conjunto ya que esto habría encarecido enormemente su coste. Estamos, por tanto, ante un compromiso entre nivel de esterilización y presupuesto, entre lo científicamente deseable y lo económicamente viable.

REQUERIMIENTOS DE PROTECCIÓN PLANETARIA

El COSPAR define actualmente cinco categorías de misiones respecto a sus requerimientos de protección planetaria, que dependen tanto del cuerpo explorado (en concreto, de la posibilidad de que exista vida en él) como del tipo de misión (orbitador, *flyby*, *lander*, *rover* o de retorno de muestras), según se muestra en la siguiente tabla:

Cate- goría de contami- nación	Prevención	Nivel de pre- caución	Probabilidad de contami- nación	Cuerpo	Tipo de misión
I		Nulo	Cualquiera	Sol, Mercurio, Asteroides*	Cualquiera
II	Con organismos terrestres	Remota	Significativa	Luna, Venus, Ceres, Asteroides*, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno, Plutón, Caronte, Cometas	Cualquiera
III				Marte, Europa, Ganimedes, Encélado, Titan, Tritón	Orbitador, <i>flyby</i>
IV					<i>Lander</i> , <i>rover</i>
V	De retorno	Desconocido	Desconocida	Cualquiera	Retorno de muestras (restringido o no)

* Las misiones a los asteroides diferenciados pertenecen a la categoría I, mientras que las dirigidas a asteroides no diferenciados (cuerpos parentales de las condritas, entre ellas las carbonáceas) se engloban en la categoría II. En el capítulo 10 de este libro hablaremos sobre los asteroides y meteoritos.

En el ejemplo que más nos interesa aquí, un *lander* o *rover* que vaya a aterrizar en Marte o Europa tendrá categoría IV, y se clasificará en subcategorías (a, b, c) en función de otras características de la misión. Así, *Perseverance* y *Rosalind Franklin* están clasificadas en la categoría IVb, ya que incluyen un módulo de amartizaje dotado de instrumentos relacionados

con la búsqueda de vida, pero no están dirigidos a una «región especial» del planeta. Aunque éste es un tema controvertido, se definen como regiones especiales de Marte aquellas con alta probabilidad de contener agua (y, tal vez, vida) en su subsuperficie, o incluso en su superficie durante el verano. Están influidas por la topografía del planeta, pero de manera simplificada podemos decir que corresponden aproximadamente a las latitudes intermedias entre las ecuatoriales (donde es más difícil que exista hielo subsuperficial) y las polares (demasiado frías para que el hielo se funda en algún momento del año marciano). Hasta el momento, la única sonda que ha llegado con éxito a una región especial de Marte (y por tanto es de categoría IVc) fue el aterrizador *Phoenix*, pues como veremos se posó cerca de su polo norte.

Los requerimientos típicos de una misión de categoría IVb implican que, al llegar a su destino, el vehículo debe contener menos de 200 000 esporas totales en las superficies expuestas (con densidades medias de 300 esporas/m²), y otras 200 000 esporas en el interior de los materiales a los que no se tiene acceso durante el ensamblaje. Además, es preciso realizar un inventario de los materiales orgánicos que contiene cada uno de los componentes utilizados, evaluando mediante los ensayos oportunos la posibilidad de que alguno se desgasifique durante el vuelo o ya en su lugar de destino, lo que podría producir contaminación molecular con determinados compuestos.

Como vemos, en ese compromiso entre lo teóricamente deseable y lo técnica o económicamente posible, se ha optado por permitir llevar cerca de medio millón de esporas (y, por tanto, diez veces más de microorganismos totales) en cada misión que actualmente se posa en Marte. Merece la pena destacar que, en cuanto a la densidad superficial de esporas, el COSPAR tiene requerimientos mucho más restrictivos para las partes del *rover* o *lander* que van a estar en contacto con la superficie del planeta o satélite (como las patas o ruedas, y sobre todo los taladros que perforan el subsuelo), en las cuales se tolera únicamente de 1 a 3 esporas/m², que para aquéllas zonas más alejadas de su superficie (como el cuerpo del vehículo, la mayor parte de los instrumentos embarcados, los mástiles o cámaras).

Poniendo un ejemplo actual, tras la llegada de *Curiosity* al cráter Gale de Marte en 2012, Catharine A. Conley, responsable de protección planetaria de la NASA, afirmó que en el momento del lanzamiento el *rover* en su conjunto contenía sólo entre 20 000 y 40 000 esporas termorresistentes, y quizás hasta 100 o 1000 veces más de microorganismos en total. No obstante, según sus palabras, la agencia *asumía* que la mayor parte de esa carga biológica no habría sobrevivido al vacío y las grandes dosis de radiación acumulada durante el viaje (de ocho meses y medio) y en su periplo posterior por la superficie del planeta. En cualquier caso, el cráter Gale había sido elegido como lugar de amartizaje por ser muy seco y no contener ninguna región

especial: una ventaja (o, más bien, una gran limitación) de enviar *rovers* que realmente todavía no van en busca de vida.

Como precaución adicional, durante su recorrido por el cráter a *Curiosity* no se le ha permitido atravesar zonas donde el color o la textura del terreno sugieren que puede haber agua congelada en la superficie marciana, o incluso agua líquida en la subsuperficie. Aunque esto constituye una de las paradojas actuales en el ámbito de la búsqueda de vida extraterrestre, las restricciones de protección planetaria son claras: no se debe tocar con nuestros instrumentos los lugares más favorables para que exista vida marciana, precisamente porque aún no estamos seguros de poder hacerlo sin contaminarlos con microorganismos o biomoléculas terrestres. Frente a esta idea, el conocimiento de la vida en nuestro planeta indica que ésta ha colonizado todos los entornos imaginables, incluso los más secos o los que poseen características físico-químicas más extremas. Por tanto, análogamente, si existe vida en Marte lo más probable es que no esté confinada a ciertas regiones especiales, sino que se habrá extendido por todo el planeta.

Si las medidas de protección planetaria que hemos estado comentando se realizan correctamente durante el ensamblaje de un robot de exploración, se estima que su repercusión económica puede suponer del 25 % al 30 % del coste total de la misión. Y esos son muchos millones de dólares, euros, yuanes o rublos... por lo que a veces algunas agencias espaciales intentan reducirlos «relajando» en parte las restricciones impuestas por el COSPAR. Así, la propia NASA, pensando en las futuras misiones a Marte y en su *Europa Lander* (del que hablaremos) convocó a finales de 2018 una reunión de expertos bajo un postulado que resulta muy indicativo de los nuevos tiempos que corren: «El deseo legítimo de proteger la Tierra y otros cuerpos celestes de la contaminación se debe equilibrar adecuadamente con los beneficios científicos, sociales y económicos de las misiones espaciales públicas y privadas».

En paralelo, hay científicos implicados en la exploración espacial que están propugnando la eliminación de las restricciones de protección planetaria que actualmente impiden la llegada de robots de exploración a las regiones especiales de Marte, con objeto de que se pueda buscar cuanto antes la posible presencia de vida endógena en ellas. La razón que se esgrime, con cierta lógica, es que los humanos no tardaremos más de dos décadas en llegar al planeta rojo: en ese momento las legiones de microorganismos que nos acompañen comenzarán a intentar colonizarlo, a pesar de que los astronautas se muevan por su superficie utilizando trajes espaciales aparentemente estancos y herramientas teóricamente esterilizadas. Tras cinco décadas sin modificar lo fundamental de sus normas, el COSPAR es cada vez más receptivo a todas estas cuestiones. Estamos en un momento clave para la

exploración espacial, y en particular para la protección planetaria. De hecho, quizá ya sea tarde...

¿HEMOS LLEVADO YA VIDA TERRESTRE A OTROS LUGARES?

Dejando aparte los numerosos experimentos de vuelos balísticos y suborbitales realizados durante el siglo XX, muchos seres vivos de diferentes especies han orbitado alrededor de la Tierra desde que el 4 de octubre de 1957 fuera lanzado por la URSS el primer satélite artificial: el *Sputnik 1*. Esta esfera, cuyo nombre significa en ruso «compañero de viaje», de unos 60 cm de diámetro y poco más de 80 kg de peso, sin duda llevaba un gran repertorio de microorganismos adheridos a todas sus superficies: esos microscópicos compañeros de viaje del orbitador dieron nada menos que 1400 vueltas a nuestro planeta. El 3 de noviembre de ese mismo año, el primer animal (no el primer ser vivo, como acabamos de ver) que se puso en órbita de nuestro planeta, a bordo del *Sputnik 2*, fue la perra *Laika*: una experiencia muy corta y estresante para ella, ya que falleció por sobrecalentamiento entre 5 y 8 horas después del lanzamiento, tras haber dado 4 vueltas escasas a la Tierra. Por tanto esta perrita callejera de Moscú fue también, y varios días antes de lo previsto, el primer animal muerto en órbita terrestre. Tras esta heroica representante de la especie *Canis lupus familiaris*, han volado en diferentes misiones alrededor de la Tierra muchos otros animales, incluidos más perros, conejos, ratas, ratones, huevos fertilizados de pollo, huevos de rana, carpas y otros peces, caracoles, arañas, moscas, avispas, hormigas, insectos palo, escarabajos, grillos, gusanos o medusas. Y también plantas de numerosas especies, hongos, amebas y gran variedad de bacterias y arqueas. Si consideramos todas las misiones conjuntamente, hemos ido poniendo un auténtico zoo en órbita de nuestro planeta.

¿Y los humanos? El 12 de abril de 1961, el cosmonauta Yuri Gagarin fue el primer *Homo sapiens* en orbitar en torno a la Tierra. Este hito, con el que la URSS volvía a tomar delantera sobre Estados Unidos, lo realizó a bordo de la cápsula *Vostok 1* durante 108 minutos. Tras despegar diciendo «*Poyejali!*» («¡Vámonos!») estuvo hablando, comiendo fruta... y sin duda disfrutando de las mejores vistas posibles: nuestro planeta desde 315 km de altura. Cuatro meses después, Guerman S. Titov repitió y amplió la hazaña a bordo de la *Vostok 2*. Tres meses más tarde describiría una órbita el chimpancé *Enos* a bordo de la cápsula *Mercury Atlas 5* de la NASA, y el primer humano

norteamericano que logró orbitar nuestro planeta fue el astronauta John Glenn, en febrero de 1962, a bordo de la *Mercury Atlas 6*. Dos pioneros más fueron la cosmonauta Valentina Tereshkova, primera mujer en órbita terrestre (a bordo de la *Vostok 6*, en marzo de 1963) y su compatriota Alekséi A. Leónov, que el 18 de marzo de 1965 logró realizar el primer paseo espacial de la historia, durante 12 minutos y 9 segundos. Quienes alguna vez se hayan preguntado por qué en una de las escenas más recordadas de la película *2001: Una odisea en el espacio* (con guion de Arthur C. Clarke, amigo de Leónov y de Stanley Kubrick), estrenada tres años más tarde, sólo se escucha la respiración del astronauta Frank Poole cuando sale al espacio desde la nave *Discovery*... deben leer qué le ocurrió durante su regreso a la cápsula *Vosjod 2* a ese primer ser humano que había flotado en el vacío espacial.

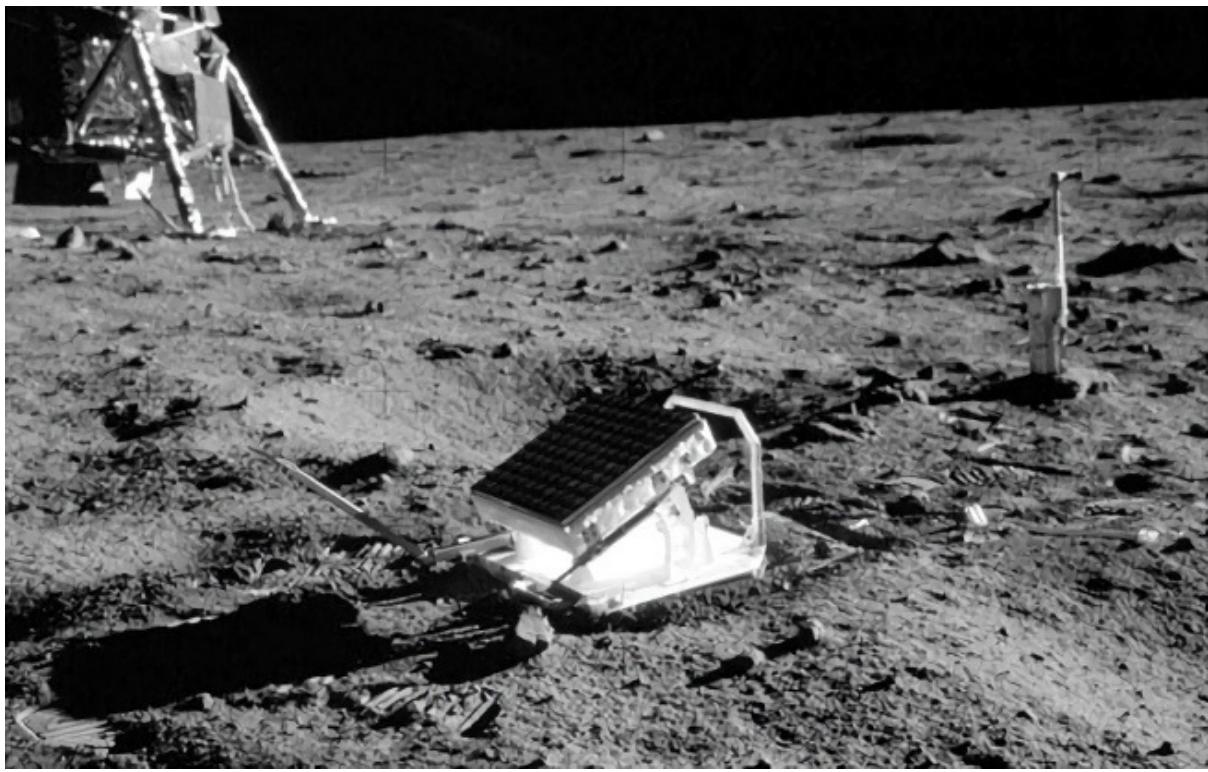
Desde 1968 también se orbitó la Luna: los primeros animales y plantas en la sonda soviética *Zond 5*, y los primeros astronautas en el *Apolo 8* de la NASA, como comentamos en el segundo capítulo del libro. Más tarde, a partir de 1986, numerosos humanos y otros seres vivos han habitado durante períodos más o menos largos en órbitas terrestres bajas, a una altitud de entre 300 y 400 km sobre la superficie del planeta: en la estación espacial soviética *Mir*, la Estación Espacial Internacional (ISS) y la estación china *Tiangong-2*. No obstante, todo esto se ha llevado a cabo en el interior de espacios cerrados de mayor o menor tamaño, y en ocasiones sobre su superficie o muy cerca de ella.

Lo más trascendental para el tema que nos ocupa es preguntarnos si no habremos llevado ya vida terrestre a la superficie de los planetas o satélites que hemos visitado, tanto de forma no intencionada como, quizá, siendo conscientes de ello. Sobre la primera opción, la respuesta es que sin duda lo hemos hecho, pues como se ha indicado la esterilización completa no existe y muchos de los materiales e instrumentos enviados fuera contenían con toda seguridad microorganismos. Además, hemos visto que los requisitos de protección planetaria son diferentes para distintas partes de los *landers* o *rovers*, en función de que teóricamente vayan a entrar o no en contacto con la superficie del cuerpo al que se llega. Pero ¿qué ocurre si el aterrizaje no funciona como estaba previsto y el robot impacta a gran velocidad contra el suelo, lo que ha ocurrido numerosas veces en la Luna, Venus y Marte?

En esos casos todos sus componentes, con mayores o menores densidades de esporas por metro cuadrado, quedarán desperdigados sobre la superficie, alrededor del cráter generado en ella por el choque incontrolado. La violencia del impacto habrá producido temperaturas y presiones que quizá hayan eliminado parte de los microorganismos que viajaban como polizones interplanetarios... pero ¿habrán muerto todos? Y pensemos además en otro aspecto: aunque la llegada (a la superficie de Marte, por ejemplo) haya sido controlada y exitosa, ¿qué puede ocurrir con el robot y sus diminutos

habitantes después de años o décadas de abandono sobre el planeta, una vez finalizada su vida útil? En un entorno con tanta radiación, ¿cuánto tiempo resistirá cualquier *lander* o *rover* los procesos de fatiga de materiales antes de acabar con su estructura dañada y todos sus componentes degradados, dispersos sobre el suelo marciano? Además, en cualquiera de estos casos, desde su llegada a Marte el viento puede haber esparcido por la tenue atmósfera y la superficie del planeta la carga biológica que contuvieran los instrumentos llevados allí desde la Tierra. Inquietantes cuestiones.

Volviendo a la Luna, recordemos que en ella no se aplican medidas de protección planetaria porque con el programa Apolo quedó claro que (hasta donde sabemos) no contiene vida. En palabras de Gerhard Kminek, responsable de protección planetaria de la ESA: «No existen requerimientos técnicos de protección planetaria para la Luna y no hay limitaciones desde el punto de vista de la contaminación biológica u orgánica». Por tanto, a nuestro satélite han llegado seres vivos terrestres sin restricciones. Entre ellos, algunos humanos afortunados. Doce astronautas caminaron sobre el gris y polvoriento suelo del satélite entre 1969 y 1972, dejando en él multitud de objetos: el famoso espejo que depositó Aldrin, otros instrumentos científicos, herramientas, cámaras fotográficas y de vídeo, rollos de película sin usar, discos con mensajes grabados, una placa metálica firmada por Richard Nixon y los tres tripulantes del *Apolo 11*, seis banderas de Estados Unidos y sus mástiles, una pequeña estatuilla de aluminio creada por el artista belga Paul Van Hoeydonck en homenaje a los fallecidos durante las misiones anteriores, doce pares de botas usadas, las dos pelotas de golf que Alan Shepard lanzó durante la misión del *Apolo 14*, una pluma de halcón, tres *rovers* de más de media tonelada cada uno, la foto de su familia que Charlie Duke llevó en el *Apolo 16*... y un largo etcétera. Sin duda, todo ello estaba recubierto de abundantes y variados microorganismos al salir de la Tierra.



La llegada de la misión *Apolo 11* a la Luna supuso el comienzo de la contaminación antrópica de nuestro satélite con microorganismos terrestres. En la imagen se observa el retrovisor o «espejo» que se colocó para medir con precisión la distancia Tierra-Luna mediante haces láser disparados desde nuestro planeta (en el llamado *Lunar Laser Ranging Experiment*), una cámara con su pie, otros materiales depositados sobre el suelo y el módulo *Eagle* al fondo. Esta fotografía de la NASA (disponible a través de Wikimedia Commons) sirve también para apreciar la textura del regolito lunar que pisaron los astronautas.

De todos modos, lo más relevante para el tema que estamos tratando en este capítulo es que, entre el legado de esa docena de astronautas están 96 bolsas de orina y heces (no todas llenas, aparentemente) que quedaron dispersas alrededor de los seis lugares de alunizaje. La justificación para dejarlas allí es que resultaba necesario aligerar todo el peso posible que llevaran consigo los módulos en el momento de su despegue, ya que siempre traían de vuelta varios kilogramos de rocas y regolito de la superficie lunar. Al no existir seres vivos en nuestro satélite, en principio no habría mayor problema en ello. Pero pensemos en un detalle: las primeras bolsas con deposiciones, que contenían una nutrida representación del microbioma intestinal de Armstrong y Aldrin, fueron abandonadas sobre la superficie de la Luna *antes* de saber si en las rocas que ambos acababan de recoger se iba a detectar la presencia de vida endógena en nuestro satélite. Por tanto, podemos afirmar que aquel comportamiento fue, entre otros calificativos posibles, muy incorrecto desde el punto de vista de la protección planetaria.

ÚLTIMAS NOTICIAS DESDE LA LUNA

Cinco décadas y muchas misiones después, el 3 de enero de 2019 la sonda china *Chang'e 4* se convirtió en el primer robot en posarse sobre la cara oculta de la Luna. Como en el caso de la *Chang'e 3*, enviada en 2013, el segundo alunizaje chino fue un éxito, lo que justifica el nombre escogido para esta serie de misiones: *Chang'e* es la diosa china de la Luna y habita en nuestro satélite. La sonda *Chang'e 4*, con una masa de unas 3,8 toneladas, lleva un pequeño *rover* de 140 kg y seis ruedas que tras el alunizaje fue bautizado como *Yutu 2* (lo que en chino mandarín significa «liebre de jade»). Varias imágenes que mostraban cómo este *rover* descendía por unos carriles metálicos desde el módulo aterrizador hasta el suelo lunar fueron muy comentadas a comienzos de 2019.

Pero lo principal, en nuestro contexto, es que la sonda *Chang'e 4* llevaba un experimento astrobiológico cuidadosamente diseñado, que había liderado la Universidad de Chongqing. En un cilindro de 18 cm de alto y 16 cm de diámetro, con una masa total de 3 kg, viajaron seis especies de seres vivos: levaduras, semillas de cuatro plantas (*Arabidopsis*, colza, patata y algodón) y huevos de mosca del vinagre. En el experimento no había gusanos de seda, a pesar de lo que algunos medios publicaron tras el alunizaje. Y, aunque nadie hablaba sobre ellas en sus crónicas, *Chang'e 4* llevaría además innumerables especies de bacterias asociadas a esos eucariotas pluricelulares. El cilindro se mantenía presurizado a una atmósfera terrestre, estaba termostatizado e incluía sus propias reservas de agua, además de aire de nuestra atmósfera, nutrientes y sustrato vegetal. Un tubo dirigía la luz que llegaba del Sol hasta el contenedor para permitir el crecimiento de las plantas, cuyas semillas fueron convenientemente regadas en cuanto la sonda alcanzó la superficie lunar. La idea era que, en esta minibiosfera autosuficiente, las plantas generaran oxígeno para que las moscas lo respiraran una vez que sus huevos eclosionasen, mientras que las levaduras se harían cargo de descomponer la materia orgánica producida. Consumidores y descomponedores, a su vez, producirían el dióxido de carbono que las plantas iban a necesitar para realizar la fotosíntesis gracias a la luz que les llegaba a través del tubo. Para hacer un seguimiento de los resultados de ese interesante experimento y difundirlo al público general, el cilindro contenía dos pequeñas cámaras apuntando a los lugares clave.

Por tanto, el alunizaje de la *Chang'e 4* supuso que, por primera vez, la vida había llegado a la cara oculta de la Luna. Y esos humildes huevos de mosca del vinagre estaban llamados a ser animales pioneros allí, como en la cara que nos mira lo fueron Armstrong y Aldrin en 1969. Pero, a pesar de que

las condiciones interiores de este pequeño invernadero cilíndrico eran las mismas que las de nuestro planeta, los seres vivos viajeros debían enfrentarse a dos diferencias fundamentales para crecer y establecer los ciclos ecológicos esperados: la gravedad lunar es la sexta parte que la de la Tierra, y los períodos de día y noche duran unos 14 días terrestres.

En medio de una gran expectación, el 15 de enero de 2019 se hizo público que las semillas de algodón de la *Chang'e 4* habían germinado días atrás, y circularon fotos de un pequeño tallo verde sobresaliendo por encima de la estructura de plástico blanco situada sobre el sustrato, dentro del cilindro. Pero este tema fue controvertido, porque dicha foto (que para algunos estaba inaugurando la era de la botánica espacial) había sido tomada en un experimento idéntico realizado paralelamente, como control, en un laboratorio de China. Las otras tres especies de plantas no llegaron a germinar, y los huevos de mosca nunca eclosionaron. En cualquier caso, más tarde se supo que ninguna semilla había sobrevivido a la larga noche que comenzó el 13 de enero. La muerte llegó a la cara oculta de la Luna y el experimento terminó pronto. El contenedor de la *Chang'e 4* había sido diseñado para que nada pueda salir de él, por lo que aparentemente la superficie lunar no fue ni será contaminada con las moléculas biológicas que ahora contiene en este cilindro.

Por otra parte, el 6 de agosto de 2019 tuvimos una noticia relacionada con la sonda israelí *Beresheet* (que en hebreo significa «Génesis»), lanzada con la intención de ser la primera misión privada en la Luna, pero que se había estrellado contra la superficie de nuestro satélite el 11 de abril de ese año. Llevaba consigo varios experimentos, y además diferentes potentados de todo el mundo habían «comprado espacios» dentro de ella para enviar los más variados objetos. Entre ellos estaba el financiero norteamericano Nova Spivack, cofundador y presidente de la Arch Mission Foundation, cuya finalidad declarada es «preservar el conocimiento y la biología de nuestro planeta en un proyecto con las dimensiones del Sistema Solar, llamado El Archivo del Billón de Años». Así, según él, «donde vaya la humanidad llegará el archivo, y donde vaya el archivo habrá llegado la humanidad». De hecho, en el afán por llenar nuestro entorno de «bibliotecas» que alguna civilización extraterrestre pudiera descubrir en el futuro, Spivack ya envió en 2018 un disco con la trilogía de novelas «Fundación» (escritas por Isaac Asimov entre 1951 y 1953, en esto tuvo muy buen gusto) en el *Tesla Roadster* rojo que Elon Musk lanzó al espacio en aquel inolvidable vuelo inaugural de su cohete *Falcon Heavy*. Pues bien, continuado con este curioso empeño, un año más tarde la Arch Mission Foundation empaquetó en la sonda *Beresheet* un DVD con millones de datos sobre la vida terrestre, incluida la Wikipedia en inglés, sesenta mil páginas escaneadas de libros clásicos, imágenes de obras de arte de distintas culturas y de algunos lugares

sagrados... así como «conocimientos» tan poco académicos como la explicación de varios trucos de magia de David Copperfield. Además, se incluyeron muestras de DNA de 24 miembros de esta fundación.

Pero lo que supimos cuatro meses después del alunizaje frustrado de *Beresheet* fue algo que se había mantenido en secreto hasta entonces, sin comunicárselo a la compañía responsable de la misión (la israelí *SpaceIL*) ni a su director científico: poco antes de cerrar su paquete con destino a la Luna, Spivack tomó la muy cuestionable decisión de incluir también cien millones de células de diferentes organismos y además miles de tardígrados deshidratados e introducidos en una solución salina fría. Todos ellos iban embebidos en una resina que se quería probar como método de preservación del material biológico en el espacio. Finalmente, quizá para asegurarse el éxito de su envío, decidió esparcir otros miles de estos ositos de agua deshidratados, pegados a la cinta adhesiva que cubría su peculiar «biblioteca lunar». Como comentamos en el capítulo dedicado a los organismos extremófilos, los tardígrados son animales diminutos famosos por su capacidad para resistir, entre otras condiciones muy alejadas de las que consideramos normales, temperaturas extremas, desecación y muy altas dosis de radiación.

Spivack probablemente reconoció estos detalles sobre su peculiar envío porque (aunque al dirigirse a la Luna no había violado ningún requerimiento de protección planetaria) el COSPAR requiere que se informe sobre los materiales biológicos y orgánicos llevados a nuestro satélite antes de que transcurra medio año desde cada lanzamiento... y el de *Beresheet* se había realizado el 22 de febrero de 2019. En declaraciones de esos días de agosto, el propio Spivack y varios científicos consideraban que los tardígrados seguramente habrán resistido el impacto contra la superficie lunar y las grandes dosis de radiación que estarán recibiendo, aunque en ausencia de agua y de atmósfera en principio no podrán haberse reproducido ni propagado allí. Tal vez podrían sobrevivir «aletargados» durante años, hasta que otra misión eventualmente los recupere y analice, pudiendo así estudiar su viabilidad. Con todo, quizá al final un envío tan poco ortodoxo como éste, y la misión fallida que lo llevaba, puedan resultar más interesantes de lo previsto. Por el momento, esto ya ha tenido una consecuencia relevante: desde 2019 no se puede decir con seguridad que la Luna sea un lugar sin vida.

LOS HUMANOS QUE VOLVERÁN A LA LUNA... Y LLEGARÁN A MARTE

En la nueva carrera por regresar a nuestro satélite participan los programas espaciales más importantes del mundo, liderados por la NASA, la ESA y las agencias china (CNSA), rusa (Roscosmos), japonesa (JAXA), india (ISRO), israelí (IAI) y surcoreana (KARI). En 2019, Estados Unidos ha dado un gran paso en ese sentido al sentar las bases de su programa de exploración lunar Artemis, cuyo primer objetivo será volver a pisar la Luna con la misión *Artemis 3*: si se cumplen los planes, en 2024. Esta vez, lógicamente, habrá hombres y mujeres astronautas. Como parte de este programa, la NASA y el resto de agencias espaciales que operan la ISS comenzarán a construir en 2023 una estación espacial (muy acertadamente llamada *Gateway*) en órbita de nuestro satélite, que en 2024 ya debería tener sus dos primeros módulos operativos. En paralelo, China sigue avanzando con su propio programa de viajes tripulados a la Luna, que podría incluir la construcción de otra pequeña estación espacial allí. También están mirando a nuestro satélite, más como estación de paso hacia Marte que como destino final, las divisiones aeroespaciales de grandes empresas que ya hemos citado anteriormente: SpaceX, Virgin Galactic, Blue Origin y Boeing.

Por su parte, el programa de exploración de la agencia ISRO logró poner con éxito en órbita lunar la sonda *Chandrayaan 2*, lanzada cincuenta años y dos días después de la llegada del *Apolo 11*. Sin embargo, el 6 de septiembre de 2019 las expectativas indias sufrieron un duro varapalo cuando la nave *Vikram* (que incluía el rover llamado *Pragyan*) impactó durante su descenso desde el orbitador en una zona cercana al polo sur de la Luna. Por tanto, a día de hoy siguen siendo solo tres los países que han conseguido aterrizar suavemente sobre nuestro satélite: la URSS, Estados Unidos y China.

En cualquier caso, la vuelta a la Luna va a requerir un presupuesto enorme, lo que está poniendo en duda todos los plazos inicialmente previstos. Cuando finalmente llegue esa nueva era en la exploración humana de nuestro satélite, se basará en la colaboración público-privada y no estará guiada sólo por la ciencia: buscará su rentabilidad con la explotación de los recursos que contiene, tanto para ser utilizados allí como para traerlos a la Tierra. Entre ellos está el agua, presente en las reservas de hielo ya localizadas en el fondo de algunos cráteres. A su vez, el regolito se podrá procesar y utilizar *in situ* como material de construcción, e incluso para extraer de él oxígeno molecular (O_2), según un proyecto de la ESA actualmente en investigación. Pero el objetivo más apetecible para la minería lunar es un gas que se encuentra en concentraciones importantes en las rocas del subsuelo: el helio-3, isótopo no

radiactivo del helio muy escaso en la Tierra, que podría reemplazar al tritio (hidrógeno-3) como combustible para las reacciones de fusión nuclear que en el futuro requerirá el desaforado consumo energético de la humanidad. De todos modos, su obtención se plantea muy complicada ya que sería necesario procesar unos 150 millones de toneladas de regolito lunar para obtener una sola tonelada de helio-3, y tampoco resulta fácil imaginar el transporte de ese gas hasta nuestro planeta. En el ámbito de la ciencia ficción, la magnitud de estos problemas se ha mostrado, por ejemplo, en la interesante (y tal vez premonitoria) película *Moon*, dirigida por Duncan Jones en 2009.

En este sentido, también se está planteando la extracción de recursos mineros de Marte o de asteroides ricos en metales, y la conversión de rocas en suelo fértil de cara a la terraformación de planetas o satélites. Pensando en ello, e inspirado en las plantas de biolixiviación de minerales (abundantes, por ejemplo, en el entorno de río Tinto o en Chile), en 2019 se desarrolló en la ISS el experimento *BioRock*, un prototipo de reactor ideado por el astrobiólogo Charles Cockell que permite extraer metales de los minerales que los contienen, utilizando diferentes microorganismos capaces de formar biofilms activos en condiciones de microgravedad. Con el tiempo, puede que las empresas mineras dispongan de legiones de microorganismos terrestres extrayendo metales en el Sistema Solar.

En resumen, la vida ya ha salido de nuestro planeta sólo con billete de ida... y seguirá haciéndolo en el futuro. Somos responsables de haber iniciado una auténtica panspermia dirigida, pero no utilizando asteroides como vehículos de transporte sino complejos robots de exploración. Debemos plantearnos si es ético haberlo hecho también en lugares donde podría haber vida endógena, como Marte o Titán. Si lo será en Europa. Pero quizás no podríamos haber actuado de otra forma, pues la tecnología disponible no permite enviar *landers* o *rovers* esterilizados por completo.

Y hagámonos una última pregunta para terminar este capítulo: los microorganismos terrestres que ya hemos llevado a la Luna, Mercurio, Venus, Marte, Titán, algunos asteroides y cometas, y que pronto seguirán llegando allí y también a Europa y a otros cuerpos, ¿habrán sucumbido a sus condiciones realmente extremas y a las dosis de radiación recibidas durante y después del viaje? Probablemente sí, pero en caso contrario quizás alrededor de nuestros robots abandonados (o de sus restos desperdigados por aquellas superficies) se hayan formado ya pequeños oasis de biodiversidad terrestre, aislados o en interacción con la vida endógena que pudiera existir previamente en cada lugar. Por el momento lo desconocemos, pero no hay que olvidar la famosa frase que el doctor Ian Malcolm pronuncia en la película *Parque Jurásico* (dirigida por Steven Spielberg en 1993 a partir del inquietante libro escrito por Michael Crichton tres años antes): «La vida se abre camino...».



Un café con... Michel Viso



Doctor en Biología. Miembro del Panel de Protección Planetaria del COSPAR y científico del Programa de Astrobiología del Centro Nacional de Estudios Espaciales CNES (París, Francia).

Eres un experto internacional en el campo de la protección planetaria, y ese fue el entorno en el que nos conocimos hace ya unos cuantos años. ¿Cuál es tu opinión acerca de que las restricciones en el control de contaminación biológica deberían ser relajadas, dado su muy elevado coste para las misiones? Otra de las razones que se esgrimen es que la mayoría de los microorganismos terrestres viables (o, incluso, todos ellos) contenidos en cualquier lander o rover serán inactivados a lo largo del vuelo y/o durante la exposición a los ambientes esterilizantes y de alta radiación de Marte, Europa u otros cuerpos. ¿Estás de acuerdo?

Las restricciones y procedimientos de protección planetaria son un resultado del Tratado del Espacio Exterior (de 1967): sus principios son admitidos por las naciones que lo firmaron... y por toda la comunidad internacional. Las recomendaciones prácticas son propuestas por un conjunto de científicos del Committee on Space Research (COSPAR) y van evolucionando con nuestro

conocimiento de las características de los cuerpos espaciales, así como por lo que vamos descubriendo acerca de la microbiología terrestre. Por tanto, las medidas de protección planetaria tienen que adaptarse al cuerpo visitado (planeta, satélite, asteroide, cometa, etc.), al tipo de misión y a las investigaciones planificadas. De forma muy concreta: lo primero que debes hacer en investigación espacial es asegurarte de que no contaminas el lugar que visitas, liberando microbios terrestres en su superficie o subsuperficie, si allí existe algún riesgo de que puedan llegar a replicarse.

En este ámbito de la protección planetaria, a lo largo de los años se ha ido desarrollando una serie de recomendaciones y poniendo a punto diferentes procedimientos para la reducción de la carga biológica que se lleva a bordo de los robots de exploración. En tu opinión, ¿son totalmente equivalentes en la NASA, la ESA y otras agencias espaciales?

Las recomendaciones no están tanto enfocadas hacia el procedimiento, sino a asegurar que el número final de esporas por metro cuadrado (y su cantidad total en el conjunto de la nave espacial) quede por debajo de un valor determinado. Esta medida es sólo una aproximación o *proxy* del nivel de limpieza del *lander* o *rover* en cuanto a la cantidad de microorganismos que puede contener. Se consideran sólo las esporas y no la forma vegetativa de los microbios porque se supone que estos últimos serán eliminados por la transición entre la atmósfera terrestre y el vacío del espacio profundo, así como por los diversos tipos de radiación muy energética recibidos durante el viaje espacial. Los procedimientos concretos utilizados para reducir la carga biológica son responsabilidad de cada agencia espacial. De hecho, las técnicas de limpieza y esterilización usadas son habitualmente muy parecidas porque la flora microbiana quecontamina los equipos es también, por lo general, muy similar. En la actualidad, la mayoría de las misiones son realmente cooperativas, por lo que las agencias están trabajando conjuntamente para utilizar el mismo método de reducción de carga biológica, y para evitar la recontaminación de los equipos y del conjunto del robot durante las operaciones previas al lanzamiento.

Una paradoja en el campo de la protección planetaria es que las llamadas «regiones especiales» de Marte (aquellas que contienen hielo de agua y/o tienen opciones para albergar agua líquida del substitution) no pueden ser seleccionadas como lugares de aterrizaje en misiones de exploración. ¿Es esto demasiado restrictivo y podría retrasar la detección de la vida (si es que realmente existe) en la superficie o el subsuelo del planeta rojo?

Éste es un verdadero problema, sí, que está dando auténticos dolores de cabeza a quienes planifican las misiones y a los científicos e ingenieros que

trabajan en ellas. Digamos que sí estarías autorizado a entrar en una región especial de Marte, pero sólo si eres ultralimpio y garantizas la esterilidad total de tu robot. Esto es especialmente relevante considerando la parte más superior del subsuelo del planeta, justo debajo de la superficie que vemos. El problema es cuando puedes garantizar que algunas piezas o componentes de tu *hardware* sí han alcanzado el nivel de limpieza y esterilización requerido, pero esto no es posible certificarlo para el conjunto de la nave espacial. Y sabemos que el aterrizaje podría fallar: en ese caso, si tenías previsto llegar a una zona especial, el impacto podría fundir el hielo del subsuelo y crear agua líquida transitoriamente. Entonces algunos microorganismos terrestres presentes en cualquier lugar del *lander* o *rover* estrellado encontrarían un entorno para replicarse, podrían propagarse allí, y esto sin duda perjudicaría muy seriamente cualquier intento posterior de detectar una posible vida marciana indígena.

En otros casos, podría haber misiones que no aterrizzan directamente en una región especial, pero puedan viajar horizontalmente o penetrar verticalmente dentro de los límites de una de ellas. Esto ocurriría fácilmente con un *rover* que se desplaza a lo largo de la superficie marciana, llega a una región especial y comienza a taladrar en su subsuelo con una broca (en principio ultralimpia y estéril) para tomar muestras. Éste es el verdadero desafío en la actualidad: conseguir y mantener la esterilidad de las piezas de *hardware* dada la gama de robots exploradores que navegan, y navegarán, por la superficie de Marte.

Y ese desafío es especialmente relevante en las misiones de retorno de muestras, lógicamente. Estás directamente implicado en el grupo de trabajo que propone y diseña las instalaciones europeas de recepción de las muestras que nos llegarán de Marte, donde se debe impedir la contaminación en ambos sentidos: Marte-Tierra y Tierra-Marte. ¿Qué puedes contarnos sobre la situación actual de este auténtico reto?

La NASA/ESA *Mars Sample Return Mission* está actualmente en discusión pero, en cualquier caso, de acuerdo con las recomendaciones del COSPAR se considera que las muestras marcianas que nos lleguen podrían albergar alguna forma de vida indígena del planeta rojo. Por tanto, tienen que ser consideradas potencialmente peligrosas para la biosfera de la Tierra. Esto implica un conjunto de medidas cautelares durante el viaje de vuelta desde Marte, y una cuarentena estricta tras su llegada a nuestro planeta. Pasado ese tiempo se podrá declarar, si es el caso, que «no contienen microorganismos marcianos». Durante dicha cuarentena, las muestras estarán protegidas frente a la contaminación química y microbiana terrestre, manteniéndose en un entorno cerrado y confinado. Allí se manejarán en incubadores herméticos con una

atmósfera no reactiva y provistos de guantes integrados para poder manipularlos desde fuera.

Estos entornos cerrados estarán situados en el interior de un laboratorio de alta seguridad, capaz de evitar cualquier propagación de los posibles microbios marcianos fuera de la zona de contención. Lugares como estos ya existen en casi todos los países desarrollados, y se conocen como Laboratorios de Bioseguridad nivel 4 (BSL4) o Laboratorios de Contención Máxima. En ellos se manipulan bacterias y virus letales para el ser humano, por lo que las normas de trabajo son las más estrictas que se pueden cumplir en nuestro planeta. Los trabajadores de un BSL4 como el que acogerá las muestras de Marte visten con trajes completos presurizados, para que nada de ese entorno pueda llegar a estar en contacto con su cuerpo. Además, cualquier material que salga del interior del laboratorio se esteriliza por calor o químicamente.

Dado que los europeos participamos a un nivel significativo en esta misión conjunta con Estados Unidos, sería natural disponer de una instalación de este tipo en nuestro continente. Construir al menos dos de ellas en el mundo, con capacidad plena para abordar esta investigación, es lo mínimo que se podría esperar. Esto también resulta necesario por razones de seguridad. Y, a nivel práctico, tratar de encontrar microorganismos desconocidos, que quizás podrían ser patógenos, sin duda será un esfuerzo multilaboratorio. En esas muestras buscaremos vida, ya sea activa, durmiente (por ejemplo, en forma de esporas) o fosilizada. No sabemos qué podremos encontrar, así que tenemos que ser extremadamente cuidadosos para preservar la integridad de esos fragmentos de Marte... y sobre todo para proteger la biosfera terrestre.

Esto es muy emocionante, Michel, porque recuerda los tiempos de la exploración lunar durante el proyecto Apolo... Pero pasemos al siguiente paso, que será la llegada de misiones tripuladas a Marte. En tu opinión, ¿desde que dejemos la primera huella de una bota en el regolito marciano quedarán anulados todos los esfuerzos previos para mantener al planeta rojo protegido de la contaminación microbiana y molecular terrestre? En otras palabras, ¿deberíamos tratar de encontrar vida marciana indígena antes de que nuestros primeros astronautas empiecen a trabajar allí?

Los esfuerzos actuales en protección planetaria tienen como objetivo preservar el trabajo enfocado a la posible detección de vida marciana indígena. Se está discutiendo mucho sobre las restricciones para el vuelo tripulado y el aterrizaje en el planeta rojo. Pero, pese a todas las precauciones que tomemos, algunos microbios terrestres se propagarán en el entorno marciano. Y, a su vez, los astronautas o cosmonautas estarán en contacto con

el polvo y la atmósfera marciana: si existe alguna población microbiana en Marte podrá interaccionar con las personas que salgan del módulo de descenso y den sus primeros pasos por el planeta a pesar de que, por supuesto, llevarán los mejores trajes espaciales imaginables.

Si antes de pisar el planeta rojo no tenemos información clara sobre las posibles formas de vida marciana, latentes o activas, será difícil descubrir vida auténticamente desarrollada allí... salvo que sus características básicas sean muy diferentes de las que conocemos para la vida terrestre: usamos sólo veinte aminoácidos, las moléculas que transmiten la información (DNA y RNA) poseen sólo cinco bases nitrogenadas y trabajan de forma muy específica, y tanto los aminoácidos como los azúcares son homoircales.

¿La actual política de protección planetaria está lo suficientemente madura como para garantizar el aterrizaje en Europa sin contaminar esta luna helada con vida terrestre?

Como sabes, Carlos, la protección planetaria está continuamente en revisión, para adaptarse a los nuevos conocimientos y retos. Actualmente consideramos que el desembarco de un *lander* en la superficie de Europa, sin que pueda tener ningún contacto con su océano subglacial, puede considerarse viable y satisfactorio si se aplican cuidadosamente todas las medidas y restricciones propuestas por el COSPAR. Teniendo en cuenta el nivel de radiación que recibe la superficie de esta luna, así como la temperatura real del hielo, consideramos que la supervivencia y propagación de la vida terrestre allí es muy improbable.

Pero existe una posibilidad realmente inquietante, que los científicos todavía están discutiendo: podría ocurrir que un aterrizador para Europa (o cualquier otra luna de hielo), provisto de un generador de radioisótopos (*RTG*) como fuente de energía, se estrellara incontroladamente contra la superficie. En ese caso el *RTG* seguiría liberando calor durante varias décadas, derretiría el hielo superficial e iría abriéndose un camino descendente a lo largo de toda la corteza helada... hasta llegar, antes o después, al océano subglacial. En ese caso, el riesgo de una posible contaminación con microorganismos y moléculas terrestres del agua líquida de Europa, que quizá contenga algún tipo de vida indígena, es evidente. Actualmente tenemos una base sólida para comenzar a planificar esa misión y consideramos los últimos descubrimientos con la intención de poder actualizar la política de protección planetaria y proponer medidas de precaución complementarias.

El CNES y otras instituciones europeas están animando a la comunidad científica de nuestro continente para trabajar coordinadamente, con el fin de poder competir o colaborar con Estados Unidos y China. En tu opinión, ¿qué

iniciativas europeas en exploración espacial y astrobiología son actualmente más relevantes?

Intentamos que los investigadores europeos estén más unidos, pero no para competir con los demás sino para ser más fuertes en nuestra cooperación con ellos. La estructuración de los programas de investigación en Europa hace difícil consensuar un esfuerzo conjunto a muy largo plazo. Por ejemplo, en casi veinte años de exploración de Marte la ESA envió con éxito sólo dos misiones (*Mars Express* y *ExoMars Trace Gas Orbiter*), mientras que la NASA llegó en ocho ocasiones. La Luna es un nuevo objetivo para todas las agencias espaciales, incluida la ESA, aunque lógicamente no puede ser tan prometedora como Marte para la astrobiología. En esta vuelta a nuestro satélite, la ESA está profundamente integrada en el programa de la NASA.

Más allá del planeta rojo la exploración resulta aún más difícil. Por ejemplo *JUICE*, la ambiciosa misión de la ESA al sistema joviano para explorar algunas de sus lunas heladas, es «de un solo disparo» y el continente Europa no está preparando una exploración más completa del satélite Europa. No desarrollamos al ritmo adecuado tecnologías como los *RTG* para proporcionar energía a los futuros robots. La exploración a fondo del Sistema Solar requiere un esfuerzo significativo, sostenido y duradero para el diseño y preparación de misiones: invertir más miles de millones de euros durante, al menos, una década. Además, hay que considerar que el viaje durará mucho tiempo, incluso más de los diez años que la exitosa *Rosetta* empleó en llegar al cometa 67P. Estas misiones son tan ambiciosas que, en realidad, la única manera de lograr convertirlas en una realidad será en el marco de una amplia cooperación internacional.



7. Marte



En el cuarto día de terreno laminado, las paredes de la meseta que flanqueaban el lecho plano por el que iban se curvaron y se unieron. Los rovers subieron por la hendidura hacia un llano más alto; y allí, ante ellos, en el nuevo horizonte, había una colina blanca, una gran elevación redondeada, como un Ayers Rock blanco. Una colina blanca... ¡era hielo! Una colina de hielo, de cien metros de altura y un kilómetro de ancho... y cuando la rodearon vieron que se prolongaba hacia el norte. Era la punta de un glaciar, quizá una lengua del casquete del polo. En los otros vehículos todos gritaban, y en medio del ruido y la confusión Nadia sólo pudo oír a Phyllis gritando: —¡Agua! ¡Agua!

Kim Stanley Robinson,
Marte rojo

Marte era un planeta muy prometedor para que la vida se hubiera originado allí hace unos 3900 millones de años (Ma), aproximadamente a la vez que en la Tierra. Estaba en la zona de habitabilidad en torno al Sol, un gran océano de agua líquida cubría la mayor parte de su hemisferio norte y poseía una atmósfera rica en dióxido de carbono. Además, una enorme cantidad de meteoritos y cometas habían impactado sobre su superficie durante las dos mismas épocas en que llegaron masivamente a la nuestra, enriqueciéndola con un amplio repertorio de moléculas orgánicas.

Pero el tamaño y la energía interna de Marte no eran suficientes para mantener en estado líquido su núcleo de níquel y hierro, por lo que éste acabó solidificándose. En consecuencia, hace unos 4000 Ma se había desvanecido casi por completo su campo magnético, que hasta entonces lo protegía de la radiación procedente de nuestra estrella. El viento solar arrastró su atmósfera, débilmente retenida por la gravedad de un planeta pequeño, hasta dejarla a finales del período Noético (hace 3700 Ma) en un 1% de la original. En paralelo se había ido deteniendo la tectónica de placas, con lo que la superficie marciana dejó de tener la dinámica que se requiere para mantener geológicamente vivo un planeta y así garantizar el continuo reciclaje de materiales. La actividad volcánica disminuyó radicalmente hace unos 3500 Ma, tras haber sido muy intensa en la infancia del planeta.

Sin apenas presión atmosférica, y en ausencia de ciclos hidrológicos y procesos de reciclaje, se fue evaporando parte del agua líquida que hasta entonces abundaba en la superficie de Marte. Otra fracción quedó almacenada en los casquetes de sus polos, junto al hielo de dióxido de carbono. Y el resto

del agua fue absorbida en el suelo congelado y el subsuelo del planeta. Así, hace unos 3000 Ma, en la transición entre los períodos Hespérico y Amazónico, Marte se convirtió en el desierto seco y polvoriento que hoy en día conocemos, con temperaturas medias superficiales de -55°C ... pero que quizá esconda la sorpresa que estamos esperando.

EL PLANETA ROJO

Marte es el planeta que más fascinación, temor e interés ha despertado en la humanidad. Desde tiempos inmemoriales hemos seguido sus movimientos aparentes sobre el fondo estrellado del cielo, y distintas culturas de oriente y occidente construyeron multitud de mitos relacionados con su color rojizo (hoy sabemos que debido al óxido de hierro presente en su superficie), que siempre recordaba a la sangre. Los astrónomos de Babilonia lo llamaron Nergal, como el dios sumerio-babilónico de la muerte y el inframundo, mientras que para los griegos fue Ares, hijo de Zeus y Hera, el violento y cruel dios de la guerra. Esa misma relación fue mantenida por los romanos, que lo llamaron Marte, hijo de Júpiter y Juno, aunque para ellos este dios (tan sólo superado en popularidad por su padre) también lo era de la valentía, la virilidad, la pasión y la perfección. De hecho, a él dedicaron el segundo día de la semana y el tercer mes del año, como sigue siendo patente en muchos idiomas derivados o no del latín. Dos milenios después, cuando en 1877 Asaph Hall descubrió los satélites de este planeta, serían denominados Fobos y Deimos: los hijos gemelos de Ares y Afrodita que personificaban el miedo y el terror. Astrónomos como Aristarco de Samos, Nicolás Copérnico, Tycho Brahe o Johannes Kepler realizaron contribuciones fundamentales para entender el movimiento de Marte, y con ello la geometría de nuestro sistema planetario.

Cuando en 1609 Galileo Galilei comenzó a utilizar el telescopio para observar los astros (de lo que hablaremos en los capítulos siguientes), uno de los planetas que centraron su atención fue Marte. A partir de entonces siempre estuvo en el punto de mira de muchos científicos, que fueron incrementando el conocimiento sobre este cuarto planeta del Sistema Solar. Gracias a ello, hoy conocemos muy bien sus características. Marte tiene un diámetro de 6794 km, aproximadamente la mitad que el de nuestro planeta, lo que corresponde a una superficie similar a la suma de todos los continentes de la Tierra. Sus días son algo más largos que los nuestros ya que tiene un período

de rotación de 24,6 horas, mientras que un año allí dura 687 días marcianos. Su distancia al Sol (medida como el semieje mayor de su órbita) es de 1,52 ua, un 50 % mayor que la nuestra a la estrella. La inclinación de su eje de giro respecto al plano de la eclíptica es de 25,2°, algo superior que la terrestre, por lo que tiene también estaciones y de hecho son más largas y pronunciadas que las disfrutadas aquí. Como resultado de todo ello y de su tenue atmósfera (que ejerce una presión de sólo 6 milibares), la temperatura superficial de Marte varía entre -140 °C y +25 °C, dependiendo de la latitud y la época del año. A lo largo de las próximas páginas iremos descubriendo más características astronómicas, geológicas y químicas de este fascinante planeta.

LOS CANALES DE MARTE

En paralelo al avance científico, la observación de Marte mediante telescopios llevó en ocasiones a interpretaciones erróneas de lo que parecía verse (o se deseaba ver) en su superficie, transmitiendo al público la idea de que el planeta rojo podría estar habitado. En este sentido, es conocida la historia del astrónomo, ingeniero y académico italiano Giovanni V. Schiaparelli, nacido en 1835 y que gozó de gran reconocimiento en su país. Entre otras investigaciones estudió numerosas estrellas binarias, descubrió el asteroide Hesperia y asoció algunas «lluvias de meteoritos» a la intersección de la órbita terrestre con la cola de diferentes cometas. Pero si aparece en este capítulo es porque en 1877 y 1879, mientras Marte estaba «en oposición» y podía verse totalmente iluminado por el Sol, lo observó durante varias noches al telescopio y descubrió que en su superficie había una red de estructuras longitudinales curvilíneas, que parecían conectar los dos hemisferios.

Ése era un hallazgo muy sugerente que, según se comentaba en la revista *Scientific American* en 1882, invitaba a volver a pensar en los habitantes de Marte. Como resultado de sus observaciones, Schiaparelli elaboró mapas detallados del planeta según lo veía al telescopio, poniendo nombre en latín a varias de las regiones y estructuras que detectaba (y que en muchos casos se han mantenido). En 1895 publicó en el fascículo 11 de su obra *La vita sul pianeta Marte* (que iba apareciendo por entregas en la revista *Natura ed Arte*) unas frases que han pasado a la historia: «Más que verdaderos canales, de la forma para nosotros más familiar, debemos imaginar depresiones del suelo no muy profundas, extendiéndose en dirección rectilínea durante miles de kilómetros, con un ancho de 100, 200 kilómetros o más. Ya he señalado otra

vez que, de no existir lluvia en Marte, estos canales son probablemente el principal mecanismo mediante el cual el agua (y con él la vida orgánica) puede extenderse sobre la superficie seca del planeta».

Sugerentes palabras, sin duda. El problema vino cuando este texto se tradujo al inglés y la palabra *canali*, que se refería a *channels* en el contexto geológico del que hablaba el astrónomo, se escribió incorrectamente como *canals*, sugiriendo así que eran construcciones artificiales para llevar el agua de un lugar a otro. En esa época, la capacidad de la humanidad para remodelar a gran escala el terreno de nuestro planeta era bien conocida, ya que las obras del canal de Suez se habían desarrollado entre 1859 y 1869. Otros escritos posteriores de Schiaparelli insistieron en esta idea, como al comentar sobre dichos canales que «el hecho de que estén dibujados con absoluta precisión geométrica, como si se hubieran trazado con un compás, ha conducido a algunos a pensar que son trabajo de seres inteligentes». A partir de entonces los canales artificiales se hicieron evidentes para muchos observadores de Marte, y en los mapas que fueron sucediéndose pasaron de los cien originalmente dibujados por Schiaparelli hasta cerca de quinientos. Como decía con sorna el astrónomo español Josep Comas i Solà, aquello se parecía cada vez más a una red de ferrocarriles que se iba extendiendo sobre la superficie del planeta rojo.

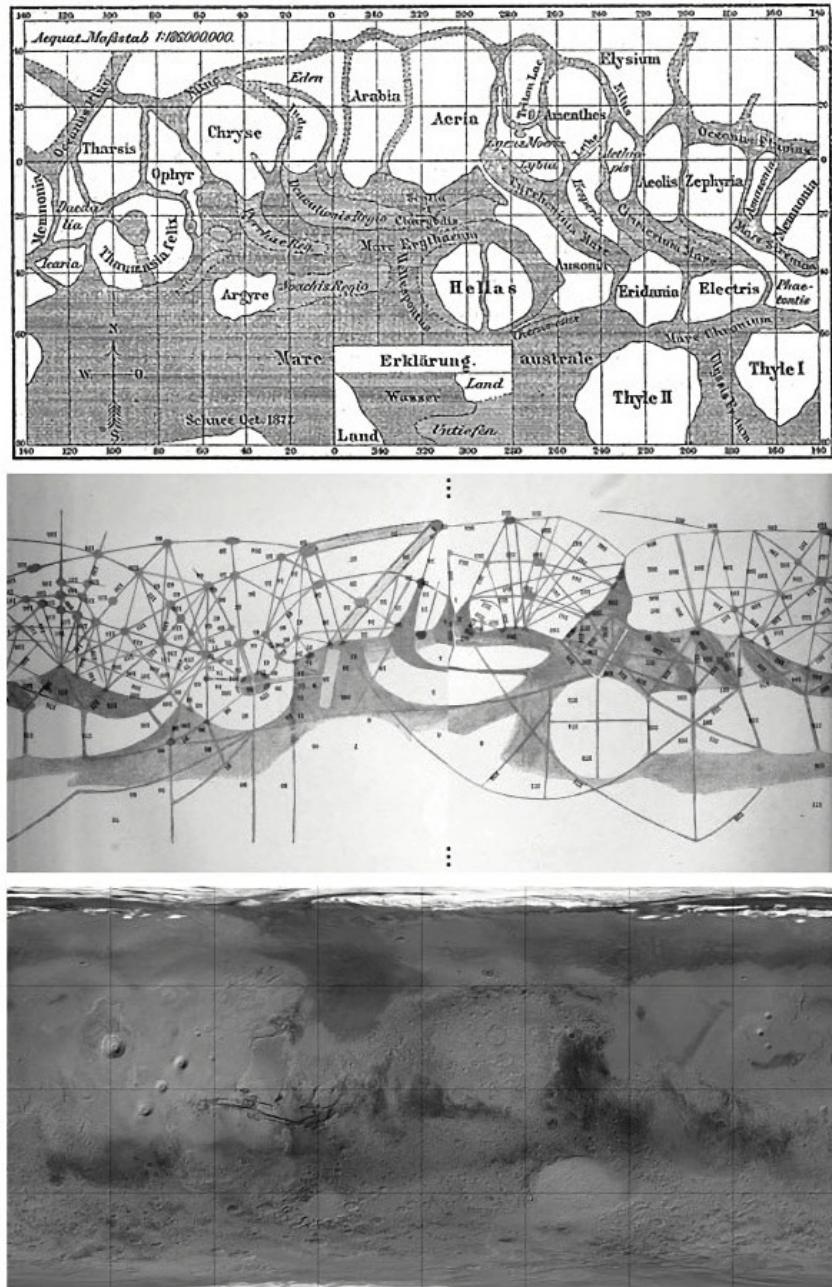
Así, a finales del siglo XIX estaba plenamente asumido que en Marte vivían seres inteligentes. De hecho, en 1891 la Academia de Ciencias Francesa convocó un concurso para premiar con cien mil francos (donados por una viuda millonaria muy interesada en estos temas) a la persona o nación que durante la década siguiente fuera capaz de comunicarse con formas de vida tecnológicas de algún cuerpo extraterrestre y obtener respuesta... pero la potentada mecenas pidió que se excluyera a Marte porque era evidente que podríamos establecer contacto con sus habitantes. No hay constancia de que nadie ganara tan sustancioso premio.

En aquel contexto, una de las personas que desde Estados Unidos más firmemente apoyó la idea de los canales construidos por algún tipo de vida racional fue el astrónomo Percival Lowell. Entre otros méritos de este inquieto y adinerado científico destaca la construcción en 1894 del observatorio que lleva su nombre en Flagstaff (Arizona), que con el tiempo resultó clave para el avance de la astronomía y desde el cual Clyde W. Tombaugh descubriría Plutón en 1930. Fascinado por los dibujos de Schiaparelli, el obsesivo Lowell dedicó varios años de su vida a analizar la superficie de Marte y dibujar la estructura de los numerosos *canals* que veía en ella. Como resultado escribió tres libros: *Marte* (publicado en 1895), *Marte y sus canales* (1906) y *Marte y la morada de la vida* (1908), este último con un título que quizá deba reutilizarse en el futuro. Gracias a ellos, entre los lectores del agitado final del siglo XIX y el comienzo del XX se terminó de

asentar la idea de que el planeta rojo estaba habitado por seres inteligentes, que disponían de tecnología suficiente para realizar grandes obras de ingeniería hidráulica con la que llevaban el agua desde las regiones polares a sus sedientas latitudes ecuatoriales.

Una propuesta tan atractiva como ésta triunfó rápidamente, y la «martemanía» que se desató fue dando lugar a todo tipo de especulaciones. Así, el prestigioso astrónomo y divulgador francés Camille Flammarion escribió que en Marte «se reúnen, como aquí, todos los elementos de la vida: agua, aire, calor, luz, vientos, nubes, llanuras, ríos, valles, montañas», y en sus obras apoyaba la existencia de marcianos inteligentes capaces de construir canales. Además, recordemos que en 1898 el novelista y escritor de ciencia ficción británico H. G. Wells había publicado *La guerra de los mundos*, primera obra en la que se plantea la invasión de la Tierra por los marcianos.

Pero, en paralelo, muchos científicos consideraban imposible que Marte estuviera habitado por seres expertos en el uso de maquinaria de obras públicas. Entre ellos se encontraba el astrónomo italiano Vincenzo Cerulli, quien desde el comienzo pensó que los canales descubiertos por su eminente paisano, incluso aunque fueran *channels*, realmente no existían en el planeta y no eran más que una ilusión óptica. De hecho, Schiaparelli había dibujado formas similares al observar Mercurio al telescopio. Por su parte, el astrónomo inglés Edward W. Maunder llegó incluso a realizar experimentos visuales con voluntarios, para demostrar que tales canales no tenían una existencia real en la superficie de Marte. Otros científicos, como el naturalista británico Alfred R. Wallace (que ya ha aparecido en este libro por ser, junto a Charles R. Darwin, el padre de la teoría de la evolución por selección natural), también se mostró contrario a que existiera vida en el planeta rojo, tal como recogió en su libro de 1907 *¿Es Marte habitable?* Con todo ello, Marte había conseguido una enorme popularidad entre la población mundial, y tanto el planeta como los misterios que lo rodeaban comenzaron a considerarse un referente de interés en distintos ámbitos de la cultura. Así, cuando entre 1914 y 1916 el músico inglés Gustav Holst compuso su sugerente suite *Los planetas*, en la que cada movimiento está dedicado a uno de los siete conocidos hasta entonces, el primero tenía un destinatario claro: Marte.



Comparación de los mapas de Marte dibujados por Schiaparelli y Lowell con la topografía real del planeta. El de Schiaparelli, de 1877, fue publicado en 1888 en la enciclopedia alemana *Meyers Konversations-Lexikon*. El de Lowell (en una edición de 1896 de su libro *Marte*) se publicó con el norte en su parte inferior, por lo que ha sido invertido por el autor y reconfigurado (uniendo sus dos partes por la línea indicada con trazos punteados) para facilitar la comparación con los paneles superior e inferior. La topografía de Marte se generó a partir de los datos obtenidos por las cámaras de los orbitadores *Viking* (que operaron entre 1976 y 1980) y por el instrumento *Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA)* del *Mars Global Surveyor* (entre 1999 y 2006). Valles Marineris se observa en el mapa de Schiaparelli como el canal curvo que aparece al sur de la región denominada Ophyr; en el de Lowell corresponde al número 43 y es claramente reconocible en la topografía real del planeta. Figura elaborada por el autor a partir de imágenes disponibles en Wikimedia Commons.

El final definitivo del mito de los canales (lo que algunos han llamado «la deslowellización de Marte») llegaría medio siglo más tarde, gracias al desarrollo de la ciencia y la tecnología. Así, cuando la sonda de la NASA

Mariner 4 envió las primeras 21 imágenes del planeta el 14 de julio de 1965, las *Mariner 6* y *Mariner 7* tomaron otras 75 y 126, respectivamente, y el orbitador *Mariner 9* logró fotografiar casi toda su superficie y realizar los primeros mapas a partir de 1971... allí no aparecía ningún canal, natural ni artificial, que conectara ambos hemisferios. Sí había similitudes a nivel global entre lo dibujado por Schiaparelli o Lowell y la topografía real del planeta, pero ésta no mostraba señales de la desenfrenada actividad de los ingenieros marcianos. Lo que se veía, con un nivel de detalle que iría aumentando gracias a las misiones sucesivas, era un paisaje desértico con impresionantes formaciones volcánicas (entre ellas el Olympus Mons, que con sus 22 km de altura es la mayor montaña del Sistema Solar) y salpicado por multitud de cráteres de impacto de diferentes tamaños. De cerca, Marte se parecía más a la Luna que a la Tierra. Esa sensación de lugar inhóspito y desolado, sin ningún atisbo de vida, se difundió rápidamente entre quienes habían albergado la esperanza de encontrarse con otro planeta habitable, al cual pudiéramos viajar sin problema. No es casual que David Bowie, en diciembre de 1971, titulara *Life on Mars?* una de sus canciones más enigmáticas. Ni que Elton John, cuando en abril de 1972 lanzó el tema *Rocket Man (I Think It's Going to Be a Long, Long Time)*, definiera el planeta rojo mediante un imaginativo juego de palabras: «Marte no es el mejor lugar / para criar a tus hijos / realmente es frío como el infierno».

Volviendo a la topografía de Marte, además de volcanes y cráteres de impacto en las imágenes de su superficie sólo aparecía una estructura longitudinal evidente, como una inmensa arruga en la cansada piel del planeta: el sistema de cañones de Valles Marineris, nombrado en honor a su descubridor, *Mariner 9*. Situado al este de la región de Tharsis, con sus 4500 km de longitud (diez veces más que el Gran Cañón del Colorado) y hasta 200 km de anchura, recorre de oeste a este casi un cuarto del perímetro ecuatorial de Marte. Curiosamente, Schiaparelli y Lowell lo habían dibujado como uno de los canales más pequeños, sin darle una importancia especial. Este gigantesco accidente geográfico, que llega a tener 11 km de profundidad en algunas zonas, probablemente se originó como una gran fractura producida por la separación de dos placas tectónicas (similar a lo que ocurre con el Valle del Rift en nuestro planeta) en una época en la que Marte aún era geológicamente activo. Posteriormente, se fue esculpiendo durante millones de años por la acción erosiva de grandes volúmenes de agua que descendía desde las tierras altas del hemisferio sur a las más bajas y planas del norte (una topografía global que Schiaparelli y Lowell habían intuido al revés, con los mares en los terrenos supuestamente más bajos del sur). Esta enorme grieta en el planeta rojo, probablemente el paisaje de mayor belleza de todo el Sistema Solar, es más sugerente que todos los canales, presas, autopistas o aeropuertos que hayan podido imaginarse allí desde finales del siglo XIX.

De hecho, el inesperado colofón de esta historia llegó en 2003, cuando dos investigadores clínicos determinaron que, al menos en el caso de Lowell, lo que estaba viendo en realidad al observar Marte (y, con formas muy similares, también en Venus y Mercurio) no eran estructuras que existieran en su superficie. Por el contrario, como utilizaba una abertura muy cerrada en el telescopio para minimizar las turbulencias introducidas por nuestra atmósfera, al llegarle la luz del planeta lo estaba haciendo funcionar como el oftalmoscopio que utilizan los oculistas... y lo que veía proyectado era el patrón de las venas de su propia retina. Sorprendente hallazgo. En esta ocasión no podemos decir que la realidad supere a la ficción, pero sí que consigue explicar su insólito origen.

MARCIANOS DE FICCIÓN

En cualquier caso, desde que se popularizaron aquellos imaginativos mapas de Marte la poderosa idea de los canales artificiales y los habitantes inteligentes del planeta rojo siguió asentándose a lo largo del siglo xx: la humanidad necesitaba no sentirse sola en el Universo... y además buena parte de ella tenía poco espíritu crítico, por lo que resultaba fácilmente manipulable. Lógicamente, si existían los marcianos podrían visitarnos. De hecho, seguro que lo harían porque habían demostrado tener más desarrollo tecnológico que nosotros. Vendrían en sus naves, con forma de platillo volante o de nube lenticular al atardecer, para abducirnos uno a uno... o para conquistar toda la Tierra. Y los visitantes podrían llegar también desde otros puntos del Universo, porque si había vida inteligente en un planeta tan cercano como Marte seguro que existían millones de lugares habitados en la inmensidad del Cosmos. Y algo aún más inquietante: quizás también estuvieran agazapados en la cara oculta de la Luna, a sólo tres días de nosotros incluso si sus naves eran tan rudimentarias como las nuestras. Los ingredientes para el desarrollo del fenómeno ovni estaban servidos, y sus incansables partidarios fueron creciendo hasta llegar a un máximo que coincidió con el apogeo de la carrera espacial, en las décadas de 1960 y 1970. Actualmente, a pesar de todo lo que hemos aprendido gracias a la ciencia y la tecnología, siguen existiendo nostálgicos que imaginan una nave espacial alienígena en cuanto tienen ocasión, como también veremos en el último capítulo de este libro.

Una cuestión interesante y no suficientemente explicada por los ufólogos es que los visitantes del espacio casi siempre eran (y siguen siendo) antropomórficos: hombrecillos verdes o de otros colores, parecidos a nosotros... aunque por lo general más feos. Esta sorprendente similitud entre su fenotipo y el nuestro estaría indicando que la evolución en su planeta, generalmente Marte, se originó y ha funcionado exactamente igual que en la Tierra durante los últimos 3800 Ma, pasando por las mismas etapas y respondiendo de forma idéntica a los innumerables eventos de azar que han condicionado la aparición de nuestra especie. Por ejemplo, en su lugar de origen también se habría tenido que producir algo parecido a la Explosión Cámbrica, que marcó la transición a la simetría bilateral de la mayor parte de los animales actuales, y esos seres habrían evolucionado en un entorno físico-químico muy parecido al que tenemos en la Tierra si sus sentidos funcionan de forma muy similar a los nuestros. Pero hay algo aún más truculento: en algunos casos de supuestas abducciones se ha llegado a afirmar que el marciano de turno (un macho alfa dominante) ha fecundado a una humana... lo que estaría indicando que en realidad somos de la misma especie o de una muy cercana. Mejor no seguir por ahí.

Lo curioso es que, cuando se quiere creer irracionalmente en algo, las pruebas científicas que van en contra de ello se tergiversan o malinterpretan para reforzar esa idea preconcebida. Los movimientos antivacunas o quienes defienden la nunca probada efectividad de la homeopatía son muestras actuales de esta actitud anticientífica. En el caso de Marte, un ejemplo bien conocido surgió con una de las fotografías que tomó el orbitador de la misión *Viking 1* el 25 de julio de 1976, en concreto la imagen número 72 de su órbita 35. La obtuvo mientras sobrevolaba a 1873 km de altura la región de Cydonia Mensae, en la zona de Acidalia Planitia más cercana a los terrenos elevados de Arabia Terra, a 41° de latitud norte. Debido a la baja resolución de la imagen y al ángulo de incidencia de la luz en ese momento, con el Sol a sólo 20° sobre el horizonte, una pequeña meseta de 3 km de largo y 1,5 km de ancho tenía un relieve que parecía corresponder a una cara humana mirando fijamente al espectador. Para quienes en esa época aún seguían creyendo en la existencia de vida inteligente en Marte, estaba claro: *ellos* habían esculpido ese gran rostro como muestra de su poder y para advertirnos de su presencia.

Aquél era un ejemplo claro de pareidolia, la tendencia de nuestro cerebro a reconocer en cualquier tipo de formas (aparezcan en una roca, en el tronco de un árbol o en las manchas de humedad de una baldosa) los patrones que nos resultan más familiares, especialmente las caras humanas o las formas de animales. De hecho, cuando décadas más tarde los orbitadores *Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey* y *Mars Express* volvieron a fotografiar esa meseta con mucha mejor resolución y bajo diferentes iluminaciones, se pudieron analizar las estructuras geológicas presentes en su superficie... que en

absoluto recuerda a un rostro humano o de cualquier otro ser vivo. Pero, para los acérrimos defensores de aquella cara marciana, se trataba de una conspiración de las agencias espaciales: la habían borrado de las fotografías para que ellos dejaran de ganar dinero con las publicaciones y charlas en las que la seguían mostrando. Posteriormente, la pareidolia ha seguido dando grandes alegrías a quienes escrutan imágenes de la superficie de Marte en busca de los hallazgos más extraños que uno llegue a imaginar. En internet se puede encontrar, por ejemplo, una roca fotografiada por *Curiosity* en 2014 que para algunos es claramente un fémur de vaca, otras que parecen champiñones, o las recientes explicaciones de un profesor emérito de entomología de Ohio que cree ver abejas fosilizadas en las sombras que se forman en ciertas piedras y marcas del terreno. Recordemos lo que escribió Francisco de Goya como explicación de uno de sus *Caprichos*: «La fantasía abandonada de la razón produce monstruos imposibles: unida con ella es madre de las artes y origen de las maravillas».

En cualquier caso, la presencia de vida más o menos inteligente en Marte también resultaba (y resulta) muy atractiva para quienes realmente no creen (o no del todo) en los hombrecillos verdes, pero están deseosos de pasar un buen rato leyendo novelas de aventuras que se desarrollan en los exóticos entornos proporcionados por el planeta rojo, realizar vuelos interplanetarios con la imaginación, o reflexionar sobre nuestro posible futuro allí.

El origen de los relatos de ficción relacionados con el Cosmos es muy antiguo y su primer destino fue, lógicamente, la Luna. Así, ya en el siglo II de nuestra era, *La Historia verdadera*, escrita en griego por el autor sirio Luciano de Samósata, nos mostraba un viaje imaginario y satírico hasta nuestro satélite y más allá (incluyendo guerras interplanetarias) por lo que para algunos habría inaugurado el género de la ciencia ficción. Quince siglos después, en 1608 Johannes Kepler escribió la novela *Somnium*, en la que el astrónomo y matemático alemán fantaseaba con un viaje a la Luna durante un eclipse de Sol. Para Isaac Asimov y Carl Sagan, ésta debería considerarse la primera obra genuinamente de ficción científica.

Treinta años más tarde, debemos al clérigo y naturalista inglés John Wilkins la obra *El descubrimiento de un mundo en la Luna*: en ella, este polifacético autor planteaba viajar a nuestro satélite (respirando «el aire puro de los ángeles» durante el trayecto) para visitar a sus habitantes y comerciar con las sociedades que ellos habían formado allí. El dramaturgo y poeta francés Cyrano de Bergerac publicó su *Historia cómica de los estados e imperios de la Luna* en 1657, seguida por la equivalente del Sol en 1662: dos obras en las que se mostraba convencido de la existencia de vida fuera de la Tierra. Según veremos en el capítulo dedicado a los planetas extrasolares, casi un siglo después el mismísimo Voltaire escribió una curiosa obra en la que se sirve de un viaje interestelar para mostrar algunas de sus ideas filosóficas. Y,

en 1865, los lectores volaron *De la Tierra a la Luna* gracias a otro autor francés, Julio Verne.

Los viajes a Marte comenzaron en la literatura más tarde, pero durante casi un siglo y medio han dado lugar a bastantes novelas inolvidables... además de otras que no merece la pena recordar. Podemos recomendar un puñado de obras que muchos lectores sin duda conocen: *Across the Zodiac: The story of a wrecked record* (Percy Greg, 1880, la primera obra de ciencia ficción conocida que transcurre en Marte), *Unveiling a parallel: A romance* (Alice Ilgenfritz Jones y Ella Merchant, 1893), la ya comentada *La guerra de los mundos* (H. G. Wells, 1898), *La conquista de Marte por Edison* (Garrett P. Serviss, 1898), *El prisionero del planeta Marte* (Gustave Le Rouge, 1908), *Una princesa de Marte* (Edgar Rice Burroughs, 1912), *Aelita* (Alexéi Tolstoi, 1923), *Crónicas marcianas* (Ray Bradbury, 1949, con prólogo de Jorge Luis Borges en la edición en español), *Las arenas de Marte* (Arthur C. Clarke, 1951), *A lo marciano* (Isaac Asimov, 1951), *Tiempo de Marte* (Philip K. Dick, 1964), *Homo Plus* (Frederik Pohl, 1976), *Camino desolación* (Ian McDonald, 1988), *Marte* (Ben Bova, 1992), la magnífica trilogía *Marte rojo, Marte verde y Marte azul* (Kim Stanley Robinson, 1992-1996), *Marte se mueve* (Greg Bear, 1993), *A través de Marte* (Geoffrey A. Landis, 2002), *Marcianos, Go Home* (Frederic Brown, 2003), *Ares Express* (Ian McDonald, 2010), *El marciano* (Andy Weir, 2012) o *Desierto rojo. Punto sin retorno* (Rita Carla Francesca Monticelli, 2012). En paralelo, desde 1926 (con la entonces popular y ahora mítica *Amazing Stories*, fundada por Hugo Gernsback) fueron apareciendo colecciones de revistas y cómics de ciencia ficción que durante décadas han tenido a Marte como principal diana para los lapiceros de sus dibujantes. Y, lógicamente, desde hace años el planeta rojo es el escenario ideal para gran número de videojuegos.



Breve selección de cinco libros y tres películas de ciencia ficción ambientados en Marte, o protagonizados por marcianos que vienen a visitarnos. © Album.

Varias de las novelas que citábamos se han llevado al cine y a la pequeña pantalla con más o menos acierto, aunque también hay muchas películas relacionadas con Marte que no se basan en libros previamente publicados. Entre estas últimas mencionaremos sólo cuatro, que resultan especialmente interesantes por distintos motivos: *Capricornio 1* (dirigida por Peter Hyams en 1977), *Mars Attacks!* (Tim Burton, 1996), *Planeta rojo* (Antony Hoffman, 2000) o *Misión a Marte* (Brian De Palma, 2000). Aparecerá alguna más en el último capítulo de este libro. En cualquier caso, quien desee profundizar en este sugerente tema puede consultar los centenares de estudios, monografías, guías y páginas web que se ocupan expresamente de analizar las películas y series inspiradas en Marte, las que transcurren en el planeta o las que nos traen marcianos al nuestro. Además, hay otras muchas películas en las que aparecen extraterrestres sin un punto de origen conocido, aunque lo más probable es que hayan llegado desde Marte dada la irrefrenable tendencia de sus habitantes a invadirnos.

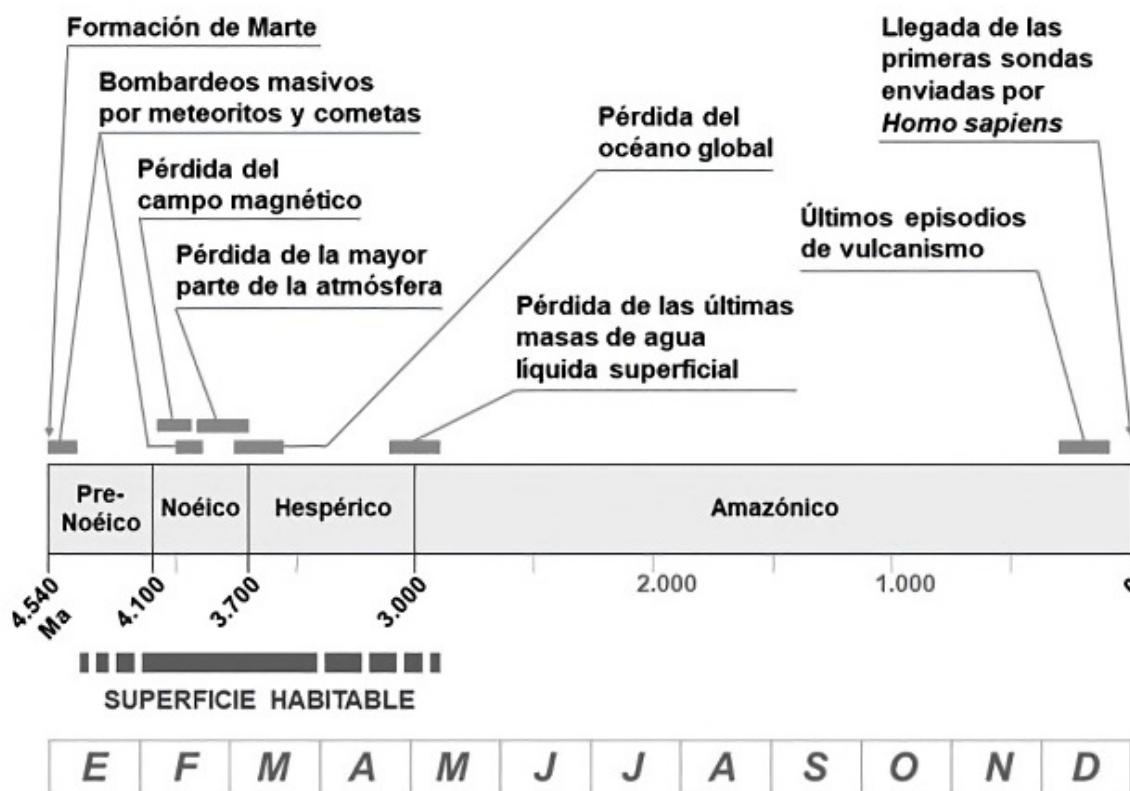
¿VIDA EN MARTE?

Desde el punto de vista científico no merece la pena creer en las imaginativas historias de ficción, con marcianos yendo y viniendo de su planeta al nuestro, pero tampoco hemos de dejarnos llevar por la estéril apariencia actual de la superficie desértica de Marte. El conocimiento acumulado durante el último medio siglo nos dice que el agua líquida fue muy abundante en su pasado remoto: caía en forma de lluvia y nieve desde las nubes, formaba glaciares, ríos, grandes cuencas, cañones impresionantes, cataratas, lagos, un enorme océano, islas, costas escarpadas, playas a las que llegaban las olas. El planeta rojo fue azul, como el nuestro. El agua influyó decisivamente en la estructura y composición del sustrato geológico de Marte, según nos indican las rocas sedimentarias y los minerales hidratados analizados en su superficie por distintas misiones. Y en lo que hoy nos parece un terreno hostil probablemente una gran cantidad de reacciones químicas exploraban caminos hacia la bioquímica, aprovechando los diferentes entornos proporcionados por aquel medio acuoso. En esa misma época, hace unos 3800 Ma, la vida estaba surgiendo en un contexto geoquímico similar y también protagonizado por el agua líquida, en el planeta que se había formado en la siguiente órbita estable más cercana al Sol: la Tierra.

Por tanto, nada impide que la biología se originara simultáneamente en Marte y la Tierra. Si Marte fue un planeta vivo en el pasado («y oh, qué gran *si*», como escribió Darwin al reflexionar acerca de la aparición de los seres vivos aquí), lo que sabemos sobre la robustez de la vida como un fenómeno global en la Tierra nos indicaría que debe haberse mantenido allí. Si hubo biología, seguramente todavía la hay: el reto es ser capaces de encontrarla. Probablemente no existirá en su desértica superficie, que es muy seca, muy fría, rica en compuestos oxidantes y está azotada sin descanso por altas dosis de radiación ultravioleta e ionizante procedente del Sol. Los datos experimentales disponibles indican que, debido a la combinación de estos factores, el suelo marciano es estéril en los primeros centímetros bajo la superficie, o incluso hasta 1,5 m de profundidad según algunos modelos.

Pero recordemos una frase de *El Principito*, la deliciosa novela de Antoine de Saint-Exupéry que todos hemos leído: «Lo que embellece al desierto es que esconde un pozo en alguna parte». Esto es aplicable al Marte actual: como comentaremos más adelante, bajo su desértica piel se ha detectado agua líquida, y también hay mucho hielo de agua en ciertas zonas del suelo que, cuando la temperatura del verano lo permite, puede incluso fluir hasta las superficies mejor orientadas al Sol. Además, la protección frente a la radiación está garantizada en el subsuelo, así como en el interior de los múltiples tubos volcánicos y cuevas que existen bajo la superficie del

planeta: fascinantes lugares que ya se detectaron por los orbitadores de las *Viking*, y algunos de los cuales han podido comenzar a estudiarse por otras misiones en órbita de Marte. Por lo tanto, diferentes ambientes ofrecen hoy en día condiciones de habitabilidad para una posible vida microbiana en el planeta rojo, como iremos viendo a lo largo de este capítulo. Es decir, todo indica que Marte fue (y tal vez es) habitable, por lo que la pregunta más relevante es si allí hubo (o hay) vida.



Representación simplificada de la historia geológica de Marte, de forma equivalente al esquema mostrado para la Tierra en el capítulo 3. Se indican los correspondientes períodos y los principales procesos que contribuyeron a la pérdida de su habitabilidad. Haciendo la equivalencia a un año, como en el caso de la Tierra, consideramos que la superficie del planeta fue habitable desde finales de enero hasta principios de mayo. La intervención humana en Marte comenzó con la llegada de las primeras sondas a su superficie, a finales de 1971. Figura elaborada por el autor.

La respuesta corta es: no lo sabemos. Cuando se culmine la fase actual, principalmente centrada en la caracterización geológica y la localización de agua (pues el «mantra» más repetido por la NASA y otras agencias espaciales ha sido «*follow the water*»), la generación de misiones que ya se están diseñando para continuar la investigación a partir de 2022 debería tener entre sus objetivos la búsqueda de evidencias de vida (actual o extinta) en el planeta rojo. De hecho, muchos consideramos que tras haber enviado un buen número de «geólogos robóticos» a Marte, es hora de mandar un «rover biólogo», que tenga entre sus instrumentos al menos un biosensor capaz de analizar en la

superficie del planeta (y, sobre todo, en su subsuelo) la presencia de biomarcadores moleculares. Con él, además, se podría investigar el posible origen biológico de las fluctuaciones de metano (CH_4) detectadas en la atmósfera marciana, que comentaremos más adelante. De esta forma se continuaría la búsqueda de vida que quedó interrumpida tras los resultados de las misiones *Viking*: las primeras que analizaron la posible existencia de seres vivos en Marte, hace ya cinco décadas... y sorprendentemente las últimas en intentarlo hasta el momento.

LAS SONDAS *VIKING* Y SUS CONTROVERTIDOS RESULTADOS

El 10 de octubre de 2019 se publicó en la revista divulgativa *Scientific American* un artículo que para muchos lectores pudo resultar sorprendente, pues su título era tan directo como provocativo: «Estoy convencido de que encontramos evidencia de vida en Marte en la década de 1970». Iba firmado nada menos que por Gilbert V. Levin, un ingeniero e inventor ya jubilado, pero que en su día fue el investigador principal de uno de los tres instrumentos científicos a bordo de las sondas gemelas *Viking 1* y *Viking 2* de la NASA, que llegaron al planeta rojo en 1976.

Pero, antes de centrarnos en esos dos vikingos que alcanzaron la costa de Marte, merece la pena recordar cómo empezó la carrera entre la URSS y Estados Unidos por conquistar el planeta. Las primeras misiones que tenían intención de orbitar Marte fueron las soviéticas *Mars 1960A* y *Mars 1960B*, lanzadas en el año que indica su nombre, aunque no llegaron a ponerse en órbita terrestre con éxito. Durante la década y media siguiente se lanzaron más de veinte sondas por las agencias soviética y norteamericana (que se sumó a la carrera espacial en 1964), de las cuales sólo seis lograron llegar: las misiones de sobrevuelo o *flyby* de la NASA *Mariner 4* (con cuya cámara en blanco y negro se obtuvieron las primeras imágenes, como hemos comentado), *Mariner 6* y *Mariner 7*, así como los orbitadores *Mariner 9* (el primer artefacto humano que se puso en órbita estable de otro planeta, el 13 de noviembre de 1971) y pocos días después los soviéticos *Mars 2* (que además de orbitar Marte incluía un módulo de descenso, estrellado contra la superficie) y *Mars 3* (gemela de la anterior). El aterrizador de esta última misión tiene el honor de haber sido el primer objeto en posarse suavemente sobre la deseada piel de Marte, concretamente en la región de Terra Sirenum. Desde allí mandó una fotografía y valiosos datos científicos durante los

escasos 20 segundos que estuvo activo, aquel histórico 2 de diciembre de 1971 en el que una bandera con la hoz y el martillo llegaba al planeta rojo.

Tras ir aprendiendo de los éxitos y de los fracasos cosechados durante ese tiempo, las *Viking 1* y *Viking 2* (con una masa de 3527 kg cada una y lanzadas desde Cabo Cañaveral el 20 de agosto y 9 de septiembre de 1975) supusieron una auténtica proeza tecnológica: sólo siete años después del alunizaje de la primera misión tripulada se lograba llevar con éxito hasta la superficie de Marte dos módulos aterrizadores de 572 kg dotados de instrumentación científica. Este programa fue el resultado de la decidida apuesta de Estados Unidos por vencer a la URSS en la carrera espacial, como se desprende del párrafo anterior, aunque el presupuesto dedicado a ello (unos 3500 millones de dólares de aquellos años, que calculando la inflación habría que multiplicar por seis para obtener valores actuales) era siete veces menor que el del programa Apolo con el que se llevó a los humanos a nuestro satélite (aproximadamente 25 500 millones de dólares de la época, invertidos entre 1961 y 1972, de los que 6000 millones correspondieron únicamente al *Apolo 11*). Además, la llegada a Marte se producía en un momento de gran excitación sobre la posible existencia de vida extraterrestre, como comentábamos, por lo que ambos vikingos se dedicaron casi en exclusiva a buscarla. Los orbitadores de las *Viking*, herederos de la *Mariner 9*, llevaban cámaras con las que en total tomaron más de 50 000 imágenes de alta resolución de la superficie del planeta, espectrómetros infrarrojos para analizar las trazas de vapor de agua de la atmósfera marciana y radiómetros infrarrojos para el mapeado térmico superficial. Además, iban equipados con las antenas que garantizaban la comunicación con la Red de Espacio Profundo («Deep Space Network», DSN) de la NASA, de la que ya hemos hablado.

Una vez separado de su orbitador correspondiente, cada *lander* entró en la muy tenue atmósfera del planeta a unos 16 000 km/h, comenzando a frenarse (y a la vez protegiéndose del calentamiento producido por el rozamiento contra ella) mediante un escudo térmico. Éste se desprendió cuando estaba a 6 km de altura, y a partir de dicho punto el módulo descendió con un gran paracaídas hasta situarse a 1,2 km sobre el suelo. Entonces comenzó la tercera fase de esta trepidante (nunca mejor dicho) maniobra de frenado, mediante la activación de retrocohetes que permitieron reducir su velocidad hasta sólo 10 km/h. Gracias a ello, en una secuencia perfecta que en total duró apenas 7 minutos, el *lander* se depositó suavemente, con las patas extendidas, sobre regolito marciano. Un enorme logro tecnológico, realizado de forma automática y a una distancia de 342 millones de kilómetros de nosotros cuando el *lander* de la *Viking 1* amartizó el 20 de julio de 1976. Desde allí, la señal de radio que nos trajo la buena nueva tardó 19 minutos en llegar hasta los operadores de la DSN que la esperaban ansiosos, parte de ellos a pocos kilómetros de Madrid.

Ambos módulos aterrizadores llevaban como carga útil o «carga de pago» cámaras (que en total enviaron unas 1400 imágenes), una pequeña estación meteorológica con varios sensores, un brazo robótico para tomar muestras del suelo y tres instrumentos científicos en una especie de laboratorio biológico en miniatura. El diseñado y construido por Gilbert V. Levin y su equipo se llamaba *Labeled Release* (*LR*), que podemos traducir como emisión o liberación marcada. Su fundamento era sencillo, y de hecho conceptualmente estaba basado en los experimentos realizados por Louis Pasteur a partir de 1859 para refutar la generación espontánea de la vida: a la porción de suelo marciano proporcionada por el brazo robótico se le añadían varios compuestos biológicos en disolución (entre ellos algunos aminoácidos y ácido fórmico) que contenían carbono marcado radiactivamente (^{14}C o carbono-14), y se medía si tras siete días de incubación podía detectarse la producción de dióxido de carbono (CO_2) radiactivo. Ello indicaría la existencia de actividades metabólicas en dicho regolito: algún tipo de vida que consumía los nutrientes proporcionados y generaba el gas marcado como producto de deshecho.

Pues bien, el 30 de julio de 1976, sólo 10 soles (se llaman así los días marcianos, que como dijimos son de 24,6 horas) después del amartizaje del *Viking Lander 1* en la llanura Chryse Planitia (a $22,3^\circ$ al norte del ecuador, en el delta formado por lo que sería la desembocadura de Valles Marineris), se recibieron los primeros resultados del instrumento *LR*. Y eran positivos. También lo fueron al repetirse los ensayos con otras muestras durante los días siguientes. Lógicamente, el instrumento realizó una serie de controles en Marte (entre ellos, incubando muestras previamente esterilizadas por calentamiento a $160\text{ }^\circ\text{C}$ durante tres horas), y tanto antes como en paralelo se llevaron a cabo miles de experimentos de control en distintos entornos de la Tierra: nunca se produjeron falsos positivos ni falsos negativos. Para mayor alegría de los miembros del equipo científico, también se obtuvieron resultados positivos con las muestras del suelo analizadas por el instrumento *LR* que había viajado poco después a bordo del *Viking Lander 2*. Éste había amartizado en Utopia Planitia (una región con nombre realmente sugerente para buscar vida en ella), a una latitud de $47,6^\circ$ N y a unos 6000 km de distancia de su aterrizador gemelo. Por tanto, «algo» había en el suelo de Marte, en dos zonas muy alejadas entre sí y con distinta geoquímica, que consumía los nutrientes proporcionados y producía CO_2 a partir de ellos. La hipótesis de Levin y de sus colaboradores (manifestada entonces, retomada a partir de 1997 y vuelta a poner sobre la mesa en 2019) es clara: se trata de microorganismos heterótrofos que metabolizan materia orgánica bajo la superficie del planeta rojo. Es decir, según estos investigadores hay vida en Marte... y fue encontrada la primera vez que se buscó, en 1976.

Sin embargo, ni la NASA ni el conjunto de la comunidad científica ha apoyado nunca estos resultados. ¿Por qué no lo han hecho, si podrían suponer el descubrimiento más relevante de la historia de la humanidad? Quizá por eso, por la relevancia que tendría decir que hace casi medio siglo que encontramos vida en Marte. Precisamente Carl Sagan, uno de los mayores impulsores del proyecto Viking, había popularizado una advertencia realizada dos siglos antes por el filósofo David Hume y también por el físico y matemático Pierre-Simon Laplace: «Las afirmaciones extraordinarias requieren evidencias extraordinarias». En el caso que nos ocupa, aunque los resultados del *LR* fueron positivos, los obtenidos por los otros dos instrumentos biológicos que incluían los aterrizadores de las *Viking* (y que también buscaban señales de metabolismo en la superficie del planeta) fueron negativos.

El segundo de dichos instrumentos que llevaban los laboratorios de ambos *landers* era el *Pyrolytic Release (PR)* o de liberación pirolítica. De forma simplificada, la pirolisis es la rotura o degradación de la materia orgánica al calentarla controladamente en ausencia de oxígeno, lo que permite identificar después los pequeños compuestos generados. Pues bien, el experimento consistía en tomar una muestra del suelo marciano (y en paralelo otra de control, que se esterilizaba como hemos indicado para el *LR*), iluminarla durante 5 días con luz artificial visible (evitando el ultravioleta), y añadir los gases CO₂ y CO marcados radiactivamente con ¹⁴C. Durante una incubación en esas condiciones, si en la muestra había algún microorganismo fotosintético (o, en general, autótrofo) fijaría el CO₂ marcado y produciría materia orgánica radiactiva, que podría ser identificada tras ser descompuesta por pirolisis. Pero los resultados obtenidos con la muestra nativa y el control esterilizado fueron iguales, por lo que se concluyó que no existía actividad fotosintética (ni quimioautotrófica, diríamos actualmente) en el suelo de Marte.

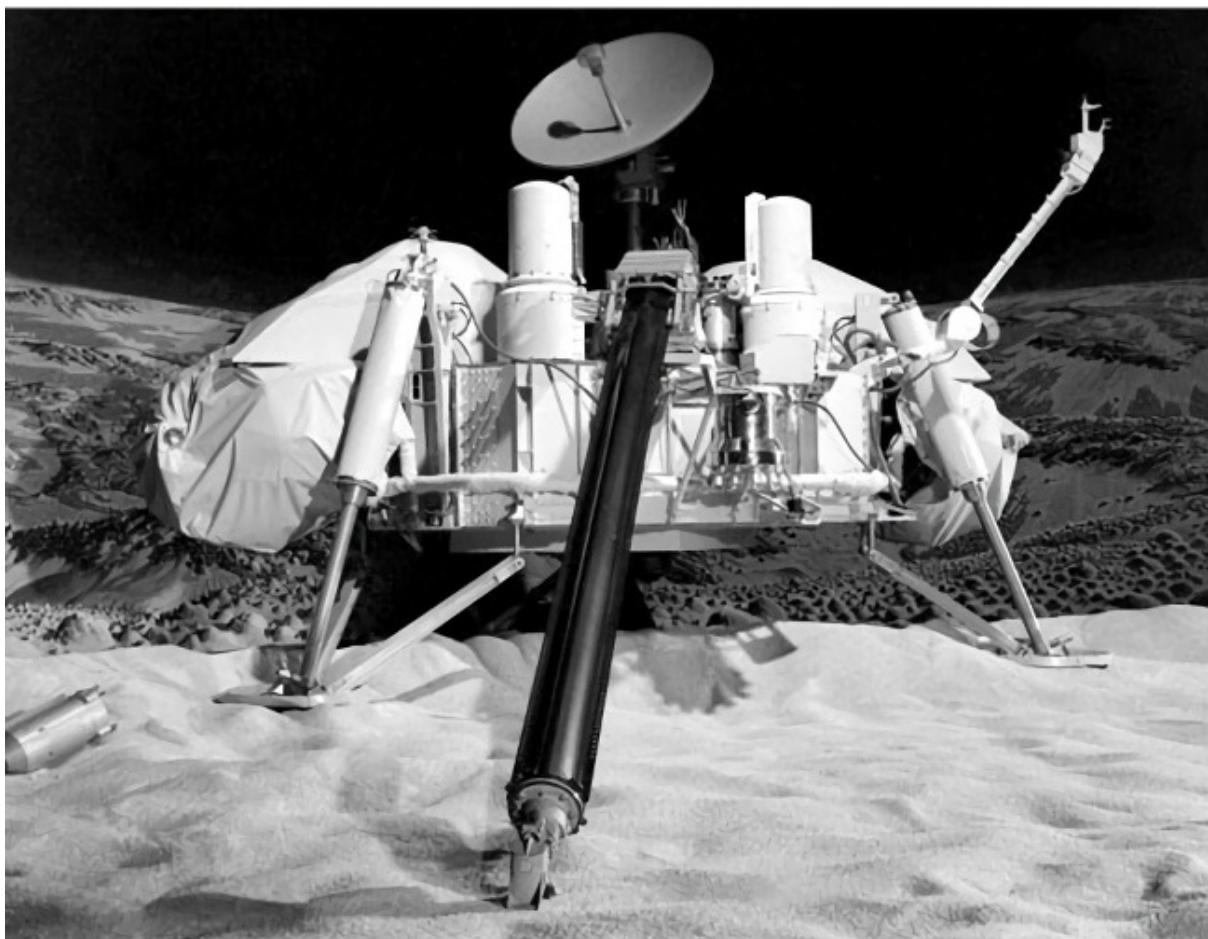
El tercer instrumento biológico de los *Viking Landers 1* y *2* era el *Gas Exchange Experiment (GEX)*. Funcionaba introduciendo una muestra del regolito marciano (y, en paralelo, un control esterilizado) en un pequeño recipiente que contenía una mezcla de gases controlada, aportando nutrientes y estudiando el intercambio de moléculas gaseosas que se pudiera producir entre la muestra y esa «atmósfera». Se analizaba específicamente la posible emisión de CO₂, metano o nitrógeno molecular (N₂), que podrían ser indicativos de la presencia de actividades metabólicas. Como en el caso del *PR*, no hubo resultados positivos en ninguna de las muestras ensayadas. Adicionalmente a estos tres experimentos que buscaban actividades biológicas ligadas a microorganismos, ambos aterrizadores contaban con un cromatógrafo de gases acoplado a espectrómetro de masas (*GC/MS*) con el

que se analizó la posible presencia de moléculas orgánicas directamente en el suelo marciano: todas las muestras estudiadas dieron resultados negativos.

Por tanto, dada la ausencia de señales positivas en tres de estos cuatro instrumentos, oficialmente se asumió que los resultados del *LR* suponían un falso positivo: la producción de CO₂ marcado se debería a algún proceso meramente químico que estuviera operando en la muestra marciana durante el período de incubación. Por tanto, para la NASA no había pruebas o evidencias suficientes que apoyaran algo tan extraordinario como la detección de vida en Marte.

No obstante, como Gilbert V. Levin y sus colaboradores han subrayado, varias de las misiones que han llegado al planeta rojo después de las *Viking*, con instrumentos más sensibles para detectar moléculas orgánicas en la superficie del planeta (entre ellas, como veremos, *Curiosity*), sí las han encontrado. Además, la estabilidad de las moléculas orgánicas en la superficie resulta muy variable, ya que pueden degradarse por procesos de oxidación desencadenados por radicales químicos (generados por las grandes dosis de radiación ultravioleta solar y rayos cósmicos que llegan a la superficie) o mediados por los iones perclorato (ClO₄⁻) presentes en el suelo (tal como detectó el aterrizador *Phoenix*, del que más tarde hablaremos). Otro dato, éste procedente de nuestro planeta pero que sirve para alimentar la controversia en Marte, es que en la superficie de los valles secos de la Antártida y en otros entornos extremos terrestres no han podido detectarse moléculas orgánicas debido a su muy baja concentración... pero sí se han encontrado y caracterizado microorganismos endolíticos viviendo en las rocas. Por último, actualmente sabemos que existen depósitos de hielo en la subsuperficie de Utopia Planitia, lo que podría favorecer la posible presencia de vida al menos en el lugar analizado por el *Viking Lander 2*.

En consecuencia, Levin escribía lo siguiente en su provocativo artículo de 2019: «Inexplicablemente, en los 43 años transcurridos desde las *Viking*, ninguna de las sondas posteriores de la NASA que han aterrizado en Marte incluía un instrumento de detección de vida para continuar estos excitantes resultados. En su lugar, la agencia ha lanzado una serie de misiones a Marte para determinar si alguna vez hubo un hábitat adecuado para la vida y, en ese caso, traer muestras a la Tierra para su análisis biológico». Precisamente este investigador propuso hace algunos años un instrumento basado en el *LR* de las *Viking* para el rover *Perseverance*, con el que se analizaría la quiralidad de los compuestos eventualmente obtenidos tras incubar con nutrientes el suelo marciano en condiciones controladas: si eran homoquirales (todos con simetría de tipo L, o todos D) querría decir que hay procesos metabólicos implicados en su producción, mientras que si aparecen en mezclas racémicas (con las formas L y D al 50 %) provendrían de reacciones geológicas o químicas no relacionadas con la vida. Pero



Modelo a escala real del *lander* de las sondas *Viking*, recreando la toma de muestras con el brazo robótico durante su misión en Marte (imagen de Wikimedia Commons). ése era un instrumento «demasiado biológico», y finalmente la NASA no lo seleccionó.

De hecho, como hemos indicado, tras los discutibles pero esperanzadores resultados de las *Viking* sorprendentemente no se han enviado a Marte otras misiones para buscar auténticas señales de vida. Esto se debe a que el grado de desarrollo tecnológico de los sistemas biosensores propuestos hasta ahora no se considera suficiente, y también a un motivo que es más bien sociológico o incluso político: por el momento ninguna agencia espacial se atrevería a lanzar una misión indicando claramente que su objetivo es la búsqueda de vida en el planeta rojo (o en cualquier otro lugar), ya que lo más probable es que no la encontrara de forma inequívoca... debiendo por tanto asumir que dicha misión no ha sido exitosa. Y, teniendo en cuenta lo que esto supondría para la financiación de los siguientes proyectos de exploración, «el fracaso no es una opción». Por cierto, esta expresión, famosa porque en la película *Apolo 13* (dirigida por Ron Howard en 1995) fue la advertencia que recibieron los astronautas de tan dramática misión desde el Centro de Control de Houston, en realidad nunca fue dicha por Gene Kranz, el director de vuelo del programa Apolo. Pero esa es otra historia.

El caso es que, como no se ha vuelto a buscar vida en Marte de forma directa, aquella producción de CO₂ marcado que detectó el instrumento *LR* de las *Viking* en 1976 sigue sin ser confirmada ni refutada. Pero desde entonces, a pesar de esquivarse la principal pregunta que podemos plantearle al planeta rojo, la fascinante historia de la exploración espacial ha permitido llegar a él en numerosas ocasiones para estudiar algo menos comprometido: sus condiciones de habitabilidad pasada o presente.

EL REGRESO A MARTE

Tras las sondas *Viking* hubo que esperar dos décadas, hasta el año 1997, para que llegaran a Marte las siguientes misiones exitosas: el orbitador *Mars Global Surveyor* y la sonda *Mars Pathfinder*, ambas de la NASA. Se enviaron el 7 de noviembre y el 4 de diciembre de 1996, respectivamente, aprovechando una de las «ventanas de lanzamiento» que para Marte se producen aproximadamente cada dos años, y que comprenden la semana anterior y posterior al momento en que resulta más corta la trayectoria entre ambos planetas, lo que reduce la duración del viaje, el consumo de combustible y el coste de la misión. *Mars Global Surveyor* se posicionó con éxito en una órbita polar desde la cual envió decenas de miles de imágenes de alta resolución de Marte entre 1999 y 2006, y entre otros hitos realizó un completo mapa topográfico del planeta (como hemos visto anteriormente) gracias a su instrumento *Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA)*.

Por su parte, *Mars Pathfinder* se desprendió de su etapa de crucero tras llegar a Marte y descendió en Ares Vallis, no muy lejos del lugar en el que la *Viking 1* había amartizado 21 años antes. Lo hizo en una fecha muy señalada para los norteamericanos, el 4 de julio, y al día siguiente el periódico *New York Post* decía en su portada, con una mezcla de orgullo y humor heredado de la ciencia ficción: «La Tierra invade Marte». Una de las novedades tecnológicas de esta misión es que, tras el aerofrenado y la activación de paracaídas y retrocohetes, se amortiguó el impacto de la llegada con un sistema de grandes airbags: se inflaron hasta formar un tetraedro y éste fue rebotando sobre el suelo según lo previsto. Una vez posicionada correctamente y abandonada esa protección, la sonda comenzó a comunicarse con la Tierra. El módulo de aterrizaje recibió el nombre de *Carl Sagan Memorial Station*, en homenaje al brillante científico y entusiasta divulgador de la exploración espacial, que había fallecido sólo 16 días después del

lanzamiento de esta misión. De dicho módulo descendió el pequeño *rover Sojourner*, de 65 cm de largo y 11,5 kg de masa, nombrado a propuesta de una estudiante de doce años en honor de Sojourner Truth, una mujer nacida bajo la esclavitud en 1797 que destacó como abolicionista y activista durante toda su vida.

Ese primer vehículo con ruedas que llegaba a la superficie de otro planeta estuvo activo durante 83 soles (casi tres meses terrestres), y durante su recorrido de poco más de 100 metros analizó diversos aspectos de la geoquímica y petrología del suelo, así como de la atmósfera del planeta rojo. En esta nueva etapa de la NASA, *Mars Pathfinder* estaba ya guiada por el lema «seguir el agua»: como hoy consideramos que sólo en este solvente pueden producirse las complejas reacciones químicas que permiten el mantenimiento de los seres vivos, la detección de agua es un requisito necesario (aunque, como hemos comentado, no suficiente) para la presencia de vida en un entorno extraterrestre. Además, desde el punto de vista mediático la misión tuvo un éxito sin precedentes, pues las fotografías que las cámaras del pequeño todoterreno con seis ruedas *Sojourner* iban enviando durante su recorrido fueron seguidas con enorme interés por una humanidad deseosa de volver a disfrutar con la exploración de otros mundos. Años más tarde, este *rover* pionero volvió a hacerse muy popular gracias a su papel clave para la supervivencia del imaginativo astronauta Mark Watney en la novela *Marte* (peor título que el original inglés, *The Martian*), publicada por Andy Weir en 2011 y llevada al cine por Ridley Scott en 2015.

Durante los años siguientes se encadenó una serie de fracasos en los intentos de llegar a Marte. Así, el orbitador *Nozomi*, la primera misión al planeta rojo de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA), lanzada en 1998 con la intención de estudiar la interacción del viento solar con la atmósfera marciana, no llegó a insertarse en la órbita prevista y pasó a describir una trayectoria elíptica en torno al Sol. A finales de ese mismo año y principios del siguiente se lanzaron dos sondas que en conjunto formaban la misión *Mars Surveyor '98* de la NASA: el orbitador *Mars Climate Orbiter (MCO)* y el aterrizador *Mars Polar Lander (MPL)*. El objetivo científico de *MCO* era estudiar la atmósfera de Marte y la interacción del vapor de agua y el dióxido de carbono con la superficie, además de servir para transmitir a la Tierra los datos obtenidos por *MPL* y por las sondas previstas para años sucesivos. Pero este orbitador se destruyó debido a uno de los errores más lamentables de la historia de la exploración espacial: mientras la nave avanzaba hacia su destino y realizaba los cálculos correspondientes utilizando el sistema internacional de unidades (el habitual para nosotros), el equipo de control de Tierra se comunicaba con ella empleando el sistema anglosajón (que aún es el oficial en Estados Unidos, y mide la longitud en millas, pies o pulgadas). Es fácil, y triste, imaginar el resultado: durante los meses de navegación se fueron

acumulando errores en la trayectoria planeada, y al llegar a Marte la sonda pasó a sólo 57 km de altura sobre su superficie en vez de a los cerca de 150 km previstos, con lo que se desintegró debido a la fricción con la atmósfera del planeta. Los estudiantes que estén leyendo estas líneas podrán tomar buena nota de lo importante que es utilizar correctamente los sistemas de unidades al resolver sus problemas de física e ingeniería... sobre todo si en el futuro han de ponerse de acuerdo con sus colaboradores norteamericanos en algún proyecto importante.

A pesar de que tras este fiasco se implementaron medidas de control rigurosas, las malas noticias para la agencia norteamericana continuaron con *MPL*. Dicho aterrizador tenía como objetivo posarse en un lugar muy complicado en comparación con las regiones ecuatoriales en las que habían amartizado las *Viking* y *Mars Pathfinder*: entre las latitudes 74 y 78° S, a menos de 1000 km del polo sur marciano, para investigar sobre la interesante dinámica de avance y retroceso del casquete de hielo de dióxido de carbono. Pero 10 minutos antes de aterrizar se perdió el contacto con la sonda, probablemente por un fallo en el motor de descenso que la hizo impactar incontroladamente contra el suelo. Así, estas misiones pasaron a formar parte de un listado que muestra cómo aproximadamente la mitad de los intentos de llegar al planeta rojo no lo han conseguido.

Al comenzar el siglo XXI la NASA volvió a la senda del éxito con el orbitador *2001 Mars Odyssey*, cuyo nombre fue elegido como homenaje a la mítica película *2001: Una odisea del espacio* (dirigida por Stanley Kubrick en 1968), una vez que Arthur C. Clarke (autor del relato en el que se basa y coguionista del filme) dio su visto bueno para ello. Esta misión estudia desde entonces el entorno de radiación del planeta, busca evidencias de agua líquida y de hielo, cartografía la distribución de elementos químicos en la superficie, y además sirve como enlace de comunicaciones entre nuestro planeta y los robots que trabajan en el suelo de Marte. Uno de los hitos de este orbitador fue la detección en 2002 de una gran concentración de moléculas con hidrógeno en el subsuelo de ambos polos y también en latitudes ecuatoriales, lo que se interpreta como la presencia de hielo de agua allí. Seguimos la pista del agua y la habíamos encontrado. Recordando la película que dio nombre a la misión, podemos imaginar la música de Strauss (Richard o Johann) como emotivo fondo para este hallazgo. Desde el punto de vista de la astrobiología, la presencia de agua bajo la superficie de Marte planteaba más claramente la posibilidad de encontrar vida en el planeta y podría permitir su eventual exploración humana en el futuro.

El día de Navidad de 2003, Europa llegó a Marte por primera vez. La misión de la ESA *Mars Express* se posicionó con éxito en órbita del planeta, aunque la alegría no fue completa porque el aterrizador británico *Beagle 2* perdió el contacto con el orbitador mientras descendía sobre la región de

Isidis Planitia. Así, una serie de fallos técnicos y del propio diseño de la misión hicieron imposible saber qué resultados habría producido esta sonda con forma de disco, que tenía previsto obtener energía para su brazo robótico e instrumentos analíticos abriéndose como una flor sobre la superficie, con paneles solares en sus cuatro pétalos. Tal fracaso fue especialmente frustrante para la comunidad astrobiológica, ya que entre la instrumentación del *Beagle 2* había un microscopio y un instrumento *GC/MS* más avanzado que el de las *Viking*, con capacidad para analizar la composición isotópica del carbono presente en las rocas de la superficie y subsuperficie. Su investigador principal, Colin Pillinger, había aventurado durante la preparación de la misión: «El *HMS Beagle* fue el barco que llevó a Charles R. Darwin en su viaje alrededor del mundo durante la década de 1830, e hizo que nuestro conocimiento sobre la vida en la Tierra diera un salto cuantitativo: esperamos que el *Beagle 2* haga lo mismo para la vida en Marte». Pero esta vez la nave no llegó a puerto, o si lo hizo no pudo comunicárnoslo.

Afortunadamente, los instrumentos instalados a bordo de *Mars Express* (algunos de los cuales eran herederos de la sonda soviética *Mars 96*) han funcionado perfectamente y están permitiendo estudiar la composición y circulación de la atmósfera, mapear la topografía superficial y la composición mineralógica de la subsuperficie marciana, tomar gran número de imágenes de alta resolución del planeta, y también ha podido analizar el campo gravitatorio del satélite Fobos durante un sobrevuelo. Entre sus descubrimientos más relevantes está la localización de sulfatos hidratados y arcillas del tipo de los filosilicatos en distintos puntos del planeta, la confirmación de que en los polos marcianos hay gran cantidad de hielo de agua y de dióxido de carbono... y dos temas clave para lo que más nos interesa en este libro, que pondremos en contexto posteriormente: la detección de metano en la atmósfera marciana y el hallazgo de agua líquida con alta salinidad bajo la superficie del planeta.

Poco después de la llegada de este orbitador europeo, el protagonismo volvió a recaer en la NASA. En enero de 2004, tras desprenderse de sus etapas de crucero amartizaron las dos sondas que formaban la misión *Mars Exploration Rover (MER)* con el objetivo de profundizar en el conocimiento del clima y la geología marciana: los vehículos *Spirit* (o *MER-A*) y *Opportunity* (*MER-B*). Sus nombres se eligieron tras un concurso de relatos entre estudiantes, que fue ganado por Sofi Collis, una niña de tan sólo nueve años, cuya última frase decía: «*Thank you for the Spirit and the Opportunity*». Estos robots exploradores gemelos eran herederos del concepto probado con *Sojourner*, pero mucho más grandes y complejos. Podríamos decir que si el *rover* pionero era un patinete, estos dos serían carritos de golf: cada uno pesaba 185 kg e incluía como carga útil seis instrumentos científicos principales y cuatro cámaras. Llegaron a lugares diametralmente opuestos en

el ecuador del planeta rojo: *Spirit* al cráter Gusev (al sur de Elysium Planitia), y *Opportunity* a las llanuras de Meridiani Planum.

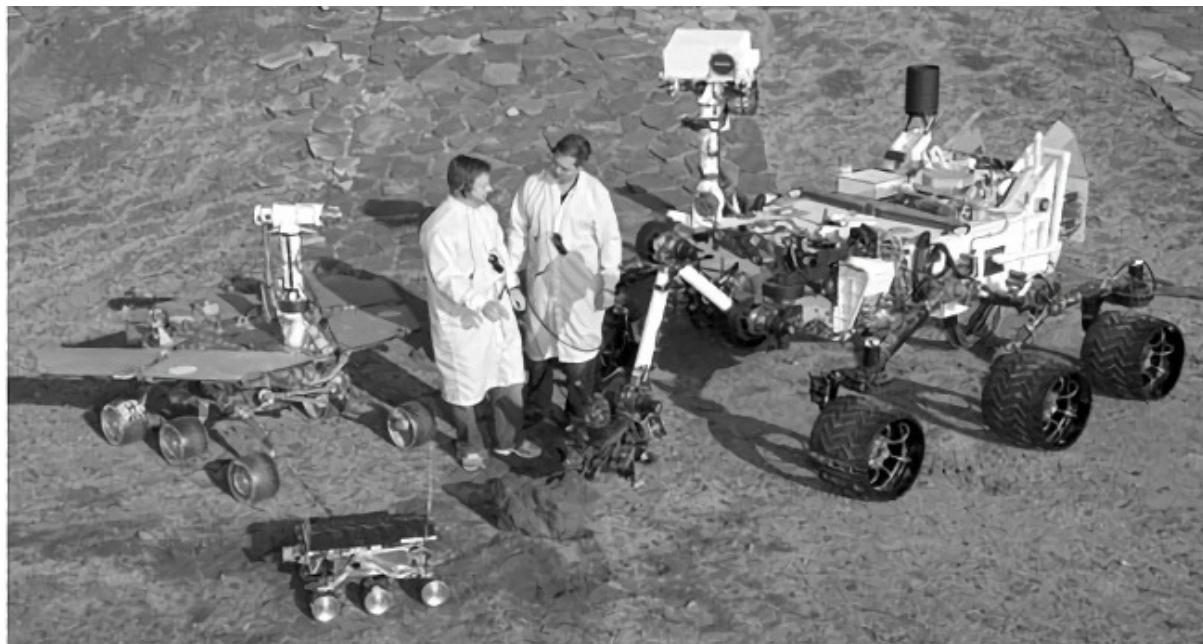
Ambos supusieron un gran éxito tecnológico, pues habían sido diseñados para ser operativos durante 90 soles y recorrer 600 m, pero *Spirit* estuvo activo 2208 soles (hasta 2010, tras haber quedado atrapado en un banco de arena del que fue imposible rescatarlo) y viajó 7,7 km, mientras que *Opportunity* tiene el récord de haber recorrido 45,1 km sobre Marte (más de una maratón, como les gusta recordar a sus ingenieros) durante los 5111 soles que se mantuvo operativo (hasta que en junio de 2018 se perdió el contacto con él debido a la deposición de gran cantidad de polvo sobre sus paneles solares durante una larga tormenta de arena que afectó a todo el planeta). En ambos casos, cuando el terreno que atravesaban era especialmente difícil su recorrido se iba controlando por los ingenieros del Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA, teniendo en cuenta que de media hay 20 minutos de desfase entre el envío y la recepción de las órdenes. Sin embargo, cuando el camino estaba despejado estos exploradores avanzaron haciendo uso de sus sistemas de conducción autónoma.

Durante los seis años de trabajo de *Spirit* en el cráter Gusev, analizó los basaltos y las partículas de polvo presentes en sus llanuras, y en la zona de Columbia Hills caracterizó rocas que contenían sulfatos, carbonatos y goethita (el oxihidróxido de hierro con el nombre más poético de todos los minerales), formados en presencia de agua líquida estable. Además, gracias al mal funcionamiento de una de sus ruedas, en una maniobra arrastró parte del regolito y descubrió un material blanco y brillante bajo él. Estaba formado por sílice (óxido de silicio, SiO_2), lo que sugería que en esa zona probablemente hubo manantiales hidrotermales, entornos que en nuestro planeta constituyen uno de los posibles escenarios para el origen de la vida. Sin duda sería interesante volver a visitar la superficie de este cráter, que en el pasado fue el lecho de un lago muy prometedor.

Por su parte, el longevo *Opportunity* realizó numerosos hallazgos durante su visita a los cráteres Eagle, Endurance, Victoria y Endeavour, en pleno ecuador del planeta. Entre ellos destaca el descubrimiento de esférulas de hematita, un óxido de hierro que en estos «arándanos» (como los bautizó el siempre imaginativo equipo científico de la misión) mostraba señales de haberse formado en un entorno acuoso ácido. Uno de sus resultados más relevantes es que identificó los materiales más antiguos detectados *in situ* hasta el momento en el planeta: sedimentos que contienen arcillas, formados en presencia de agua hace unos 4000 Ma, en el período Noéico. Este rover también descubrió jarosita, un sulfato hidratado de hierro y potasio que en la Tierra se forma en presencia de aguas ácidas, y es el más andaluz de los minerales marcianos: fue hallado por primera vez en el barranco del Jaroso (en Cuevas del Almanzora, Almería) y además se encuentra en el entorno del

río Tinto (donde, por cierto, también aparecen goethita y hematita). Lo más interesante es que, si bien el origen de la jarosita terrestre puede ser abiótico, también se produce gracias a la actividad metabólica de bacterias acidófilas oxidadoras de hierro como *Acidithiobacillus ferrooxidans* (una de las protagonistas de las aguas de nuestro río rojo, como vimos). Esto no quiere decir nada más, pero desde aquel descubrimiento *Opportunity* se hizo muy popular entre los microbiólogos especializados en extremofilia. Además, «Oppy» detectó venas de yeso junto al borde del cráter Endeavour, indicando que en el pasado se movió por allí un flujo de agua rica en sales.

En 2005 se lanzó el orbitador de la NASA *Mars Reconnaissance Orbiter* (*MRO*), que desde 2006 está analizando la mineralogía y el hielo de la superficie y subsuelo de Marte, utilizando sus tres cámaras de alta resolución (de hasta 30 cm/píxel), un espectrómetro y un radar de penetración. Además, sirve como sistema de transmisión de comunicaciones desde el planeta. Entre sus descubrimientos, *MRO* determinó que el volumen de hielo de agua presente en el polo norte de Marte equivale a un tercio del hielo que actualmente cubre la isla de Groenlandia. El instrumento *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars* (*CRISM*) ha localizado diferentes tipos de arcillas, carbonatos, cloruros, óxidos y también yacimientos de ópalo (sílice hidratado). La presencia de estas rocas y minerales sugiere que en la superficie marciana hubo agua en estado líquido durante mucho más tiempo de lo que se pensaba, y por tanto en teoría la vida pudo haber tenido un margen más amplio para originarse y diversificarse allí. Además, como veremos posteriormente, este orbitador ha aportado pruebas muy valiosas sobre la posibilidad de que haya hielo de agua a poca profundidad, e incluso que en la actualidad exista agua líquida con alta concentración de sales fluyendo ocasionalmente en puntos de la superficie del planeta rojo.



Tres generaciones de robots exploradores construidos por la NASA, que podemos ver juntos en el terreno de pruebas del Jet Propulsion Laboratory (JPL, Pasadena, California) gracias a las réplicas idénticas que se construyen de cada uno que se envía a Marte. En primer plano aparece el pequeño *rover Sojourner*, de la misión *Mars Pathfinder*, que llegó al planeta rojo el 4 de julio de 1997 y fue pionero en desplazarse sobre su superficie. A la izquierda está la réplica (sin los paneles solares) de los robots gemelos *Spirit* y *Opportunity* en la misión *Mars Exploration Rover (MER)*, cuyo amartizaje se produjo en enero de 2004. A la derecha aparece el imponente *Curiosity* (por seguridad, sin su generador de radioisótopos, *RTG*) de la misión *Mars Science Laboratory (MSL)*, que se posó sobre el planeta el 6 de agosto de 2012. Los dos ingenieros del JPL situados en el centro son Matt Robinson y Wesley Kuykendall. © JPL-Caltech/NASA.

LA CONQUISTA DEL POLO NORTE

La siguiente misión en llegar a Marte fue la sonda norteamericana *Phoenix*, que en 2008 amartizó suavemente sobre el permafrost de la inmensa llanura de Vastitas Borealis, cerca del polo norte del planeta, a latitud 68,2° N. Casi diez años después del fracaso de la *Mars Polar Lander* cerca del polo sur, con este módulo aterrizador de 350 kg se cumplía el difícil sueño de alcanzar las regiones circumpolares de Marte. Por este motivo se nombró a la misión como el ave mitológica que resurge de sus cenizas, aunque a los fans de *Star Trek* siempre les sugerirá una nave espacial de su saga. *Phoenix* inauguró una serie de misiones de la NASA denominadas *scout* o «explorador», que se caracterizan por ser de pequeño tamaño, tener un coste relativamente bajo, aportar innovaciones tecnológicas y enfocarse a acumular información necesaria para la futura exploración humana del planeta. El interés científico

por llegar al ártico marciano se debía a que, como hemos comentado, *Mars Odyssey* había detectado en 2002 grandes concentraciones de materiales con hidrógeno principalmente bajo la superficie de ambos polos, lo que se interpretó como la presencia de hielo de agua en dichas latitudes. Además de este dato espectroscópico, varios orbitadores habían observado numerosos rasgos morfológicos que indican la presencia de hielo de agua en las llanuras árticas de Marte, entre ellos un patrón de terrenos poligonales con estructura análoga a la de ciertos territorios periglaciares de la Tierra. En nuestro planeta, dichas morfologías responden al cambio de fase del agua entre sólido y líquido (y viceversa) al llegar el verano (o el invierno), lo que podría estar ocurriendo también en Marte.

Los resultados de la *Phoenix*, durante los 157 soles que permaneció activa, estuvieron a la altura de las expectativas. Utilizando su brazo robótico pudo recoger numerosas muestras de suelo y depositarlas en los instrumentos de análisis situados en su plataforma, entre los dos grandes lóbulos con paneles solares. Estos incluían un analizador térmico y de gases ocluidos en el suelo, un sistema para medir la conductividad y las propiedades electroquímicas del terreno (que contenía además un microscopio), y una estación meteorológica para caracterizar el clima de la región. Pero el más novedoso de todos era el Wet Chemistry Laboratory (WCL), un auténtico laboratorio en miniatura que por primera vez en la historia de la exploración espacial analizó la química del suelo de otro planeta. Este instrumento, el tercero tras los *Labeled Release* de las dos *Viking* en emplear sobre Marte medios líquidos en sus experimentos, permitía detectar un gran número de cationes y aniones diferentes, y medir parámetros como su pH, conductividad o potencial de óxido-reducción. Es decir, lo que todos los estudiantes de química hemos hecho en las clases de prácticas durante los primeros años de carrera... pero prescindiendo del cuaderno de laboratorio, sin la supervisión de un profesor y sobre la superficie del planeta rojo.

Con esta misión se pudieron tomar fotografías que confirmaban cómo el hielo de dióxido de carbono aparece a pocos centímetros bajo la superficie y se sublima en contacto con el aire. Los análisis químicos realizados por el WCL en dos muestras superficiales y otra tomada a 5 cm de profundidad mostraron que ese suelo era algo alcalino (con un pH de 7,7) y contenía varios iones que estarían formando sales en el terreno. Entre ellos se encontraban los cationes calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+), los aniones cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_{42-})... y además otro cuyo descubrimiento fue una sorpresa: el perclorato (ClO_4^-). Por tanto, en principio ese terreno se considera habitable para los microorganismos, aunque según comentábamos el perclorato es muy oxidante y puede degradar rápidamente la materia orgánica. La temperatura del aire se mantuvo entre -78°C y -90°C durante

el período estudiado, con vientos de entre 11 y 58 km/h. Además, al encontrarse en latitudes polares, las cámaras de *Phoenix* lograron captar dos imágenes hasta entonces inéditas y que resultaban de gran belleza: la nieve de agua cayendo desde las nubes situadas a unos 4 km de altura en la tenue atmósfera, y el Sol de medianoche sobre el horizonte de Marte.

LA NUEVA ERA DE LAS MISIONES ROBÓTICAS

La misión *Mars Science Laboratory (MSL)* supuso otro éxito para la NASA y el comienzo de una nueva etapa en la exploración de Marte, cuando el 6 de agosto de 2012 amartizó *Curiosity*: el robot más grande y complejo jamás enviado al planeta, que sigue plenamente operativo en él. Su coste fue de unos 2500 millones de dólares, como corresponde a una misión de tipo Flagship, las de mayor presupuesto entre los tres programas de la agencia norteamericana para explorar el Sistema Solar (junto a las New Frontiers, intermedias, y las Discovery, de menor coste). El nombre de este *rover* se eligió, como en ocasiones anteriores, tras un concurso entre escolares norteamericanos. Y esta vez no podría ser más adecuado, ya que la curiosidad es lo que realmente define el trabajo de los científicos e impulsa la exploración espacial. *Curiosity* tiene una masa de 899 kg y el tamaño de un coche como el *Mini*, con unos imponentes 2,2 m de altura hasta la cabeza de su mástil, y a nivel tecnológico supone un salto cualitativo y cuantitativo con respecto a sus antecesores *Spirit* y *Opportunity*. De hecho, debido al consumo de sus instrumentos y para garantizar una vida útil mucho más larga, no utiliza paneles solares como fuente de energía sino un generador termoeléctrico de radioisótopos (*Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG*), alimentado por plutonio-238 y similar al usado con éxito en las *Viking*. Pensar en ello resultaba, digamos, curioso... durante aquella mañana del 26 de noviembre de 2011, cuando desde Cabo Cañaveral algunos científicos e ingenieros del Centro de Astrobiología asistimos al lanzamiento del cohete *Atlas V 541* que llevaba a *Curiosity* en su cofia.

Afortunadamente, todo salió bien durante el despegue y el viaje hasta el planeta rojo. Teniendo en cuenta la masa del *rover*, el sistema de aterrizaje con una fase final dependiente de airbags fue sustituido por un nuevo método: después del aerofrenado con el escudo térmico y del despliegue de un gran paracaídas, un sistema de retrocohetes mantuvo literalmente suspendida en el aire una especie de grúa volante (o *sky crane*) desde la que el *rover* descendió

suavemente con unos cables hasta tocar el suelo. En ese momento, los cables se cortaron con un sistema pirotécnico y la grúa fue despedida para que cayera lejos del robot. Todo funcionó a la perfección en esta complicada maniobra. El amartizaje se produjo dentro del espectacular cráter Gale, en el extremo sur de las tierras bajas de Elysium Planitia y muy cerca del ecuador del planeta (a latitud 5,2° S). El punto exacto al que llegó se denominó después Bradbury Landing, en homenaje al escritor de ciencia ficción del que ya hemos hablado. A partir de ese lugar, *Curiosity* comenzó a explorar y a analizar el suelo marciano con sus 80 kg de compleja y sofisticada carga útil científica.

Los instrumentos de *Curiosity*, distribuidos entre la plataforma, el mástil y el cabezal de su brazo robótico extensible, incluyen nada menos que diecisiete cámaras que trabajan a diferentes longitudes de onda, un microscopio, un espectrómetro de plasma inducido por láser (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS*, incluido en el instrumento *Chemistry and Camera complex, ChemCam*), un espectrómetro de rayos X, un difractómetro de rayos X y un analizador de radiación. Además, cuenta con una *suite* de instrumentos llamada *Sample Analysis at Mars (SAM)* que permite caracterizar los compuestos orgánicos existentes en la atmósfera y el suelo, además de analizar los isótopos del C y el O presentes en el dióxido de carbono y el metano para distinguir entre su posible origen geoquímico o biológico. Las muestras pulverizadas que caracteriza la *SAM* son obtenidas con un pequeño taladro situado en el brazo robótico, con el que se puede perforar unos centímetros del suelo marciano en los puntos deseados. A bordo de *Curiosity* también opera la estación medioambiental *Rover Environmental Monitoring Station (REMS)*, liderada por el Centro de Astrobiología y que supuso la primera vez que llegaba a Marte tecnología diseñada y construida en España, como comentaremos en la conversación final de este capítulo. Con tales instrumentos, el *rover* más complejo que hasta el momento opera fuera de nuestro planeta está investigando la geología, el clima, el entorno de radiación y las condiciones de habitabilidad de Marte, movido por la curiosidad de su equipo científico.

Para lo que más nos interesa en este libro, merece la pena detenernos un momento en el trabajo que está llevando a cabo la *suite SAM* cuando analiza la materia orgánica volátil presente en el suelo. Para ello se toman con el brazo robótico y el taladro muestras de regolito marciano o rocas pulverizadas y se calientan lentamente en un horno hasta 1000 °C, de forma que las moléculas que pasan a fase gas (entre ellas, el agua potencialmente incluida en los minerales o rocas) son caracterizadas mediante *GC/MS*. Esta técnica es muy poderosa y ha sido utilizada anteriormente en Marte, pero tiene la limitación de que buena parte de los compuestos orgánicos eventualmente presentes en el suelo del planeta se descomponen en otros más pequeños

durante el proceso. Por ello, como se comentaba en un capítulo anterior, varios científicos estamos proponiendo instrumentos biosensores que permitan analizar directamente las moléculas orgánicas potencialmente contenidas en las muestras del suelo o subsuelo marciano, sin descomponerlas ni modificarlas previamente.

Los hallazgos de este *rover* hasta la fecha están siendo muy relevantes. *SAM* ha detectado la presencia de los seis elementos fundamentales para la vida en rocas de entre 4600 y 3900 Ma de antigüedad, el famoso «grupo CHONPS» del que hablábamos en capítulos anteriores. Esto indica que a nivel químico el planeta rojo sí contaba (y cuenta) con los ingredientes necesarios para el origen y mantenimiento de los seres vivos. Además, en varias muestras tomadas en el Monte Sharp y las llanuras circundantes dentro del cráter Gale, esta *suite* analítica ha detectado por primera vez moléculas orgánicas endógenas en el planeta, tras comprobarse que no eran contaminantes moleculares (recordemos el capítulo anterior) llevados en el robot desde la Tierra. Su caracterización es muy complicada, porque los percloratos que abundan en el regolito marciano alteran la materia orgánica al ser calentada para su análisis. Aun así, se considera que el carbono orgánico detectado podría formar parte de esa mezcla compleja de hidrocarburos que conocemos como kerógeno, y que algunos científicos han llegado a proponer como resultado de la descomposición de seres vivos en el pasado. Lógicamente estas arriesgadas propuestas deben ser apoyadas por evidencias experimentales, ya que la materia orgánica también podría haber llegado a Marte en meteoritos de tipo condrita carbonácea, como veremos posteriormente. Para ello será fundamental la información que aporte la instrumentación analítica de las siguientes misiones que lleguen al planeta rojo.

Por su parte, uno de los hallazgos del *LIBS* de *Curiosity* ha sido el elemento boro (B), presente en inclusiones de minerales de sulfato de calcio: como en nuestro planeta los boratos desempeñan un papel importante en la estabilización de la ribosa que forma los nucleótidos del RNA, sería posible empezar a imaginar interesantes escenarios para la química prebiótica en Marte. Pero, por el momento, esto sólo es una sugerente hipótesis. En paralelo, según comentaremos más adelante, este *rover* está trabajando activamente para intentar explicar el misterio de la presencia puntual de metano en la atmósfera del planeta. Las medidas de temperatura, presión atmosférica y nivel de radiación que está realizando *REMS* también resultan fundamentales para conocer el entorno ambiental que tendría la vida si existe actualmente, además de para cuantificar las peligrosas condiciones que les esperan a las futuras misiones tripuladas. A nivel geológico, entre otros descubrimientos se han caracterizado arcillas con escaso contenido salino, lo que indica su formación en presencia de agua con baja cantidad de sodio y

potasio en esa zona, quizá similar al «agua dulce» de los ríos y lagos terrestres. Además, *Curiosity* ha encontrado rocas redondeadas parecidas a nuestros «cantos rodados», que serían el resultado de la erosión por la corriente de antiguos torrentes o cascadas. Sin duda, algunos paisajes de nuestro presente pueden ayudarnos a imaginar los de Marte en el pasado.

Para terminar el breve repaso por los resultados de esta exitosa misión, invitamos al lector a buscar en internet los impresionantes autorretratos de control que se va haciendo *Curiosity* durante su recorrido, como un turista en un país exótico que quisiera dejar constancia de su presencia junto a los espectaculares entornos visitados. Y recomendamos también ver imágenes de las preciosas puestas de sol que este *rover* (como, con menos calidad de imagen, hicieron antes *Spirit* y *Opportunity*) ha captado en Marte. Debido a la composición de su atmósfera y al polvo en suspensión, son ocasos de color azul en el cielo rosado del planeta rojo. Merece la pena pensar en ello durante un atardecer que tiña de rojo el horizonte de color celeste de nuestro planeta azul. Y una reflexión que nos puede acompañar durante la lectura de los siguientes capítulos: en el Sistema Solar, sólo desde Marte y la Tierra podemos ver cómo cambian las tonalidades del cielo durante una puesta de sol.

Volviendo a la historia resumida de la exploración del planeta que estamos repasando desde hace varias páginas, el siguiente éxito se lo anotó un país que nunca antes había enviado misiones a Marte: la India. Lo logró con una sonda llamada *Mars Orbiter Mission (MOM)*, coloquialmente conocida como *Mangalyaan* (en sánscrito, «Nave a Marte»), que se lanzó a finales de 2013 y se posicionó en la órbita prevista en septiembre de 2014. Concebida como una prueba de la tecnología y sistemas de operación requeridos para las siguientes misiones espaciales previstas por este país (que está teniendo luces y sombras en su programa lunar, como vimos), desde entonces ha proporcionado información sobre la atmósfera y la mineralogía de la superficie marciana utilizando cinco instrumentos construidos también en la India. Con este gran logro, la Indian Space Research Organisation (ISRO) se ha sumado al selecto grupo de las que hasta 2020 han llevado orbitadores o *rovers* operativos a Marte: la soviética, NASA y ESA. Además, la India tendrá para siempre dos récords: haber sido el primer país en llegar con éxito al planeta rojo la primera vez que lo ha intentado, y haberlo hecho con la misión más barata de la historia de la exploración de Marte (con un coste comunicado de tan sólo 73 millones de dólares).

Dos semanas después del despegue del cohete indio, otro orbitador de la NASA fue lanzado rumbo a Marte, el *Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN)*, acrónimo que además en inglés significa «experto»). Desde su inserción en órbita dos días antes que *Mangalyaan* en la suya, los ocho instrumentos que contiene están investigando cómo desaparecieron la

atmósfera y el agua en Marte, un tema clave para entender el destino que pudo tener la vida en caso de que previamente se hubiera originado en el planeta. Los datos obtenidos hasta ahora han permitido confirmar que, como indicábamos al comienzo de este capítulo, una vez perdido el campo magnético de Marte fue el viento solar el responsable de la progresiva desaparición de su atmósfera y posteriormente de la hidrosfera. Sus instrumentos también han mostrado que el planeta sigue perdiendo agua actualmente, al irse sublimando desde el hielo a su tenue atmósfera y allí ser descompuesta en hidrógeno y oxígeno por la radiación solar. Actualmente, debido a la progresiva pérdida de prestaciones de *MRO*, la NASA está reconfigurando *MAVEN* para garantizar las comunicaciones con sus *rovers* en el futuro. Como dato curioso de esta sonda, en ella se colocó un DVD que contiene los haikus ganadores de un concurso convocado por la NASA antes de su ensamblaje: la poesía orbita desde el cielo sobre el planeta.

El siguiente capítulo de esta apasionante historia lo ha escrito la ESA junto a la agencia espacial rusa (Roscosmos, fundada en 1992 tras la desintegración de la URSS), con el lanzamiento en 2016 de la misión *ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO)* que estaba formada por el orbitador del mismo nombre y el aterrizador *Schiaparelli*, nombrado en recuerdo del astrónomo italiano que creyó ver canales en Marte. Como en el caso de *Mars Express* en la década anterior, la misión fue sólo parcialmente exitosa: el orbitador se posicionó correctamente en su órbita en octubre de ese año, pero el módulo que debería haber amartizado con suavidad impactó descontroladamente contra la superficie tras apagarse sus retrocohetes antes de tiempo. El día siguiente, haciendo gala de un dudoso sentido del humor que no se entendió en Europa, algún columnista estadounidense escribió que desde su llegada ya hay dos cráteres llamados *Schiaparelli* en Marte.

Por su parte, los cuatro instrumentos a bordo de *TGO* están funcionando según lo previsto y permiten detectar un amplio abanico de moléculas en la atmósfera del planeta, con una sensibilidad sin precedentes para los gases traza. Gracias a ello, como veremos, este orbitador está plenamente preparado para contribuir a la investigación sobre la esquiva presencia de metano en la atmósfera marciana, y puede resultar clave en la solución de este misterio. Además, ya ha permitido realizar el primer mapa de la distribución de agua subsuperficial (en forma de hielo o de minerales hidratados) en todo el planeta, detectando una concentración especialmente alta en el subsuelo de las regiones Solis Planum y Bosphorus Planum, al sur de Valles Marineris. Otro cometido importante de este orbitador es servir como satélite de comunicaciones para la siguiente fase de la misión *ExoMars*, que aparecerá más adelante.

Así hemos llegado a la última sonda que, hasta el momento de escribir estas líneas, ha alcanzado el planeta rojo: el aterrizador de la NASA *Interior*

Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport (*InSight*, de nuevo un acrónimo muy acertado porque en inglés significa «visión» o «perspicacia»). Esta misión del programa Discovery amartizó el 26 de noviembre de 2018 en Elysium Planitia, sólo 560 km al noroeste del cráter Gale en el que trabaja *Curiosity*, empleando para el descenso la misma tecnología que tan bien había funcionado con su vecino. *InSight* se alimenta con paneles solares en una plataforma igual a la de *Phoenix* (como vimos en una de las imágenes del capítulo anterior) e incluye cámaras y cuatro instrumentos de investigación geofísica desarrollados fundamentalmente en Europa. El primero es un sismómetro llamado *Seismic Experiment for Interior Structure* (*SEIS*), para medir la posible actividad sísmica en el planeta y realizar modelos de su estructura interior. El segundo, la sonda térmica *Heat Flow and Physical Properties Package* (*HP³*), diseñada para penetrar hasta 5 m en el subsuelo marciano y estudiar las propiedades térmicas del material encontrado durante su descenso. Esto está resultando mucho más complicado que lo previsto, pues el instrumento no dispone de un taladro y el suelo sobre el que amartizó la sonda está formado por un material muy cohesivo. En palabras de su equipo científico: «Esperábamos una textura de azúcar y hemos encontrado harina, que se compacta al presionar para intentar avanzar». El tercero es el experimento de radio *Rotation and Interior Structure Experiment* (*RISE*), cuyo cometido es caracterizar de forma precisa la rotación del planeta. Y el cuarto nos resulta muy familiar: la estación meteorológica *Temperature and Winds for InSight* (*TWINS*), similar al instrumento *REMS* que opera en *Curiosity* y también desarrollado por el Centro de Astrobiología.

Uno de los resultados más interesantes que *InSight* ha producido hasta el momento es la confirmación de que en realidad Marte no es un planeta geológicamente muerto. Ya se sabía que en él ocurren procesos relevantes, como la erosión realizada por el viento y en ocasiones por el deshielo del agua de su subsuperficie, pequeños temblores desencadenados a nivel local por dichos deshielos, fenómenos de inestabilidad gravitatoria de algunas laderas con mucha pendiente, así como la caída de meteoritos que siguen provocando pequeños cráteres de impacto. Pero *InSight* ha descubierto algo más sorprendente: en Marte se producen movimientos sísmicos o «martemotos», de los que el primero se detectó el 6 de abril de 2019. En esa fecha terrestre, correspondiente al sol 128 de su misión sobre Marte, *InSight* tenía ya depositado sobre la superficie y plenamente operativo el sismómetro *SEIS*. Entonces, los científicos e ingenieros de la misión encargados de analizar la información enviada por los dos juegos de sensores de este instrumento recibieron con sorpresa una señal acústica muy nítida, de unos 7 segundos de duración. Provenía del interior del planeta y era claramente diferente de la vibración continuamente producida por los vientos marcianos,

o de vez en cuando por el movimiento del brazo robótico de *InSight* al desplazarse para tomar fotografías de la superficie o empujar hacia abajo al *HP*³. En internet se puede encontrar tanto el sonido del viento como el de ese primer martemoto, cuya frecuencia ha sido aumentada sesenta veces para situarla dentro de nuestro espectro audible. Desde entonces se está detectando una media de dos temblores al día, con diferentes intensidades, frecuencias y duraciones. Aunque la mayoría son muy leves y recuerdan los pequeños «lunamotos» detectados en la superficie de nuestro satélite por las misiones *Apolo*, hasta ahora más de veinte han llegado a magnitudes entre 3 y 4, varios de ellos provenientes de la cercana región de Cerberus Fossae. De esta forma, una nueva disciplina científica está dando sus primeros pasos: la sismología marciana.

EL METEORITO ALH84001

Existe otra forma de explorar el planeta rojo, menos espectacular pero mucho más barata, ya que no requiere orbitarlo ni posarse sobre él: analizar alguno de los más de 130 fragmentos de Marte que nos han llegado a la Tierra. De hecho, entre todos los meteoritos caídos en nuestro planeta (de los que hablaremos en el capítulo 10), el más controvertido durante los últimos años ha sido uno que vino de Marte, y que aparentemente contenía algo maravilloso: fósiles de bacterias que alguna vez vivieron allí.

Repasemos lo principal de su historia. Hace unos 16 Ma otro meteorito, muy masivo y probablemente proveniente del cinturón de asteroides, impactó oblicuamente en Marte y extrajo gran cantidad de material de su corteza. Entre esas rocas que abandonaron el planeta y comenzaron a vagar por el espacio había algunas formadas al comienzo de su historia geológica: magmas solidificados hace aproximadamente 4100 Ma que habían sido transformados por el agua entre 200 y 400 Ma después, durante el período Noéico, en un proceso que depositó carbonatos y otras sales en sus fracturas. Uno de dichos fragmentos expulsados de Marte quedó finalmente atrapado por el campo gravitatorio terrestre y atravesó nuestra atmósfera. La parte más interior de él, que resistió la desintegración del resto por rozamiento con el aire, cayó en la Antártida hace unos 13 000 años y formó un cráter en el hielo. El agua fundida por el impacto volvió a congelarse por encima de él, con lo que este mensajero de Marte permaneció prácticamente inalterado durante milenios, mientras los hielos que lo contenían se fueron desplazando

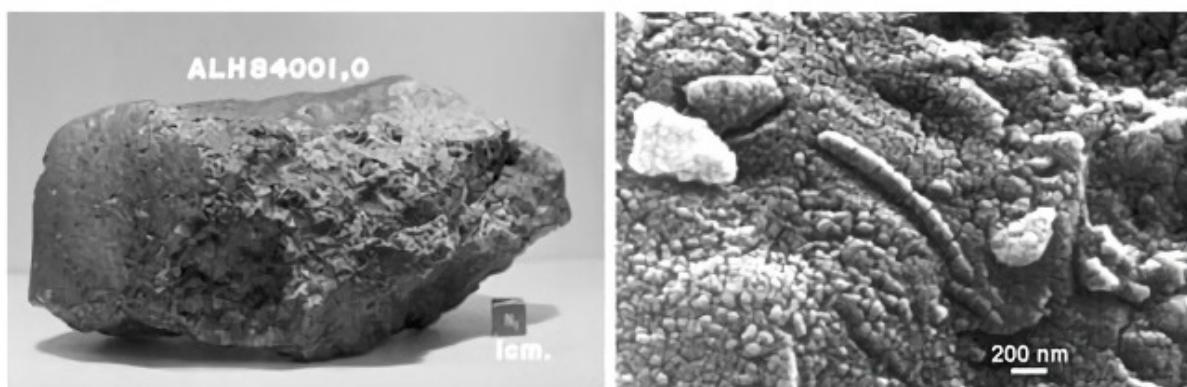
lentamente hasta llegar a la región de Allan Hills. Allí, los intensos vientos antárticos (los mismos que más tarde derrotarían al capitán Scott) fueron erosionando el agua congelada y dejaron su tesoro al descubierto: una roca oscura misteriosamente aparecida sobre la blanca superficie.

Y allí fue encontrada el 27 de diciembre de 1984 por una expedición norteamericana financiada por la Oficina de Programas Polares de la National Science Foundation. Se trataba de un meteorito de tipo acondrita, de color rojizo oscuro y una masa de 1,9 kg, que fue denominado ALH84001, haciendo referencia al lugar (Allan Hills) y año de su hallazgo, y al hecho de que había sido el primero encontrado en esa campaña anual. Inicialmente se clasificó como una diogenita, probablemente procedente del asteroide Vesta, y así quedó catalogado en la colección de meteoritos de la NASA. Pero en unas investigaciones realizadas casi una década después se comprobó que el hierro que contenía el ALH84001 mostraba un estado de oxidación demasiado alto como para provenir de un asteroide. Ante ello, se analizaron los isótopos de algunos de los elementos presentes en él, y en particular los del oxígeno ya que cada cuerpo del Sistema Solar muestra una proporción diferente entre ellos, sirviendo así como «certificado de origen». Y la conclusión fue clara: había llegado desde Marte. Era, por tanto, uno de los menos de cien meteoritos marcianos recogidos hasta ese momento en nuestro planeta.

A partir del año 1994, ALH84001 comenzó a ser analizado en detalle por un equipo de investigadores liderado por David S. McKay, director del Programa de Astrobiología del Johnson Space Center (JSC) de la NASA, un científico con gran experiencia que en la década de 1960 había formado en geología a los astronautas del programa Apolo. Dos años después, el 7 de agosto de 1996, este investigador y los altos cargos de la agencia espacial norteamericana anunciaron públicamente los principales resultados de un artículo que la prestigiosa revista *Science* iba a publicar nueve días más tarde, según los cuales este meteorito contenía pruebas de que la vida existió en Marte en el pasado. Las evidencias incluían el descubrimiento, por primera vez en tal abundancia, de moléculas orgánicas complejas en el interior de un meteorito marciano: hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) que podrían corresponder (o no) a productos de degradación de microorganismos extintos.

Pero lo más asombroso es que el análisis de este meteorito mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) había revelado la presencia de glóbulos y estructuras tubulares formados por carbonatos, que podrían ser de origen biológico o incluso corresponder a fósiles de bacterias que formaban filamentos. El diámetro de cada una de ellas sería de entre 20 y 200 nm, es decir, de 5 a 50 veces menor que el de las conocidas en nuestro planeta hasta esa época. Por tanto, quizás tuviéramos ante nuestros ojos los primeros

microfósiles encontrados en una roca marciana, lo que supondría que el planeta rojo albergó vida en el pasado... y tal vez incluso pudiera estar habitado en la actualidad. Así, tras ese sorprendente anuncio, muchos científicos recordaron con más simpatía los controvertidos resultados que el instrumento *LR* de las *Viking* había obtenido veinte años antes. Por el contrario, otros advirtieron de que supuestas formas de vida fosilizadas habían sido encontradas en 1961 en el meteorito Orgueil (una condrita carbonácea procedente del cinturón de asteroides y caída en Francia en 1864)... pero acabaron siendo granos de polen terrestre. Así, tanto la excitación como la desconfianza comenzaron a crecer rápidamente.



El meteorito ALH84001, encontrado en la Antártida en 1984. En el primer panel, las partes superior e izquierda de la roca muestran la costra de fusión producida durante su entrada atmosférica, mientras que a la derecha se observa su textura interior. El segundo panel muestra la famosa imagen obtenida por SEM de una zona del meteorito, en la que aparecen algunos de los glóbulos y estructuras tubulares comentados en el texto. Fuente: Wikimedia Commons.

Algo que aumentó aún más la repercusión mediática de este anuncio de la NASA fue que esa misma tarde el presidente Bill Clinton convocó a la prensa en los jardines de la Casa Blanca para resaltar su trascendencia, y a la vez para mostrar su orgullo por el trabajo de los científicos norteamericanos en la investigación y la exploración espacial. Merece la pena rescatar un párrafo de su breve pero grandilocuente declaración ante las cámaras, que resulta interesante porque se trataba del ser vivo más poderoso de un planeta refiriéndose a la posible presencia de formas de vida en otro muy cercano (como a veces ocurre en las películas de ciencia ficción, pero sin platillos volantes en el cielo de Washington): «Hoy, la roca 84 001 nos habla a través de todos esos miles de millones de años y millones de millas. Habla de la posibilidad de la vida. Si se confirma este descubrimiento, seguramente será uno de los hallazgos más impresionantes sobre nuestro universo que la ciencia haya realizado. Sus implicaciones son tan trascendentales y asombrosas como se puede imaginar. Incluso prometiendo respuestas a algunas de nuestras preguntas más antiguas, plantea otras aún más fundamentales».

Precisamente lo que caracteriza el trabajo de los investigadores es no dejar de interrogarnos por el conocimiento que existe en cada momento, poniendo siempre en duda los descubrimientos (propios o ajenos) mediante el pensamiento crítico y el método científico. Eso es lo que hace grande e imparable a la ciencia, al contrario de lo que ocurre con las creencias basadas en dogmas inmutables o con las variopintas invenciones de las pseudociencias que nos rodean. Por tanto, como era de esperar, un artículo que proponía la existencia de vida pasada en Marte (y que en la prensa mundial había generado todo tipo de titulares desmesurados) enseguida fue analizado críticamente, hasta el último detalle, por muchos científicos. Durante los meses siguientes se realizaron numerosas investigaciones adicionales sobre este meteorito, tanto en otros laboratorios como en el del propio equipo de McKay.

Así, en enero de 1998 un trabajo publicado en *Science*, firmado por investigadores norteamericanos de la Scripps Institution of Oceanography, rebatía esos resultados y proponía que la contaminación química y biológica del ALH84001 durante los miles de años que permaneció en los hielos de la Antártida habría sido la responsable de la presencia de materia orgánica en él. Mezclas complejas de hidrocarburos aromáticos se han encontrado en otros meteoritos y en diferentes lugares del Sistema Solar (como iremos viendo), sin que ello implique la presencia de procesos biológicos en ellos. Por otra parte, en el artículo se recordaba que una morfología similar a la bacteriana (y de tamaño mucho menor, en este caso) no es un criterio de biogenicidad. Tal cautela ha de tenerse muy en cuenta al examinar posibles formas de vida primitiva en la Tierra, al buscar microorganismos en entornos extremos de nuestro planeta... y por supuesto al analizar rocas extraterrestres. De hecho, ningún otro meteorito de origen marciano analizado ha mostrado nunca la presencia de supuestos fósiles bacterianos.

El propio McKay era bien consciente de que una propuesta extraordinaria requería pruebas mucho más sólidas que las aportadas en su artículo de 1996. De hecho, como pude comprobar al hablar con él en varias ocasiones, siempre fue un científico sistemático, prudente e incluso tímido, que según decía habría preferido que su descubrimiento no hubiera tenido tanta repercusión (por parte de la NASA, de los políticos y de toda la prensa mundial) antes de haber podido acumular pruebas científicas adicionales. Así, hasta su fallecimiento en 2013 siguió trabajando con su equipo sobre este meteorito y aportando datos para mantener que las morfologías encontradas en él podrían corresponder a nanobacterias. En nuestro planeta, estas bacterias de tamaño mucho menor que las convencionales se conocían desde 1990, y hoy en día nadie las pone en duda desde la publicación en 2016 por el grupo de Jillian Banfield de un artículo fundamental en el campo de la biodiversidad bacteriana. De hecho, si existieran microorganismos en Marte u otro entorno

extraterrestre, su tamaño no tendría por qué ser similar al de los terrícolas: sus requerimientos bioenergéticos y grado de complejidad molecular podrían resultar muy diferentes, lo que repercutiría en su volumen y masa óptimos.

En paralelo, McKay descubrió además que las estructuras con morfología aparentemente de nanobacterias filamentosas en el ALH84001 contienen magnetita: un óxido de hierro (Fe_3O_4) nunca antes detectado en un meteorito, que además aparecía en forma de nanocristales cuya simetría hexagonal y disposición alineada eran muy similares a los que biosintetizan y acumulan en su interior las bacterias magnetotácticas terrestres. Pero esos cristales también se pudieron fabricar después en otros laboratorios, en ausencia de procesos biológicos. No constituían, por tanto, un biomarcador. Así, los argumentos a favor de la existencia de vida pasada en Marte basados en este meteorito han ido perdiendo mucha fuerza, aunque el tema aún no está cerrado por completo y podría dar sorpresas en el futuro.

En cualquier caso, el ALH84001 supuso un hallazgo clave para relanzar el interés por la búsqueda de vida extraterrestre, un espaldarazo a los planes norteamericanos para la exploración robótica del planeta rojo... y un estímulo adicional para el propio origen del Instituto de Astrobiología de la NASA. Pasado el tiempo, merece la pena contemplar de cerca esta roca marciana como parte de la extraordinaria colección de meteoritos del Museo Nacional de Historia Natural de Washington, administrado por el Smithsonian Institute, que además contiene otras piezas de enorme interés científico como los estromatolitos más antiguos encontrados en nuestro planeta y algunos de los fósiles que mejor nos hablan de la evolución de la vida terrestre.

AGUA LÍQUIDA EN EL MARTE ACTUAL

Como se indicaba anteriormente, en la década de 1970 las sondas *Mariner* y *Viking* de la NASA ya enviaron imágenes de lo que parecían ser antiguos lechos de ríos, lagos, cañones o deltas. Por su parte, los orbitadores lanzados posteriormente han permitido elaborar mapas más detallados, globales y locales, de la topografía marciana. El origen más probable de buena parte de los accidentes geográficos que muestra Marte está en que el agua líquida abundaba sobre el planeta en su pasado remoto, y durante aquella época de clima templado los ciclos hidrológicos se producían allí de forma análoga a como entonces lo hacían (y hoy lo hacen) en la Tierra. Así, la investigación astrobiológica llevada a cabo por las agencias espaciales desde finales del

siglo XX ha obedecido a la idea de seguir el agua, como antesala de la vida. Varias de las misiones que hemos comentado (incluidas las *Viking*, *Mars Odyssey*, *Spirit*, *Opportunity* y *MRO*) fueron exitosas en la detección de hielo de agua bajo la superficie de Marte, en las latitudes polares y medias investigadas. Por eso hemos oído y leído tantas veces que «se ha encontrado agua en Marte», algo que, más allá de las bromas sobre la escasa novedad de la recurrente noticia, supone hoy en día una realidad incuestionable.

De hecho, utilizando datos de *Mars Odyssey* y *MRO*, a finales de 2019 se publicó que en algunas zonas de la región de Arcadia Planitia (al suroeste del lugar de amartizaje de *Phoenix*) existen depósitos de hielo de agua muy poco profundos, a tan sólo 30 cm bajo el suelo, por lo que según sus descubridores las futuras misiones tripuladas «no necesitarían una retroexcavadora para desenterrarlo, sino sólo una pala». Además, en diferentes lugares de Marte se han caracterizado rocas o minerales hidratados, entre ellos sulfatos, carbonatos, hidróxidos y silicatos. Todo ello ha permitido confirmar que el agua fluyó por el planeta y se acumuló en su gran océano del hemisferio norte, además de en numerosos lagos en el sur, entre hace aproximadamente 4000 y 3500 Ma. Por tanto, quizás la vida pudo originarse en Marte más o menos en la misma época que en la Tierra, y sería potencialmente detectable si dejó algún tipo de fósil (molecular o morfológico) allí. No hay ninguna evidencia de ello, pero tampoco hay nada que lo impida.

Por su parte, la existencia de vida actual en Marte requeriría la presencia de agua líquida ahora mismo, mientras el lector tiene este libro en sus manos. ¿Es esto posible? Las opciones para que en el planeta rojo haya agua líquida en la actualidad cobraron relevancia a partir de 2015, cuando *MRO* analizó la morfología y reflectividad de las marcas descendentes y señales de escorrentía presentes en los bordes de un buen número de cráteres. Algunas de ellas aumentaban de brillo durante los veranos marcianos, con temperaturas que en latitudes ecuatoriales pueden llegar hasta los +20 °C en las superficies más expuestas al Sol a mediodía. Por ello se postuló que estarían producidas por agua con alto contenido salino (lo que se llama «salmuera» cuando la concentración total de sales es mayor del 5 %), que se fundía a esa temperatura y fluía durante un corto período de tiempo... hasta que al caer la noche quedaba de nuevo congelada o absorbida por el regolito. En concreto, el instrumento *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometers for Mars* (*CRISM*) de este orbitador encontró señales de sales hidratadas en dichas marcas, fundamentalmente cloratos y percloratos, lo que apoyaba que el flujo actual de salmueras era el responsable de ellas.

Pero la evidencia más directa de que hoy en día hay agua líquida en Marte no llegó hasta 2018, en lo que ha supuesto el hallazgo más importante y mediático del orbitador *Mars Express* de la ESA. Tal hito se produjo el 25 de julio de ese año, cuando un grupo de investigadores coordinado por Roberto

Orosei, del Instituto Nacional de Astrofísica de Italia, publicó en la revista *Science* que las señales o «ecos» obtenidos por el radar de penetración de su instrumento *Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding* (*MARSIS*) en 29 sobrevuelos realizados por *Mars Express* entre 2012 y 2015, reanalizados tras una modificación en el *software* que se estaba utilizando, eran compatibles con la existencia de una gran masa de agua líquida de hasta 20 km de diámetro y un espesor de al menos 1 m. La señal se había localizado en la latitud 81° S, dentro de la región Planum Australe del polo sur marciano. Y llegaba al orbitador desde una profundidad de 1,5 km, lo que en dicha zona corresponde a la interacción entre la superficie rocosa del planeta y el casquete permanente de hielo de agua. Ese hielo de agua, a su vez, está cubierto en su parte superior por una capa de hielo de dióxido de carbono durante los inviernos, en los que se puede llegar hasta los -120 °C.

Se ha estimado que tal masa de agua subglacial está a unos -68 °C: entonces, ¿cómo puede encontrarse en estado líquido? La explicación más plausible es que contendrá una concentración muy alta de percloratos y otras sales de sodio, magnesio y calcio (que han sido previamente detectadas en el suelo marciano por la *Phoenix*), lo que permitiría que el agua no se congele a esa temperatura. Es el efecto que conocemos como «descenso crioscópico». La concentración de tal salmuera podría ser menor si su temperatura no fuera realmente tan baja, a lo que podría contribuir algún flujo residual de actividad geotérmica en el planeta o la propia presión ejercida por el kilómetro y medio de hielo que tiene por encima. No obstante, debido a que las señales de radar son difíciles de interpretar, pues dependen mucho de la temperatura y composición del subsuelo, la reflexión detectada también podría estar producida por algún tipo de barro muy húmedo, o incluso por rocas porosas infiltradas con agua. En cualquier caso, aquella era (y sigue siendo) la primera evidencia de agua líquida presente actualmente en el planeta. Muchos medios de comunicación lo describieron como el hallazgo de un gran lago subterráneo, aunque en realidad la palabra «lago» no aparece en ningún lugar del artículo original. Pero era difícil resistirse a usar este término tan familiar para todos.

La presencia de agua fundida bajo los casquetes polares de Marte ya se había hipotetizado tres décadas antes, por analogía a los cerca de cuatrocientos lagos que se conocen en nuestro planeta bajo el hielo de la Antártida (entre ellos el famoso lago Vostok, situado bajo más de 3 km de hielo) o de algunas zonas del Ártico. Además, esto plantea interesantes similitudes con las masas de agua líquida que existen bajo la corteza helada de Europa, Encélado y otras lunas del Sistema Solar exterior que denominamos «mundos oceánicos». Así, su descubrimiento en el planeta rojo por *Mars Express* no sólo supuso un gran éxito para la ciencia europea (en este caso, particularmente la italiana) sino que permitió volver a soñar con la

posibilidad de que actualmente vivan microorganismos extremófilos en el subsuelo húmedo de Marte.

De hecho, cuando el investigador principal de este artículo fue preguntado por la posibilidad de que haya algún tipo de vida microbiana en esas aguas, a pesar de sus condiciones realmente extremas en cuanto a temperatura y salinidad, dijo: «La respuesta corta es sí». En esa afirmación va implícito el hecho de que en diferentes lagos subglaciales de nuestro planeta, tanto de agua dulce como salada, se han podido detectar y caracterizar comunidades microbianas que mantienen ecosistemas aislados de la atmósfera, en oscuridad total, con escasez de nutrientes y a temperaturas por debajo de los -10°C . Lógicamente, otros científicos no tienen tan claro que esto sea viable en Marte, y para algunos es totalmente imposible que la vida exista actualmente en el planeta rojo. Estas discrepancias son las que permiten avanzar a la ciencia, y quizá algún día se sepa quién estaba en lo cierto. Además, teniendo en cuenta que *MARSIS* aún sólo ha explorado el 10 % del polo sur del planeta, este hallazgo sugiere que en Marte podría existir una red de acuíferos bajo la superficie, tal vez incluyendo otros a latitudes menores, lo que ha dado alas a las propuestas para realizar perforaciones que permitan llegar a ellos en el futuro. Pozos. Agua bajo el desierto. La belleza escondida de la que nos hablaba *El Principito* al comienzo de este capítulo.

Los descubrimientos de *Mars Express* sobre el agua en Marte han continuado. Las espectaculares imágenes que este orbitador tomó en diciembre de 2018 del cráter de impacto Korolev, situado cerca del polo norte marciano (y nombrado en honor de Serguéi P. Koroliov, padre de la cosmonáutica), permitieron calcular que en sus 80 km de diámetro se acumula, llenándolo por completo y formando sobre él una inmensa cúpula congelada, una masa de unos 2220 km^3 de hielo de agua. Esto está permitiendo avanzar sobre el cálculo de las reservas hídricas que tiene el planeta, lo que resultará muy útil cuando se planteen misiones tripuladas, o si algún día se pretende establecer colonias estables allí.

EL MISTERIO DEL METANO Y EL OXÍGENO EN LA ATMÓSFERA MARCIANA

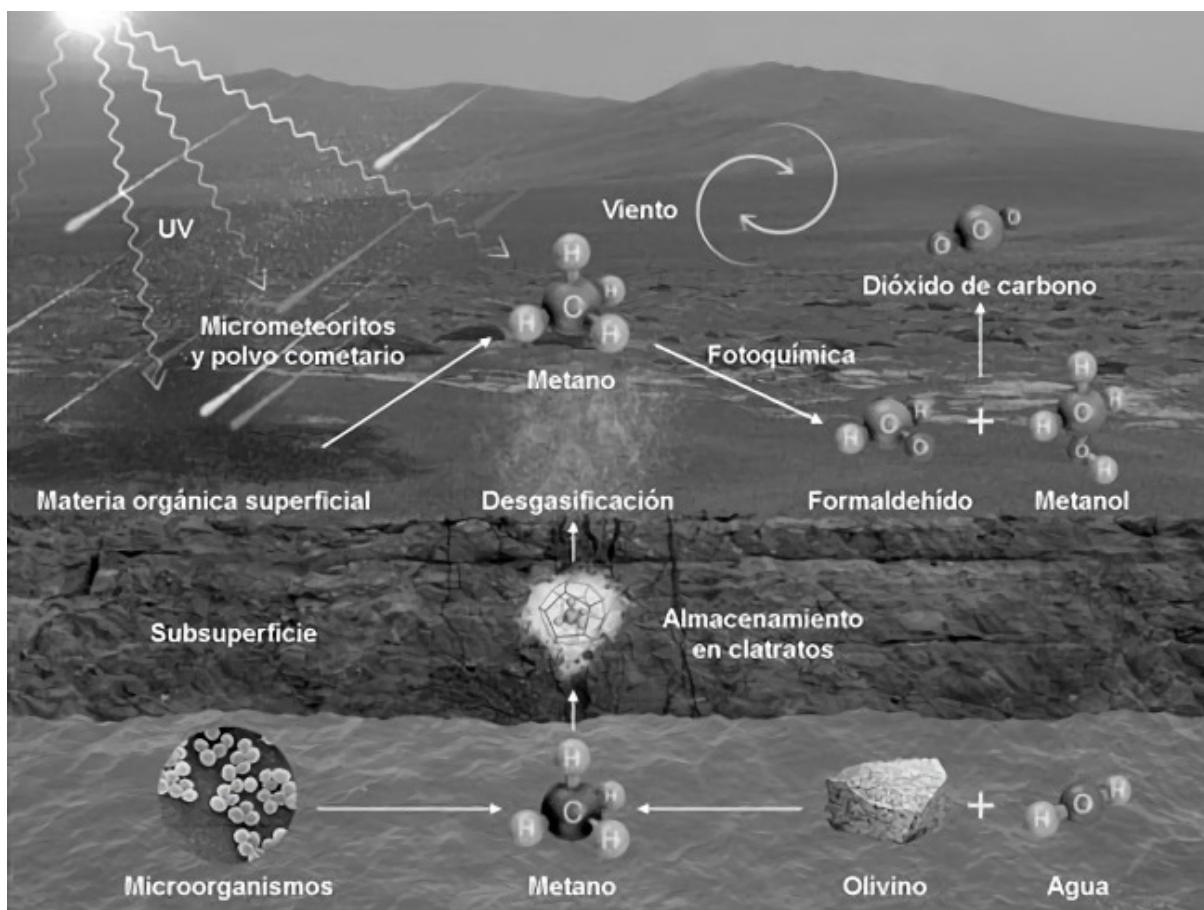
Una ventaja de la larga y productiva vida útil que está teniendo el rover *Curiosity* sobre el planeta rojo es que ha permitido analizar *in situ* la presión y composición de su atmósfera, formada básicamente por dióxido de carbono, a

lo largo de las estaciones de tres años marcianos (equivalentes a unos seis terrestres). Así, el instrumento *REMS* ha determinado que la presión atmosférica fluctúa entre 730 Pascales (Pa) en invierno y 900-920 Pa al final de la primavera y comienzo del verano (por comparación, recordemos que la presión atmosférica media al nivel del mar en la Tierra es de 101 325 Pa, equivalente a 1 bar). Esta fluctuación estacional se debe a la sublimación del dióxido de carbono: en invierno pasa de gas a sólido y se deposita sobre los casquetes polares, rebajando la presión atmosférica y desencadenando una distribución global del aire, mientras que el proceso opuesto se produce cuando se incrementa la temperatura superficial al final de la primavera. Además, *REMS* ha permitido analizar a lo largo de los años la humedad relativa del aire, la dirección e intensidad del viento, la temperatura del aire y el suelo, y los niveles de la radiación ultravioleta que llega a la superficie.

Por su parte, uno de los instrumentos que forman la *suite SAM* de *Curiosity* ha determinado que la composición media anual de la atmósfera marciana en el cráter Gale es 95,1 % de dióxido de carbono, 2,6 % de nitrógeno molecular, 1,9 % de argón (Ar), 0,16 % de oxígeno molecular (O_2), 0,06 % de monóxido de carbono (CO) y trazas de otros compuestos. La concentración de algunos de los gases minoritarios fluctúa hasta en un 40 % a lo largo del año, y se ha podido determinar que las variaciones del nitrógeno y el argón correlacionan con los cambios globales de presión, aunque mostrando un cierto desfase que corresponde a su tiempo de mezcla en la atmósfera. Pero lo más interesante en relación con la posibilidad de que exista vida en Marte tiene que ver con dos moléculas que nos resultan muy familiares: el metano (CH_4) y el oxígeno.

El metano es el hidrocarburo más sencillo y se encuentra en estado gaseoso a temperaturas mayores de $-162^{\circ}C$, a la presión atmosférica terrestre. En la Tierra se genera fundamentalmente mediante procesos biológicos, en concreto por la actividad metabólica de arqueas metanógenas anaerobias: cerca de 60 especies que pertenecen a clases taxonómicas con nombres tan clarificadores como *Methanobacteria*, *Methanococci*, *Methanomicrobia* o *Methanopyri*. Pero el metano que se emite a la atmósfera (en nuestro planeta o en Marte) también puede tener un origen geológico, por ejemplo a partir de reacciones conocidas como «serpentización», que se producen en surgencias hidrotermales (actuales en la Tierra, o en el pasado del planeta rojo): el olivino (silicato de hierro y magnesio) u otros silicatos se hidrolizan, generando serpentina (hidroxisilicato de magnesio, u otros minerales relacionados), magnetita (un tipo de óxido de hierro del que ya hemos hablado) e hidrógeno molecular (H_2); si el medio es rico en dióxido de carbono (como precisamente ocurre en entornos hidrotermales), éste se puede combinar con el hidrógeno molecular producido, generando metano y agua.

Además, en Marte la radiación ultravioleta solar puede reaccionar con la materia orgánica depositada en la superficie por micrometeoritos o polvo cometario, produciendo metano.



Possibles mecanismos de producción (biológica o abiótica), almacenamiento, liberación y degradación del metano en el subsuelo, la superficie y la atmósfera de Marte. Imagen cortesía de NASA/JPL-Caltech disponible en Wikimedia Commons, modificada por el autor.

Una vez sintetizada (biológica o geológicamente), cada molécula de metano liberada a la atmósfera tiene una duración de varios siglos antes de ser destruida fotoquímicamente por la radiación solar hasta generar CO₂, y no se conocen mecanismos que eliminen rápidamente este gas. Lo que sí puede ocurrir es que el metano generado (por una u otra vía) en el subsuelo quede atrapado en clatratos de gas: estructuras formadas por moléculas de agua congelada, enlazadas entre sí mediante enlaces de puentes de hidrógeno, que retienen un compuesto gaseoso (en este caso, el metano) en sus cavidades, pudiendo liberarlo bruscamente al sufrir cambios de presión o temperatura. Por tanto, el metano detectado actualmente en Marte podría haberse originado en un pasado más o menos remoto.

Repasados estos conceptos, podemos plantear dos preguntas clave: ¿se ha detectado metano en la atmósfera de Marte?, y, si es así, ¿su origen sería biológico? La primera cuestión nos lleva a una interesante y contradictoria

historia de descubrimientos. A partir de 1999, las observaciones desde telescopios terrestres indicaron una ínfima concentración de metano en la atmósfera marciana: 10 moléculas de este compuesto por cada mil millones (10^9 , a lo que se llama «un billón» en los países anglosajones, mientras que en Europa continental un billón son un millón de millones, 10^{12}) de moléculas totales de gas en un volumen determinado, es decir, 10 partes por billón (anglosajón) en volumen (ppbv). Determinaciones posteriores ampliaron el rango a entre 0 y 50 ppbv. Por comparación, la concentración de metano en la atmósfera terrestre es actualmente de unos 1800 ppbv. En 2004, el instrumento *Planetary Fourier Spectrometer (PFS)* de *Mars Express*, que como dijimos orbita el planeta rojo desde finales del año anterior, midió valores de 0-30 ppbv. Hasta ahí, todo normal dentro de una variabilidad tan alta.

Casi una década más tarde, concretamente el 15 de junio de 2013, la *SAM* de *Curiosity* detectó un pico puntual de 6 ppbv durante su recorrido por el cráter Gale, frente a los niveles habituales medidos por este instrumento, que habían sido siempre menores de 1 ppbv. Esto suponía la primera evidencia de una acumulación transitoria de metano a nivel del suelo, en concreto a una altura de aproximadamente 1 m sobre la superficie del planeta. El día siguiente, como se pudo determinar años después, *Mars Express* también había medido la presencia de este gas, en su caso a 15 ppbv. Tras dicho pico puntual, el metano se dejó de detectar por ambos instrumentos. La rápida desaparición de este gas es difícil de explicar, salvo que fuera consumido por procesos de absorción en rocas... o bien por microorganismos metanotróficos análogos a los que en nuestro planeta lo utilizan para su metabolismo. De hecho, en ninguna otra medición realizada por *Mars Express* entre 2012 y 2014 se detectó metano. El misterio estaba servido.

Durante los años siguientes, *Curiosity* detectó variaciones estacionales de metano entre tan sólo 0,2 y 0,7 ppbv. Por su parte, los instrumentos *Nadir and Occultation for Mars Discovery (NOMAD)* y *Atmospheric Chemistry Suite (ACS)* del orbitador *ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO)*, que como hemos comentado es el analizador de gases más sensible que opera en Marte desde 2017 (con un límite de detección de 0,05 ppbv), nunca han confirmado la presencia de esta molécula y tampoco han detectado formaldehído (HCHO, que se originaría como producto de su degradación fotoquímica). Pero, para sorpresa de todos, durante la noche del 9 de junio de 2019 la *SAM* de *Curiosity* volvió a «oler» metano a nivel del suelo, y además con el pico más alto medido hasta el momento: 21 ppbv. Sin embargo, ni *Mars Express* ni *TGO* detectaron dicho compuesto al sobrevolar el cráter Gale el día siguiente. ¿Qué está ocurriendo con el metano en el planeta rojo? Aún no lo sabemos, y ésa es una de las preguntas actualmente más interesantes en el campo de la astrobiología. Se han ido proponiendo modelos meteorológicos de circulación

atmosférica para intentar explicar el transporte y la mezcla del metano sobre este cráter, en los que se considera que la velocidad de destrucción de dicha molécula podría ser mayor que en la Tierra, o bien que se reabsorba rápidamente por las rocas marcianas.

Por su parte, la segunda cuestión que planteábamos tiene una respuesta más sencilla. Si se detectara inequívoca y repetidamente metano en Marte podríamos comenzar a aventurar su origen, gracias sobre todo a la capacidad analítica de *TGO*: la presencia simultánea de otros hidrocarburos sencillos como etano (C_2H_6) o propano (C_3H_8) apoyaría su origen biológico, mientras que si aparece junto a gases como el dióxido de azufre (SO_2) sería probablemente el producto de procesos geológicos. En cualquier caso, harán falta más investigaciones que incluyan el análisis de la composición isotópica del metano, algo para lo que sí está capacitado el instrumento *NOMAD* de *TGO*, pues puede diferenciar entre isótopos del carbono y también entre hidrógeno y deuterio (D), en variantes de la molécula como $^{12}CH_4$, $^{13}CH_4$ y $^{12}CH_3D$. Además, lógicamente, antes de poder afirmar algo tan extraordinario como la existencia de vida metanogénica y/o metanotrófica en el planeta rojo sería necesario caracterizar esos microorganismos eventualmente responsables. El misterio continúa.

Antes de poder llegar a responder estas preguntas, a finales de 2019 se planteó otra también de mucho calado, al publicarse que la *SAM* de *Curiosity* ha medido fluctuaciones estacionales y anuales de oxígeno molecular sobre la superficie del cráter Gale, y que sorprendentemente éstas no siguen el mismo patrón que las de nitrógeno y argón comentadas anteriormente. En concreto, se ha detectado que la concentración de oxígeno es hasta un 30 % más alta de lo previsto (en función de la concentración de otros gases) durante la primavera y el verano marcianos, mientras que resulta menor de lo esperado durante el invierno. Además, tales medidas muestran variabilidad a lo largo de los tres últimos años marcianos. Y un dato adicional: se ha visto que durante los veranos y otoños marcianos parece existir una correlación entre las fluctuaciones en oxígeno y en metano.

Las causas que pueden estar detrás (o, mejor dicho, debajo) de estas variaciones en la concentración de oxígeno todavía se desconocen, y de nuevo podrían ser biológicas, atmosféricas o geológicas. Entre las primeras, para los aumentos y disminuciones de este gas habría que pensar en metabolismos microbianos (que si fueran equivalentes a los de nuestro planeta resultarían similares a la fotosíntesis oxigénica y la respiración aerobia, respectivamente), hipótesis para la que de momento no hay ninguna prueba a favor. La explicación atmosférica del aumento de concentración de oxígeno iría en la línea de la fotolisis (ruptura producida por la radiación solar de alta energía) del dióxido de carbono o del vapor de agua, aunque la primera

molécula resulta demasiado estable y la segunda no se encuentra en la concentración suficiente en la atmósfera marciana. Por último, las causas geoquímicas podrían implicar la producción de oxígeno a partir del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y los percloratos presentes en el suelo marciano, debido a las temperaturas relativamente más altas de finales de primavera y del verano. En cualquier caso, aún no se ha confirmado por *TGO* que estas extrañas variaciones en los niveles de oxígeno se detecten de forma global en la atmósfera del planeta.

Una vez más, ante temas como éstos hemos de ser muy cautos, independientemente de lo que podamos leer en titulares de prensa y redes sociales, o incluso de lo que *nos gustaría* que estuviera ocurriendo actualmente en Marte. A día de hoy no existe ninguna evidencia que apunte hacia la presencia de microorganismos (metanogénicos, metanotróficos, fotosintéticos, respiratorios... o con cualquier otro tipo de metabolismo, similar o no a los terrestres) activos en el planeta rojo, mientras que sí conocemos los procesos atmosféricos y geoquímicos que podrían originar y consumir estos gases fluctuantes que tanto llaman nuestra atención.

2020: VOLVEMOS A MARTE

En el contexto de las muchas preguntas y algunas respuestas que hemos estado comentando a lo largo de este capítulo, en 2020 el afán de los humanos por explorar nos lleva de nuevo a Marte. Por primera vez en la historia, estaba previsto que la ventana de lanzamiento que se abre a mediados de julio fuera aprovechada por los cuatro protagonistas actuales de la carrera espacial: la NASA, la ESA junto a Roscosmos (en una misión que finalmente se ha pospuesto para ser lanzada en 2022) y la agencia espacial china (CNSA). Además, se suma un país cuya fortaleza económica le ha permitido dar su primer paso hacia la exploración planetaria: los Emiratos Árabes Unidos. Las misiones norteamericana, china y emiratí llegarán aproximadamente a la vez, por lo que entre febrero y marzo de 2021 se espera más tráfico en el espacio aéreo de Marte que en algunos aeropuertos españoles.

La misión de la NASA, dentro de su programa Flagship, se llama *Mars2020*: la más ambiciosa en la historia de la exploración robótica del Sistema Solar. En marzo de 2020 se comunicó el nombre del correspondiente *rover* tras una votación realizada por internet en todo el mundo, a partir de las nueve palabras que habían resultado finalistas en un concurso entre

estudiantes norteamericanos. La denominación ganadora fue *Perseverance*, propuesta por Alex Mather, de 13 años y natural del estado de Virginia. El vehículo que va a perseverar en la investigación de Marte es un robot de 1025 kg (algo más masivo que *Curiosity* aunque con un diseño similar), que se posará sobre el planeta el 18 de febrero de 2021 utilizando el mismo sistema de amartizaje que funcionó perfectamente con su predecesor. Llegará al cráter Jezero, de 49 km de diámetro, situado en el borde oeste de Isidis Planitia (a latitud 18° N) y que estuvo cubierto por el agua hace 3500 Ma. Esta zona siempre ha sido muy deseada como destino de la exploración, y de hecho no está lejos del lugar donde debería haber amartizado suavemente la sonda *Beagle 2* a finales de 2003. Su objetivo principal es caracterizar los procesos que formaron y modificaron el entorno geológico de un antiguo delta fluvial, para determinar su habitabilidad pasada y buscar materiales con elevado potencial para preservar biomarcadores. De hecho, el espectrómetro *CRISM* del *MRO* ya ha detectado la presencia de carbonatos y arcillas muy antiguas en esa zona. Por tanto, se estima que *Perseverance* (o, como ya se le conoce coloquialmente, «*Percy*») podría llegar a identificar evidencias de vida pasada: microfósiles o incluso estromatolitos que nos hablaran de comunidades microbianas activas durante la infancia del planeta. Además, tiene previsto recoger muestras del terreno para que sean traídas a la Tierra por misiones posteriores, como comentaremos más adelante, y recabar datos sobre los recursos naturales y los peligros potenciales para una futura exploración humana de Marte.

Para conseguir estos objetivos, la carga útil de *Perseverance* es la más compleja y sofisticada que se haya enviado nunca al planeta rojo, y está alojada en un vehículo más robusto que *Curiosity* y dotado de mayor capacidad de navegación autónoma, que podrá recorrer unos 200 m cada día. Los siete instrumentos científicos principales, que incluyen veintitrés cámaras, están situados tanto en el cuerpo del vehículo como en el extremo de su brazo robótico: i) el sistema de cámaras panorámicas y estereoscópicas *Mastcam-Z*, que por primera vez incorpora un *zoom*, con el que además de guiar las operaciones del *rover* mediante fotografías y vídeos se puede estudiar a distancia la mineralogía del terreno; ii) *SuperCam*, una *suite* de instrumentos que proporcionará imágenes, analizará la composición y mineralogía de los materiales, e informará sobre la presencia de moléculas orgánicas en los suelos o rocas a los que apunte; iii) el espectrómetro Raman con excitación por láser ultravioleta *Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics and Chemicals (SHERLOC)*, que como indica su acrónimo realizará una labor detectivesca para determinar la mineralogía local de las muestras y para detectar los posibles materiales orgánicos que existan en ellas, incluyendo algunas biomoléculas y sus productos de degradación; iv) el espectrómetro de rayos X *Planetary*

Instrument for X-ray Lithochemistry (PIXL), para analizar con gran sensibilidad la composición elemental de los materiales estudiados; v) el radar de penetración *Radar Imager for Mars' Subsurface Exploration (RIMFAX)*, que investigará la estructura geológica del subsuelo a escala centimétrica; vi) un sistema experimental para producir oxígeno a partir del dióxido de carbono atmosférico, llamado *Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE)*, con el que se evaluará la posibilidad de generar un gas respirable en compartimentos cerrados durante la futura exploración humana del planeta; vii) la estación medioambiental *Mars Environmental Dynamics Analyzer (MEDA)*, diseñada y construida en el Centro de Astrobiología (incluyendo elementos fineses y estadounidenses) a partir de sus antecesoras *REMS* y *TWINS*, y que aloja sensores de temperatura del suelo y el aire, presión atmosférica, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, así como del tamaño y forma de las partículas de polvo... a los que incorpora un elemento muy innovador y sugerente: la cámara *SkyCam*, destinada a observar exclusivamente el cielo y las nubes de Marte.

Finalmente, a medio camino entre el avance tecnológico y la repercusión mediática (algo que la NASA siempre tiene muy presente) este *rover* llevará un pequeño helicóptero, llamado *Ingenuity* pero con un cometido muy ambicioso: ser el primero que vuela en un entorno extraterrestre. Tras cuatro años de desarrollo en el *JPL* y de pruebas en cabinas a baja presión, se llegó a la conclusión de que el mejor diseño para conseguir la sustentación necesaria de los 1,8 kg de este «marscóptero» en una atmósfera con menos de un 1 % de densidad respecto de la terrestre requería dos hélices contrarrotatorias de 1,21 m de diámetro. Cada una de ellas tendrá dos palas y girará a unas 3000 revoluciones por minuto, 30 veces más rápido que los helicópteros que vuelan en nuestro planeta. Este dron pionero, que irá alojado en la parte inferior del *Perseverance* hasta su llegada a la superficie del planeta, tiene previsto demostrar la viabilidad de la tecnología realizando hasta 5 vuelos de forma autónoma, de entre 30 y 90 segundos cada uno. *Ingenuity* no contendrá instrumentos científicos pero sí paneles solares, baterías y una cámara de alta resolución: las fotografías «a vista de pájaro» que nos mande marcarán sin duda otro hito en la historia de la exploración planetaria. Si pudieran verlas, el argentino Raúl Pateras de Pescara y el español Juan de la Cierva estarían orgullosos de lo lejos que ha llegado el autogiro.

Además de Estados Unidos, en esta obra que se va a representar sobre la superficie del planeta rojo no podía faltar China, a través de su agencia CNSA. Como se comentó en el capítulo anterior, el programa espacial de este país asiático es realmente ambicioso y hasta ahora ha tenido a la Luna como objetivo principal, no sólo por su interés científico y económico sino también como terreno de pruebas para llegar a Marte. A pesar de que la CNSA está muy por detrás de la NASA en cuanto a tecnología y presupuesto (unos 6000

millones de dólares anuales, frente a 40 000, según los datos disponibles) cuenta con el apoyo total del Gobierno y de su poderoso aparato de propaganda, por lo que los logros que va obteniendo suponen un motivo de gran orgullo nacional. De hecho, aunque esto no suele tener mucho eco en los medios de comunicación occidentales, China fue el país que más lanzamientos de misiones espaciales realizó durante 2018 y 2019.



Representación artística del *rover Perseverance* de la misión *Mars 2020* de la NASA sobre la superficie del cráter Jezero, en Marte, avanzando hacia el lector. En primer plano aparece su complejo brazo robótico, y a mitad de altura del mástil se observan, en disposición horizontal, los sensores de viento del instrumento *MEDA*. Imagen cortesía de NASA/JPL-Caltech.

Así, en verano de 2020, tan solo trece años después de haber llegado a la Luna, China enviará su primera misión a Marte. Se llama *Tianwen 1*, un nombre que podría traducirse como «preguntas al cielo» o «preguntas a la verdad celestial» y está tomado del título de un largo poema escrito en el siglo IV antes de nuestra era por Qu Yuan. De hecho, *Tianwen* es la denominación elegida para todas las misiones planetarias futuras de la CNSA, a Marte u otros planetas, de la misma forma que ya se llaman *Chang'e* las que tienen la Luna como destino. *Tianwen 1* está formada por un orbitador, un módulo aterrizador y un pequeño *rover*. El primero lleva un radar de penetración, un espectrómetro infrarrojo, un magnetómetro y un sensor de partículas, así como cámaras de media y alta resolución. El aterrizador se posará probablemente sobre la región de Utopia Planitia, cerca del imponente Elysium Mons y casi a mitad de camino entre los lugares donde amartizaron la *Viking 2* e *InSight*. De él descenderá un *rover* con seis ruedas y alimentado

por paneles solares. Tiene una masa de 240 kg y es relativamente sencillo, aunque cuenta con varios instrumentos muy informativos, entre ellos un espectrómetro de plasma inducido por láser (*LIBS*), un espectrómetro infrarrojo, un radar, un magnetómetro, un microscopio, una estación meteorológica y una cámara de alta resolución.

Según adelantábamos, otro país se incorpora a la carrera espacial y a la fiebre de este «verano marciano»: los Emiratos Árabes Unidos. El primer intento del mundo árabe en llegar al planeta consistirá en un orbitador relativamente sencillo y de fabricación fundamentalmente norteamericana, llamado *Al Amal* o en inglés *Hope* (es decir, muy significativamente, «Esperanza») aunque también se conoce como *Emirates Mars Mission (EMM)*. Esta sonda, a la que el país ha dedicado un generoso presupuesto a través del Centro Espacial Mohammed bin Rashid y que despegará desde Japón, tiene como objetivo el estudio de las variaciones diarias y anuales en la estructura y composición de la atmósfera marciana. Para ello contará con tres instrumentos: un espectrómetro infrarrojo, otro ultravioleta y una cámara en el rango ultravioleta-visible. Con todo, si las tres misiones se desarrollan según lo previsto, en el primer trimestre de 2021 podremos decir que esta vez sí: la Tierra habrá conquistado Marte.

EL ESPERADO REGRESO DE EUROPA AL PLANETA ROJO

La apuesta europea para 2022 (tras haber sido retrasada en varias ocasiones, la última de ellas en 2020) es la misión *ExoMars*, que supondrá la segunda fase del programa de colaboración entre la ESA y Roscosmos iniciado con el lanzamiento del *ExoMars Trace Gas Orbiter* en 2016. Sus objetivos generales son muy ambiciosos, e incluyen la posible detección de señales de vida pasada, el estudio de la distribución del agua en el subsuelo, la identificación de los eventuales riesgos para la exploración humana, y la adquisición de experiencia para un futuro programa de retorno de muestras. La misión constará de una etapa de crucero de la que se desprenderá el módulo de descenso, cuya velocidad se reducirá rápidamente mediante aerofrenado, dos paracaídas consecutivos (que no funcionaron correctamente en los ensayos realizados durante 2019, principal motivo por el cual la misión se retrasó de 2020 a la ventana de lanzamiento de agosto-octubre de 2022) y retrocohetes. Por tanto, si todo va bien, en 2023 una misión liderada por la ESA llegará por primera vez de forma controlada a la superficie de Marte. A falta de

confirmación definitiva, amartizará en la región de Oxia Planum, junto a la desembocadura de Ares Vallis y muy cerca de la zona que recorrió el *rover* pionero *Sojourner* en 1997. Allí se posará el aterrizador ruso *Kazachok*, cuyo nombre significa «pequeño cosaco» y además corresponde a una danza popular del país. Este módulo contendrá una carga útil de 45 kg compuesta por trece instrumentos científicos para analizar la dinámica atmosférica, el suelo y subsuelo del planeta, su meteorología y sismología. Además, llevará varias cámaras que permitirán monitorizar su descenso y caracterizar el entorno.

Pero lo más prometedor de esta misión es que desde *Kazachok* va a descender el primer *rover* europeo en llegar a Marte. Su nombre (elegido a comienzos de 2019 entre las 36 000 propuestas que se recibieron desde todos los Estados miembros de la ESA) es muy adecuado: *Rosalind Franklin*, en recuerdo a la química y cristalógrafa inglesa cuyos resultados experimentales fueron clave para descubrir la estructura en doble hélice del DNA, y que en su época nunca fue reconocida. Por tanto, un estupendo titular de prensa dentro de unos años podría ser que *Rosalind Franklin* ha encontrado evidencias de vida en Marte.

Este vehículo, más pequeño y mucho menos complejo que los actuales de la NASA, tendrá seis ruedas e irá alimentado por paneles solares. Su masa será de 310 kg y contendrá diez instrumentos principales, de los cuales los tres primeros forman parte del *Pasteur Analytical Laboratory* (haciendo en esta ocasión homenaje a Louis Pasteur, uno de los científicos franceses más relevantes de la historia): i) el instrumento *Mars Organic Molecule Analyser* (*MOMA*), que investigará la presencia de moléculas orgánicas, biomoléculas y desbalances entre formas quirales L y D que puedan ser marcadores de vida pasada, utilizando una tecnología similar a la que está funcionando en *SAM* de *Curiosity*: las muestras recogidas del suelo se calientan hasta 1000 °C (o bien, en este caso, se extraen mediante desorción inducida por láser), y las moléculas volátiles que pasan a fase gas se identifican con un *GC/MS*; ii) el espectrómetro visible-infrarrojo *MicrOmega-IR*, que permitirá caracterizar la composición y textura de los minerales presentes en las muestras analizadas, con el objetivo de trazar su origen geológico y postular el entorno ambiental en el que se formaron; y iii) el espectrómetro Raman miniaturizado *Raman Laser Spectrometer* (*RLS*), un instrumento desarrollado en nuestro país por la Unidad Asociada entre la Universidad de Valladolid, el Centro de Astrobiología y el INTA, que permitirá identificar con precisión las fases minerales presentes en las muestras y proponer escenarios (geológicos, o inducidos por alguna actividad biológica) para su origen, así como detectar moléculas orgánicas que puedan servir como biomarcadores de vida pasada.

Los demás equipos a bordo de *Rosalind Franklin* son: iv) las cámaras de alta resolución *PanCam*, situadas en la parte más alta de su mástil de 2 m de

altura, requeridas para la navegación del *rover*; v) el espectrómetro infrarrojo *Infrared Spectrometer for ExoMars (ISEM)*, que va situado junto a *PanCam* y se utilizará para caracterizar a distancia el entorno geológico; vi) un novedoso taladro que permitirá perforar hasta 2 m de profundidad en el subsuelo marciano, tomando muestras de 1 cm de diámetro y 3 cm de largo que podrán ser llevadas a los instrumentos del laboratorio Pasteur para su análisis: de cara a la posible detección de vida, esto supone la principal innovación de la ESA respecto a todos los *rovers* anteriores y al propio *Perseverance*; vii) la cámara de campo cercano *Close-up Imager (CLUPI)*, situada en la base de dicho taladro, que permitirá escoger y caracterizar los lugares exactos de perforación; viii) el espectrómetro infrarrojo miniaturizado *Mars Multispectral Imager for Subsurface Studies (MA-MISS)*, que va alojado dentro del taladro y estudiará la composición mineral y la estratigrafía del terreno; ix) el radar de penetración *Water Ice and Subsurface Deposit Observations on Mars (WISDOM)*, con el que se caracterizará la estratigrafía del terreno sobre el que circule el *rover*; y x) el espectrómetro de neutrones *ADRON-RM* para buscar hielo de agua y minerales hidratados bajo la superficie. Con todo ello, tras los retrasos acumulados durante la última década, esperemos que *Rosalind Franklin* dé muchas alegrías (y también una gran cantidad de trabajo en su recorrido por Marte) a centenares de científicos dentro y fuera de nuestro continente.



Recreación artística del *rover Rosalind Franklin* de la misión *ExoMars* de la ESA, avanzando sobre la superficie de Marte en el año 2023. Al fondo aparece el módulo aterrizador ruso *Kazachok*, del que habrá descendido el *rover* tras su llegada al planeta rojo. El cilindro vertical oscuro que contiene *Rosalind Franklin* en su parte frontal incluye el taladro con el que perforará el subsuelo marciano hasta 2 metros de profundidad, con el objetivo de tomar muestras que serán posteriormente analizadas por los instrumentos del *Pasteur Analytical Laboratory*. © ESA/ATG medialab.

EL RETO DE TRAER MUESTRAS DE MARTE

Volviendo a la estrategia que la NASA ha iniciado en 2020, además de los objetivos de *Perseverance* que ya hemos comentado este *rover* tiene previsto tomar durante su recorrido hasta 42 muestras del suelo marciano en pequeños contenedores, cerrarlos herméticamente y depositarlos sobre la superficie del cráter Jezero o cerca de su borde. Las porciones de regolito se extraerán utilizando una broca hueca, que permitirá recoger cilindros de material de aproximadamente 1 cm de diámetro y 5 cm de longitud (es decir, del tamaño de una pila AA convencional), con una masa estimada de 15 g cada uno, y se irán guardando en un carrusel. La idea es que durante los años siguientes otra misión robótica sea capaz de llegar hasta los lugares donde se hayan depositado dichas muestras, recogerlas y traerlas a la Tierra. Esto es fácil de escribir, incluso de dibujar, pero supone un reto de enorme complejidad para la ingeniería espacial. De hecho, aún hay muchas cuestiones sin resolver sobre ello. Lo que sí parece claro es que esta misión, por el momento llamada *Mars Sample Return (MSR)*, se desarrollará en colaboración con la ESA para aprovechar la experiencia de los científicos e ingenieros a uno y otro lado del Atlántico. Y, sobre todo, para repartir entre ambas agencias su elevado coste, asociado a la gran cantidad de material que habrá que llevar a Marte: cada kilogramo que se pone en el planeta rojo cuesta, de media, un millón de euros... y el proyecto *MSR* requiere dos sondas adicionales, además del propio *rover Perseverance*, que despegarán en 2026.

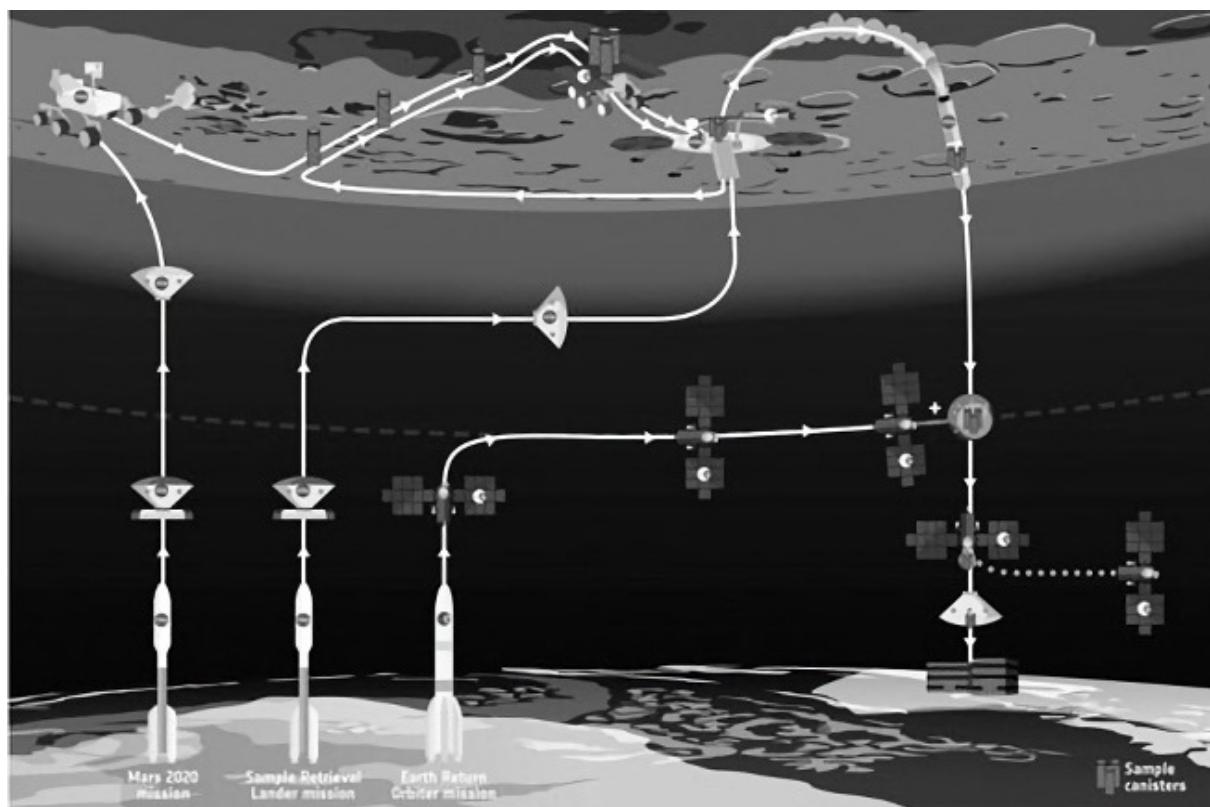
La primera de ellas, de la NASA y llamada *Sample Retrieval Lander (SRL)*, contendrá una etapa de crucero y un módulo de descenso. Este último, que aterrizará suavemente cerca del lugar donde le estén esperando las muestras, incluirá un pequeño cohete de una etapa (para el que la NASA maneja dos diseños diferentes) conocido genéricamente como *Mars Ascent Vehicle (MAV)*, así como un *rover* europeo relativamente sencillo llamado *Sample Fetch Rover (SFR)*. El vehículo con ruedas localizará y recogerá las muestras depositadas entre cinco y seis años antes por *Perseverance*,

llevándolas hasta el módulo de descenso. Una vez a su lado, el brazo robótico *Sample Transfer Arm (STA)* de dicho módulo recogerá las valiosas muestras, depositándolas en un contenedor esférico de 27 cm de diámetro y unos 10 kg de masa llamado *Orbital Sample (OS)*, que estará situado en un extremo del *MAV*. El cohete se pondrá entonces en posición vertical y despegará de Marte: una operación que como podemos imaginar es técnicamente muy complicada... y más aún al hacerse sin intervención humana *in situ*. En cualquier caso, resulta energéticamente menos costoso despegar desde allí que desde nuestro planeta, pues la intensidad del campo gravitatorio de Marte es el 38 % de la terrestre: sólo hace falta alcanzar una velocidad de 5 km/s para vencer esa atracción y salir del planeta, frente a la velocidad de escape de 11,2 km/s que necesitan los cohetes para soltarse del abrazo de la Tierra.

Una vez abandonada la superficie marciana, el contenedor *OS* con su preciosa carga se pondrá en órbita estable durante los primeros meses de 2029, y allí será capturado (lo que supone la maniobra más compleja de toda la misión) por la segunda sonda implicada en el proceso: el orbitador de la ESA *Earth Return Orbiter (ERO)*, que habrá llegado a Marte aproximadamente a la vez que la *SRL*. Una vez subido a bordo, el cofre del tesoro se introducirá en la cápsula *Earth Entry Vehicle (EEV)* y la *ERO* iniciará su singladura hacia la Tierra. Tiene previsto llegar a nuestro planeta y liberar el *EEV* en septiembre de 2031: tras su descenso controlado (y la correspondiente cuarentena que comentábamos al final del capítulo anterior) las tan esperadas muestras quedarán a disposición de los científicos. Por tanto, cuando comience la próxima década vamos a recibir la visita de una nave enviada desde Marte por una forma de vida inteligente. Esta vez sí será cierto. Y quizás lleguen marcianos a bordo. Sin duda, a H. G. Wells le habría encantado verlo.

Para añadir aún más presión a este ya de por sí complejísimo proyecto *MSR*, la NASA y la ESA se han visto espoleadas desde mediados de diciembre de 2019, cuando se conocieron los primeros detalles de proyecto que tiene China para igualar o incluso adelantarse a Occidente en la nueva disputa por la supremacía espacial. Según lo que se va comunicando del proyecto de la CNSA, la misión china (aún sin nombre oficial) requerirá dos sondas que despegarán simultáneamente, en la ventana de lanzamiento de noviembre de 2028. La primera, como en el caso de su competidora de la NASA, constará de una etapa de crucero y un *lander*, que a su vez contendrá un pequeño cohete *MAV* y un *rover* capaz de recoger directamente muestras de la superficie (aún no se ha decidido en qué zona) y depositarlas en un contenedor dentro del *MAV*. Este cohete despegará desde Marte en julio de 2030, poniendo en órbita del planeta dicho contenedor con su carga. La segunda sonda, que habrá permanecido en órbita de Marte desde agosto de 2029, atrapará el contenedor y comenzará su viaje de vuelta a la Tierra, donde

llegará en septiembre de 2031. Es decir, aunque parezca increíble, tras una espectacular aventura de menos de tres años las muestras recogidas alcanzarán nuestro planeta aproximadamente a la vez que las obtenidas en la misión de la NASA y ESA, más larga y ambiciosa. Será un emocionante final en la etapa reina de la carrera espacial. Y quizá también llegue a sumarse otro equipo a la disputa, éste con el dorsal de Roscosmos, ya que desde hace años Rusia está proponiendo (aunque aún sin fecha aprobada) la misión de recogida de muestras llamada *Mars-Grunt* o *Expedition-M*.



Esquema de las tres sondas implicadas en la misión de recogida de muestras *Mars Sample Return*, que se realizará como colaboración entre la NASA y la ESA. En esta infografía, la Tierra aparece en la parte inferior y Marte en la superior. © ESA-K Oldenburg.

Si todo va según lo previsto, estas misiones marcarán un hito sin precedentes en la historia de la investigación de Marte. Quizá puedan traer a la Tierra fósiles, estromatolitos o biomarcadores moleculares que nos hablen de la vida pasada en el planeta rojo. O incluso podrían contener microorganismos u otro tipo de seres vivos que actualmente estén desarrollándose bajo aquel suelo desértico. En cualquier caso, para que tales resultados sean concluyentes resulta imprescindible garantizar que las muestras no se contaminen químicamente ni biológicamente al ser recogidas, ni durante su viaje a nuestro planeta, ni a lo largo de los detallados análisis que se realizarán en las instalaciones de recepción, ni tampoco en los afortunados laboratorios terrestres donde se manejen durante las décadas siguientes. En el capítulo anterior ya

comentamos las restricciones de protección planetaria de categoría V a las que deben hacer frente las misiones de retorno de muestras de Marte, relacionándolas con lo que supuso la traída de rocas y regolito de la Luna durante el programa Apolo. Si esto se hace correctamente, la enorme capacidad científica y tecnológica de los diferentes grupos que participen en el análisis de tales muestras permitirá obtener resultados interesantísimos, que superarán con creces a los que hasta entonces hayan podido producir los instrumentos embarcados en robots (orbitadores, aterrizadores y vehículos, siempre sujetos a limitaciones de peso y consumo de potencia) durante su trabajo *in situ*. Nos esperan, sin duda, grandes sorpresas.

EL FUTURO: LAS MISIONES TRIPULADAS

En paralelo a los proyectos de retorno de muestras, la NASA, la ESA y la CNSA, así como las empresas SpaceX (con sus propuestas *Red Dragon* posteriormente *Starship*), Blue Origin, Virgin Galactic y Boeing, llevan ya tiempo trabajando en la definición de misiones tripuladas a Marte. Quizá alguna de ellas sea realidad dentro de dos o tres décadas. De hecho, la llegada de humanos al planeta rojo es uno de esos temas para los que, en cualquier momento que se pregunte a un científico, siempre faltan veinte años. El motivo es que, a pesar de la reducción de tiempos que conllevará la competencia entre agencias espaciales y empresas privadas, en realidad se trata de un asunto muy complicado no sólo desde el punto de vista científico y tecnológico, sino también médico, económico, sociológico y político.

El viaje a Marte de una nave con astronautas (digamos que entre cuatro y seis, lo que parece un número razonable) requeriría los habituales ocho meses de vuelo, sumados a dos o tres meses de trabajo en el planeta (tiempo mínimo para que resulte productiva la excursión) y la vuelta a casa (saliendo en un cohete mucho más grande y complejo que los MAV, lógicamente). Pasar aproximadamente un año y medio lejos de la protección que nos ofrece el campo magnético terrestre conlleva acumular unas enormes dosis de radiación, incluso utilizando en todo momento los mejores sistemas de apantallamiento y trajes espaciales imaginables. Por tanto, la probabilidad de que los astronautas desarrollem cancer y otras patologías aumentará considerablemente. En general, los riesgos para la salud en una misión interplanetaria serán muchísimo mayores que los afrontados durante los ocho días de viaje de ida y vuelta a la Luna, aquí al lado, en las misiones *Apolo*. La

situación familiar y los conflictos emocionales a los que se enfrentará cada astronauta durante la preparación de un viaje muy largo al espacio también han de tenerse en cuenta, como se expone con sutileza en la película francesa *Próxima*, dirigida por Alice Winocour en 2019. De hecho, las reflexiones de esta película (ante la última misión a la Estación Espacial Internacional previa a un viaje a Marte) son en parte herederas de la mítica cinta soviética *Solaris* (Andréi Tarkovski, 1972), basada en la novela homónima del escritor polaco Stanislaw Lem. Sin duda, en una aventura tan exigente y peligrosa como llegar hasta el planeta rojo surgirán tensiones de todo tipo entre la tripulación. Esto se está intentando investigar con algunos experimentos en la ISS, precisamente, y también en distintos entornos aislados de nuestro planeta en los que han convivido grupos de supuestos viajeros espaciales (teóricamente autosuficientes y sin contacto con el exterior) durante meses. De hecho, por lo que pueda ocurrir, los psicólogos de las agencias espaciales ya han indicado que una de las características buscadas en la personalidad de esos futuros exploradores será... el sentido del humor.

En la otra cara de la moneda, contar con un grupo de científicos e ingenieros trabajando sobre la superficie de Marte garantizaría la obtención de información muy valiosa basada en la integración de diferentes tipos de datos, algo en lo que por el momento los humanos somos más eficientes que los robots. Como comentaba en una ocasión el astronauta de la ESA Pedro Duque (años antes de ser nombrado Ministro de Ciencia, Innovación y Universidades de nuestro país): «La auténtica exploración de un cuerpo extraterrestre no se produce hasta que llegan a él misiones tripuladas». Y, antes o después, los humanos acabaremos desembarcando en el planeta rojo.

Para desarrollar la experiencia e intuición de los futuros científicos exploradores, resultan muy importantes los programas de entrenamiento que ya están realizando diferentes agencias espaciales en entornos relevantes de nuestro planeta, entre ellos dos que nos resultan familiares: los alrededores del río Tinto, en Huelva, y los entornos volcánicos de la isla de Lanzarote. Una vez completada su formación, imaginemos qué productivo podría ser el trabajo de un equipo de bioquímicos, químicos orgánicos, microbiólogos, geólogos e ingenieros analizando *in situ* muestras del suelo marciano en busca de señales de actividad biológica. Eso sí, como comentábamos en el capítulo anterior, hemos de imaginarlos trabajando sin contaminar con microorganismos o biomoléculas terrestres la posible vida endógena con la que pudieran encontrarse, lo que en sí mismo es un reto muy complicado. Además, lógicamente, en su viaje de vuelta estos (suponemos que felices) astronautas traerían consigo tantas muestras como les fuera permitido (en realidad, no nos engañemos, probablemente alguna más), listas para ser analizadas con mucho mayor detalle en los laboratorios terrestres.

EXPLORACIÓN O EXPLOTACIÓN

Si la exploración humana de Marte puede llevarse a cabo con seguridad, independientemente de que los astronautas sean o no capaces de encontrar vida allí, es probable que se generalicen los viajes al planeta. Hay que volver a leer a los autores de ciencia ficción comentados al principio, que llevan más de un siglo planeando su colonización: a los más imaginativos como Edgar Rice Burroughs o Ray Bradbury, y a los más realistas como Kim Stanley Robinson o Andy Weir. A medio plazo, para que las misiones resulten rentables, el interés científico seguramente tendrá que convivir con otras motivaciones que aporten financiación adicional a las agencias espaciales. Tal vez llegue a ponerse de moda entre los grandes potentados de nuestro planeta ir de vacaciones a Marte, una vez que ya no les resulte excitante pasar unos días en las estaciones espaciales que orbiten la Tierra o la Luna, y tras haber conocido la sensación de pasear por la superficie de nuestro satélite. Las agencias de viajes más exclusivas ofrecerán experiencias interplanetarias, y las revistas del corazón (que seguirán existiendo, sin duda) se llenarán de reportajes con famosos enfundados en trajes espaciales de diseño, pisando el suelo polvoriento de Marte y con su cielo rosado como fondo. Quizá delante de un glamuroso atardecer azul.

En ese caso, esperemos que las respectivas fundaciones de esos millonarios sean generosas con los programas científicos que se desarrollen allí. Pero lo más probable es que la rentabilidad de los viajes a Marte, e incluso la opción de plantear colonias humanas estables y automantenidas en su superficie (o bajo ella, pues probablemente los primeros habitantes de Marte serán cavernícolas que vivan en tubos volcánicos), provenga de la explotación minera de sus recursos. Y eso podrá llegar a suponer un problema, si tenemos en cuenta lo comentado en el capítulo anterior. La difícil convivencia entre los intereses de la ciencia y la minería de Marte se expone con detalle en la interesante serie documental de ciencia ficción titulada *Marte*, producida por *National Geographic* y estrenada en Estados Unidos en 2016. Esa tensión entre la investigación enfocada a la búsqueda de vida y el aprovechamiento de los recursos del planeta (es decir, entre la exploración y la explotación) llega a su culmen en el segundo capítulo de la segunda temporada de esta serie, cuando la empresa Lukrum Industries (adecuado nombre) encuentra una gran masa de agua líquida en el subsuelo marciano. Pero no vamos a desvelar aquí lo que sucede después: merece la pena ver esta bien asesorada obra de ficción.

Como ha advertido el geólogo Alberto G. Fairén, investigador del Centro de Astrobiología, la llegada masiva de astronautas y la explotación minera de

Marte en busca de recursos podrá suponer el comienzo del Antropoceno o «Edad de los humanos» en el planeta. Este período geológico sucedería al actual Amazónico y estaría marcado por los efectos duraderos que provocaremos: contaminación con nuestros microorganismos, erosión y transformación de la superficie y el subsuelo con las máquinas e infraestructuras para la minería, modificación de la atmósfera, así como introducción de materiales contaminantes y residuos. Se ha propuesto que el Antropoceno comenzó en la Tierra a mediados del siglo XX y, aunque aún no es una época geológica definida formalmente, sus efectos ya son visibles por ejemplo en la Antártida. Quizá dentro de poco tengamos el dudoso honor de hacer converger la historia de ambos planetas en un período caracterizado por nuestra influencia en ellos.

Se avecinan tiempos en los que las cuestiones bioéticas, e incluso geoéticas, han de pasar a primer plano en la exploración espacial: ¿tenemos derecho a alterar el equilibrio climático de otro planeta, su entorno geológico... y su vida endógena si ésta existiera antes de nuestra llegada? Como Carl Sagan decía en su mítica obra *Cosmos*, publicada en 1980 y aún bajo los efectos de los controvertidos resultados de las *Viking*: «Si hay vida en Marte creo que no deberíamos hacer nada con el planeta. Marte pertenecería entonces a los marcianos, aunque los marcianos fuesen sólo microbios. La existencia de una biología independiente en un planeta cercano es un tesoro incalculable y creo que la conservación de esa vida debe reemplazar a cualquier otra posible utilización de Marte».

¿TERRAFORMACIÓN DEL PLANETA ROJO?

Para terminar este capítulo, dedicaremos unos párrafos a lo que podría ser la siguiente etapa de nuestro desembarco en Marte, un tema sobre el que corren ríos de tinta y de bits: la terraformación del planeta, es decir, su conversión en un lugar habitable para los humanos y otros seres vivos terrestres. A partir de ideas ya manejadas en la década de 1930, el término «terraformación» apareció por primera vez en el relato de ciencia ficción *Órbita de colisión*, escrito por Jack Williamson y publicado en la revista *Astounding Science Fiction* en 1942. Dos décadas más tarde, desde la ciencia se comenzó a contemplar la posibilidad de terraformar cualquier planeta o satélite, pensando principalmente en Venus y Marte. Se estudiaba como una opción teórica en el caso de que la Tierra agotara sus recursos para alimentar a la

humanidad (lo que parecía posible a largo plazo, pues ya se estaba empezando a disparar el crecimiento demográfico que nos ha llevado a los casi 8000 millones de habitantes actuales), o si una catástrofe global amenazara nuestra supervivencia aquí, tanto por la caída de un enorme meteorito (algo improbable pero no imposible) como por el estallido de una guerra nuclear (lo que realmente preocupaba mucho, dada la escalada armamentística que se estaba produciendo durante la guerra fría). Hoy en día, también podríamos pensar en una pandemia provocada por un virus especialmente letal.

Terraformar un planeta o satélite es intervenir en él para conseguir que sus condiciones ambientales globales acaben siendo similares a las de la Tierra, y por tanto adecuadas para la vida animal y vegetal. A veces se dice «para la vida terrestre» en general, pero entonces no se está teniendo en cuenta a las múltiples especies de microorganismos extremófilos que no necesitarían de tal intervención para encontrar apetecibles algunos entornos extraterrestres. Un proceso como ése era (y es) fácil de proponer por escrito o en un esquema, pero requiere etapas tan complejas como producir una atmósfera respirable en el planeta o satélite, y conseguir que su superficie tenga una temperatura media adecuada para que el agua líquida se mantenga en ella: idealmente, en torno a unos confortables 25 °C.

La llamada «terraformación científica» de Marte fue planteada por el propio Carl Sagan en 1973, en un artículo titulado «Ingeniería planetaria en Marte». Básicamente requeriría calentar la superficie del planeta (complicado asunto, a pesar de las diversas opciones propuestas) para que el hielo de dióxido de carbono de sus polos se sublime y pase a la atmósfera, que se hará cada vez más densa y por efecto invernadero contribuirá a ese calentamiento superficial. Con ello, el agua de los casquetes polares y el permafrost se fundirá y comenzará a fluir por el planeta. Posteriormente, inoculando cianobacterias en el agua y plantando árboles en el suelo se desencadenarán procesos fotosintéticos que inyectarán cantidades crecientes de oxígeno molecular en la atmósfera, hasta el nivel requerido para que los animales y plantas terrestres puedan respirar (lo que se estima en al menos un 14%). Toda una declaración de intenciones. Entre otros muchos comentarios posibles, para que las plantas puedan crecer sería necesario suplementar con materia orgánica, nitrógeno y microorganismos aquel estéril regolito: recordemos por ejemplo cómo en la novela *Marte* de Andy Weir lo hacía el astronauta Mark Watney, a pequeña escala y en la medida de sus posibilidades, hasta conseguir cultivar patatas. Recientemente se ha planteado la opción de transformar el suelo marciano usando bacterias modificadas genéticamente para hacerlo fértil. En cualquier caso, el oxígeno y los demás gases que se vayan produciendo han de mantenerse en la atmósfera a pesar de la débil atracción gravitatoria del planeta.

La libertad creativa de la ficción permite completar este complejísimo e impredecible proceso en tiempos compatibles con la existencia de nuestra especie, como muestran buena parte de las novelas y películas que comentábamos al principio. Pero desde la ciencia se considera que resulta imposible siquiera iniciar la terraformación de Marte utilizando las tecnologías disponibles o imaginables. El principal de los muchos problemas es que no existe suficiente cantidad de dióxido de carbono congelado en el planeta. Con los datos conocidos se ha podido calcular que, aunque todo ese hielo se sublimara a fase gas, la presión atmosférica pasaría de los insignificantes 6 milibares actuales sólo unos 50 milibares, lo que sigue siendo veinte veces menos que la presión de nuestra atmósfera. Y, a partir de ahí, el resto del proceso es inviable. Sin embargo, conocer la realidad no nos impide seguir soñando: ése es el maravilloso Marte que pasa de rojo a azul y después a verde en la siempre recomendable trilogía de novelas escritas por Kim Stanley Robinson.

Marte ha sido, es y será un lugar fascinante. Hemos de estar atentos a todo lo que se vaya publicando próximamente, que será mucho, sobre los retos de la exploración humana del planeta. Quizá, cuando en el futuro este y otros libros actuales caigan en las manos (o en la pantalla) de algún coleccionista de antigüedades, podrá evaluar si los científicos de las primeras décadas del siglo XXI éramos pesimistas u optimistas sobre la posibilidad de pisar Marte y de llegar a colonizarlo. Tal vez, además, para entonces ya se sepa si en el planeta rojo ha triunfado la vida.



Un café con... José Antonio Rodríguez Manfredi



Doctor Ingeniero en Telecomunicaciones. Coordinador del Grupo de Instrumentación Espacial en el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA, Torrejón de Ardoz, Madrid) e Investigador Principal de las estaciones meteorológicas para Marte TWINS/InSight y MEDA/Perseverance.

Nos conocemos desde hace más de quince años, y durante todo este tiempo hemos seguido muy de cerca nuestros trabajos respectivos en el CAB, a veces colaborando en ellos. Como ingeniero, has estado directamente implicado en la planificación y construcción del instrumento REMS (del que Javier Gómez-Elvira fue investigador principal), que está haciendo un gran trabajo a bordo de Curiosity desde su llegada a Marte en 2012. Además, eres el investigador principal de TWINS (que desde finales de 2018 opera en InSight) y también de MEDA (que trabajará en el rover Perserverance de la misión Mars2020) ¿Nos puedes resumir las principales características de estos sensores ambientales que la NASA ha incluido en su ambicioso programa de investigación del planeta rojo?

Durante mucho tiempo, los datos atmosféricos que proporcionaron las misiones Viking resultaron esenciales para conocer la dinámica ambiental de

Marte. Sin embargo, el concepto y el diseño del instrumento *REMS* marcó un antes y un después en la caracterización de la atmósfera local de nuestro planeta vecino. Y es que no sólo fue diseñado para medir magnitudes anteriormente no registradas, sino que se construyó para que pudiera tomar datos casi continua y regularmente, de manera independiente a si el ordenador central de *Curiosity* «está dormido» o no (lo que resulta esencial para poder entender los ciclos y dinámicas diarias). *REMS* mide el viento tanto en su componente vertical como horizontal, la temperatura del aire y del suelo, la humedad relativa, la presión y la radiación ultravioleta incidente.

Por su parte, el instrumento *TWINS* es una adaptación de los modelos de repuesto que en su día fueron fabricados como parte de *REMS*. Es decir, son en esencia los mismos, sensiblemente adaptados a los requisitos de la misión *InSight*.

Años después, nuestro equipo internacional se vio envuelto en una nueva misión cuando la NASA seleccionó el instrumento *MEDA* como parte de la instrumentación científica de la misión *Mars2020*. Como no podía ser de otra forma, en el diseño de *MEDA* se aprovechó la herencia, la experiencia y las lecciones aprendidas de sus predecesores, dando lugar a una nueva generación de instrumentación para la caracterización ambiental de Marte, capaz de medir más, mejor y con más eficiencia.

Tuve ocasión de estar a tu lado en Cabo Cañaveral el día 26 de noviembre de 2011, cuando se lanzó el cohete Atlas V que llevó a Marte al rover Curiosity. El lanzamiento fue un éxito y todos estábamos muy felices al ver salir hacia el planeta rojo una misión que por primera vez en la historia llevaba tecnología española. Nunca olvidaré el abrazo que nos dimos, amigo Manfredi, y cómo llorabas de emoción: ¿qué sentiste al empezar a formar parte de la historia de la exploración de Marte?

Como a ti, querido amigo, desde muy pequeño el espacio siempre me ha cautivado. La inmensidad del Universo y las miles de oportunidades que nos abren cada uno de esos puntos que observamos cuando miramos hacia arriba son cuestiones realmente abrumadoras. Recuerdo, además, cómo quería estar en el Centro de Control de turno en la película sobre el espacio que fuese, y trabajar «en la NASA»... cosas totalmente inalcanzables para un niño de pocos años.

Aquellas lágrimas en el Centro Espacial Kennedy considero que no reflejaban el sentir del trabajo bien hecho o de, como dices, verme como una parte de la historia de la exploración espacial. Creo que, más bien, manifestaban cómo el sueño de aquel niño se hacía realidad. En ese momento recordé la ilusión, todo el esfuerzo y los sacrificios, no sólo míos, que me habían llevado allí. Otra vivencia particularmente emotiva fue la llegada de

Curiosity a Marte, que viví desde el Jet Propulsion Laboratory de la NASA en California. De nuevo, pude ver muchas lágrimas de emoción y alegría. El tiempo de espera hasta recibir la señal de que el amartizaje había sido exitoso fueron siete minutos inenarrables.

Esta experiencia está siendo la suma de muchos momentos buenos y también algunos malos. Pero no se me ocurre una recompensa mejor para el esfuerzo y la dedicación personal, y para la comprensión y apoyo de mi entorno familiar, que poder cumplir este sueño de mi niñez.

Pasados los años, ¿qué estamos aprendiendo sobre la meteorología y la habitabilidad marciana gracias a las estaciones ambientales que estáis poniendo sobre su superficie, y qué podremos averiguar en el futuro gracias a MEDA?

Al igual que en la Tierra, los datos que tomamos desde la superficie de Marte son críticos para entender la dinámica y la evolución tanto de la meteorología como del clima del planeta. Éstos resultan esenciales para validar los resultados de los modelos numéricos e interpretaciones basadas en los datos que recogen los satélites orbitadores.

Como casos concretos, por ejemplo, tener un conocimiento preciso de la dinámica atmosférica marciana es esencial para poder hacer aterrizar exitosamente una futura misión robótica o, más importante aún, una misión tripulada. Por otro lado, desde un punto de vista científico, ese conocimiento también nos va a permitir evaluar las condiciones de habitabilidad presentes o pasadas, y entender cómo esa dinámica ha modelado la geología superficial del planeta. Por eso las distintas agencias espaciales internacionales enfatizan y priorizan el registro de dichas magnitudes *in situ*.

En ese contexto, *MEDA* nos ayudará a entender lo siguiente: i) la cantidad y las propiedades físicas y ópticas del polvo local en suspensión, y su evolución diaria y estacional; ii) cómo y por qué las magnitudes ambientales registradas difieren de las medidas por las misiones anteriores; iii) las relaciones entre el entorno ambiental local y la dinámica planetaria observada desde los satélites; iv) los flujos e intercambios de energía y agua entre el subsuelo y la capa baja de la atmósfera, en escala de pocos días, interestacionales o anuales; v) los ciclos anuales de radiación solar cercana en la superficie de Marte; vi) el contexto ambiental de las muestras que el *rover* recoja; vii) las características del entorno que puedan afectar a la eficiencia de los sistemas desarrollados para obtener oxígeno de la atmósfera marciana; y viii) cómo estas medidas encajan con las extrapolaciones de los modelos.

En 2022 despegará rumbo a Marte el instrumento Raman Laser Spectrometer (RLS), a bordo del rover de la ESA Rosalind Franklin. Su investigador principal es nuestro compañero Fernando Rull, científico del CAB y

catedrático de Física de la Universidad de Valladolid. Como buen conocedor que eres del proyecto, ¿qué retos científicos y de ingeniería se han tenido que superar para construir e integrar este instrumento tan prometedor?

La espectrometría Raman es una técnica bien conocida y muy útil para la identificación y caracterización (composicional y estructural) de minerales y biomarcadores, independientemente de su naturaleza orgánica/inorgánica o del estado de las muestras (sólidas, líquidas o gaseosas).

Desde la perspectiva de la exploración de Marte, esta técnica permitirá conocer mucho mejor varios aspectos de la mineralogía marciana que aún se ignoran en gran medida. Esto resulta fundamental para comprender la historia del planeta, su habitabilidad, la potencial capacidad de haber acogido vida en el pasado (si se mantienen evidencias y rastros de ella), o incluso albergarla en la actualidad.

Sin embargo, el empleo de esta técnica en exploración planetaria implicaba grandes dificultades debido al bajo nivel de madurez tecnológica que presentaba inicialmente. El equipo del instrumento español RLS tuvo que hacer frente al enorme reto científico y tecnológico que supuso diseñar, construir y validar la tecnología Raman para una misión como ésta. No obstante, seguro que estará a la altura del retorno científico que va a generar, así como del gran esfuerzo realizado por nuestros colegas.

Cuando ralentizas un poco tu frenético ritmo de trabajo y reflexionas acerca de la posibilidad de que realmente exista vida en Marte, o sobre si seremos capaces de encontrarla, ¿eres optimista? ¿Y qué piensas con relación a la posible existencia de algún tipo de seres vivos en las lunas heladas de Júpiter o Saturno?

Sí, ciertamente soy optimista sobre esa posibilidad. Como bien sabes, cada día recibimos nuevas evidencias sobre el muy alto potencial de habitabilidad de Marte. Los entornos geológicos que hemos visitado con *Spirit* y *Opportunity*, con *Phoenix*, y actualmente con *Curiosity* revelan escenarios donde la vida podría haber sobrevivido en el caso en que hubiera llegado a surgir. Y algunas de las nuevas misiones que están siendo diseñadas actualmente llevarán ya instrumentación para detectar esas trazas de vida (pasada y presente), con lo que podremos salir de dudas.

Por lo que respecta a las lunas de los planetas exteriores, te confieso que ahí soy un poco menos optimista... pero no pesimista. Si bien es cierto que hemos encontrado unas condiciones realmente prometedoras, todavía quedan grandes preguntas por resolver y mucho por investigar. En cualquier caso, creo que en los próximos años vamos a cambiar nuestra apreciación de la vida en el Universo gracias a los descubrimientos de los planetas tipo Tierra que cada día se están publicando, y a los hallazgos a los que asistiremos.

En este contexto, ¿cuál es tu opinión sobre las medidas de protección planetaria que actualmente se imponen por las agencias espaciales y por el COSPAR a los instrumentos que viajan a Marte o a otros lugares donde podría existir vida? ¿Su relación coste/efectividad te parece razonable?

Considero la protección planetaria, tanto de «exportación» como de «importación», un tema serio y de gran trascendencia, con multitud de implicaciones. Todo ello en pro de llevar a cabo una exploración responsable del Sistema Solar, y desarrollar esfuerzos para proteger la ciencia, los entornos explorados, y también la Tierra, claro está. Desde finales de la década de 1950, las agencias más grandes han hecho enormes inversiones y esfuerzos para cumplir con los estrictos requisitos de limpieza biológica, desarrollando metodologías de trabajo y tecnología que pudieran soportar las altas temperaturas de la esterilización. Sin embargo, estas regulaciones y metodologías resultan muy costosas y de difícil cumplimiento para agencias o programas espaciales no tan grandes. En tal caso, y dado que la protección planetaria es un asunto que compete y debe ser aceptado por todos, su implementación a nivel global puede suponer un problema importante.

Así, cuando actualmente parece haber un nuevo repunte de la carrera espacial internacional (incluso con la participación de empresas privadas), creo que vamos a tener que replantearnos muchos de los principios que hasta ahora estaban sólidamente establecidos. Por ejemplo, ¿cómo afectará la protección planetaria a la exploración humana de Marte? Además, si la esterilización de sistemas robotizados eleva los costes de desarrollo un 30 %, ¿podrían las medidas de protección planetaria llegar a hacer inviable explorar Marte?

Pasando a la ficción, uno de los libros (y, después, película) sobre Marte que más me han gustado en los últimos años es The Martian, escrito por el ingeniero informático Andy Weir con un estilo desenfadado y directo, pero a la vez muy bien documentado y asesorado. ¿Qué opinión te merece a ti? Como gran aficionado al cine, ¿qué otras películas sobre Marte, clásicas o recientes, recomendarías?

Desde un punto de vista científico y tecnológico, coincido contigo en que *The Martian* es, en muchos aspectos, bastante fiel a la realidad. Se nota el asesoramiento cualificado que tuvo Andy Weir durante su escritura. Obviamente, la película se toma ciertas licencias cinematográficas para que la trama y la acción resulten visualmente atractivas y entretenidas... pero es bastante fiel al libro y tiene gran verosimilitud y realismo. Como a ti, tanto la novela como la película me gustaron por su rigor, pero también por el tono humorístico con el que introducen la ciencia y la tecnología como vías de escape del tremendo drama que vive el personaje.

Por otro lado, me vienen a la cabeza varias películas sobre Marte que puedo recomendar, aunque no todas ellas han tenido el mismo cuidado y asesoramiento científico que *The Martian*. Aunque algunas no muestran efectos visuales memorables, creo que sí exponen algunos mensajes interesantes. Destacaría *Crónicas marcianas* (Anderson, 1980), adaptación de la emblemática obra de Bradbury. También me gustaron *Mars Attacks!* (Burton, 1996), que con su estética cómico-paródica desmitifica algunos de los planteamientos tradicionales, y *Capricornio Uno* (Hyams, 1978) por su espíritu crítico.

En general, creo que el cine y la literatura han desempeñado un papel muy importante en la mentalidad de la sociedad actual, y en cómo se concibe el espacio exterior y la posible existencia de vida fuera de nuestro planeta.

Por último, ¿crees que la posible existencia de vida fuera de la Tierra implicaría que también habrá vida inteligente en algún otro lugar? Si es así, ¿en tu opinión estamos tecnológicamente y psicológicamente preparados para interaccionar con otras inteligencias extraterrestres?

Aunque no descarto la existencia de vida inteligente fuera de la Tierra, hecho que estadísticamente podría sustentarse, que yo sepa no tenemos evidencias sobre ello. Ni siquiera hay indicios que nos puedan llevar a pensar en esta posibilidad de una manera razonable.



8. Las lunas de Júpiter



Buenos días, señores. Éstas son unas instrucciones grabadas antes de su partida. Por razones de seguridad de la más alta importancia, han sido conocidas a bordo durante la misión solamente por su computador HAL 9000. Ahora que están en el espacio de Júpiter, y con toda la tripulación reanimada, pueden enterarse. Hace dieciocho meses se descubrió la primera señal de vida inteligente fuera de la Tierra. Estaba enterrada a doce metros bajo la superficie lunar, cerca del cráter Cracovia. Si no fuera por una potentísima emisión de radio orientada hacia Júpiter, el negro monolito, de cuatro millones de años de antigüedad, habría permanecido completamente inerte. Su origen y su finalidad son todavía un misterio total.

Arthur C. Clarke y Stanley Kubrick,
guion de 2001: *Una odisea del espacio*

En 1982, catorce años después de estrenarse esta mítica película y treinta y cuatro años más tarde de que Arthur C. Clarke hubiese escrito *El centinela*, relato en el que se basa su guion, este genial autor publicó la segunda parte de la saga «Odisea espacial», titulada *2010: Odisea dos*. En uno de sus momentos más emotivos, la llegada de un gran número de monolitos a Júpiter ha hecho que su masa y densidad aumenten enormemente, lo que desencadena reacciones de fusión nuclear y el planeta está a punto de convertirse en una estrella. Cuando esto ocurra, proporcionará la energía necesaria para que la incipiente vida que se estaba empezando a desarrollar en el océano interior del satélite Europa evolucione rápidamente y dé lugar a especies inteligentes. Pero, justo antes de esa conversión de Júpiter en un nuevo Sol, el astronauta David Bowman regresa a la nave *Discovery* y ordena a su ordenador *HAL 9000* que transmita este mensaje a la Tierra: «Todos estos mundos son para ustedes, excepto Europa. No intenten aterrizar allí. Úsenlos juntos. Úsenlos en paz».

Pasando de la ficción a la realidad, medio siglo después de esa prohibición y antes de saber si su agua líquida contiene o no alguna forma de vida, probablemente un robot aterrizará sobre la superficie de Europa.

JÚPITER

El planeta más grande del Sistema Solar es un gigante de gas con un diámetro de 142 984 km, 11 veces mayor que el terrestre, y tiene unas 320 veces más masa que nuestro punto azul pálido. De hecho, es casi 2,5 veces más masivo que la suma de todos los demás planetas que giran en torno al Sol, y si tuviese 80 veces más masa podría haber superado el umbral necesario para iniciar los procesos de fusión termonuclear que lo habrían convertido en una estrella. Aun así Júpiter, nombrado como el padre de los dioses y los hombres en la mitología romana, que había sido Marduk para los babilonios y Zeus para los griegos, no llega a una milésima parte de la masa del Sol, que es el auténtico dominador de este panteón. Gira en torno a su eje en algo menos de 10 horas, por lo que su día es el más corto de todos los planetas de nuestro entorno. Y se desplaza alrededor del Sol, a una distancia media de 5,2 ua, cada 11,9 años terrestres.

A la investigación sobre este planeta han contribuido decisivamente varios observatorios terrestres, el telescopio espacial *Hubble* (*HST*, puesto en órbita en 1990 como colaboración entre la NASA y la ESA), y algunas sondas de la NASA. Desde la década de 1970, diferentes misiones que también sobrevuelan otros capítulos de este libro realizaron aproximaciones a Júpiter durante sus viajes a través del Sistema Solar. Así las sondas *Pioneer 10* y *Pioneer 11*, realmente pioneras en muchos ámbitos de la investigación espacial, fueron las primeras que atravesaron el cinturón de asteroides y enviaron imágenes cercanas de este planeta (y de algunos de sus satélites, de los que más tarde hablaremos) durante sus sobrevuelos de 1973 y 1974. En ellos hicieron un estudio preliminar de su atmósfera, detectaron su intenso campo magnético y analizaron sus cinturones de radiación. En 1979, las misiones *Voyager 1* y *Voyager 2* ampliaron notablemente la información sobre el planeta, y entre otras cosas descubrieron que también posee un sistema de anillos formados por polvo y pequeños fragmentos de hielo y rocas, invisible desde la Tierra. Con estas primeras aproximaciones al planeta se comprobó que todo en él es grandioso, como el dios al que Wolfgang Amadeus Mozart había dedicado en 1788 su solemne y vibrante *Sinfonía nº 41 en Do Mayor*, la última que compuso, cuyo cuarto movimiento constituye una de las más altas cimas en la historia de la música.

La primera misión específicamente diseñada para estudiar Júpiter y sus principales satélites fue *Galileo*, lanzada en 1989, que comenzó a orbitarlo en 1995. A pesar de que tuvo problemas serios con la antena de comunicación, su instrumentación (que incluía cámaras, espectrómetros infrarrojo y ultravioleta, un radiómetro, un magnetómetro, y detectores de polvo y

partículas energéticas) funcionó correctamente y aportó informaciones muy valiosas, como veremos más adelante. Además, cuando el orbitador se aproximaba al planeta liberó una sonda que penetró en la atmósfera con un gran paracaídas y protegida por un escudo térmico: durante casi una hora pudo transmitir los datos que iban registrando sus instrumentos, hasta que se desintegró debido a la presión y temperatura existentes unos 200 km bajo la superficie visible. En cuanto al orbitador, una vez concluida su exitosa misión en 2003 fue lanzado hacia el planeta y se sumergió en esa misma atmósfera densa y turbulenta que hasta entonces había estado estudiando. Con ello se evitaba que en algún momento pudiera llegar a colisionar contra el satélite Europa. Se cumplían así las restricciones impuestas por la protección planetaria, ya que *Galileo* no había sido esterilizado antes de su lanzamiento... y además quedaba claro que su equipo científico conocía el mensaje enviado por *HAL 9000* dos décadas antes.

Previamente, en el año 2000 la misión conjunta de la NASA y la ESA *Cassini/Huygens*, con destino a Saturno, también había realizado un sobrevuelo o *flyby* de Júpiter durante el cual recogió gran cantidad de información. Y, en 2007, la sonda *New Horizons* pasó junto al gigante de gas en su viaje (del que hablaremos en otro capítulo) hacia Plutón. Por su parte, la segunda y hasta ahora última misión diseñada específicamente para estudiar Júpiter ha sido *Juno*, que salió de nuestro planeta en 2011 y comenzó a orbitar a su hermano y esposo en 2016. Entre la instrumentación que contiene destacan sus cámaras, espectrómetros, un radiómetro de microondas, un magnetómetro, un detector de partículas y otros equipos para analizar la distribución de masa en el interior del planeta y la formación de auroras en sus polos. Así, desde su llegada a Júpiter está enviando ingentes cantidades de información científica sobre su estructura interna, la composición y dinámica de su atmósfera, y su magnetosfera.

Como resultado de los datos proporcionados por estas misiones, y de las observaciones realizadas desde Tierra y por el *Hubble*, sabemos que la atmósfera de este gigante está compuesta por un 89 % de hidrógeno molecular (H_2) y un 11 % de helio (He), mostrando trazas de metano (CH_4), amoníaco (NH_3), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y vapor de agua (un gas clave en cuya cuantificación está trabajando activamente *Juno*). Con una temperatura superficial media de unos $-161^{\circ}C$, esta atmósfera está organizada verticalmente en una serie de capas que se van comprimiendo progresivamente y dan paso a un interior líquido de hidrógeno metálico. Bajo él, se supone que podría existir un núcleo rocoso de hierro y silicatos (no se sabe si claramente definido o tal vez más diluido o «borroso») cuya masa se ha estimado entre 2 y 18 veces mayor que la Tierra, a presiones de 8000 millones de veces la terrestre y temperatura de unos $35\,000^{\circ}C$. El planeta

tiene un campo magnético extraordinariamente intenso, unas 20 000 veces mayor que el de la Tierra.

Las capas más altas de su atmósfera son muy dinámicas, y están dominadas por bandas oscuras paralelas al ecuador separadas por zonas brillantes formadas por nubes de amoníaco congelado. También se ha descubierto un conjunto de inmensos ciclones en ambos polos, actualmente nueve en el norte y seis en el sur, que forman patrones geométricos dinámicos. Pero sobre todas las características de la atmósfera joviana destaca su Gran Mancha Roja, descubierta por Robert Hooke en 1664: un inmenso anticiclón situado en el hemisferio sur, cuyo tamaño es aproximadamente el doble que la Tierra y produce vientos de hasta 400 km/h. Todo ello hace que la superficie gaseosa de Júpiter sea una de las más sugerentes del Sistema Solar, hasta el punto de que durante los últimos años varios científicos y artistas plásticos están experimentando con los ajustes y contrastes de las imágenes enviadas por *Juno*, para crear paisajes de una belleza sobrecogedora. Así, cuando en 2017 este orbitador envió las mejores fotografías jamás captadas del gran vórtice anticiclónico, el director de ciencia planetaria de la NASA, Jim Green, comentó: «Las imágenes tan esperadas de la Gran Mancha Roja de Júpiter son la tormenta perfecta del arte y la ciencia». Esto nos hace recordar una famosa cita del Premio Nobel de Física y brillante divulgador científico Richard Feynman, cuando al referirse a la belleza y poder de evocación que encierra el conocimiento científico se preguntaba: «¿Qué clase de hombres son esos poetas que pueden hablar de Júpiter como si fuera humano, pero han de guardar silencio si se trata de una esfera de amoníaco y metano en rotación?».

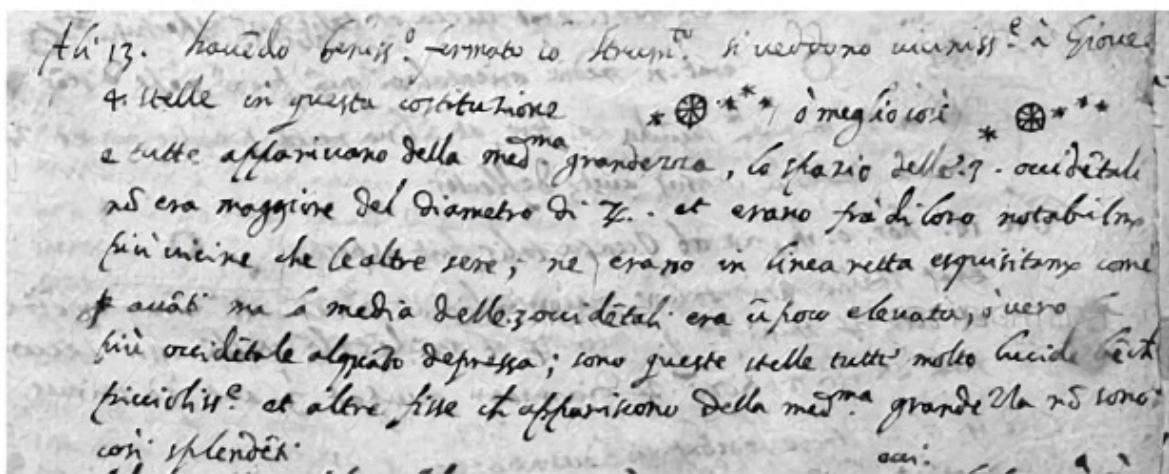
A cambio, ninguno de los entornos de este inmenso planeta, en ausencia de agua líquida y de moléculas orgánicas, parece ofrecer posibilidades para que los seres vivos se puedan desarrollar allí. En cualquier caso, el siempre creativo Carl Sagan especuló en el segundo capítulo de su famosa serie de televisión *Cosmos: un viaje personal* (estrenada en 1980 y que en toda una generación despertó el interés por la astronomía y la ciencia en general) que podría existir alguna forma de vida en las nubes de Júpiter, una idea que desde entonces ha ido retomándose en la ciencia ficción. De todos modos, para la astrobiología lo más interesante no está en este planeta sino alrededor de él, dado que la masa y la energía interna de este gigante lo convierten en el auténtico dios de su particular sistema de satélites. Y algunos de ellos son lugares realmente prometedores para la existencia de vida extraterrestre.

LOS SATÉLITES DE JÚPITER

Debido a su intenso brillo, el segundo planeta más luminoso de nuestro cielo después de Venus es conocido desde la antigüedad. Por tanto, cuando en 1609 Galileo Galilei comenzó a utilizar y mejorar el telescopio (un invento patentado un año antes en Holanda por el fabricante de lentes Hans Lippershey) para realizar observaciones astronómicas, Júpiter fue uno de los primeros cuerpos en los que centró su atención. Y el 7 de enero de 1610, mientras lo estaba observando desde Padua, realizó un descubrimiento inesperado: cerca de él había tres estrellas muy pequeñas, prácticamente alineadas con el ecuador del planeta. Tras varias noches de atenta observación, el 13 de enero apareció otra más, y pudo comprobar que las posiciones relativas de ellas iban cambiando a lo largo de la línea imaginaria que las unía. La conclusión era clara y (en todos los sentidos de la palabra) revolucionaria: Júpiter tenía «planetas» que lo orbitaban a diferentes distancias, como si se tratara de un Sistema Solar en miniatura. Por tanto no todos los cuerpos giraban alrededor de la Tierra, como desde Aristóteles había mantenido el modelo geocéntrico, y ni siquiera en torno al Sol según afirmaba el heliocentrismo impulsado por Nicolás Copérnico desde mediados del siglo anterior.

Estos descubrimientos, que supusieron un punto de inflexión en la historia de la astronomía, fueron publicados en Venecia dos meses más tarde, en un breve y bellísimo tratado escrito en latín que también contenía sus observaciones sobre la Luna. Tituló este ensayo de forma muy poética: *Sidereus nuncius*, que podemos traducir como *Mensajero sideral* o *Noticiero sideral*. Los dibujos de nuestra Luna que también contenía esta obra mostraban cómo la había observado con su telescopio: llena de cráteres y montañas, rugosa, muy alejada de esa esfera perfecta y pura que la filosofía aristotélica suponía desde casi dos mil años antes para todos los objetos del «mundo supralunar». De hecho un amigo de Galileo que lo admiraba profundamente, el pintor y arquitecto Ludovico Cardi (conocido como «Il Cigoli»), cuando ese mismo año recibió el encargo de pintar al fresco la cúpula de la capilla conocida como *Salus Populi Romani* en la basílica de Santa María la Mayor, en Roma, tomó una decisión arriesgada: no apoyó los pies de su Inmaculada Concepción sobre una Luna estilizada y perfectamente lisa, según mandaba la tradición, sino en el satélite craterizado tal y como lo había observado al telescopio el astrónomo de Pisa. Cuatro siglos después, merece la pena acercarse hasta esa imponente basílica romana para comprobarlo.

Los cuatro satélites de Júpiter, hoy conocidos en su honor como galileanos, fueron denominados por él «astros mediceos» (con los numerales I, II, III y IV) en honor al poderoso Cosme II de Médici, antiguo alumno suyo y gran Duque de Toscana. Posteriormente, el astrónomo alemán Simon Marius (que siempre reclamó haber descubierto estos satélites unos días antes que Galileo, aunque su publicación fue posterior) los bautizó, por sugerencia de Johannes Kepler, con los nombres de tres mujeres y un hombre que fueron amantes de Zeus en la mitología griega: Ío, Europa, Ganimedes y Calisto. En cualquier caso, no comenzaron a llamarse así de forma generalizada hasta dos siglos más tarde. Desde aquel descubrimiento pionero no han dejado de acumularse datos sobre el sistema joviano, incluyendo el hallazgo de otras muchas lunas, todas ellas más pequeñas. Hasta el momento se han detectado 79 satélites orbitando Júpiter, que no son sino restos del proceso de formación del planeta, y cuyos nombres están tomados de las mitologías griega y romana. Varios de ellos corresponden a las demás amantes o las hijas de este dios omnipotente y caprichoso. Pero centrémonos en los cuatro principales.



Observación de los cuatro satélites de Júpiter realizada por Galileo Galilei desde Padua el 13 de enero de 1610, a las 18.54 h, tal como quedó anotado en su diario de trabajo (hoy conservado en la Biblioteca Nacional Central de Florencia). Así lo describió después en su tratado *Sidereus nuncius*: «El día trece vi por primera vez las cuatro estrellitas en la siguiente disposición respecto a Júpiter: Ori. * O *** Occ. Estaban tres en la parte occidental y una en la oriental. Formaban casi una línea recta, ya que la intermedia de las occidentales se separaba un poco de la recta hacia Septentrión. La más oriental distaba de Júpiter dos minutos, siendo cada uno de los intervalos entre las restantes y con Júpiter de un solo minuto. Todas las estrellas mostraban el mismo tamaño. Y aunque de tamaño pequeño eran, a pesar de todo, luminosísimas, y mucho más brillantes que estrellas fijas del mismo tamaño». Bajo el fragmento de su diario (disponible en Wikimedia Commons) se muestra la posición de los cuatro satélites galileanos tal como se podían ver desde Padua ese día y a esa hora, utilizando un programa de astronomía.

ÍO

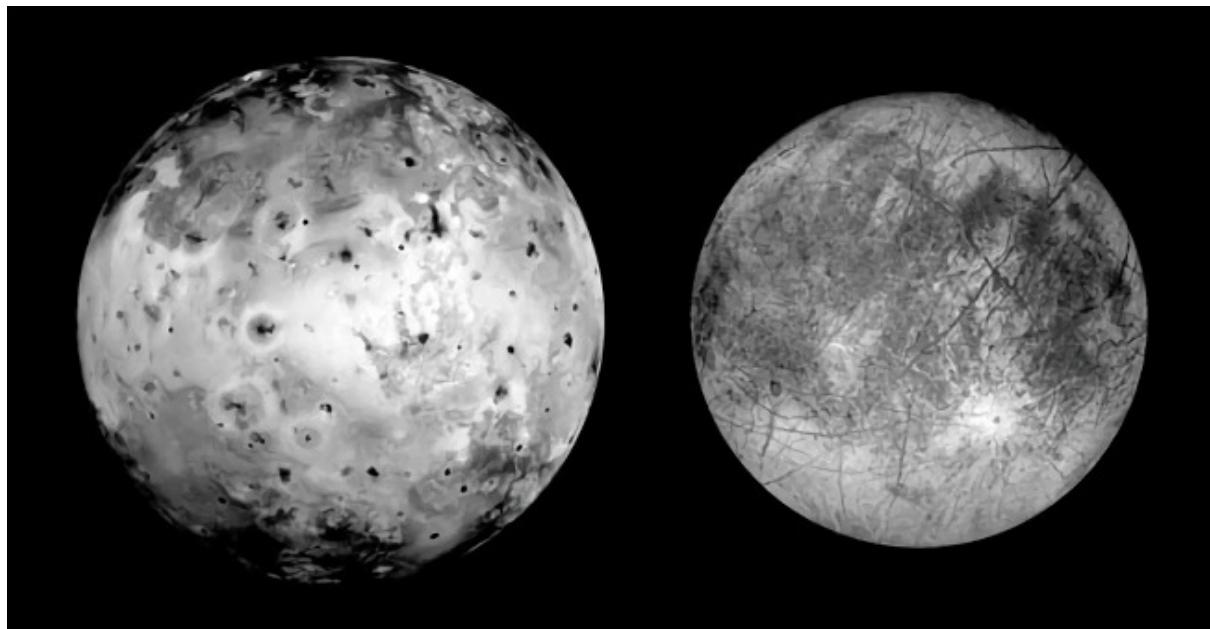
El más interior de los satélites galileanos es el tercero del sistema en cuanto a tamaño, con un diámetro similar a nuestra Luna: 3643 km. Recorre su órbita en torno a Júpiter cada 1,8 días terrestres, y como ocurre en los otros tres descubiertos por Galileo y muchos más satélites del Sistema Solar (incluyendo la luna que domina nuestro cielo) presenta rotación síncrona: su velocidad angular de rotación y traslación es la misma, por lo que siempre muestra la misma cara al planeta. Posee un núcleo de hierro fundido y su corteza está formada por silicatos, lo que le confiere la mayor densidad de los satélites jovianos.

Aunque la temperatura media de su superficie es de -143°C , Ío se encuentra sometido a los intensos efectos de marea provocados por Júpiter, y en menor medida por Europa y Ganimedes (con los que está en resonancia orbital), que inducen desplazamientos y fricciones constantes en su interior, manteniéndolo muy caliente. Esto hace que su corteza sea la más geológicamente activa de todo el Sistema Solar y, como descubrió el orbitador *Galileo*, en la actualidad contiene más de cuatrocientos volcanes activos que expulsan nubes de dióxido de azufre (SO_2) y otros gases. Se ha comprobado que la lava que brota de sus erupciones es la más caliente de todas las conocidas en el Sistema Solar, con una temperatura de 1650°C . Por tanto, a pesar de que la superficie de Ío es globalmente fría existen focos de calor muy importantes en ella, lo que provocará gradientes de temperatura potencialmente interesantes para la química del planeta.

En la corteza de esta luna también hay cadenas montañosas con algunos picos más altos que el Everest y zonas planas de gran extensión, pero carece de cráteres de impacto. Todo ello nos habla de una superficie muy joven y en constante renovación. El vulcanismo del satélite y el efecto de las fuerzas de marea ejercidas por Júpiter sobre él podrán conocerse mucho mejor si en 2021 se aprueba la misión *Io Volcano Observer (IVO)*, una de las cuatro que en febrero de 2020 ha pasado el «primer corte» entre las propuestas al programa Discovery de la NASA (las misiones de menor coste de la agencia norteamericana, que no deben superar los 450 millones de dólares). El objetivo de *IVO* es realizar 10 sobrevuelos de Ío entre 2031 y 2035, lo que resulta todo un reto para la electrónica de vuelo dada la intensa magnetosfera del cercano Júpiter. En unos meses sabremos si finalmente esta compleja misión se hace realidad.

La existencia de vida en Ío se considera prácticamente imposible en la actualidad, dado que además de ser un mundo volcánico contiene la menor cantidad de agua, en proporción a su tamaño, entre todos los cuerpos

conocidos del Sistema Solar. A pesar de ello, algunos modelos han postulado que quizá pudo ser habitable en el pasado remoto, pocos millones de años después de su formación. Por tanto, aunque Ío nos recuerda hoy al infernal y estéril planeta Mustafar, en el que Darth Vader perdió su primer duelo contra Obi-Wan Kenobi, no olvidemos que el astronauta David Bowman había encontrado un monolito negro orbitando a su alrededor...



Fotografías de los satélites Ío y Europa tomadas por la misión *Galileo* de la NASA en 1996, con sus tamaños a escala. Imágenes cortesía de NASA/JPL/Universidad de Arizona (Ío) y NASA/JPL/DLR (Europa).

EUROPA

El segundo satélite galileano más cercano a Júpiter es el más pequeño de los cuatro, pero sin duda constituye uno de los lugares donde mayores esperanzas están depositadas sobre la posible presencia de vida extraterrestre. Se trata, por tanto, de un objetivo clave de la astrobiología. Con un diámetro de 3122 km, tiene un período orbital algo mayor de 3,5 días terrestres, y la temperatura media de su superficie es de -171°C . Vista desde fuera, esta luna es una esfera de hielo brillante cuya superficie está cruzada por líneas de color rojizo. Pero si hay un mundo que esconde sorpresas bajo su piel, ese es Europa.

Tiene un núcleo de hierro fundido y un manto formado principalmente por silicatos. Su superficie está compuesta de hielo de agua y sales, por lo que

refleja la luz mucho más eficientemente que nuestra Luna. Como acertadamente la recreaba Arthur C. Clarke en la novela *2001: Una odisea del espacio*, escrita en 1968 en paralelo al guion de la película con cuya cita comenzábamos este capítulo (pero en la cual el destino final de la *Discovery* no es Europa sino el satélite de Saturno Japeto): «A diferencia de la polvorienta Luna, Europa era de una brillante blancura, y mucha de su superficie estaba cubierta de destellantes trozos que se asemejaban a varados icebergs». Una década más tarde de esta predicción, cuando en 1979 las sondas *Voyager* pasaron cerca del satélite, enviaron fotografías en las que se veían zonas de su superficie con fracturas y otras que delataban el movimiento de grandes bloques de hielo. Las imágenes tomadas por el orbitador *Galileo* en la década de 1990 confirmaron estos hallazgos, mostrando disposiciones más o menos caóticas de bloques con diferentes morfologías, tal vez formados por colapsos de las capas exteriores.

El responsable de todo es Zeus, el mismo que raptó a Europa. Las fuerzas de marea que la atracción gravitatoria del planeta gigante ejerce sobre la superficie del pequeño satélite, más acusadas en la cara que lo mira constantemente, inducen flexiones, compresiones y relajaciones que también han producido las numerosas fracturas lineales observadas, extendiéndose miles de kilómetros y con hasta 2 km de anchura. Dentro de ellas existen materiales de relleno ricos en sales, principalmente sulfato de magnesio ($MgSO_4$), cloruro sódico ($NaCl$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) y otros compuestos de azufre, que al ser alterados por la radiación han adquirido un color pardo-rojizo. Una hipótesis alternativa (en realidad, complementaria) es que ese color detectado en las fracturas se deba a la presencia de compuestos orgánicos llamados tolinas: un término acuñado por Carl Sagan en 1979 para describir sustancias complejas y amorfas, compuestas por hidrocarburos e incluyendo nitrógeno, que se forman a partir de moléculas sencillas como metano, etano (CH_3-CH_3) y dióxido de carbono (CO_2) en atmósferas con nitrógeno molecular (N_2), por efecto de la radiación ultravioleta o los rayos cósmicos. Adicionalmente, el escaso número de cráteres de impacto presentes en la superficie del satélite sugiere que ésta se está renovando constantemente, y la edad que actualmente muestra sería de entre sólo 40 y 90 millones de años.

Estas características son compatibles con la existencia de un océano de agua líquida bajo la corteza helada de Europa, una hipótesis que se comenzó a plantear tras los sobrevuelos de las sondas *Voyager* y se vio fortalecida con los datos enviados por *Galileo*. Desde entonces, las observaciones realizadas por telescopios terrestres y el *Hubble* apoyan claramente este modelo frente a la hipótesis alternativa: que la dinámica del hielo superficial fuera el resultado de la actividad convectiva de un hielo menos compacto en las capas

inferiores. Así, el océano de agua subsuperficial estaría originado por el calentamiento resultante de las fuerzas de marea ejercidas por Júpiter, y el desplazamiento de grandes masas de hielo sobre el líquido sería análogo a la tectónica de placas en nuestro planeta, permitiendo el transporte de materiales entre la superficie y el océano, en ambos sentidos. Además, en este sistema se producen eventos de criovulcanismo a través de la cubierta de hielo, en los que el agua desempeña el mismo papel que el magma fundido en los volcanes terrestres. La observación por el *Hubble*, en 2014, de las primeras plumas de vapor de agua emergiendo de la superficie de Europa apoyaron de forma clara la existencia de ese océano subsuperficial.

En la actualidad se piensa que la capa de hielo que constituye la corteza europea tiene un grosor de entre 15 y 25 km, y que bajo ella se extiende un océano global de agua rica en sales, cuya profundidad sería de entre 60 y 150 km. Cuando en el capítulo 5 decíamos que una de las ventajas del agua frente a otros posibles solventes es que su forma sólida, al ser menos densa, flota sobre la líquida, teníamos en mente lugares como Europa. En conjunto, aunque el diámetro de este satélite es sólo una cuarta parte del terrestre, la cantidad de agua líquida que podría esconder es el doble de la que contienen todos los océanos de nuestro planeta. Si las futuras misiones lo confirman, Europa tendría bien ganado su apelativo de «mundo oceánico», que comparte con otros satélites ricos en agua de los que hablaremos posteriormente.

¿VIDA EN EUROPA?

Una de las particularidades del océano bajo la superficie de Europa es que estaría en contacto con el lecho rocoso del manto, en el que existe actividad geológica y probablemente contiene chimeneas hidrotermales submarinas similares a las que conocemos en los fondos de nuestros océanos (tal como se sugiere en la ilustración con la que comienza este capítulo). De hecho, algunos geólogos han propuesto que el manto de Europa podría ser equivalente al satélite Ío. Estas surgencias aportarán al medio acuoso un amplio repertorio de moléculas orgánicas, que en un entorno con tales fuentes de energía estarían poniendo a disposición del sistema los ingredientes básicos para la vida. Además, ese aporte de calor desde el fondo del océano garantizaría un gradiente de temperaturas en la columna de agua que, dada la presión existente en el sistema y la salinidad del medio, abarcaría desde más de 100 °C en las profundidades hasta menos de 0 °C en las capas más altas.

Un gran repertorio de opciones para la biología. Por otra parte, se ha propuesto que además del gran océano global podrían existir pequeños lagos independientes o interconectados, situados a distintas profundidades dentro de la corteza de hielo (tal vez similares a los que se conocen bajo la Antártida), así como cámaras criomagnéticas estables, cuyas aguas podrían contener diferentes niveles de salinidad e incluso de oxígeno disuelto.

Sin lugar a dudas, aunque Europa queda fuera de la zona de habitabilidad alrededor del Sol, constituye un mundo habitable. No tenemos ningún dato que nos lleve a pensar que el océano europeo está realmente poblado por algún tipo de seres vivos, pero sólo esta luna, junto con Encélado en el sistema de Saturno, ofrece tantas posibilidades. Microorganismos anaerobios halófilos adaptados a la alta salinidad de esas aguas, termófilos similares a los que pueblan las surgencias hidrotermales de nuestros fondos oceánicos, o criófilos que tengan su nicho en las interfases agua/hielo de las capas más altas del océano, por ejemplo, podrían vivir felices (es decir, conseguir nutrientes y reproducirse) en el océano de Europa. O, si confiamos en las imaginativas predicciones de la ciencia ficción, todo tipo de animales... con una principal predilección por los cefalópodos.

Pero hemos de utilizar nuestro espíritu crítico, teniendo en cuenta la enorme distancia que separa a este satélite de nuestro planeta y la prácticamente nula probabilidad de que ambos mundos se hayan comunicado a través de meteoritos en el pasado. Por tanto, si existiera algún tipo de vida en las oscuras aguas de Europa no tendría por qué parecerse a nada de lo que conocemos en la Tierra. Lo más plausible es que proviniera de un origen independiente, que a partir del agua y de moléculas orgánicas (pues, como ya hemos comentado varias veces, agua y carbono sí se consideran los requisitos químicos esenciales para cualquier tipo de vida) hubiera dado lugar a una bioquímica diferente, y posteriormente a sistemas biológicos que podrían ser radicalmente distintos a todos los descendientes de LUCA. Por tanto, una vez más, casi todas las criaturas de ficción que los escritores o guionistas han imaginado en las aguas de Europa responden a principios antropocéntricos, «animal-céntricos»... o incluso «LUCA-céntricos» para la vida en el Universo. Definitivamente, no es probable que haya calamares gigantes desplazándose por el océano de Europa.

Volviendo a la ciencia, si la posible vida europea fuera tan distinta de la terrestre, el auténtico reto sería llegar a detectar esos seres vivos y reconocerlos como tales. Deberíamos poder descubrir que un sistema químico presente en esas aguas funciona fuera del equilibrio termodinámico y es capaz de autorreproducirse y evolucionar, aunque nada de su bioquímica nos recuerde a la nuestra. Un ser, por ejemplo, que no contenga proteínas ni ácidos nucleicos, que no use el ATP como molécula energética o cuya compartimentación se consiga a expensas de componentes diferentes de los

lípidos. En algunos centros de investigación del mundo se está trabajando actualmente sobre lo que esto supone, tanto desde el punto de vista conceptual como tecnológico, de cara a futuras misiones. Entre ellos, según indicábamos en el capítulo 5, un grupo de investigadores del Centro de Astrobiología hemos propuesto una *suite* de instrumentos biosensores (basados en espectrometría Raman y en la tecnología de microarrays de anticuerpos y aptámeros) que podrían permitir identificar funciones bioquímicas básicas, presentes en formas de vida europeas tanto similares como muy diferentes a las terrestres. Y, lógicamente, nuestra idea es que dichos instrumentos pudieran aplicarse en el futuro también a la investigación *in situ* de otros satélites o planetas de interés astrobiológico, incluyendo Encélado o Marte.

Para dar los primeros pasos hacia la respuesta de una cuestión tan fascinante como la posible existencia de vida en Europa, la comunidad científica necesita poder acceder al agua subsuperficial del satélite, analizar en detalle su composición química... y tal vez detectar la presencia de biomoléculas o incluso organismos de algún tipo. Lógicamente, perforar esa gruesa capa de hielo resultaría inviable desde el punto de vista técnico. Pero las observaciones del *Hubble* desde 2012, junto al reanálisis de los datos obtenidos por *Galileo*, han mostrado que debido a la presión interna de dicho océano se pueden producir plumas o «criogéiseres» de vapor de agua a través del hielo, que originarían eyeciones de hasta 160 km de altura sobre la superficie. Como dato adicional, utilizando los espectrógrafos del observatorio *W. M. Keck* en Hawái, en 2019 se ha detectado vapor de agua sobre la superficie de esta luna, formando parte de una muy tenue e intermitente atmósfera dominada por el oxígeno molecular (O_2), en principio no generado por ningún proceso biológico sino precisamente por fotolisis del vapor de agua. Por tanto, como veremos al final de este capítulo, es viable diseñar misiones de sobrevuelo de Europa que intenten atravesar exactamente las plumas de agua para analizarlas con toda su instrumentación. Tendríamos así acceso al océano sin necesidad de llegar a él. Haciendo un símil gastronómico, no podríamos probar el sabor del guiso que quizás se esté cocinando en Europa, pero sí oler el vapor que sale por la válvula de seguridad de la olla. Como comentaremos en el capítulo siguiente, algo parecido hizo la sonda *Cassini* durante sus sobrevuelos de Encélado.

Además de las misiones que comentaremos, otra forma de estudiar la dinámica de los mundos oceánicos (en los sistemas de Júpiter y Saturno), así como sus posibilidades para constituir entornos habitables, es realizar experimentos de simulación en los laboratorios terrestres. En ellos se preparan «hielos artificiales» a partir de disoluciones de diferentes sales (como sulfatos o cloruros) en agua, a las que se añaden (en función del cuerpo que se desee recrear) volátiles como metanol (CH_3OH), amoníaco o dióxido de carbono. Esas soluciones se someten a presiones muy altas (en torno a 10 000

atmósferas) y temperaturas muy bajas (cercanas a los -200°C), con lo que se forman hielos de distintos tipos, diferentes sales hidratadas y clatratos de gas similares a los que pueden existir en dichas lunas. Al analizar estos productos mediante espectrometría Raman *in situ* se puede determinar qué moléculas se producen, en función de las vibraciones detectadas entre sus átomos, mientras que por calorimetría se estudia su calor específico, los parámetros de las reacciones implicadas en su formación y la propia dinámica de los procesos de criomagmatismo. En la conversación con la que termina este capítulo tendremos ocasión de conocer a una de las científicas que está trabajando activamente en este tipo de experimentos.

Un mundo tan prometedor para la vida como Europa no ha pasado desapercibido para los autores de relatos, películas, cómics e incluso videojuegos de ciencia ficción. Entre las novelas más interesantes, además de las de Arthur C. Clarke 2010: *Odisea dos* (1982) y 2061: *Odisea tres* (1988), podemos citar *El hechicero de Linn* (Alfred E. van Vogt, 1950), *Lucky Starr y las lunas de Júpiter* (Isaac Asimov, 1957), *The Memory of Whiteness* y *El sueño de Galileo* (Kim Stanley Robinson, 1985 y 2009), *La fragua de Dios* (Greg Bear, 1987), *Europa Strike* (Ian Douglas, 2000), *The Quiet War* (Paul J. McAuley, 2008), o la trilogía *Frozen Sky* (Jeff Carlson, 2012, 2014 y 2016). En el cine, una de las películas recientes que merece la pena ver es *Europa Report* (Sebastián Cordero, 2013). Tenemos muchas opciones para conocer lo que Europa podría haber sido, o podrá llegar a ser, gracias a la imaginación de estos grandes contadores de historias. Y no olvidemos que Julio Verne, en su *Viaje al centro de la Tierra* (publicado en 1864) ya había fantaseado con la existencia de un gran océano en el interior de nuestro planeta.

GANIMEDES

La luna más grande de todo el Sistema Solar, con un diámetro de 5262 km, es también el único satélite conocido que tiene su propio campo magnético, embebido en la magnetosfera de Júpiter. Ganimedes orbita el planeta en poco más de 7 días terrestres, y su temperatura superficial media es de -163°C . Las medidas realizadas por el orbitador *Galileo* determinaron que en su estructura se distinguen tres zonas bien diferenciadas: un núcleo de hierro parcialmente fundido (responsable de dicho campo magnético), un manto rocoso de silicatos y una corteza exterior formada principalmente por hielo de agua (aunque con rocas incluidas en esa matriz, como se descubrió en 2004).

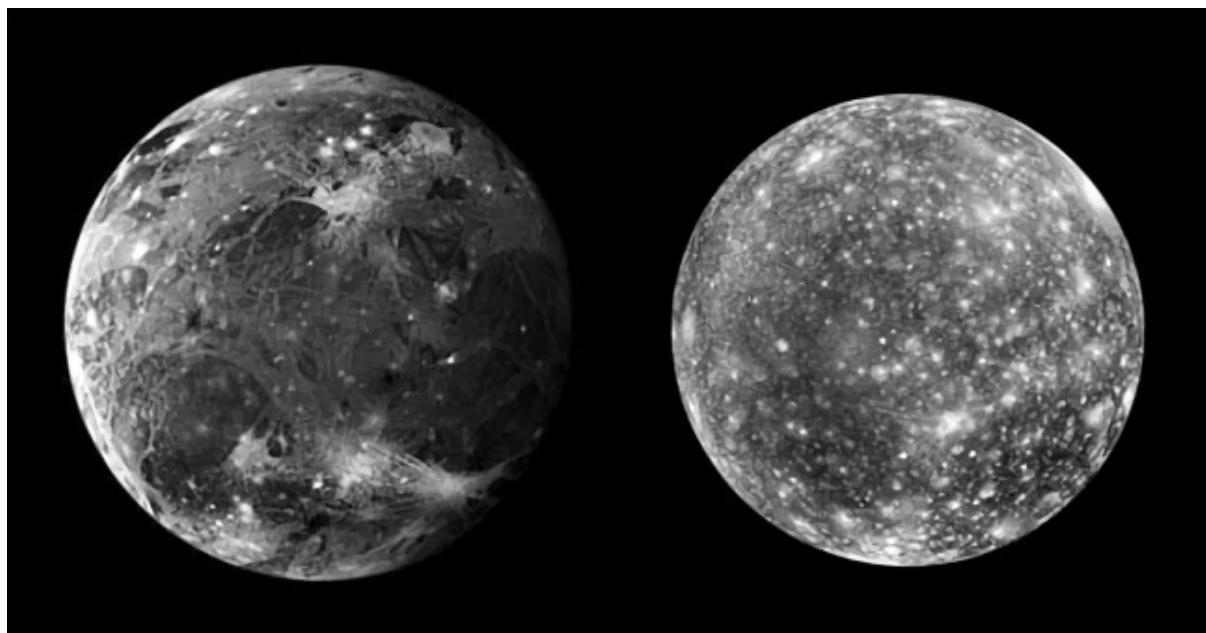
que puede tener hasta 800 km de espesor. Además, todas las pruebas indican que existiría un gran océano de agua líquida bajo la superficie, en este caso probablemente dispuesto en forma de capas en las que el hielo y el agua con alta salinidad (salmueras) se van intercalando sucesivamente. Como ocurre en Europa, se estima que el agua líquida contenida en Ganimedes supera en cantidad a la que tenemos en la Tierra. Pero, a diferencia del océano europeo, en el de Ganimedes no parece existir un contacto directo entre el agua y las rocas del manto, lo que ofrece menos opciones para conseguir el repertorio de compuestos químicos que podrían dar lugar a la vida.

Las imágenes que se han obtenido de su superficie por las misiones que hasta ahora han estudiado el sistema joviano muestran que Ganimedes tiene una historia geológica larga y compleja. Así, en torno al 40 % del hielo superficial expuesto es oscuro y rugoso, tapizado por cráteres de impacto antiguos y aplazados, por lo que podría corresponder a la corteza original del satélite. Pero sobre ese sustrato discurren grandes bandas y estrías con geometrías intrincadas, tonalidades claras y con mayor brillo, que son algo más jóvenes. Se supone que estos surcos (algunos de los cuales muestran paredes de hasta 700 m de altura y miles de kilómetros de longitud) se originaron como fallas producidas en la corteza de hielo oscuro por la actividad tectónica, rellenándose posteriormente con agua inyectada desde la subsuperficie que al irse congelando se expandió hacia los lados. A su vez, en estos terrenos claros también aparecen cráteres de impactos meteoríticos más recientes, que en ocasiones muestran las morfologías estrelladas típicamente producidas por la eyeción de materiales desde el centro.

Además, la investigación de Ganimedes realizada con el telescopio espacial *Hubble* mostró que contiene una atmósfera muy tenue y en constante renovación. Está formada principalmente por oxígeno molecular, como la europea, pero en este caso incluye también oxígeno atómico y ozono (O_3). Con todo, a la espera de lo que se averigüe con la misión *JUICE*, de la que más tarde hablaremos, este mundo oceánico se considera el segundo objetivo astrobiológico más interesante del sistema joviano, después de Europa.

Al ser el satélite más grande que se conoce, Ganimedes ha sido visitado por numerosos autores de ciencia ficción, apareciendo en relatos como *Navidad en Ganimedes* (Isaac Asimov, 1940), *El granjero de las estrellas* (Robert A. Heinlein, 1950), *Las nieves de Ganimedes* (Poul Anderson, 1954), *Yo visité Ganimedes* (José Rosciano, 1972), o *Buddy Holly está vivo y sano en Ganimedes* (Bradley Denton, 1992). Pero si hay una referencia literaria que en este caso resulta especialmente relevante es la que debemos al mismísimo Miguel de Cervantes, quien además de ser un extraordinario escritor mostró en varias de sus obras un interés por la astronomía y unos conocimientos en este campo muy superiores a los de los intelectuales de su época. Así, cuando en 1613 (sólo tres años después del descubrimiento de Galileo) publicó la

primera de sus *Novelas ejemplares*, titulada *La gitanilla*, incluyó en ella un romance que cantaba las virtudes de la reina Margarita de Austria. Pues bien, en él encontramos un grupo de versos que, además de su inspiración mitológica, dejan pocas dudas acerca del apoyo de Cervantes al modelo heliocéntrico y muestran que ya conocía la existencia de satélites que van y vienen alrededor de Júpiter: «Junto a la casa del Sol / va Júpiter; que no hay cosa / difícil a la privanza / fundada en prudentes obras. / Va la Luna en las mejillas / de una y otra humana diosa; / Venus casta, en la belleza / de las que este cielo forman. / Pequeñuelos Ganimedes / cruzan, van, vuelven y tornan / por el cinto tachonado / de esta esfera milagrosa».



Fotografías de los satélites Ganimedes y Calisto tomadas por la misión *Galileo* de la NASA (en 1996 y 1997, respectivamente) con sus tamaños a escala. Imágenes cortesía de NASA/JPL (Ganimedes) y NASA/JPL/DLR (Calisto).

CALISTO

El más alejado de los cuatro satélites galileanos es el segundo más grande de Júpiter, con un diámetro de 4821 km, es decir, prácticamente idéntico a Mercurio. A pesar de su mayor distancia al planeta, su período orbital es de algo menos de 17 días terrestres, lo que explica que Galileo pudiera ver con su telescopio los cambios en las posiciones relativas de él y sus tres compañeros más interiores al observarlos en noches sucesivas. La influencia

de la magnetosfera de Júpiter en Calisto es mucho menor que en sus otros tres amantes, y las fuerzas de marea prácticamente no lo afectan. Por tanto, la superficie de este satélite es muy poco activa geológicamente, y al no presentar actividad tectónica ha mantenido muchos y muy variados cráteres de impacto, considerándose la más antigua y craterizada de todo el Sistema Solar.

En cuanto a su composición, el núcleo de Calisto es diferente del de sus vecinos pues contiene principalmente silicatos. En la superficie, cuya temperatura media es de -139°C , se han detectado también silicatos, hielo de agua y de dióxido de carbono. Además, se considera que en ella puede existir materia orgánica compleja, quizás en forma de tolinas. Esta luna contiene una atmósfera muy tenue formada por dióxido de carbono, que es renovada cada cuatro días por sublimación del hielo superficial de este compuesto. Desde los sobrevuelos realizados por la misión *Galileo* se piensa que su ionosfera podría estar dominada por el oxígeno molecular, aunque este gas no ha sido detectado directamente.

Es posible que los procesos de diferenciación ocurridos en Calisto pudieran originar un océano de agua líquida rica en sales bajo su superficie, a una profundidad de en torno a 100 km. Esto le dota también de notable interés para la astrobiología y, aunque sus condiciones para albergar vida son menores que las de Europa y Ganimedes, será estudiado también por la misión *JUICE*. De hecho, dado que recibe mucha menor dosis de radiación de Júpiter que los otros tres satélites galileanos, se ha propuesto que sería el mejor lugar para establecer una hipotética colonia humana en el sistema joviano, siguiendo los pasos de varios autores de ciencia ficción. Ya en 1930, el ingeniero y escritor Harl Vincent publicó en la revista *Amazing Stories* dos relatos que transcurrían en esta luna: *Los exploradores de Calisto* y *Calisto en guerra*. Por su parte, Isaac Asimov comenzó precisamente en este satélite su exitosa carrera como escritor de ficción, al publicar con sólo dieciocho años el relato *La amenaza de Calisto*, en el que nos presenta un mundo con lagos y vegetación, habitado por amenazadoras orugas. Tras estos pioneros, otros autores han escrito obras en las que se muestra al satélite habitado por los humanos, como en *The Mold of Yancy* (Philip K. Dick, 1955), *Jandar of Callisto* y las otras siete novelas de su serie (Lin Carter, 1972-1978), o *2312* (Kim Stanley Robinson, 2012, en la que también aparecen Mercurio e Ío). Además, si estamos pensando en colonizar los alrededores de Júpiter, recordemos que Arthur C. Clarke nos advirtió que no tocáramos Europa... pero no dijo nada sobre Calisto.

LA MISIÓN JUICE

En junio de 2022, once años después del despegue de la última misión con destino al sistema joviano, la ESA va a enviar su primera sonda a los satélites galileanos. La misión, una de las de alto presupuesto del programa Cosmic Vision de la agencia europea, se llama *Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE)* y estudiará las tres lunas que probablemente contienen océanos de agua líquida bajo su superficie: Europa, Ganimedes y Calisto. Tras un largo y complejo viaje en el que se ayudará de múltiples asistencias gravitatorias (en un capítulo posterior describiremos este concepto) mediadas por los planetas interiores del Sistema Solar, tiene previsto comenzar a orbitar Júpiter en octubre de 2029. Realizará un primer sobrevuelo de Ganimedes ese mismo año, otro de Europa en 2030, varios de Calisto a partir de 2031 y el segundo de Europa a comienzos de 2032. En septiembre de 2032 se colocará en órbita polar de Ganimedes y se convertirá así en el primer satélite artificial en torno a una luna diferente de la terrestre. La orbitará a 500 km de altura hasta que su combustible se agote un año y medio más tarde, y su misión terminará haciéndolo impactar sobre la superficie de Ganimedes. Lógicamente, dado el final que va a tener *JUICE*, durante su construcción y ensamblaje se están teniendo en cuenta todas las restricciones de protección planetaria de categoría IV.

El objetivo de esta ambiciosa misión es estudiar la habitabilidad de las tres lunas, muy especialmente de Ganimedes. En este satélite, *JUICE* va a caracterizar las masas de agua subsuperficiales y la estructura en capas de su océano (lo que también realizará en Calisto), estudiará las propiedades físicas de la corteza de hielo, y realizará un mapa topográfico y composicional de toda la superficie. Además, durante sus órbitas investigará la estructura y distribución de masas en el interior de esta luna, medirá su campo magnético y analizará la tenue e intermitente atmósfera que presenta. En el caso de Europa, en los dos sobrevuelos planteados se aproximará hasta unos 500 km de su superficie, sobre lugares diferentes de los hemisferios norte y sur. Durante ellos, *JUICE* se centrará en la caracterización de las fracturas observadas en el hielo, en la medida del grosor de esa corteza helada en las regiones donde se han detectado plumas de vapor de agua, y en el análisis químico de su superficie, incluyendo la posible detección de compuestos orgánicos.

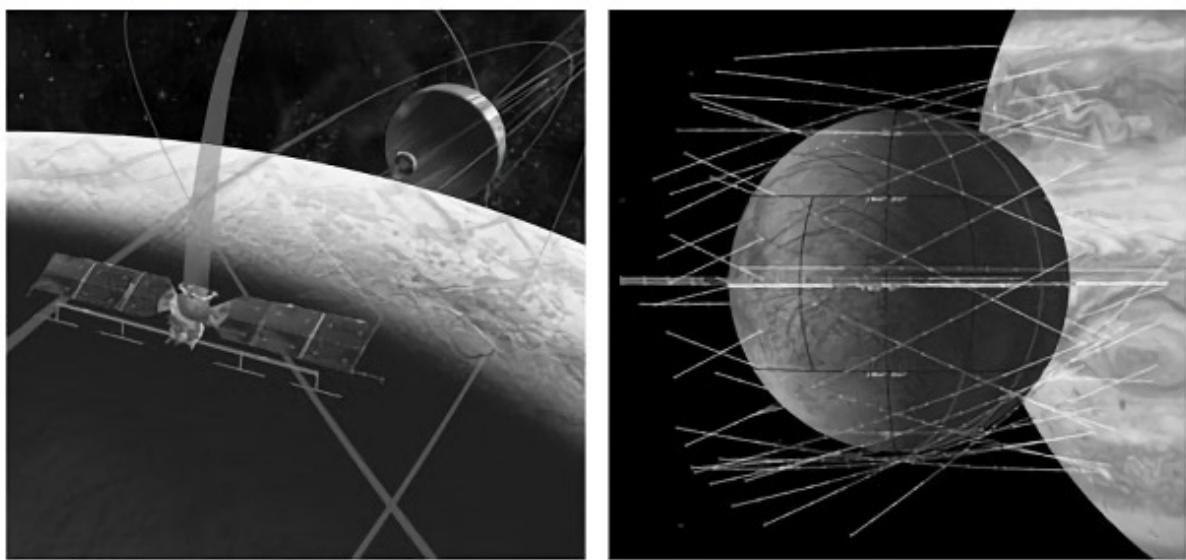
Para todo ello, *JUICE* contará con once instrumentos altamente complementarios: el sistema de cámaras *Jovis, Amorum ac Natorum Undique Scrutator (JANUS)* con resolución espacial de hasta 2,4 m, el altímetro láser *Ganymede Laser Altimeter (GALA)*, el espectrómetro infrarrojo/visible *Moons*

And Jupiter Imaging Spectrometer (MAJIS) con el que se estudiará la composición de los hielos y minerales, el espectrómetro ultravioleta *UV imaging Spectrograph (UVS)*, el espectrómetro *Sub-millimeter Wave Instrument (SWI)*, el radar de penetración *Radar for Icy Moons Exploration (RIME)*, el magnetómetro *JUICE Magnetometer (J-MAG)*, la suite de sensores para analizar la magnetosfera de Júpiter *Particle Environment Package (PEP)*, los instrumentos para estudiar el entorno de plasma *Radio & Plasma Wave Investigation (RPWI)*, así como los analizadores del campo gravitatorio de Júpiter y sus lunas *Gravity & Geophysics of Jupiter and Galilean Moons (3GM)* y *Planetary Radio Interferometer & Doppler Experiment (PRIDE)*. La comunidad científica espera con gran interés los datos que aporte esta sonda con la que Europa va a llegar a Europa... aunque principalmente estudiará Ganimedes.

EUROPA CLIPPER

La siguiente apuesta de la NASA para volver al sistema joviano está claramente enfocada hacia el satélite Europa, con el objetivo general de estudiar si allí existen los tres ingredientes fundamentales para la vida: agua en estado líquido, materia orgánica y fuentes de energía. La misión *Europa Clipper*, que aprovecha todo lo aprendido con las sondas *Galileo* y *Cassini*, nace como la evolución y optimización de proyectos previos con destino al sistema joviano que no llegaron a materializarse. En su propuesta actual, aprobada definitivamente en 2019, se ha planteado como un orbitador de Júpiter que describirá trayectorias muy elípticas para minimizar las dosis de radiación recibidas desde el planeta. Con ello, a lo largo de sus más de tres años de misión nominal (que podría ser extendida) realizará 45 sobrevuelos de Europa a diferentes latitudes de ambos hemisferios, llegando a aproximarse hasta sólo 25 km de su superficie. La experiencia acumulada al sobrevolar Encélado con la sonda *Cassini*, como comentaremos en el próximo capítulo, va a ser fundamental para lograrlo. El lanzamiento de esta misión está previsto para el año 2025, en la ventana siguiente a la utilizada por la ESA para *JUICE*, y (si el potente lanzador *Space Launch System* está disponible a tiempo) seguiría una trayectoria directa con la que llegará a Júpiter en 2028. En caso contrario, lanzándose con un cohete convencional y realizando varias asistencias gravitatorias, alcanzaría su destino en 2031.

Gracias a la cobertura tan amplia que realizará de la superficie de Europa, esta misión podrá aportar gran cantidad de información sobre su topografía, dinámica y composición. Además, analizará con un detalle sin precedentes las características del océano subsuperficial y tendrá muchas ocasiones de estudiar las plumas de vapor de agua que puedan producirse durante su vida útil. Como está previsto que se aproxime muchísimo a la superficie europea, la idea del equipo científico es que pueda llegar a intersectar alguna de esas eyecciones y así analizar directamente la composición del agua proveniente del océano, según comentábamos previamente.



Representación artística de la misión *Europa Clipper* de la NASA. A la derecha se muestran las trayectorias de los sobrevuelos previstos, con los que se conseguirá una cobertura regional global de Europa. Imágenes cortesía de NASA/JPL-Caltech.

A día de hoy, la carga útil en desarrollo para *Europa Clipper* está compuesta por nueve instrumentos: la cámara *Europa Imaging System* (*EIS*) con una espectacular resolución de hasta 50 cm, el espectrómetro infrarrojo *Mapping Imaging Spectrometer for Europa* (*MISE*), con el que se podrá estudiar la presencia y distribución de compuestos orgánicos (incluidas tolinas y también aminoácidos) además de sales y las fases del hielo, el espectrómetro ultravioleta *Europa Ultraviolet Spectrograph* (*UVS*), los espectrómetros de masas *Mass Spectrometer for Planetary Exploration* (*MASPEX*) y *Surface Dust Mass Analyzer* (*SUDA*), que caracterizarán respectivamente los gases atmosféricos y las pequeñas partículas de polvo eyectadas desde la subsuperficie, el analizador multiespectral *Europa Thermal Emission Imaging System* (*E-THEMIS*), el radar de penetración *Radar for Europa Assessment and Sounding: Ocean to Near-Surface* (*REASON*), el analizador del campo magnético *Plasma Instrument for Magnetic Sounding* (*PIMS*), y un magnetómetro aún en fase de estudio tras ser rechazada la propuesta inicial por su elevado coste. Durante el tiempo que falta hasta el lanzamiento de esta

misión, quizá alguno de los instrumentos sea ligeramente modificado u optimizado. En cualquier caso, la enorme capacidad analítica de *Europa Clipper* abrirá una nueva etapa en nuestro conocimiento sobre este mundo oceánico tan prometedor para la vida.

EUROPA LANDER: ¿TOCAREMOS LA SUPERFICIE DE ESTA LUNA?

Otro de los objetivos de la misión *Europa Clipper* es proporcionar información que resultará fundamental para la selección del lugar en el que podría aterrizar *Europa Lander*: la primera sonda que llegaría a tocar la superficie de este satélite. Este proyecto, largamente esperando por la comunidad científica, aún no ha sido aprobado formalmente por la NASA pero todo indica que en pocos años podrá ser una realidad. De hecho, los más optimistas mantienen que quizá llegue a lanzarse aprovechando la ventana de 2025, aunque en cualquier caso no saldría conjuntamente con *Europa Clipper*.

El objetivo de este módulo aterrizador fijo (nunca se ha planteado de forma realista la opción de un *rover*) es claramente astrobiológico, ya que una vez posado sobre Europa investigaría la presencia de moléculas biomarcadoras durante las tres semanas de vida útil que le pueden proporcionar sus baterías. Las buscaría en muestras recogidas con un brazo robótico capaz de extraerlas a unos 10 cm de profundidad, descartando los materiales más superficiales y alterados por las grandes dosis de radiación que llegan desde Júpiter. En tales muestras, un conjunto de instrumentos analíticos y biosensores que aún se encuentran en fase de estudio podría, en el mejor de los casos, llegar a encontrar evidencias de la vida que tal vez esté desarrollándose en su océano, unos 20 km más abajo. Hasta el momento, la NASA ha preseleccionado catorce instrumentos potenciales que podrían constituir la carga útil de unos 33 kg de este aterrizador, y actualmente se encuentran en fase de estudio y desarrollo para acomodarse a los objetivos científicos de la misión. Entre ellos hay biosensores basados en microfluídica, analizadores químicos, espectrómetros Raman y de masas, un microscopio, cámaras de alta resolución, magnetómetros y sismómetros. A nivel tecnológico, en paralelo se están evaluando las limitaciones que impone el entorno de radiación de Júpiter sobre la electrónica y los materiales que incluirá este módulo.

Así, aunque la definición del *Europa Lander* necesita aún mucho desarrollo, la capacidad de realizar una investigación *in situ* de esta luna ofrecería posibilidades inmejorables en nuestra búsqueda de otras posibles vidas en el Cosmos. Pero, para que esta misión sea realmente informativa, es evidente que las restricciones de protección planetaria (de categoría IV y durante todas las fases de su desarrollo) serán las mayores jamás planteadas en exploración espacial. Por comparación con Marte, podríamos decir que en Europa toda su superficie es una «región especial». Y muy especial. Ha de garantizarse, por tanto, la mayor esterilidad posible en esta sonda. Al fin y al cabo, como comentábamos al principio de este capítulo, si aterrizamos allí estaremos ignorando la orden que nos transmitió *HAL 9000* en 1982... y todos sabemos que esto entraña ciertos riesgos.

Por si tal atrevimiento no fuera suficiente, el futuro lejano puede ser aún más arriesgado: se están planteando opciones para el *Europa Ocean Explorer*, un pequeño submarino que tendría la capacidad de fundir lentamente la gruesa cubierta de hielo del satélite, llegar a su océano y navegar por él. Así se podría analizar directamente la composición del agua de Europa, y eventualmente encontrar allí algún tipo de vida. Varios prototipos de robot penetrador o *cryobot* ya se han probado en la Antártida y en glaciares de nuestro planeta, con notable éxito. Entre ellos, el proyecto financiado por la NASA *Very-deep Autonomous Laser-powered Kilowatt-class Yo-yoing Robotic Ice Explorer (VALKYRIE)* es un *cryobot* cilíndrico de 2,8 m de largo y 25 cm de diámetro, capaz de fundir el hielo mientras avanza autónomamente a lo largo de él, llegar al agua subglaciar y analizarla empleando la *suite* de instrumentos que contiene. Otro prototipo que está estudiando la NASA es el *Buoyant Rover for Under-Ice Exploration (BRUIE)*, con la forma de un eje terminado en dos ruedas metálicas y que gracias a su flotabilidad es capaz de «rodar» a lo largo de la superficie inferior del hielo que está en contacto con el agua, mientras los instrumentos alojados en ese eje central la van analizando. Quizá algún día robots similares a estos puedan analizar las aguas subsuperficiales de mundos oceánicos como Europa, Ganimedes o Encélado.

El futuro que nos espera en la exploración de los satélites del Sistema Solar es realmente apasionante. Tal vez en unas décadas sepamos si la ficción ha aventurado situaciones imposibles en las lunas de Júpiter... o si se quedó corta.



Un café con... Olga Prieto Ballesteros



Doctora en Geología. Coordinadora del Grupo de Geología Planetaria y Atmósferas en el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA, Torrejón de Ardoz, Madrid) e integrante de los equipos científicos de los instrumentos RLS/ExoMars, MEDA/Mas2020 y JANUS/JUICE.

En astrobiología tenemos como uno de nuestros objetivos la búsqueda de vida fuera de la Tierra, y para ello lo primero es encontrar «lugares habitables». ¿Crees que la definición clásica de zona o banda de habitabilidad debería ser ampliada en función de lo que estamos aprendiendo sobre las lunas heladas en nuestro propio Sistema Solar?

La banda de habitabilidad es un concepto nacido en el campo de la astrofísica para designar la zona alrededor de una estrella donde, gracias a su energía, es posible la presencia de agua líquida sobre las superficies planetarias. No es más que eso. Resulta muy útil porque es relativamente fácil de medir, incluso en sistemas planetarios alejados del nuestro. Sin embargo, esa definición clásica no contempla otros lugares donde se pueda estabilizar el agua líquida. La presión y el calor interno permiten que esto ocurra en muchas lunas del Sistema Solar exterior como Europa, Encélado, Titán o Ganimedes. Por tanto, el concepto clásico se debería denominar «banda de habitabilidad en

superficie». El problema para encajar los océanos subsuperficiales en la definición astrofísica es que están ocultos: los conocemos gracias a las señales indirectas sobre la presencia de agua líquida proporcionadas por instrumentos geofísicos en misiones espaciales. Sin duda, los mundos con océanos en nuestro Sistema Solar multiplican las opciones de habitabilidad en el Universo.

En tu opinión, ¿son Europa y Encélado los mejores objetivos astrobiológicos en los sistemas de Júpiter y Saturno, respectivamente? ¿Cuáles consideras las principales similitudes y diferencias entre ambos satélites, desde el punto de vista geológico?

Para la astrobiología, ambas lunas destacan entre los mundos oceánicos porque el agua líquida está en contacto con una capa rocosa. Y sabemos que la interacción entre estos materiales puede producir gradientes geoquímicos útiles para la vida. Podemos suponer que como Europa (con el tamaño aproximado de nuestra Luna) es seis veces más grande que Encélado y tiene una fracción rocosa mayor, dicha interacción presumiblemente estará más extendida. Por otra parte, los dos satélites muestran evidencias de una actividad geológica intensa, que ha renovado su superficie en tiempos recientes. Además, el descubrimiento de géiseres en Encélado por la sonda *Cassini* fue impresionante. Y la suerte quiso que la nave pasara por encima de los materiales eyectados justo durante un pulso del géiser, con lo que se pudo analizar la composición: contenía agua y algunas moléculas orgánicas. En el caso de Europa aún no tenemos detalles sobre la composición de su océano interior, pero esperamos que las misiones ya previstas nos permitan analizar también esas eyeciones.

Entonces, ¿crees que estas lunas heladas tienen más opciones que Marte para albergar vida en la actualidad? ¿Y con respecto a Titán, bajo cuya prometedora superficie también parece existir un gran océano de agua líquida?

Me inclino a pensar que sí hay más opciones en estas lunas, aunque sin ser categórica. Las grandes masas de agua de la superficie de Marte datan de los primeros tiempos de su historia y ya desaparecieron, aunque la sonda *Mars Express* ha detectado depósitos actuales de materiales empapados en agua y varios investigadores piensan que podría haber mucha agua líquida en profundidad.

Por su parte Titán es muy atractivo, en especial debido a las posibles reacciones entre las moléculas orgánicas y el agua líquida profunda. Pero su océano subsuperficial está atrapado entre capas de distintas fases de hielo, sin contacto con rocas. Además, la temperatura estimada es sumamente baja: para

mantenerse líquida, el agua necesita un compuesto químico anticongelante, tal vez el amoníaco... y esa «contaminación» perturbará algunas propiedades de la propia agua.

Como geóloga, has estudiado numerosos ambientes de nuestro planeta que constituyen análogos de entornos extraterrestres donde puede haberse desarrollado la vida. Me gustaría saber cuáles te parecen los mejores, por un lado para Marte y por otro para las lunas heladas del Sistema Solar.

El trabajo de campo en análogos planetarios es muy grato y facilita enormemente la investigación astrobiológica, aunque la analogía nunca es perfecta y suele implicar sólo ciertos parámetros. Nuestro planeta es tan complejo que podemos encontrar análogos del pasado y del presente de Marte con relación a su clima, a los sistemas químicos presentes o a los procesos geomorfológicos producidos. Destacaría el desierto de Atacama y nuestro río Tinto, que han sido reconocidos por su extrema aridez y su particular mineralogía, respectivamente. Las lunas heladas tienen también sus ambientes análogos, como los sistemas geotermales/hidrotermales de fondo marino, donde se desarrollan exuberantes comunidades de organismos alrededor de fumarolas, en la más absoluta oscuridad y a altísimas presiones; o los lagos subsuperficiales antárticos donde se produce interacción entre la roca y el agua líquida bajo la presión de una gran capa de hielo.

Mirando por un momento hacia Marte, Olga, dado que eres experta en clatratos de gas aprovecho para preguntarte tu opinión sobre los picos de metano detectados en su atmósfera... ¿Apostarías por que son de origen geológico o biológico?

No me atrevo a apostar sobre el origen, pero sí aseguraría (a pesar de los últimos datos de *TGO-ExoMars*) que en Marte, como en la Tierra, hay yacimientos subsuperficiales albergando ese metano que ahora escapa a la atmósfera por algún motivo. No lo digo sólo por las medidas directas de este gas realizadas por las sondas espaciales, sino porque hay evidencias geológicas en la superficie de Marte, como volcanes de barro, que indican una liberación de gases a la atmósfera atravesando sedimentos.

Procesos geológicos como la serpentización (alteración hidrotermal de rocas básicas) o el metabolismo biológico pueden generar metano y éste se irá acumulando en depósitos. Si a cierta profundidad hay agua en los sedimentos, líquida o sólida, el gas y la baja temperatura inducen la formación de cristales de clatrato y el metano se queda atrapado en su interior. Pero ¿por qué se desestabilizan ahora y se escapa el gas? Una razón podría ser que se esté produciendo un cambio global del clima marciano, como proponíamos algunos colegas y yo hace varios años.

Estuviste directamente implicada en la fase de planificación de la misión Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) de la ESA, y ahora formas parte del equipo científico de uno de sus instrumentos. ¿Puedes resumirnos los principales objetivos de este ambicioso proyecto con el que «Europa llegará a Europa» y a otras lunas del sistema joviano?

JUICE es la primera misión de gran presupuesto del programa Cosmic Vision de la ESA, que intentará resolver algunas de las grandes preguntas planteadas por las sondas que visitaron el sistema de Júpiter anteriormente, como *Galileo* y las *Voyager*. *JUICE* tiene dos objetivos principales: i) caracterizar por primera vez las lunas de Júpiter como objetos planetarios, centrándose en Ganimedes, Europa y Calisto; y ii) explorar el sistema de Júpiter como arquetipo de gigante de gas.

En paralelo, la NASA va a enviar la misión Europa Clipper, más centrada en esta luna, que sobrevolará en varias ocasiones. ¿En qué aspectos te parece una propuesta más ambiciosa que la misión europea, y hasta qué punto son ambas complementarias?

La misión de la NASA sobrevolará específicamente Europa 45 veces, y la de la ESA investigará el sistema joviano en general para centrarse finalmente en Ganimedes. Ganimedes despierta mucho interés desde el punto de vista planetológico ya que tiene características únicas, como su campo magnético intrínseco, un océano interno entre capas de hielo a pesar de no tener actividad actual, y una dicotomía de materiales de edad diferente con rasgos geológicos superficiales muy interesantes. Aunque para la astrobiología Europa es más atractiva, aproximarse a ella es muy arriesgado debido a los altísimos niveles de radiación que llegan desde Júpiter. Para que *JUICE* funcione durante más tiempo, se acercará a Europa en sobrevuelos cortos a distinta altura, y nos transmitirá los datos mientras se aleja a órbitas más seguras.

En cualquier caso, *JUICE* y *Europa Clipper* se complementan muy bien. De hecho, en su momento ambas agencias pensaron constituir una misma misión con las dos naves (llamada *Europa and Jupiter System Mission, EJSM*), pero finalmente la colaboración fracasó. Con el nuevo planteamiento sigue habiendo ciencia sinérgica, particularmente porque la instrumentación de las dos misiones es muy similar.

Estamos también esperando que la NASA confirme el envío de Europa Lander para analizar su superficie in situ. ¿Crees que realmente veremos a este aterrizador trabajando allí? ¿Qué resultados podría proporcionarnos, y cómo cumplirá las estrictas restricciones de protección planetaria en un entorno tan delicado como ése?

Tal como hemos aprendido con las misiones en Marte, trabajar a escala local permite conocer mucho mejor el mundo estudiado, realizar muestreos frecuentes y detectar materiales a baja concentración o sólo presentes en zonas concretas. Como sabes, la radiación altera irreversiblemente los materiales de la superficie en poco tiempo, por lo que es necesario analizar muestras frescas que puedan preservar las huellas de un ambiente habitable. Pero llegar a la superficie de Europa es muy arriesgado, altamente costoso y plantea retos tecnológicos importantes ya que carece de atmósfera y su topografía es desconocida. Todo ello está retrasando los planes del *Europa Lander*.

La protección planetaria en esta misión es otro asunto peliagudo, pues los protocolos aplicados en Marte no sirven del todo para una luna de hielo con un océano de agua subsuperficial. Adecuar estas pautas requiere estudios concienzudos para, por ejemplo, definir las condiciones compatibles con la replicación de los seres vivos allí (actividad del agua, temperatura, etc.) y determinar qué microorganismos podrían suponer un problema si llegaran como contaminantes.

En tu laboratorio realizáis experimentos con agua y hielos a alta presión. ¿Qué sistemas se logra simular así y cuáles son los resultados principales que estáis obteniendo?

La simulación experimental ayuda a entender cómo ocurren los procesos químicos y geológicos en condiciones extremas, y completa la información obtenida en los análogos terrestres. Nuestro laboratorio cuenta con equipos, diseñados por nosotros, capaces de recrear las condiciones tanto de ambientes en profundidad como de las superficies de diferentes lunas. Podemos simular los fondos oceánicos de Ganimedes, donde hay presiones en el orden de gigapascales, o determinar el efecto de la radiación de Júpiter sobre las sales de Europa en ultra alto vacío y a temperaturas de -150 °C. También estudiamos la evolución geoquímica de los fluidos de las lunas, que pueden proceder del océano o de la fusión parcial de las cortezas heladas. Hemos obtenido resultados destacables sobre el criomagmatismo, cómo evolucionan los fluidos que ascienden y cuál puede ser el origen de las estructuras superficiales que las sondas espaciales observan en Europa. Además, investigamos cómo se produce la diferenciación de los fluidos, que puede fraccionar materiales cruciales para la habitabilidad y dirigir el ciclo de algunos elementos químicos. ¡Es un trabajo apasionante!

Las lunas de los gigantes de gas están a mucha distancia de la Tierra y probablemente no han tenido contacto con nuestro planeta a través de meteoritos. Por tanto, si se encontrara vida en alguna de ellas pensariamos

que su origen ha sido diferente del nuestro... En ese caso, ¿crees que esa vida funcionaría utilizando la misma química y bioquímica que la terrestre?

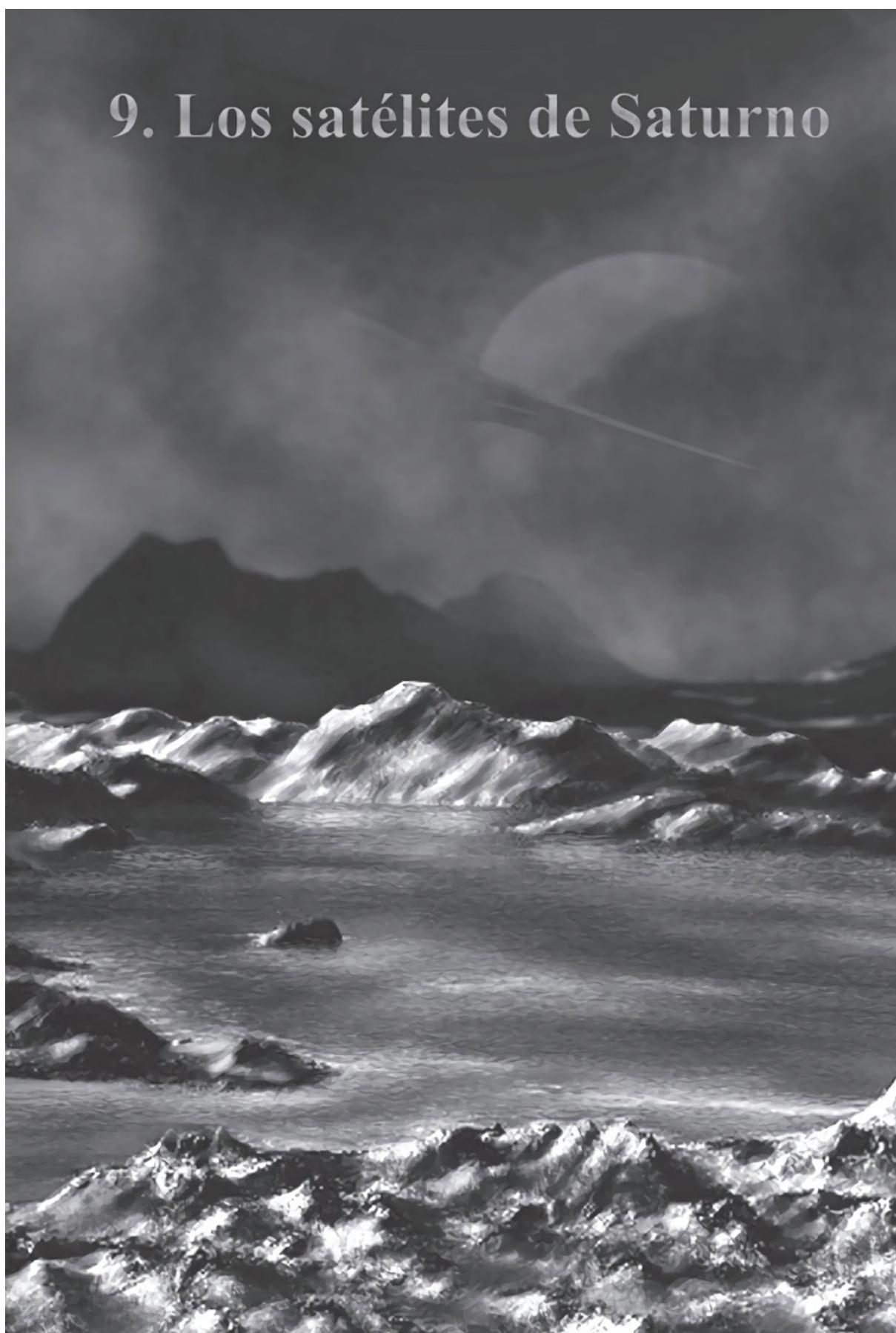
Desde mi punto de vista, el carbono y el agua son especies ideales para el desarrollo de la complejidad molecular que necesita la vida, incluso contemplando un origen diferente al terrestre. No encuentro razón para sustituirlos, siendo tan abundantes en el Universo. En cuanto a la bioquímica, no lo tengo tan claro... Si encontráramos rastros biológicos en Europa, sería muy razonable plantear un origen alternativo de la vida, pues ese ambiente potencialmente habitable parece aislado. Pero hay modelos que ven factible el transporte de material desde los planetas interiores hasta allí a partir de grandes impactos meteoríticos. Y, una vez en la superficie de Europa, mecanismos similares a la tectónica de placas terrestre sumergirían hasta su océano las posibles rocas llegadas desde nuestro planeta que quizá contuvieran microorganismos. Pero no sabemos si todo esto ha podido ocurrir realmente.

Un grupo de investigadores del CAB hemos propuesto a la ESA y al conjunto de la comunidad científica un nuevo concepto de instrumentación para buscar vida en Europa y en otros entornos astrobiológicamente relevantes. La suite de instrumentos que hemos diseñado incluye técnicas espectroscópicas y biosensores capaces de encontrar biomoléculas funcionales en esos lugares. ¿Podrías resumir sus principales ventajas frente a las propuestas realizadas por otros científicos?

Ya pasó el tiempo de buscar agua líquida: ahora los esfuerzos de la exploración astrobiológica deben centrarse en detectar señales de vida. Pero no tenemos claro cómo hacerlo si no se parece a la terrestre. Un grupo de científicos entre los que estamos tú y yo pensamos que hay características comunes a la vida que podemos rastrear: el agua, el carbono y la complejidad (bio)química. Algunas misiones espaciales ya han incluido instrumentos para detectar moléculas orgánicas, pero la mayoría son ineficientes identificando moléculas grandes o deduciendo su origen. Con el paquete de instrumentos analíticos que proponemos podríamos detectar macromoléculas, en concreto biopolímeros con la necesaria plasticidad estructural y funcional: ello nos indicaría que la señal es inequívocamente biológica. Afortunadamente, en nuestro centro tenemos científicos con gran experiencia en cada una de las tecnologías requeridas. Vivimos un tiempo muy emocionante, ¿verdad?



9. Los satélites de Saturno



Titán era el único satélite de consideración en el sistema de Saturno. Pero no era su tamaño la causa de que Wess lo mirase con curiosidad y Bigman con odio. El motivo radicaba, sin embargo, en que los tres astronautas estaban casi seguros de que Titán era el único mundo del Sistema Solar habitado por personas que no reconocían la supremacía de la Tierra. Súbita e inesperadamente se había revelado como un mundo del enemigo.

Isaac Asimov,
Lucky Starr y los anillos de Saturno

Bajo el pseudónimo de Paul French, Asimov escribió *Lucky Starr y los anillos de Saturno*, su sexta y última novela de ciencia ficción para jóvenes protagonizada por el bravo piloto que da nombre a la serie, entre diciembre de 1957 y febrero de 1958. Poco antes, la Unión Soviética se había apuntado un gran éxito con el lanzamiento del primer satélite artificial puesto en órbita, el *Sputnik 1*. Influido por el ambiente de la época, el prolífico e imaginativo autor, que además era químico de formación y profesor de bioquímica, llevaba en esta ocasión a sus lectores a las inmediaciones del planeta más espectacular del Sistema Solar. Y en la aventura tiene un especial protagonismo su satélite natural más grande y mejor conocido: Titán. Casi medio siglo después, esa luna se convirtió en la única además de la nuestra a cuya superficie hemos llegado con una sonda. Y sabemos que allí no hay personas rebeldes frente a la autoridad de los terrícolas, pero quizás sí pueda existir alguna forma de vida actualmente... o en el futuro.

MITOS, LIENZOS, NOTAS Y LENTES

Los titanes y las titánides constituían la principal raza de dioses surgidos de la unión entre Urano y Gea, el cielo y la Tierra. El más joven y poderoso de ellos (que acabaría derrotando a su padre y gobernando durante la edad dorada) era Crono, patrón de las cosechas y dios del calendario y las estaciones. En la mitología romana, este titán griego fue asimilado a una deidad propia, Saturno, al que se representaba como un anciano de larga

barba con una hoz en la mano como símbolo de la agricultura. Saturno había conseguido que su hermano mayor, Titán, le permitiese reinar... pero con una condición: no podría tener hijos varones ya que en caso contrario éstos llegarían a destronarle. Se casó con Ops (la titánide Rea para los griegos), diosa de la fertilidad, y como era de esperar tuvieron descendencia de ambos sexos. Para que su hermano no descubriera que había roto el pacto, Saturno decidió que la mejor solución era devorar a sus hijos varones a medida que iban naciendo. Pero la piadosa Ops logró ocultar y criar a tres de ellos: Júpiter, Neptuno y Plutón, que junto a sus hermanas Juno, Ceres y Vesta llegarían a tener un largo recorrido en la mitología y en el cielo.

La impactante imagen de Saturno comiéndose a su propio hijo es uno de los mitos que mayor repercusión ha tenido en el arte occidental. Quizá la representación con más fuerza dramática de este acto de canibalismo es el óleo *Saturno devorando a un hijo*, pintado por Francisco de Goya entre 1820 y 1823 en uno de los muros de su casa a las afueras de Madrid, la conocida como Quinta del Sordo. Posteriormente fue transferido a lienzo y trasladado, junto con el resto de sus inquietantes *Pinturas negras*, al Museo Nacional del Prado. Allí podemos sobrecogernos ante este cuadro. Si continuamos la visita del mismo museo no podemos pasar por alto otra obra maestra sobre el mismo tema, y con idéntico título, considerada el antecedente directo de la de Goya: la pintada por Peter Paul Rubens dos siglos antes, entre 1636 y 1638. Cuando este maestro de la escuela flamenca recibió del rey Felipe IV el encargo de componer escenas mitológicas inspiradas en las *Metamorfosis* de Ovidio para decorar la madrileña Torre de la Parada, uno de los motivos que eligió fue el de Saturno. Este magnífico óleo representa a un anciano de larga melena y barba blanca apoyado en una guadaña, símbolo de la agricultura, desgarrando el pecho de un aterrorizado niño al que sujetaba con su brazo izquierdo. Bajo él y a su espalda, unos densos nubarrones grises y negros emmarcan la escena, aumentando el dramatismo de esta obra clave del arte barroco. Pero hay algo que llama nuestra atención en el entorno que envuelve al padre y al desdichado hijo: por encima del hombro derecho de Saturno brillan tres estrellas perfectamente alineadas en el cielo plomizo, de las que la central es mayor y más luminosa que las otras dos. ¿A qué constelación pertenecen y por qué Rubens quiso darles tal protagonismo sobre el sombrío fondo de este cuadro?

Para encontrar la respuesta a esta pregunta hemos de viajar hasta la Toscana, al norte de Italia. Florencia fue uno de los grandes focos culturales y económicos de Europa desde la Edad Media, y entre los siglos XIV y XVI protagonizó un desarrollo artístico, literario y científico sin precedentes que la convirtieron en la cuna del Renacimiento. En ese entorno tan propicio, entre 1573 y 1588 se estuvo reuniendo en el palacio del conde Giovanni de' Bardi un grupo de músicos, poetas y humanistas, conocidos como la *Camerata*

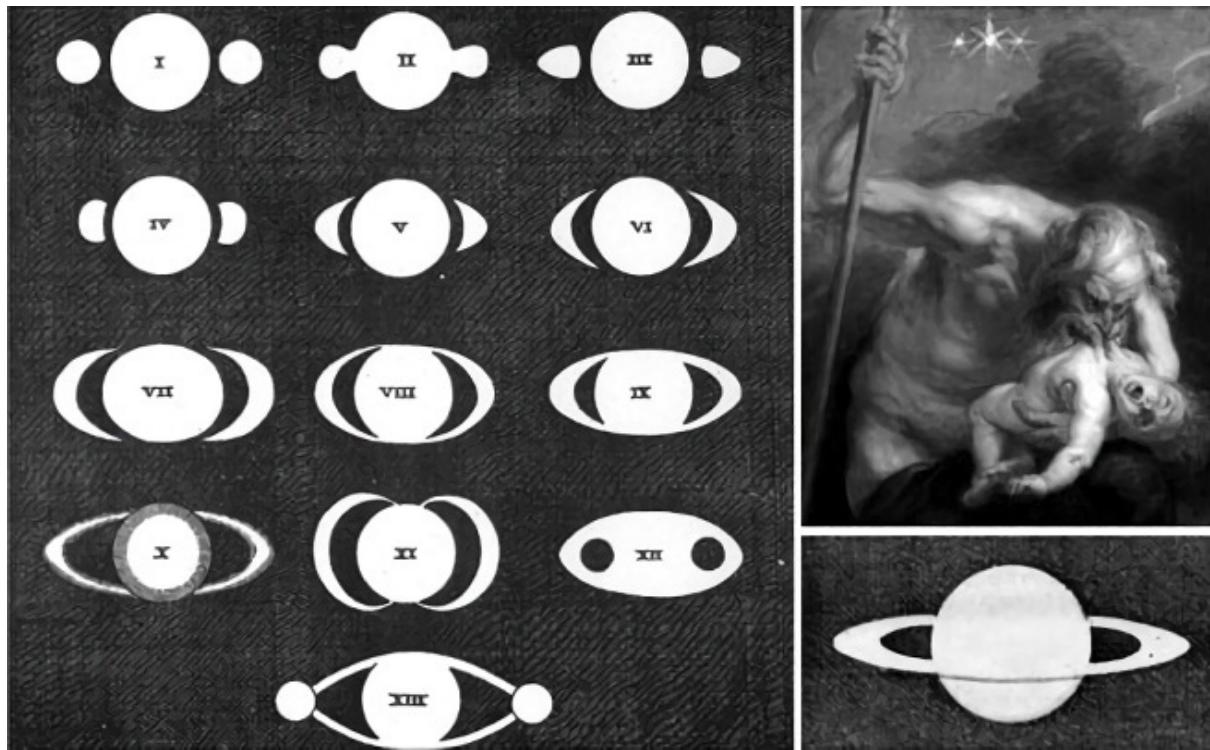
Fiorentina. Su propósito era estudiar y renovar las tendencias de la música, las artes escénicas y la literatura, sentando las bases de su evolución futura. Entre esos intelectuales y artistas estaba Jacopo Peri, quien en 1597 terminaría de componer *Dafne*, considerada como la primera ópera de la historia: un nuevo género que la *Camerata* había estado proponiendo para retomar, en el ámbito musical, la vigencia y capacidad de sugerencia de las tragedias griegas clásicas. Un amigo suyo y también integrante del selecto grupo era Vincenzo Galilei, reconocido compositor además de laudista, cuyas partituras y ensayos teóricos contribuyeron decisivamente a la revolución musical que marcó la transición al Barroco. El mayor de sus seis hijos, nacido en Pisa en 1564, se llamaba Galileo: Galileo Galilei. Durante varios años, padre e hijo colaboraron activamente en la investigación sobre la vibración de cuerdas y el comportamiento de las columnas de aire, en los que hoy se consideran estudios pioneros de la acústica musical. De hecho, Galileo siempre reconoció a su padre como la persona que más le había enseñado sobre la observación paciente y el estudio sistemático de los fenómenos que ocurrían a su alrededor. Probablemente, buena parte de sus históricos descubrimientos en astronomía y otros ámbitos de la ciencia se los debemos a la música.

El 10 de julio de 1610, tras haber realizado desde Padua y Venecia sus históricas observaciones de la Luna y los satélites de Júpiter, Galileo se trasladó a Florencia. Y, cuando llevaba sólo quince días viviendo en la ciudad que tan inspiradora había resultado para su padre, orientó el telescopio hacia Saturno. Aquél era el planeta más distante entonces conocido, ya que Urano tiene muy escaso brillo y no se había identificado como tal, y Neptuno no es visible con el ojo desnudo. De hecho, como Saturno brilla en el cielo menos que los demás planetas pero nos acompaña durante gran parte del año, distintas culturas orientales y occidentales lo habían identificado y seguido desde la antigüedad. Para griegos y romanos, al ser el que más lentamente veían desplazarse en noches sucesivas resultaba lógico identificarlo con el anciano guardián del tiempo humano y el calendario. Pero aquél 25 de julio era la primera vez que alguien lo observaba a través de un par de lentes alineadas que permitían aumentar varias veces su tamaño.

El astrónomo de Pisa comprobó con sorpresa que Saturno era diferente de los demás astros que había estudiado hasta entonces: parecía ser una esfera con dos abultamientos o protuberancias laterales, como si fueran las asas de un tazón de leche o las grandes orejas de un rostro redondo que le estuviera mirando a él. Tal como escribió a Cosme II de Médici, a quien ya conocimos en el capítulo anterior: «El planeta Saturno no está solo, sino que se compone de tres que casi se tocan, pero que nunca se mueven ni cambian entre sí. Están dispuestos en una línea paralela al zodíaco y el del centro (el propio Saturno) es unas tres veces más grande que los laterales». Así lo plasmó en sus dibujos,

algunos de los cuales mostraban dos círculos unidos a otro central más brillante, y en sus escritos lo representaba con las letras «oOo». Supuso que podría tratarse de un planeta y dos grandes lunas muy cercanas a él, lo que visto al telescopio parecía una estrella central y dos más pequeñas a ambos lados. Precisamente eso es lo que 26 años más tarde pintaría Rubens, cuya amplia cultura incluía el conocimiento de la obra de Galileo, para simbolizar a Saturno. Tenemos la suerte de poder contemplar en el Museo del Prado esta maravillosa fusión de la ciencia y el arte, en un lienzo extraordinario que nos lleva mucho más allá de la escena mitológica que representa.

En cualquier caso, con el tiempo Galileo comprobó que algo extraño le ocurría a Saturno: su aspecto no cambió durante los siete meses siguientes pero, cuando en 1612 volvió a observarlo, aquellas «asas» o lunas laterales habían desaparecido... hasta el punto de que el astrónomo bromeaba con que realmente parecía que Saturno hubiera devorado a sus hijos. Pero, para mayor sorpresa, el sistema oOo volvió a hacerse claramente visible dos años más tarde. Nunca llegó a saber por qué ocurría aquello. Hoy en día la razón nos parece lógica, aunque al astrónomo de Pisa le era imposible intuirla, a pesar de su ingenio y tenacidad: debido al movimiento relativo entre Saturno y la Tierra, y a que el plano de los anillos forma un ángulo de 27° con la eclíptica, cuando nuestra línea de visión queda contenida en dicho plano éstos quedan de canto y «desaparecen», pues como comentaremos su anchura es insignificante. Hubo que esperar hasta 1655, trece años después de la muerte de Galileo, para que el astrónomo y matemático holandés Christiaan Huygens pudiera observar «el anillo» de Saturno utilizando un telescopio de mucha mayor calidad y resolución, construido por él mismo con la ayuda de su hermano: tenía 3,5 m de longitud y con él lograba cerca de 50 aumentos, frente a un máximo de 20 en los usados por Galileo. Comunicó este descubrimiento el año siguiente, y en 1659 lo publicó en su obra *Systema Saturnium*. Seis años después, el también astrónomo e ingeniero de origen italiano Giovanni Domenico Cassini descubrió que, en realidad, no era uno único sino un sistema de anillos. Desde entonces, la fascinación por los anillos de Saturno no ha dejado de crecer.



Visiones de Saturno recogidas por Christiaan Huygens en su libro *Systema Saturnium*, tal como lo habían observado varios astrónomos anteriores. El primer dibujo es uno de los realizados por Galileo Galilei en julio de 1610, y los numerados del II al XIII son obra de otros astrónomos entre 1614 y 1650. En la parte derecha, abajo, se muestra una de las ilustraciones que realizó el propio Huygens para ese libro, con el anillo claramente identificado, correspondiente a la observación realizada por él un 17 de diciembre de 1657. Imágenes de las Smithsonian Institution Libraries, disponibles en Wikimedia Commons. Encima de ese dibujo se muestra la parte superior del cuadro *Saturno devorando a un hijo*, pintando por Peter Paul Rubens entre 1636 y 1638. © Museo del Prado, Album.

SATURNO

Hoy sabemos que Saturno es un gigante de gas con un diámetro de 120 536 km, unas 9,5 veces mayor que el terrestre. Su masa es equivalente a 95 Tierras, lo que supone un 30 % de la de Júpiter. Haciendo unos sencillos cálculos se obtiene que su densidad no llega a 700 kg/m^3 , la menor con diferencia de todos los planetas del Sistema Solar, y de hecho es el único que flotaría sobre el agua. Su período de rotación es de 10,6 horas y describe una órbita en torno al Sol, a una distancia (semieje mayor de su órbita) de 9,5 ua, cada 29,5 años terrestres. Debido a su rápida rotación, su composición y su relativa baja gravedad, es el planeta de nuestro sistema cuya forma de esferoide está más achata por los polos.

Hemos ido conociendo sus características gracias a observaciones desde la Tierra herederas de aquellas de los pioneros del siglo XVII, a los datos aportados por los telescopios espaciales *Hubble* y *Spitzer*, y a tres sondas de la NASA que lo sobrevolaron entre 1979 y 1981: *Pioneer 11*, *Voyager 1* y *Voyager 2*. Pero la mayor cantidad de información que tenemos sobre Saturno fue enviada por la exitosa misión conjunta de la NASA, la ESA y la Agencia Espacial Italiana (ASI) llamada *Cassini-Huygens*, un nombre en honor de los dos astrónomos que comenzaron a desvelar la naturaleza de sus anillos.

Esta misión, a la que contribuyeron 27 países y cuyo coste estimado fue de 3260 millones de dólares, constaba de dos elementos: la sonda norteamericana *Cassini*, cuyo objetivo era orbitar Saturno, y el aterrizador europeo *Huygens* con destino a Titán. Se lanzó el 15 de octubre de 1997 y llegó al planeta el 1 de julio de 2004, convirtiéndose en la primera nave que lo orbitaba y la cuarta en visitarlo. El 25 de diciembre de ese año la sonda *Huygens* se separó de *Cassini* y comenzó su viaje a Titán, descendiendo lentamente hasta la superficie de esta luna el 14 de enero de 2005, como posteriormente comentaremos. El orbitador *Cassini* estaba alimentado por un generador termoeléctrico de radioisótopos (*RTG*) y contenía doce instrumentos científicos entre los que había cámaras de alta resolución, un radar, un analizador de polvo, un magnetómetro, un experimento de ondas de radio y plasma, así como espectrómetros visible, infrarrojo, ultravioleta, de masas y de plasma. Tras trece años de intenso trabajo aportando información muy valiosa sobre el planeta, sus anillos y satélites, el 26 de abril de 2017 *Cassini* penetró en el espacio entre Saturno y sus anillos más interiores. Aquél era su último objetivo antes de que el 15 de septiembre se produjera lo que fue llamado el *Grand Finale*: al haber agotado casi por completo la energía proporcionada por el *RTG* y para evitar que pudiera llegar a contaminar Encélado, Titán u otra luna, la sonda fue lanzada hacia la densa y fría atmósfera del planeta. Durante su descenso siguió enviando información, bajo la lluvia de agua e hidrocarburos, hasta que se desintegró como un meteorito que hubiera llegado desde un pequeño planeta azul habitado por una especie viajera y curiosa.

Gracias a todo ello hemos descubierto que el interior de Saturno está compuesto por un núcleo de hierro y níquel unas diez veces más masivo que la Tierra, rodeado por una gruesa capa de hidrógeno metálico y otra más exterior de hidrógeno y helio líquidos. Por encima aparece su atmósfera, que es casi exclusivamente (un 96,3 %) de hidrógeno molecular (H_2), junto al 3,3 % de helio (He), 0,4 % de metano (CH_4) y trazas de amoníaco (NH_3), deuteruro de hidrógeno (HD, molécula químicamente igual al H_2 pero formada por un átomo de hidrógeno y otro de deuterio), etano (CH_3-CH_3), etino o acetileno ($CH=CH$), propano ($CH_3-CH_2-CH_3$) y fosfina (PH_3). Se ha

podido determinar que entre los hidrocarburos se producen reacciones fotoquímicas inducidas por la radiación ultravioleta del Sol. Las nubes más altas de la atmósfera del planeta, a una temperatura media de -189°C , están formadas por cristales de amoníaco que otorgan al planeta su característico color amarillento. Por debajo de ellas se han identificado nubes con cristales de agua e hidrogenosulfuro de amonio (NH_4SH). Como resultado de su dinámica, la superficie externa de Saturno muestra una disposición en capas paralelas al ecuador, aunque menos definidas que las de su hijo Júpiter. También se han detectado inmensas tormentas en este planeta, entre ellas la Gran Mancha Blanca, conocida desde 1876 y que se produce aproximadamente una vez cada año de Saturno (por lo que en 2020 o 2021 se espera la siguiente), y otra de enormes dimensiones estudiada por *Cassini* a lo largo de 2011. El planeta posee un intenso campo magnético que es responsable, entre otras cosas, de las auroras detectadas en su polo norte.

En cualquier caso, según comentábamos, la característica más definitoria de este planeta es su espectacular sistema de anillos. Los más claramente visibles se extienden en su plano ecuatorial entre 6600 y 134 000 km desde la superficie. Es decir, llegan hasta una distancia prácticamente igual al diámetro del propio planeta, lo que se corresponde con algunos de los dibujos originales de Galileo. Tienen un grosor comprendido entre sólo 10 m y 1 km, por lo que desde la Tierra resultan invisibles cuando los observamos de perfil, tal como le ocurrió a este astrónomo pionero durante 1612. Están compuestos principalmente por pequeños bloques (de entre 1 cm y 10 m de tamaño) formados en un 99,9 % de hielo de agua, con impurezas de silicatos, tolinas y carbono amorfo. Los anillos se nombran con letras de la A a la G siguiendo el orden de su descubrimiento, y muestran diferencias en su densidad de partículas, brillo y composición. A partir del más interior van en el orden D, C, B, A, F, G y E (y mucho más lejos aparece el llamado «anillo Febe»), de los que los cinco primeros son los más compactos y brillantes. Entre ellos aparecen discontinuidades o divisiones, algunas producidas por la presencia de las lunas denominadas «pastoras» (como Pandora, Prometeo, Pan o Dafne, que van «limpiando» el espacio en torno a ellas como si fueran quitanieves), mientras que en otros casos se deben a desestabilizaciones inducidas por las resonancias orbitales entre distintos satélites. Entre las dos principales hipótesis sobre su origen, una plantea que el material de los anillos corresponde a los restos de una luna que se destruyó, y la otra que representa parte de los componentes originales de la nebulosa planetaria, que no llegaron a incorporarse a Saturno.

Las imágenes de alta resolución de los anillos enviadas por el orbitador *Cassini* nos han permitido conocerlos mucho mejor, y además están entre las más bellas que se han obtenido en la historia de la exploración espacial. Distintas misiones han mostrado que los otros tres planetas del Sistema Solar

exterior (Júpiter, Urano y Neptuno) también tienen tenues sistemas de anillos en torno a ellos, formados por fragmentos de hielo y polvo. Pero ninguno resulta tan extenso, complejo e impresionante como el de Saturno. Sin duda, en nuestra comarca del Cosmos él es el auténtico *Señor de los Anillos*.

A pesar de que en los párrafos anteriores han aparecido algunas moléculas orgánicas y agua, las características de Saturno no ofrecen opciones para el desarrollo de una química compleja que pueda originar vida en él. Pero, tal como le ocurre a Júpiter, algunas de sus lunas sí son lugares muy prometedores para ello. De hecho, el planeta de los anillos es también en el que más satélites se han descubierto hasta el momento: de los 205 conocidos en el Sistema Solar, 82 orbitan en torno a Saturno. Entre ellos, 53 ya tienen nombres oficiales que se han ido tomando de las mitologías griega y romana. Antes del comienzo de la investigación espacial sólo se conocían los de mayor tamaño: Mimas, Encélado, Tetis, Dione, Rea, Titán, Hiperión, Jápeto y Febe. Estos siguen siendo los más estudiados en la actualidad, entre los que Mimas, Encélado, Dione y Titán resultan muy interesantes porque probablemente son mundos oceánicos con masas de agua subsuperficial. Y en concreto dos de ellos, a los que dedicaremos las próximas secciones, se han convertido en un objetivo prioritario de la astrobiología: Encélado y Titán. Eso sí, el preferido de los seguidores de *Star Wars* siempre será Mimas.

ENCÉLADO

Encélado es el sexto satélite más grande de Saturno, con 504 km de diámetro que equivalen a la séptima parte que nuestra Luna. Presenta rotación síncrona y órbita en torno al planeta, a unos 238 000 km, cada 1,4 días terrestres. Al igual que Mimas, fue descubierto en 1789, el año de la Revolución Francesa, por el eminente astrónomo y notable músico germano-británico William Herschel. Dos siglos después, las primeras imágenes de su superficie se obtuvieron por las sondas *Voyager 1* y *Voyager 2* a comienzos de la década de 1980.

Visto desde el exterior, Encélado parece una bola de nieve. Tiene un albedo (es decir, el porcentaje de la radiación que su superficie refleja respecto a la que incide en ella) de 99 sobre 100, el valor más alto que se conoce en el Sistema Solar. Por comparación, la nieve recién caída en nuestro planeta tiene un albedo de 86, la atmósfera de Venus de 70, Europa tiene 67, Saturno 42, nuestro punto azul pálido 38, y la Luna que vemos brillar en el

cielo tiene sólo 7, a pesar de que nos parezca que refleja mucha luz del Sol. Esto indica que la superficie de Encélado es extraordinariamente lisa y pulida, y que está formada por un material con muy alta reflectividad: hielo de agua compacto. En cualquier caso, sí muestra una variedad de rasgos superficiales que incluyen algunas regiones antiguas muy craterizadas, así como amplias extensiones de terrenos jóvenes (formados hace unos 100 Ma) que se han deformado y fracturado por el efecto de marea de Saturno, análogamente a lo que produce Júpiter en Europa. Su temperatura superficial media es de -240°C .

El gran salto en el conocimiento sobre Encélado se produjo a partir de febrero de 2005, cuando la sonda *Cassini*, en órbita de Saturno, sobrevoló por primera vez esta luna y sus cámaras detectaron la presencia de grandes eyecciones de material desde la superficie. Debido al gran interés que despertaron estos géiseres o plumas dentro y fuera de la NASA, se reajustó el plan de vuelo de *Cassini* para que pudiera realizar más sobrevuelos de Encélado (que llegaron a superar los treinta durante su larga misión), de forma que además en ellos se pasara mucho más cerca de la superficie de esta luna: hasta sólo 25 km (dos veces y media la altura típica a la que vuela un avión comercial sobre la superficie terrestre), frente a los 1500 km de distancia inicialmente prevista en estas maniobras de *flyby*. Los instrumentos de *Cassini* habían sido diseñados y construidos cuando ni siquiera se sospechaba que podrían existir tales eyecciones en Encélado, pero demostraron que eran perfectamente útiles para analizarlas.

Gracias a ello se descubrieron más de cien criogéiseres en las zonas estriadas presentes en torno al polo sur de Encélado, conocidas como «rayas de tigre», que expulsan a gran velocidad (entre 4000 y 12 000 km/h) plumas de vapor de agua y finas partículas de hielo y polvo, llegando hasta 500 km de altura sobre la superficie. En distintos análisis se detectó que dichas eyecciones contienen trazas de dióxido de carbono (CO_2), amoniaco (NH_3), nitrógeno molecular (N_2), así como iones cloruro (Cl^-), carbonato (CO_{32-}), sodio (Na^+) y otros. De hecho, la composición del material que expulsa Encélado resulta similar a la de los núcleos de algunos cometas. Las observaciones y modelos indican actualmente que tales plumas son las responsables de la tenue atmósfera de vapor de agua que se ha detectado en esta luna, y también proporcionan el material que forma el anillo E de Saturno: muy ancho y difuso, incluye a Encélado y al resto de las lunas situadas entre Mimas y Titán, y a diferencia de los demás está formado por partículas microscópicas de hielo de agua con silicatos, dióxido de carbono y amoniaco. Todo ello llevó a proponer algo de enorme interés para la astrobiología: lo más probable, y consistente con otros datos, es que esas eyecciones provengan de un océano de agua salina situado bajo su superficie,

análogo al propuesto para Europa. Por tanto, lo que aprendiéramos sobre los criogéiseros de Encélado suponía un atajo para llegar a conocer su océano.

Además de las moléculas e iones mencionados, entre los compuestos volátiles de las plumas se han identificado trazas de algunos compuestos orgánicos sencillos, como metano, propano y acetileno, además de una molécula potencialmente relevante para la química prebiótica: el formaldehído (HCHO). En las partículas de polvo presentes en las eyecciones también se ha podido detectar la presencia de benceno (la molécula cíclica C₆H₆), junto a compuestos orgánicos complejos cuya masa es compatible con que tengan más de 10 átomos de carbono. Todo esto resulta muy prometedor. De todos modos, aún no se han descubierto allí moléculas que contengan fósforo o azufre, los otros ingredientes básicos para la vida tal como la conocemos. Próximas misiones a Encélado, aún sin definir, permitirán evaluar la posible conexión entre su repertorio químico y algún tipo de proceso biológico que pudiera existir en esta luna.

OPCIONES PARA LA VIDA EN ENCÉLADO

La existencia de un océano subsuperficial de agua líquida salina y probablemente muy alcalina (se estima que con pH entre 10,8 y 13,5) en Encélado fue confirmada en 2014 por la NASA, tras analizar cuidadosamente la ingente cantidad de datos enviados por los instrumentos de *Cassini* durante sus sobrevuelos. El agua líquida probablemente se extienda por todo el satélite, bajo una capa de hielo de entre 30 y 40 km (que parece más delgada en la zona del polo sur por donde surgen las plumas), y se ha estimado que la profundidad de dicho océano global sería de 10 km. Con ello, la cantidad de agua en estado líquido en esta luna sería unas cincuenta veces menor que la de nuestros océanos, pero proporcionalmente a su pequeño tamaño Encélado tiene mucha más agua líquida que la Tierra. Además, las profundas y oscuras aguas de este mundo oceánico podrían esconder grandes sorpresas.

En uno de los sobrevuelos más exitosos de *Cassini*, realizado el 28 de octubre de 2015, la sonda «rozó» Encélado a 49 km de altura sobre su superficie, y atravesó con una precisión asombrosa una de las plumas de gas que se proyectaba hacia el espacio desde las proximidades de su polo sur. Pensemos por un momento, durante una noche en la que Saturno brille tímidamente en nuestro cielo, lo que supone haber conseguido algo así. Gracias a esta espectacular maniobra, durante el brevísimo tiempo en el que la

sonda cruzó esa nube que ascendía a gran velocidad sus espectrómetros y el analizador de polvo detectaron la presencia de, entre otros, dos gases que acompañaban al vapor de agua en el material eyectado: dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno molecular. Éste fue un hallazgo clave, porque permitía plantear que Encélado alberga reacciones hidrotermales en el lecho rocoso de su océano subsuperficial, quizá desarrollándose en chimeneas volcánicas similares a las que conocemos en la Tierra, alrededor de las cuales se ha detectado una gran biodiversidad. Con ello, además, se garantizaría la existencia de gradientes de temperatura y composición en esas aguas. Y surgía la posibilidad de que desde el fondo oceánico se estuvieran emitiendo moléculas con azufre, uno de los ingredientes que en esta luna geológicamente activa nos faltaba para poder cocinar la receta de una vida quizá similar a la nuestra.

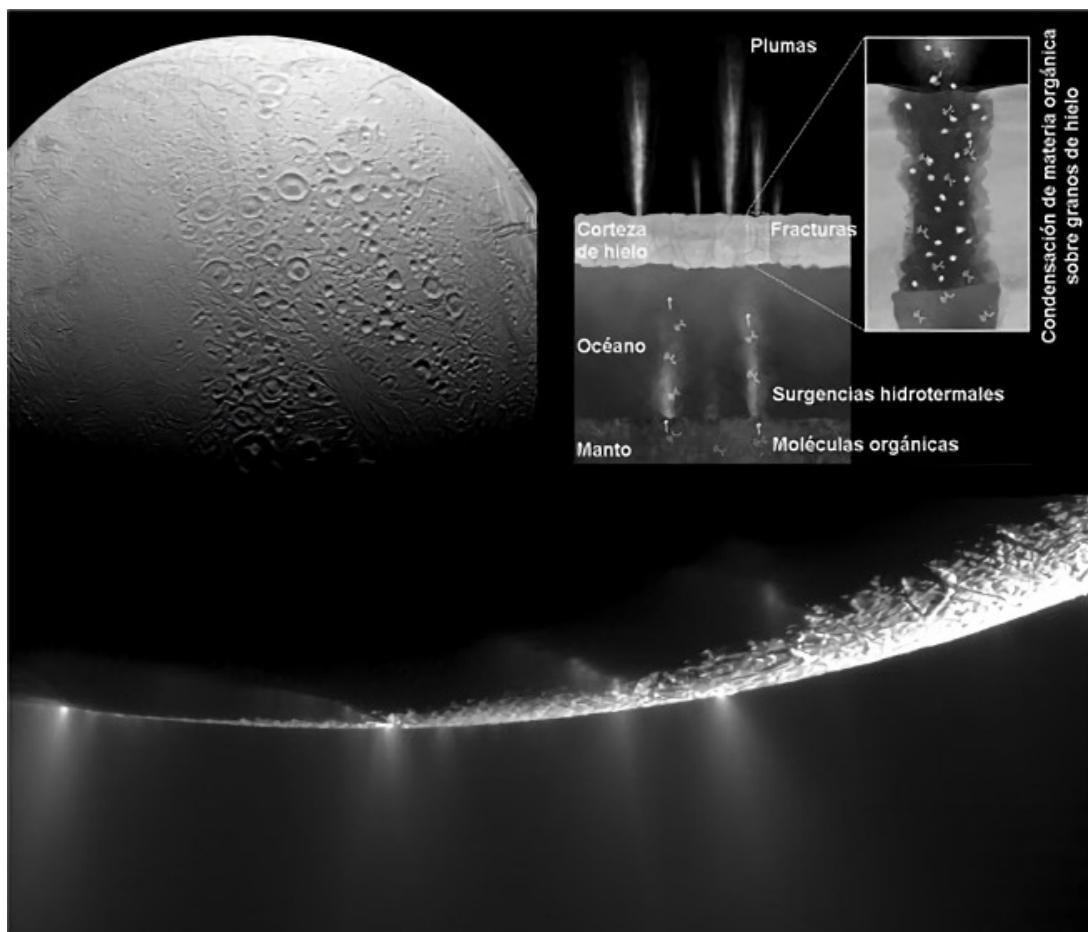


Imagen del hemisferio norte de Encélado tomada por el orbitador *Cassini* de la NASA el 27 de noviembre de 2016, cuando se encontraba a 66 000 km de esta luna. A su derecha, esquema del posible origen de las moléculas orgánicas desde las surgencias hidrotermales que parecen existir en el fondo de su océano subsuperficial. En la imagen inferior se observan más de treinta plumas de vapor de agua, partículas de hielo y moléculas orgánicas que se proyectan desde las regiones cercanas al polo sur de Encélado, combinando dos fotografías de alta resolución (81 m por píxel) tomadas por *Cassini* el 21 de noviembre de 2009, desde unos 14 000 km de distancia. Composición del autor a partir de imágenes cortesía de NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute.

La combinación de todos los resultados obtenidos hasta ahora muestra que en Encélado se dan las condiciones físico-químicas que permitirían la existencia de procesos biológicos en sus aguas, tal como se publicó en *Science* en abril de 2017, pocos meses antes del *Grand Finale* de *Cassini*. Sin duda, éste es otro mundo oceánico habitable. Por tanto, se pueden plantear para Encélado las mismas opciones, proyectos y sueños que comentábamos para Europa en el capítulo anterior. De hecho, varios investigadores pondrían por delante a Encélado en cuanto a su potencial para albergar algún tipo de vida porque, como hemos visto, en esta luna de Saturno hay evidencias directas sobre las plumas de vapor de agua y otros compuestos, entre ellos moléculas orgánicas, emitidas desde su océano. Además, en el caso de Encélado se ha propuesto que podría existir un ciclo del agua activo en la actualidad: el agua líquida subsuperficial es eyectada hacia el exterior en forma de gas y origina una tenue atmósfera de vapor de agua, a continuación este gas se sublima a fase sólida y queda depositado sobre la superficie de hielo, y millones de años después el dinamismo de la corteza volverá a poner en contacto ese hielo superficial con el agua del océano. Esta última fase supondría un lento pero constante proceso equivalente a la tectónica de placas en nuestro planeta, permitiendo recircular las moléculas orgánicas a lo largo del tiempo y haciendo más viable el mantenimiento de alguna forma de vida allí.

Como ejemplo del interés suscitado por Encélado en el ámbito de la biología, en 2018 un grupo de microbiólogos de la Universidad de Viena publicó en la revista *Nature Communications* un artículo muy sugerente. Estos investigadores habían montado en su laboratorio un sistema experimental que simulaba con la mayor fidelidad posible la composición (y las condiciones de presión y temperatura) que se suponen para el océano subsuperficial de Encélado, y a continuación probaron si allí podrían desarrollarse tres microorganismos extremófilos previamente identificados cerca de surgencias hidrotermales terrestres. Sólo uno de ellos logró reproducirse en ese «fondo oceánico de Encélado en miniatura»: la arquea metanógena termófila *Methanothermococcus okinawensis*, descubierta junto a chimeneas volcánicas situadas a 1 km de profundidad, cerca de Japón. En el sistema experimental de Viena, esta arquea crecía en condiciones anaerobias y a una temperatura de 65 °C, utilizando el mismo metabolismo autótrofo que en su ambiente natural del océano Pacífico: consumía dióxido de carbono e hidrógeno molecular, con lo que producía su biomasa y liberaba metano.

¿Podría ser un microorganismo similar a éste el responsable del metano detectado por *Cassini* en las plumas? Aún es muy pronto para aproximarnos a la respuesta que pueda tener esta pregunta. Para empezar, tal como se comentó al hablar sobre Marte, habría que diferenciar la posible producción biológica de este gas frente a un origen meramente geológico: por la propia actividad hidrotermal, su liberación a partir de clatratos, o incluso porque lo

hubieran aportado los cometas llegados hasta Encélado. Ello requeriría analizar la composición isotópica del carbono presente en este gas, pues como ya se ha comentado un origen biológico implicaría una mayor proporción del isótopo más ligero, ^{12}C , con respecto al ^{13}C y ^{14}C . Por otra parte, si hubiera algún tipo de vida en el sistema de Saturno no tendría por qué parecerse a la terrestre, tal como comentábamos en el capítulo anterior para las lunas de Júpiter... y con más razón en este caso ya que están aún más lejos de aquí.

Por todo lo resumido en estos párrafos, dada la relevancia astrobiológica de Encélado la comunidad científica está deseosa de contar con una misión específicamente dirigida a estudiar este satélite. Idealmente, podría incluir un orbitador y un módulo aterrizador, y como es lógico este último estaría sometido a las restricciones más estrictas de protección planetaria en su categoría IV. De hecho, la propuesta de la NASA *Enceladus Life Finder* (*ELF*) o la conjunta NASA/ESA *Explorer of Enceladus and Titan* (*E²T*) se presentaron al programa New Frontiers de NASA en 2017, pero no fueron elegidas. Debemos seguir esperando, al menos hasta 2023, para saber si se aprueba alguna misión a Encélado. Mientras tanto, imaginémonos sobrevolando con el *Halcón Milenario* el planeta helado Hoth, en el que comienza *El Imperio contraataca* (Irvin Kershner, 1980), para muchos la película más emocionante del universo *Star Wars* creado por George Lucas. Y también podemos leer alguna obra de ficción ambientada en el propio Encélado, aunque por el momento son muy escasas. Entre ellas destacan dos de «ciencia ficción dura» escritas por el físico y experto en exploración espacial Brandon Q. Morris: *La misión Encélado* (2017) y *Regreso a Encélado* (2019). En cualquier caso, tanto su autor como el resto de los científicos interesados por estos temas confiamos en que nuestro afán de conocer pueda verse pronto reflejado en esta luna: el espejo mejor pulido de todo el Sistema Solar.

TITÁN

Titán, el satélite más grande de Saturno, fue descubierto por Christiaan Huygens en 1655, el mismo año en el que comenzó a observar con claridad los anillos del planeta. La idea de nombrarlo como el autoritario hermano mayor de Saturno fue de John Herschel, hijo de William Herschel, a quien debemos los nombres inspirados en la mitología de todas las lunas conocidas hasta entonces en este y otros sistemas. Su diámetro es de 5149 km, mayor

que el de Mercurio y un 40 % del terrestre, y orbita en torno a su planeta con rotación síncrona cada 15,9 días terrestres, a una distancia de aproximadamente 1.222 000 km. Entre las peculiaridades de Titán, si hay una especialmente relevante es que se trata del único satélite del Sistema Solar que tiene una atmósfera apreciable, como veremos a continuación.

Las primeras sondas que sobrevolaron esta luna, entre 1979 y 1980, fueron las ya citadas *Pioneer 11* y *Voyager 1*. Con los datos enviados por ellas se pudo estimar el tamaño y masa de Titán, así como la composición y temperatura de su atmósfera. Sin embargo precisamente esa atmósfera, cuatro veces más densa que la terrestre y de color pardo-anaranjado, se mostraba totalmente opaca en el espectro visible e impedía observar su superficie. Por tanto, casi todo lo que sabemos sobre esta luna se lo debemos a la misión *Cassini-Huygens*, gracias a los sobrevuelos realizados por el orbitador de Saturno y sobre todo a la información enviada por la sonda *Huygens*, que aquel histórico 14 de enero de 2005 aterrizó suavemente sobre la (hasta entonces invisible) superficie de Titán.

Tras su aerofrenado, el aterrizador *Huygens*, con una masa de 318 kg, descendió lentamente a través de la atmósfera de Titán utilizando un gran paracaídas, hasta posarse en la región luego bautizada como Adiri, a 10,5° de latitud sur. Durante las 2,5 h que duró ese viaje hacia lo desconocido, y en los 30 minutos adicionales que la sonda se mantuvo operativa sobre la superficie, en una zona plana rodeada de pequeñas rocas, sus seis instrumentos estuvieron captando datos sobre la atmósfera de Titán y enviándolos a *Cassini*, que luego los transmitiría a la ya conocida Red de Espacio Profundo de la NASA. A día de hoy, este módulo europeo sigue siendo el único que ha aterrizado en una luna distinta de la terrestre, y también el único en tocar la superficie de un cuerpo del Sistema Solar exterior.

Uno de los instrumentos científicos que incluía era la *suite* de sensores *Huygens Atmospheric Structure Instrument (HASI)*, que permitió analizar la presión, temperatura, densidad y propiedades eléctricas de la atmósfera, y que había sido diseñado para poder medir también el movimiento de las olas en caso de que la sonda hubiese caído sobre una superficie líquida. Esto pone en evidencia una complejidad adicional de la entrada en Titán con respecto a las muchas veces que se había tocado Marte: se trataba de un aterrizaje «a ciegas», sin disponer de información previa sobre el lugar al que se podría llegar. En ese sentido, como veremos en el próximo capítulo, aquello era más parecido a las primeras aproximaciones a la superficie de Venus. Además, *HASI* incluía un micrófono con el que se grabaron los inquietantes sonidos registrados durante el descenso y aterrizaje en este lejano mundo.

Por su parte, el instrumento *Doppler Wind Experiment (DWE)* se utilizó para medir la velocidad del viento, permitiendo detectar cómo *Huygens* era empujado lateralmente a velocidades de más de 400 km/h cuando estaba a

150 km de altura sobre la superficie. El *Descent Imager/Spectral Radiometer (DISR)*, construido por la NASA y dotado de espectrómetros infrarrojos y visibles, sirvió para estudiar el flujo de radiación entre la superficie y la atmósfera, y además fue tomando imágenes durante su descenso y aterrizaje, de las que 350 pudieron ser recuperadas. Debido a la gran densidad de esa atmósfera, sólo las fotografías obtenidas por debajo de los 25 km de altura permitieron observar la topografía de la superficie. A pesar de ello, como el viento fue desplazando la sonda también durante esta fase final de su descenso, las imágenes captadas sirvieron para componer un mapa de Titán bastante completo, que ha constituido la referencia para todo el trabajo posterior. La cartografía de esta luna se ha perfeccionado gracias a la información adquirida por el radar y el espectrómetro infrarrojo de *Cassini* durante sus sobrevuelos, con lo que en 2019 se ha podido elaborar el primer mapa geomorfológico de Titán.

El cuarto instrumento a bordo de *Huygens* era el *Gas Chromatograph Mass Spectrometer (GC/MS)*, que utilizó la metodología probada en múltiples misiones anteriores para estudiar la composición química de la atmósfera de Titán durante su descenso, y también de la superficie cuando se llegó a ella. Trabajaba conjuntamente con el *Aerosol Collector and Pyrolyser (ACP)*, que recolectó las partículas sólidas y líquidas presentes en la atmósfera, las sometió a pirólisis controlada y dirigió los materiales volátiles producidos al *GC/MS* para que fueran analizados en él. Por último, el *Surface Science Package (SSP)* era una *suite* de instrumentos dedicados al análisis de las características físicas de la superficie de Titán, tanto si se llegaba a una superficie sólida como a un medio líquido.

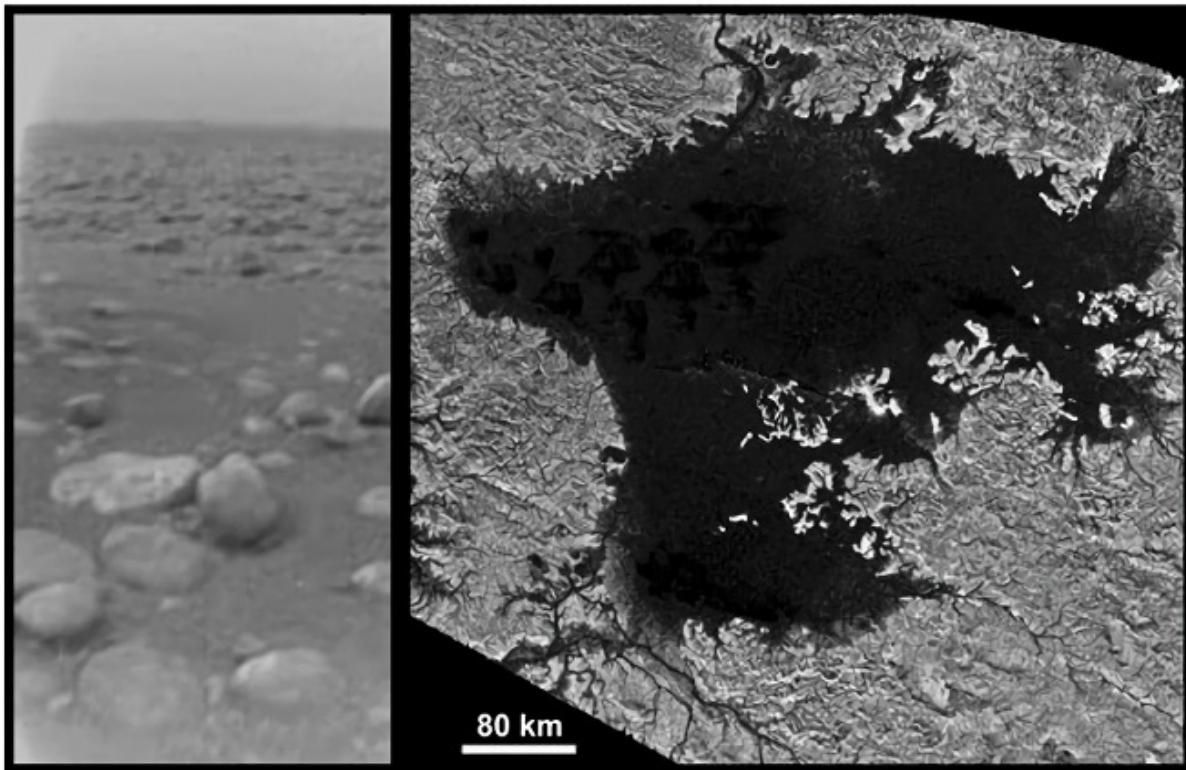


Imagen de la superficie de Titán obtenida por el instrumento *DISR* de la sonda *Huygens* de la ESA el 14 de enero de 2005. Las rocas o bloques de hielo son redondeados, lo que indicaría una posible actividad fluvial, y los situados por debajo de la parte central de la fotografía tienen tamaños de entre 10 y 20 cm. Imagen cortesía de NASA/JPL/ESA/University of Arizona. A la derecha se muestra el lago llamado Ligeia Mare, situado cerca del polo norte de Titán, que es la segunda masa líquida más extensa conocida en el satélite. Esta imagen (de falso color en el original, con una escala que va del marrón oscuro al amarillo) se obtuvo como un mosaico de señales de radar captadas por el orbitador *Cassini* de la NASA durante sus sobrevuelos de 2006 y 2007: las zonas oscuras corresponden a líquidos (en concreto, metano y etano) mientras que las más claras y brillantes son terrenos sólidos de la superficie. Imagen cortesía de NASA/JPL-Caltech/ASI/Cornell.

Al combinar la información aportada por los instrumentos de *Huygens* con la obtenida en los sobrevuelos de *Cassini*, y también con otros datos conocidos previamente, se ha determinado que la estratosfera de Titán está compuesta mayoritariamente (98,4 %) por nitrógeno molecular (N_2), junto al 1,4 % de metano y el 0,2 % de hidrógeno molecular, además de trazas de etano, oxígeno molecular y cianuro de hidrógeno (HCN). En las capas más bajas de la atmósfera las proporciones relativas de estos gases varían, pero el N_2 siempre aparece por encima del 95 %. La radiación que llega del Sol y la producida por el campo magnético de Saturno desencadenan en esta atmósfera procesos fotoquímicos que rompen las moléculas de metano y nitrógeno, dando lugar a compuestos orgánicos nitrogenados que son los responsables de la característica tonalidad anaranjada que este planeta muestra desde el exterior.

Dada la densidad y opacidad de la atmósfera de Titán, desde su superficie no se ve Saturno. Tengámoslo en cuenta cada vez que contemplamos la

recreación de un paisaje de esta luna y por encima de su horizonte aparece el planeta mostrando sus maravillosos anillos: es una imagen atractiva y muy poderosa, como se puede comprobar al comienzo de este capítulo, pero en una fotografía tomada desde allí el planeta no aparecería. En cualquier caso, si la ilustración muestra los anillos, estos nunca deberían aparecer en su ángulo más pintoresco... porque Titán y los demás satélites comparten plano con ellos y desde allí sólo se verían (si no existiera esa atmósfera, insistimos) como una línea brillante que cruza el ecuador del planeta. Otra cuestión que merece la pena recordar es que al sistema de Saturno llega aproximadamente un 1,1 % de la luz del Sol en comparación con la que recibimos en la Tierra. Si además aplicamos «el filtro» que supone su densa atmósfera, se ha estimado que la superficie de Titán está iluminada por sólo un 0,03 % de la luz que, en el espectro visible, nos llega desde el Sol. Así, tanto desde la cara de Titán que mira al planeta (siempre algo más luminosa gracias a la luz solar reflejada por él) como sobre todo desde su cara oculta, se observaría una lenta sucesión de períodos de penumbra y de noche, sin cambios de color en las nubes durante el crepúsculo.

QUÍMICA ORGÁNICA EN TITÁN

Desde el punto de vista de la astrobiología, lo más interesante de esta atmósfera activa es que puede constituir un gigantesco reactor de química prebiótica, en el que tal vez se estén produciendo reacciones similares a las que en 1953 Stanley L. Miller realizó en su famoso matraz (como vimos en el capítulo 3). Tal vez se hayan formado aminoácidos, aún no lo sabemos. Además, la presencia de HCN es especialmente interesante ya que esta molécula puede participar en muchas rutas sintéticas que originan biomoléculas sencillas. Por ello, Titán se suele considerar como un sistema análogo a la Tierra primitiva.

Los datos que *Cassini-Huygens* ha proporcionado sobre la superficie de Titán nos muestran una topografía muy interesante y variada, en la que aparecen montañas, criovolcanes, dunas formadas por granos de materiales orgánicos oscuros (que pueden contener tolinas y mezclas de hidrocarburos), llanuras con rocas, barrancos escarpados o cañones profundos. También se observan algunos cráteres de impacto, aunque menos que en otros satélites de Saturno, lo que sugiere que su superficie es joven y está geológicamente activa. Pero hay algo aún más sugerente: sobre la piel de Titán discurren ríos,

hay cascadas, costas, lagos y grandes mares. En esto también Titán es único, ya que aparte de la Tierra no hay ningún otro cuerpo en el Sistema Solar que contenga líquidos en su superficie de forma estable. Pero el líquido que protagoniza un ciclo equivalente al hidrológico en la Tierra, no es el agua sino el metano. A una temperatura media superficial de -180°C , en Titán llueve metano y por sus ríos discurre este hidrocarburo, mezclado con el etano. Y también caen allí, en forma de «nieve», otras moléculas orgánicas sintetizadas en su atmósfera. Cuando la temperatura asciende (lógicamente, Titán también presenta estaciones y su climatología es variable), el metano se evapora y pasa a formar parte de la atmósfera. Desde allí, en algún momento volverá a caer en forma de lluvia. Y, mientras tanto, la erosión fluvial y eólica siguen modificando su topografía. Pocos paisajes nos pueden resultar más exóticos y a la vez más familiares a los terrícolas que los presentes en esta luna, aunque si estuviéramos allí los veríamos con muy poca luz como para disfrutarlos.

Además, hoy sabemos que bajo la superficie de este satélite, rica en compuestos orgánicos, existe una capa de hielo de agua. Y por debajo de ella, a una profundidad de unos 60 km, todos los datos indican que hay un enorme océano de agua líquida rica en sales, que probablemente contenga también amoníaco. Aún más hacia el interior podría haber otra gruesa capa de hielo con una estructura diferente, y el núcleo parece ser rocoso, formado por silicatos hidratados. Por tanto, Titán es también un mundo oceánico y podría contener una enorme cantidad de agua, intermedia entre la de los satélites jovianos Ganimedes y Calisto. Aún no se conocen más características de este océano, pero la posibilidad de que exista una actividad tectónica que ponga en contacto los compuestos orgánicos de la superficie con el agua líquida situada bajo ella ofrece grandes posibilidades para que la química dé sus primeros pasos hacia la vida.

Por tanto esta gran luna de Saturno, que ofrece el mayor repertorio de escenarios físico-químicos conocidos en el Sistema Solar, puede que esté explorando en su océano interior una bioquímica más o menos similar a la nuestra. En diferentes laboratorios terrestres se están realizando experimentos de simulación y desarrollando modelos informáticos como aproximaciones a una cuestión tan relevante. Si en Titán esto ya se hubiera conseguido y la evolución biológica hubiese tenido éxito, tal vez el metano que protagoniza el ciclo hidrológico de su superficie no provenga del criovulcanismo sino que haya sido producido por microorganismos metanogénicos, como proponen los investigadores más optimistas. Por el contrario, si lo relevante para la química de este satélite realmente fuera el gran reactor prebiótico que forman conjuntamente su atmósfera y su superficie, podrían faltar cientos de millones de años para conocer los resultados del experimento real.

En cualquier caso, puede que en un mundo con las condiciones físico-químico-geológicas que presenta Titán acabara generándose una bioquímica

muy exótica en comparación con la nuestra, basada en el metano como disolvente: una sustancia apolar radicalmente distinta al agua, como vimos en el capítulo 5. En ese sentido, en 2015 se propuso que los compuestos orgánicos nitrogenados de la atmósfera de Titán, entre ellos el cianuro de vinilo o acrilonitrilo ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$, cuya existencia fue confirmada desde la Tierra por el gigantesco radiotelescopio formado por 66 antenas *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA*), podrían originar, en metano líquido y a temperaturas criogénicas, envolturas alternativas a las membranas celulares que conocemos en los medios acuosos terrestres. Al final de este capítulo conversaremos con uno de los científicos que lo propuso, Jonathan I. Lunine, quien además es uno de los mayores expertos a nivel mundial en la investigación sobre Titán. De todos modos, si tales comportamientos pudieran surgir y ser estables en un medio de hidrocarburos líquidos, para formar sistemas vivos deberían poder combinarse exitosamente con una red de reacciones químicas que originaran un metabolismo, y también con alguna molécula capaz de replicar y transferir información heredable. Por el momento no podemos imaginar algo así. Pero, para el experimento como tal, no hay ninguna prisa: si alguna vez se origina cualquier tipo de vida en Titán será un gran acontecimiento en la historia del Sistema Solar, aunque nuestra especie haya desaparecido y no pueda escribir artículos o libros sobre ello.

UNA LIBÉLULA EN LA ATMÓSFERA DE TITÁN

Mientras en la comunidad científica seguimos pensando en todo esto, ya han comenzado los preparativos para volver a explorar Titán. El 27 de junio de 2019, la NASA comunicó la elección de la siguiente misión de su programa New Frontiers, que son sondas de coste intermedio (en torno a mil millones de dólares), entre las menos costosas tipo Discovery y las Flagship. La ganadora fue una propuesta muy novedosa, que consiste en enviar a Titán un dron capaz de sobrevolar autónomamente sus campos de dunas, realizando análisis de las muestras que vaya recogiendo cada vez que se pose. Su nombre es realmente poético: *Dragonfly*, es decir, libélula. Si todo va según lo previsto, esta misión será lanzada en 2026 y alcanzará Titán en 2034.

La llegada a su destino supondrá un reto tecnológico sin precedentes, ya que tras pasar 8 años en el espacio deberá sobrevivir a la entrada (a unos 7,5 km/s) en la densa atmósfera de Titán, separarse de su escudo térmico, desplegar uno o dos grandes paracaídas, posarse, ser capaz de encender sus 8

rotores... y comenzar a volar como un dron octocóptero. Las operaciones y el propio vuelo deben ser totalmente autónomos, dado que la gran distancia a nuestro planeta (de unos 90 minutos luz) impide mandar órdenes y recibir la señal de su cumplimiento de forma eficiente.

Dragonfly será en realidad un gran laboratorio embarcado sobre una aeronave, de unos 3,5 m de largo y 2 m de alto. Como ha de funcionar en un lugar situado a 1500 millones de kilómetros del Sol, donde como vimos apenas llega su energía, sería inviable que estuviera alimentado por paneles solares. Por tanto, como en otras misiones ya comentadas, obtendrá su potencia a partir de un *RTG*. Merece la pena destacar que, aunque lo más atractivo para el público (un factor siempre tenido muy en cuenta por la NASA) es su capacidad para desplazarse como un dron, durante el 99 % de su vida útil *Dragonfly* estará posado sobre la superficie de Titán, funcionando como un laboratorio estático. Pero en ocho o diez ocasiones «saltará» de un lugar a otro, volando a unos 36 km/h y hasta a 4 km de altura, con la gracia de una libélula de 450 kg. Lógicamente, los ingenieros y científicos de esta misión tendrán muy en cuenta cómo esté funcionando el helicóptero *Ingenuity* que llevará consigo el *rover Perseverance*, pues como dijimos va a desplazarse sobre la superficie de Marte a partir de 2021. Eso sí, la atmósfera de Titán es unas cuatrocienas veces más densa que la marciana y esto lógicamente facilita mucho la sustentación. En total, *Dragonfly* explorará puntos separados hasta 170 km, aproximadamente el doble de la distancia recorrida por todas las misiones robóticas enviadas a Marte hasta ahora.



Representación artística de la llegada de *Dragonfly* a Titán en el año 2034, y sus operaciones sobre los campos de dunas de la región Shangri-La, en el ecuador de este satélite. Imagen de NASA/JPL-Caltech, disponible en Wikimedia Commons.

El objetivo principal de esta misión es estudiar la química orgánica que está operando en Titán, evaluar su potencial para dar lugar a procesos prebióticos, y estimar las condiciones de habitabilidad de esta luna. Con tal planteamiento, la carga útil científica de *Dragonfly* (aún sin definir por completo) probablemente incluirá los siguientes instrumentos: *Dragonfly Mass Spectrometer (DraMS)*, un espectrómetro de masas para estudiar la materia orgánica presente en la atmósfera y también en las muestras del suelo, que se extraerán mediante un taladro; *Dragonfly Gamma-Ray and Neutron Spectrometer (DraGNS)*, espectrómetro de rayos gamma y neutrones que identificará la composición de la superficie y subsuperficie en los puntos de aterrizaje; *Dragonfly Geophysics and Meteorology Package (DraGMet)*, una *suite* que incluye un sismómetro desplegable y una estación meteorológica; y *Dragonfly Camera Suite (DragonCam)*, conjunto de cámaras microscópicas y panorámicas para mostrarnos el terreno en el que trabaje... y los paisajes sobre los que se desplace.

Durante su vida útil (prevista para 2,7 años) *Dragonfly* sobrevolará los campos de dunas de la región ecuatorial de Titán llamada Shangri-La, unos 800 km hacia el noreste del lugar de aterrizaje de *Huygens* y bien cartografiada durante su descenso. Esas dunas, cuya disposición es similar a las de Namibia en nuestro planeta, no están formadas por arena de silicatos sino probablemente por gránulos de tolinas y otros compuestos orgánicos complejos, que resultará muy interesante poder analizar. Además, la libélula aterrizará en el fondo del cráter de impacto Selk, donde se cree que pudieron coexistir en el pasado las moléculas orgánicas y el agua líquida producida por la fusión del hielo, lo que podría haber originado un interesante repertorio de compuestos con potencial prebiótico. Sin duda, estas zonas son muy interesantes para la astrobiología. Pero, lamentablemente, *Dragonfly* no podrá sobrevolar los lagos y mares de metano del hemisferio norte del satélite, ya que cuando esta misión llegue a Titán será allí invierno y la temperatura que se registrará en estas latitudes (aún menor de la habitual) es incompatible con la más robusta electrónica de vuelo disponible. Por tanto, hemos de asumir que durante las próximas décadas no se podrán sobrevolar ni analizar *in situ* los únicos medios líquidos superficiales conocidos en otro cuerpo diferente de la Tierra.

De hecho, a día de hoy nadie puede aventurar si habrá más misiones a Titán después del vuelo de esta libélula. Y, por supuesto, no sabemos si algún día del futuro lejano se plantearán viajes tripulados allí. Una vez más, esto ya se ha conseguido con éxito en la ciencia ficción, incluso antes del primer sobrevuelo de la *Pioneer 11*, con obras como la pionera *Flight on Titan* (Stanley G. Weinbaum, 1935), *Lucky Starr y los anillos de Saturno* (Isaac Asimov, 1958), con la que abrimos este capítulo, *Las sirenas de Titán* (Kurt Vonnegut, 1959), que inspiró a Al Stewart una canción con el mismo título, o

la inquietante *World of Ptavvs* (Larry Niven, 1966). Entre las muchas novelas escritas desde que se empezaron a conocer imágenes del satélite, una de las primeras es *Regreso a Titán* (Arthur C. Clarke, 1975, titulada en inglés *Imperial Earth*), y dos de las últimas son *Herederos del tiempo* (Adrian Tchaikovsky, 2015), que muestra la terraformación de esta luna, o *La Sonda Titán* (Brandon Q. Morris, 2017), en la que el aterrizador *Huygens*, olvidado en su superficie desde 2005, tendrá un papel fundamental. Si nos gusta leer con música de fondo, nada mejor que la *Sinfonía nº 1 en Re Mayor* de Gustav Mahler, estrenada en 1889, que se sigue conociendo con el nombre que usó el compositor en sus primeras versiones de esta obra: *Titán*. Y entre las numerosas películas ambientadas o con referencias a este satélite de Saturno, una de las últimas es *The Titan* (Lennart Ruff, 2018), en la que la investigación genética y la exploración espacial se entremezclan.

Pero, hablando de genes, nada mejor que terminar recordando la sugerente *GATTACA* (dirigida por Andrew Niccol en 1997, precisamente el año del lanzamiento de *Cassini-Huygens*), en la que sólo los diagnosticados al nacer como «genéticamente válidos» pueden llegar a ser astronautas. Durante su formación, a través de los cristales de la corporación (cuyo nombre, GATTACA, es una secuencia de siete nucleótidos de DNA) pueden ver los cohetes despegando, siempre con destino a Titán. Al final de esta historia tan bien narrada y con tanta simbología, el «no-válido» Vincent logra subir a la nave (vestido con un elegante traje negro, curiosamente) y, sobre la emotiva música de Michael Nyman, su voz en off pronuncia unas frases memorables: «Para ser alguien que nunca estuvo hecho a la medida de este mundo, debo confesar que me está resultando difícil abandonarlo. Claro, que dicen que cada átomo de nuestro cuerpo formó parte una vez de una estrella. Quizá no me esté marchando, quizás esté yendo a casa».



Un café con... Jonathan I. Lunine



Doctor en Ciencias Planetarias. Profesor «David C. Duncan» de Ciencias Físicas y director del Departamento de Astronomía de la Universidad de Cornell (Ithaca, Nueva York, Estados Unidos).

Eres un gran experto en la evolución y habitabilidad de las lunas del Sistema Solar exterior, y una buena parte de tu dilatada trayectoria se ha centrado en la investigación de Titán. Este satélite de Saturno es más grande que el planeta Mercurio, cuenta con ríos y lagos que contienen mezclas de los hidrocarburos etano y metano, y de hecho muestra un ciclo hidrológico basado en metano. En tu opinión, Jonathan, ¿debería considerarse como un reactor de química prebiótica de tamaño planetario, probablemente análogo a la Tierra primitiva, y que por tanto podría originar algún tipo de vida extraterrestre en el futuro?

Efectivamente, ésta es una idea que se ha sugerido desde hace bastante tiempo. Por ejemplo, Chris McKay y yo mismo escribimos un breve artículo sobre ello en 1995, en la revista *Advances in Space Research*. Pero no fue ni la primera ni la última propuesta de este tipo acerca de esta luna del sistema de Saturno. Posteriormente, la misión *Cassini-Huygens* obtuvo datos muy relevantes que en mi opinión incrementan la probabilidad de que la química

prebiótica pueda estar produciéndose en la superficie de Titán, bajo ella o en ambos escenarios. Los hallazgos del orbitador *Cassini* y la sonda *Huygens* incluyen el descubrimiento de un ciclo hidrológico activo de metano, con lluvia, ríos, procesos de erosión que dan lugar a valles fluviales y barrancos, así como a la presencia de los lagos y mares.

Además, en la superficie de Titán hay dunas formadas por granos que tienen el tamaño de arena pero están compuestos por materia orgánica. Y algo aún más sugerente: hoy sabemos que bajo la superficie de esta luna existe un océano de agua líquida, probablemente salada. En la actualidad se conocen en Titán tantos tipos de escenarios alternativos en los que se podría desarrollar una química orgánica interesante, tal vez predecesora de la vida, que realmente me parece apropiado usar el término que indicas: es un gran «reactor» de química prebiótica. Si esa química ha llevado ya a la aparición de algún tipo de vida, o si alguna vez lo hará, es una pregunta diferente para la que aún no hay respuesta. Porque, en realidad, tampoco sabemos cómo se formó la vida en la Tierra. Quizá lo más honesto que podemos contestar acerca de un posible origen de la vida en Titán es: «tal vez»...

La misión Cassini-Huygens a la que te referías fue un ejemplo de colaboración fructífera entre la NASA, la ESA y la Agencia Espacial Italiana. Permitió depositar la sonda Huygens de la ESA sobre la superficie de Titán en 2005, y la valiosa información que obtuvo fue recogida por el orbitador Cassini de la NASA, que a su vez realizó descubrimientos trascendentales hasta su «Gran Final» en 2017. Dado que estuviste directamente involucrado en esta misión, ¿cuáles son, en tu opinión, los resultados más relevantes para la astrobiología que debemos a Cassini-Huygens?

Yo sugeriría que fueron dos los descubrimientos principales. El primero es la presencia de un océano de agua líquida en el interior de Titán, que como decía probablemente contiene sales. En segundo lugar, la existencia de masas líquidas en la superficie: lagos y mares, principalmente de metano. Los lagos están rodeados de depósitos que en algunos casos parecen ser «evaporitas» de compuestos orgánicos, mientras que los mares se encuentran en regiones con cañones donde el metano líquido ha ido tallando esos canales que observamos. Todo ello nos habla de un ciclo líquido activo asociado a una química orgánica de moléculas que «llueven» desde la atmósfera superior: estos compuestos orgánicos proporcionan no sólo la materia prima para las reacciones, sino también la energía química necesaria. Podríamos decir que *Cassini-Huygens* nos ha mostrado el escenario de la obra: los muebles, las cortinas, las luces... Todavía no conocemos el argumento ni la trama, aunque podemos suponerlos por lo que vemos en dicho escenario. Y para poder asistir a la representación serán necesarias otras misiones en el futuro.

Me gusta mucho esa metáfora, creo que todos estamos deseando que se levante el telón para empezar a disfrutar de la obra. Mientras tanto, con los datos proporcionados por Cassini, y teniendo también en cuenta los resultados de los modelos geológicos desarrollados posteriormente, ¿podrías resumir las principales características de ese océano subsuperficial que contiene Titán? ¿Es razonable pensar que dicha masa de agua líquida podría interaccionar en algún lugar con la superficie y con la atmósfera, ambos ricos en compuestos orgánicos?

Lo que sabemos es que ese océano es en efecto de agua líquida, que probablemente contiene sales y que se encuentra a gran profundidad: al menos 60 km por debajo de la superficie de Titán. Tenemos una seguridad casi total sobre el hecho de que dicho océano ha estado presente durante mucho tiempo, quizás a lo largo de toda la historia geológica de esta luna de Saturno. Pero no disponemos de mucha más información sobre él. Actualmente una estudiante de posgrado de mi grupo, Marika Leitner, está modelando las propiedades de este océano, y en 2019 publicamos un artículo sobre el tema en la revista *Icarus*. Como bien dices, Carlos, la pregunta clave es si ese océano entra en contacto con los compuestos orgánicos de la superficie, y si los productos de la química orgánica en las aguas del océano podrían encontrar algún camino para llegar a zonas superficiales. Desafortunadamente, *Cassini* y *Huygens* no nos dieron muchas pistas para responder a estas preguntas.

Hablemos ahora de los compuestos con nitrógeno encontrados en la atmósfera de Titán. En 2015 afirmaste, junto a otros colegas, que como esas moléculas presentan polaridad química o distribución heterogénea de cargas, podrían promover la formación de un tipo de membrana celular alternativa a las bicapas lipídicas que aparecen en la vida terrestre. Y también decías que estas exóticas membranas serían capaces de funcionar en el metano líquido de la superficie, a temperaturas criogénicas. Así, tal vez pudieran existir allí estructuras celulares que llamasteis «azotosomas». ¿Crees que podría organizarse una bioquímica más o menos compleja dentro de ellos, protagonizada por hidrocarburos?

Efectivamente, hace unos años propusimos que podría haber azotosomas en Titán y la idea sigue vigente. Pero sobre lo que me preguntas acerca de una posible bioquímica dentro de ellos, que realmente es muy interesante... honestamente no tengo imaginación suficiente para plantearlo. Podría proponer algunos aspectos de esa posible bioquímica en Titán, por ejemplo un metabolismo basado en hidrógeno, el acetileno como molécula transductora de energía, e incluso algún tipo de nitrilos o iminas para formar compuestos de naturaleza polimérica y eventualmente capaces de contener información

codificada. Pero no soy biólogo. De hecho, no sé si estarás de acuerdo conmigo, francamente creo que incluso los biólogos y químicos tenéis problemas para imaginar una bioquímica alienígena. Tenemos que volver allí para seguir investigando.

Totalmente de acuerdo, Jonathan, en general es muy difícil imaginar bioquímicas alternativas a la que se estableció aquí antes del origen de LUCA... y que desde entonces está presente en toda la vida terrestre. Aunque muy probablemente las habrá, dentro y fuera del Sistema Solar.

Sí, y si tenemos suerte quizá en el futuro descubramos alguna de ellas.

Pues, precisamente de cara al futuro de la investigación sobre Titán, la NASA seleccionó en 2019 el dron Dragonfly como la próxima misión del programa New Frontiers, que se lanzará en 2026 y se espera que llegue ocho años más tarde. ¿Cuáles son los principales objetivos científicos de una misión tan espectacular como ésta?

Dragonfly es un nuevo concepto en exploración planetaria, un *rover* volador que aprovecha la escasa gravedad y la densa atmósfera de Titán. Con ello (citando una publicación de Elizabeth Turtle y sus colaboradores en la «Lunar and Planetary Science Conference», LPSC, en 2018) será posible explorar muchos lugares, distantes entre sí decenas o centenares de kilómetros, durante una misión cuya duración prevista es superior a los dos años. De esta forma se podrá caracterizar la potencial habitabilidad de Titán, investigar la química prebiótica que está teniendo lugar allí, y también buscar marcadores químicos que puedan ser indicativos de una posible vida basada en agua y/o en hidrocarburos.

Cambiando de luna dentro del sistema de Saturno, Encélado es también un objetivo clave de la astrobiología, ya que está cubierta por hielo de agua y presenta una serie de interesantes características morfológicas en su superficie. En las regiones polares del hemisferio sur, el orbitador Cassini encontró que se están proyectando «plumas» o eyeciones de agua que contienen sales, metano, amoníaco, dióxido de carbono e hidrógeno molecular, entre otros compuestos. Esto sugería la presencia de un océano de agua líquida bajo la superficie de hielo. ¿Cuáles son las principales similitudes y diferencias entre Encélado y la luna Europa de Júpiter, con respecto a su potencial para albergar vida en sus océanos subsuperficiales?

La principal diferencia es que sabemos mucho más acerca del océano de Encélado que sobre el de Europa. Los datos disponibles nos dicen que el océano subsuperficial de Encélado contiene moléculas orgánicas, conocemos su contenido salino y el posible rango de acidez de esa agua. También

sabemos que se están produciendo procesos químicos asociados al hidrotermalismo en el fondo de dicho océano, entre el agua y la roca. Se ha detectado que en la parte superior del océano de Encélado, cerca de la interfase con el hielo, hay una capa relativamente rica en moléculas orgánicas. Muy sugerente, ¿verdad? Todavía no tenemos este tipo de información para Europa, pero esperemos disponer de ella gracias a la futura misión *Europa Clipper*. Desde el punto de vista físico el océano de Encélado es mucho más pequeño que el de Europa, por supuesto, y puede que no sea tan antiguo. En cualquier caso, no está claro cómo todo esto que estamos comentando podría afectar a las perspectivas de encontrar vida en una u otra luna.

En este contexto, si nos fijamos en los compuestos orgánicos encontrados en las plumas de Encélado, destaca la presencia de hidrocarburos grandes y complejos. De hecho, ésa fue la primera vez que tales moléculas se detectaban en un cuerpo extraterrestre de los que conocemos como «mundos oceánicos». En función de las perspectivas que abre este descubrimiento, ¿no crees que ha llegado la hora de aterrizar en Encélado, y también de volver a orbitarlo, para investigar su habitabilidad actual?

Efectivamente, estamos en el momento adecuado para hacer algo que permita continuar los descubrimientos del orbitador *Cassini*. Lo más sencillo es volar a través de esas plumas, como precisamente ya hizo esa sonda, pero disponiendo de instrumentación más avanzada que permita detectar e identificar biomoléculas. Aterrizar en Encélado, en la región de las eyecciones de agua, sin duda podría permitirnos un muestreo más detallado... pero esto conllevaría tener que respetar todas las restricciones de protección planetaria para evitar contaminar su superficie. Estos temas se estudiarán en detalle cuando en 2022 o en 2023 comience el programa para la nueva década de exploración planetaria.

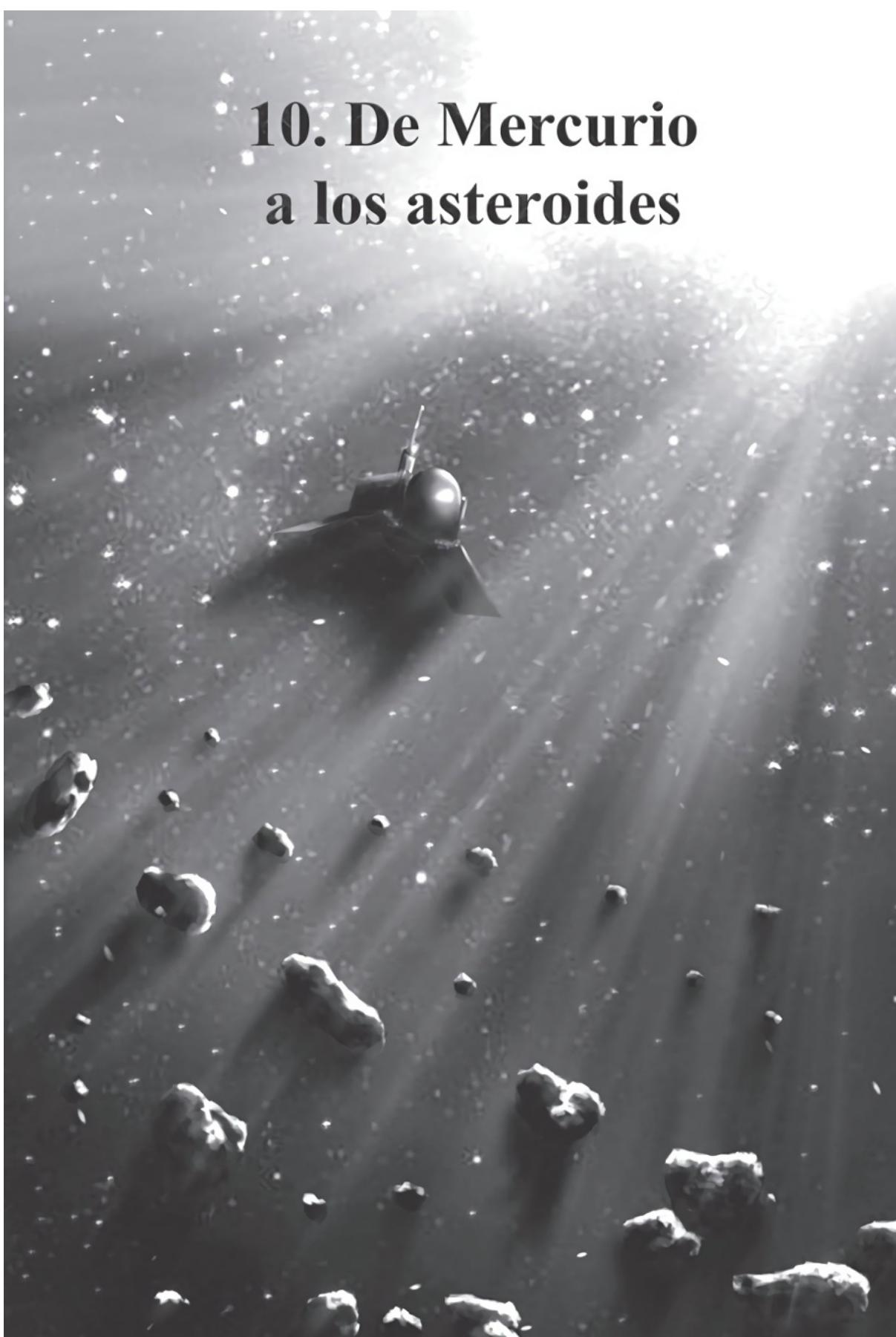
Antes de terminar esta conversación tan interesante que hemos mantenido, Jonathan, merece la pena recordar que ya se han descubierto 82 satélites de Saturno. Por tanto, el «señor de los anillos» es también el planeta con más lunas conocidas del Sistema Solar. Además de Titán y Encélado, de los que hemos hablado mientras tomábamos este café, ¿consideras que alguno de los demás es también un objetivo prometedor para buscar vida extraterrestre?

Probablemente haya otros candidatos en el rico y variado sistema de Saturno. Por ejemplo, se han visto interesantes rayas de color rojo en la superficie de Tetis, el quinto más grande que orbita este planeta. Pero, honestamente, Titán y Encélado son los objetivos más prometedores para la posible existencia de vida en ellos. Cuando tienes dos hermosos diamantes mirándote fijamente, no

te vas a otros lugares en busca de más piedras preciosas... al menos hasta que hayas recogido ambas gemas.



10. De Mercurio a los asteroides



Fui cayendo poco a poco. No tenía noción del tiempo ni de la distancia. Todo estaba muy oscuro y húmedo. Parecía como si me estuviera sumiendo en las profundidades de un océano, sin sentir la presión de las aguas. Eran tales mis pensamientos en aquellos instantes que no cabe la descripción. Acaso el oxígeno me hubiera emborrachado un poco. Me sentía agitado y ansioso de resolver el gran misterio que se abría a mis pies. La idea de que estaba cerca de morir no me preocupaba tanto como cuáles serían mis experiencias después de la muerte. Estaba a punto de llegar a Venus y sería el primer ser humano que hubiese podido contemplar la faz del velado planeta. De pronto, entré en una zona de menos nubes; pero allá abajo, muy lejos, se divisaba algo semejante a otras nubes y recordé la tan comentada teoría de las dos capas que envuelven a Venus. A medida que iba descendiendo, la temperatura iba subiendo progresivamente, pero aún hacía frío.

Edgar Rice Burroughs,
Piratas de Venus

Giramos en torno a una estrella mediocre de una galaxia vulgar. Asumámoslo. Pero aquí estamos, navegando por el espacio a bordo de un punto azul pálido repleto de vida. Y es que el Sol tiene a su alrededor una serie de cuerpos cuyas características son muy interesantes desde el punto de vista astronómico, geológico, químico... y, al menos en un caso, biológico. En conjunto, los objetos que giran en torno a nuestra estrella suponen poco más del 0,15 % de la masa total del Sistema Solar. Por tanto, a nivel cuantitativo podrían considerarse despreciables. Como todos los sistemas planetarios del Universo, no somos sino los restos del proceso de formación de la estrella en torno a la cual giramos. Escombros que no llegaron a brillar.

A pesar de ello, si subimos a una nave espacial imaginaria y los vamos recorriendo, lo que encontraremos en nuestro viaje será impresionante. Así que, recordando a David Bowie en su emotivo tema *Space Oddity*, tomemos nuestras pastillas de proteínas y pongámonos el casco, que la cuenta atrás está comenzando...

MERCURIO

El planeta más cercano a nuestra estrella es también el más pequeño del Sistema Solar, con un diámetro de sólo 4879 km. Conocido desde la época de los sumerios, posteriormente se nombró como el dios romano del comercio y mensajero de los dioses debido a su rápido movimiento aparente a lo largo del año. Dista del Sol 58 millones de kilómetros, poco más de un tercio que la Tierra, y esta proximidad a un inmenso reactor nuclear de fusión hace que la temperatura en su superficie sea altísima: hasta los 450 °C en el ecuador. Por ello las condiciones del planeta (el más cercano a la Tierra globalmente, si tenemos en cuenta sus posiciones relativas a lo largo del año) han sido siempre consideradas incompatibles con la existencia de agua líquida... y de vida. No es, por tanto, un cuerpo interesante para la astrobiología. ¿O tal vez sí?

En diciembre de 2012 se publicaron en la revista *Science* tres estudios que recogían datos obtenidos con diferentes instrumentos a bordo de la sonda *Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry and Ranging (Messenger)* de la NASA, lanzada en agosto de 2004 y que había entrado en órbita alrededor de Mercurio en marzo de 2011. En el primero de ellos, utilizando el espectrómetro de neutrones de este orbitador se había detectado un exceso de hidrógeno en algunas zonas del polo norte del planeta; en el segundo, mediante su altímetro láser se determinaba que la reflectividad de esos mismos lugares a longitudes de onda cercanas al infrarrojo era compatible con la existencia de hielo de agua; y en el tercero se mostraba un modelo detallado de las temperaturas superficiales del planeta.

La combinación de dichos resultados entre sí, y con las señales de radar obtenidas previamente desde el radiotelescopio de Arecibo (en Puerto Rico, del que hablaremos en el último capítulo), era clara e indicaba algo inesperado: en el polo norte de Mercurio, dentro de profundos y oscuros cráteres a los que nunca llega la luz del cercano Sol (algunos con nombres tan sugerentes como Gaudí, Goethe, Kandinsky, Prokofiev, Purcell o Tolkien), hay una gran cantidad de hielo de agua que se mantiene a unos −185 °C. Este contraste tan extraordinario frente a la abrasadora temperatura del planeta se debe principalmente a que la inclinación de su eje de rotación con respecto al plano de la eclíptica es de menos de 1°, en comparación con los más de 23° de la Tierra o los 25° de Marte, por ejemplo. Así, la radiación del Sol llega a su superficie casi con el mismo ángulo durante todo su corto año (equivalente a 1,5 días del planeta, u 88 días terrestres): el efecto de las estaciones es inexistente, y el fondo de los cráteres de los polos permanece siempre en sombra. A ello se une la práctica ausencia de atmósfera en el planeta, por lo que no se produce una transferencia de calor que pudiera permitir la

homogeneización de temperatura entre diferentes regiones. Se considera que esa agua del polo norte podría haberse originado por la interacción entre los núcleos de hidrógeno presentes en el viento solar y los átomos de oxígeno de la superficie del planeta.

El descubrimiento de agua en Mercurio daba sentido a un rompecabezas que se había comenzado a montar cuando la sonda *Mariner 10* de la NASA (lanzada en noviembre de 1973) sobrevoló el planeta en tres ocasiones (durante 1974 y 1975), cartografió algo más del 40 % de su superficie y tomó algunas fotografías de profundos cráteres de impacto en los polos. El siguiente dato se había obtenido en 1991, al detectarse con el radiotelescopio de Arecibo las señales de radar que comentábamos en el polo norte del planeta, compatibles con el reflejo producido por superficies de hielo de agua. Dos décadas después, la *Messenger* estaba demostrando la abundancia de agua congelada en el fondo de esos cráteres, con espesores medios de decenas de centímetros, y también en algunas zonas localizadas en el subsuelo del polo norte.

Pero el hallazgo era aún más trascendental para el tema que nos ocupa en este libro, ya que buena parte de los depósitos de agua congelada están recubiertos por una capa oscura, de entre 10 y 20 cm, formada por compuestos orgánicos alterados por la radiación. El origen de estas moléculas ricas en carbono, cuya composición aún se desconoce, estaría la caída masiva de cometas y, sobre todo, de meteoritos de tipo condrita carbonácea (de los que hablaremos más adelante), algunos de los cuales formaron esos cráteres de impacto cercanos a los polos. Por tanto, la enorme atracción gravitatoria ejercida por nuestra estrella habría sido fundamental para que muchos cuerpos menores hayan llegado a la superficie del planeta, aportando agua y un variado repertorio de moléculas. De hecho, hoy sabemos que Mercurio no tiene corteza y se ha postulado que la pudo perder como consecuencia de un violento impacto en el pasado.

La investigación de este extremo y fascinante planeta debe intensificarse, para determinar si el hielo se puede llegar a fundir en algún momento y si el agua líquida resultante tendría posibilidad de reaccionar con la materia orgánica, permitiendo una química compatible con la aparición o el desarrollo de la vida en esas zonas que se mantienen a baja temperatura. Esto se logrará combinando datos obtenidos desde los telescopios terrestres con los aportados por nuevas sondas enviadas a Mercurio. Entre ellas, en octubre de 2018 se lanzó *BepiColombo*, una misión de la ESA en colaboración con la Agencia Espacial Japonesa (JAXA). Su nombre es un homenaje al matemático e ingeniero italiano Giuseppe «Bepi» Colombo, que fue el primero en proponer (precisamente, para la misión *Mariner 10*) las hoy habituales maniobras de «asistencia gravitatoria». En ellas se utiliza el campo gravitatorio de un planeta para acelerar (o, en ocasiones, frenar) una sonda, variando además su

dirección con objeto de llevarla hacia el destino final siguiendo una trayectoria hiperbólica. La aceleración mediante asistencia gravitatoria resulta imprescindible para alcanzar los objetos más allá de Júpiter, ya que los motores cohete imponen limitaciones insalvables en cuanto a la duración del viaje y/o la masa de la sonda, mientras que los frenados por este medio son necesarios para conseguir ponerse en órbita de, por ejemplo, el propio Mercurio.

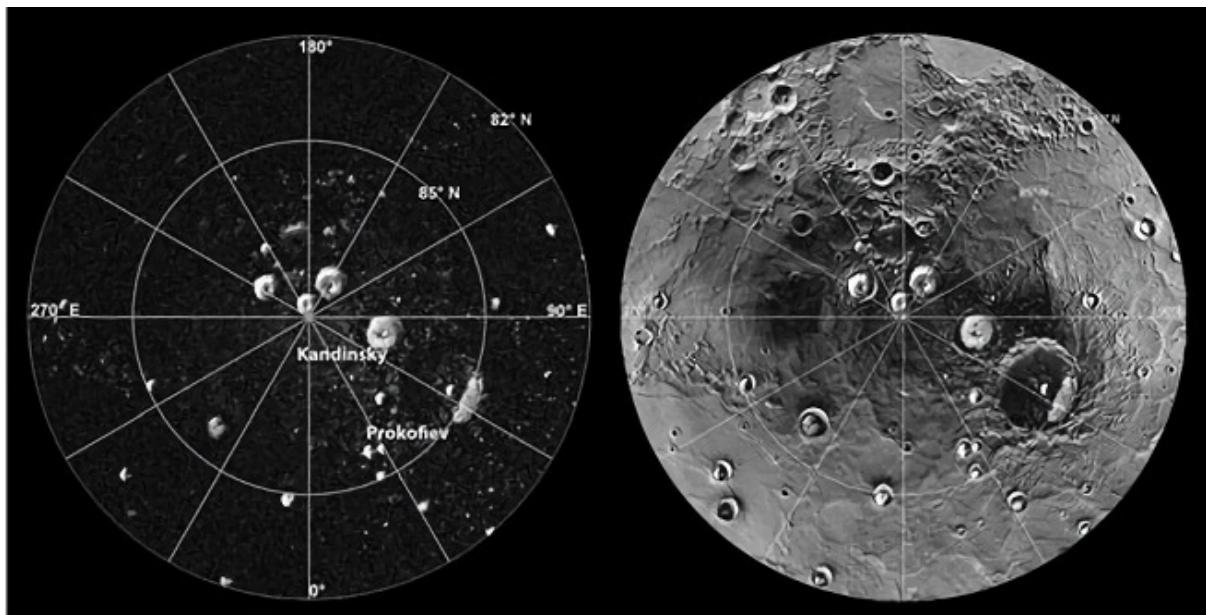


Imagen del polo norte de Mercurio en la que se muestran en color claro las zonas con alta reflectividad de radar, entre ellas los fondos de los cráteres de mayor tamaño como Prokofiev y Kandinsky (crédito: National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo Observatory). A la derecha, superposición de esta imagen con la topografía obtenida por la sonda *Messenger* de la NASA, cuyos instrumentos mostraron que esos fondos de cráteres contienen gran cantidad de hielo de agua (crédito: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington/National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo Observatory).

La misión *BepiColombo*, que se sirve de estas maniobras, está compuesta por dos orbitadores: *Mercury Planetary Orbiter* (*MPO*) y *Mercury Magnetospheric Orbiter* (*MMO*), con un total de dieciséis instrumentos. Ambos entrarán en órbita estable del planeta a finales de 2025 y se repartirán una serie de objetivos científicos relevantes, entre ellos fotografiar a alta resolución (en el espectro visible y el infrarrojo cercano) la superficie de Mercurio, cartografiarlo por completo, analizar la composición y dinámica de su atmósfera residual, e investigar el origen y características de su magnetosfera. Con todo ello, el pequeño y veloz mensajero de los dioses nos seguirá trayendo sorpresas.

Para la ciencia ficción Mercurio siempre ha sido un lugar muy sugerente, sobre todo debido a los riesgos que implica su escasa distancia al Sol. Las novelas escritas hasta la década de 1960 muestran un planeta extraño y peligroso, al que se suponía una rotación síncrona y que por tanto tendría una

cara iluminada y otra en oscuridad permanente, con una banda crepuscular en la interfase. Tres ejemplos son *Islas en el cielo* (Arthur C. Clarke, 1952), *Lucky Starr y el gran Sol de Mercurio* (Isaac Asimov, 1956) o *Misión a Mercurio* (Hugh Walters, 1965). Los relatos escritos a partir de que esa idea se refutara en 1965, y sobre todo tras la llegada de la *Mariner 10*, tienen algunos tintes más realistas, como comprobamos en *Cita con Rama* (Arthur C. Clarke, 1973), *Sundiver* (David Brin, 1980) o *Mercurio* (Ben Bova, 2005).

Parte de las novelas ambientadas en este planeta muestran un efecto real y muy peculiar de Mercurio. Debido a la gran excentricidad de su órbita y a las velocidades relativas de rotación y traslación, desde ciertos lugares de su superficie se pueden ver «amaneceres dobles»: cada día (equivalente a 58,7 días terrestres) el Sol aparece sobre el horizonte, se detiene, retrocede hasta esconderse y más tarde (4 días terrestres después) vuelve a salir para describir ya un movimiento convencional por el cielo, hasta el ocaso. En el resto del planeta, el movimiento aparentemente retrógrado del Sol se observa a diferentes alturas sobre el horizonte, como una pequeña parada y descenso de la estrella durante su trayectoria. Sin duda, merecería la pena contemplarlo en directo.

VENUS

El astro más brillante de nuestro cielo después del Sol y la Luna, conocido en muchos idiomas como lucero del alba o lucero vespertino, aparece desde la antigüedad en numerosas mitologías y es un referente cultural continuo en la literatura y las artes plásticas. Los romanos le dieron el nombre de la diosa del amor, la fertilidad y la belleza, de cuyo nacimiento hablaremos en el capítulo siguiente. Galileo Galilei también apuntó su telescopio hacia Venus en aquel productivo año de 1609 y descubrió que, como la Luna, mostraba fases en función de su posición relativa respecto al Sol: una prueba más a favor del modelo heliocéntrico. Sin embargo, a pesar del gran desarrollo de los telescopios desde entonces, durante más de 360 años no fue posible observar su superficie.

El misterio rodeaba al segundo planeta del Sistema Solar, y esto no sólo era motivador para los astrónomos. La literatura de ficción se interesó por Venus desde la novela pionera *Viaje a Venus* (Achille Eyraud, 1865), publicada el mismo año que *De la Tierra a la Luna* de Julio Verne. Durante más de la mitad del siglo xx, muchos escritores imaginaban Venus como un

planeta paradisíaco, con temperaturas agradables, ríos, bosques... e incluso animales, como los dinosaurios, que vivían allí y tal vez esperaban nuestra llegada. Otras obras, como la primera de la *Serie de Venus* escrita por Edgar Rice Burroughs en 1932 (que recordábamos en la cita inicial de este capítulo) mostraban una visión del planeta más cercana a las ideas científicas ya manejadas en la época: envuelto por dos gruesas capas de nubes, con temperaturas extremas y sin oxígeno. Pero, eso sí, en la ficción de Burroughs Venus estaba habitado por seres inteligentes. Infinidad de cuentos, novelas, cómics, películas, series de televisión y videojuegos han transcurrido en Venus. Como pequeño ejemplo, cinco relatos interesantes de diferentes épocas son *In the Walls of Eryx* (Howard P. Lovecraft y Kenneth Sterling, 1939), *La larga lluvia* (Ray Bradbury, 1951), *Becalmed in Hell* (Larry Niven, 1965), *Venus of Dreams* (Pamela Sargent, 1986, primera novela de una trilogía sobre la terraformación del planeta), o *Venus* (Ben Bova, 2000).

Desde el punto de vista científico Venus ha sido, a partir de la década de 1950, un luminoso objeto del deseo para la exploración espacial. La primera nave que llegó a este planeta fue *Venera 1*, de la agencia espacial soviética, que lo sobrevoló el 12 de mayo de 1961. Su diseño era similar a un batiscafo, presurizado y refrigerado con ventiladores internos. Lamentablemente, tras realizar tres sesiones de telemetría se perdió el contacto con ella. Así, la primera sonda que se aproximó a Venus durante un tiempo suficiente fue *Mariner 2* de la NASA, a finales de 1962. Más tarde, como parte de la carrera espacial que se desarrollaba durante la guerra fría, la URSS volvió a tomar la delantera cuando en 1966 llegó primera (aunque demasiado acelerada) a la superficie de Venus, y la sonda *Venera 3* se estrelló contra ella. Tras diferentes misiones que iban aportando valiosos datos científicos sobre el planeta y su atmósfera, el primer aterrizaje exitoso se consiguió con la sonda soviética *Venera 7* a finales de 1970. Cinco años más tarde, la *Venera 9* logró convertirse en el primer satélite que orbitó Venus. El módulo de aterrizaje que llevaba esta productiva misión se posó en la región de Beta Regio el 22 de octubre de 1975, logrando realizar análisis geológicos y tomando la primera imagen con suficiente calidad de su superficie. Por fin, los humanos teníamos frente a nuestros ojos la piel que Venus había estado ocultando bajo un tupido velo.

Mientras se sucedían los éxitos soviéticos, la NASA llegó a plantearse un gran golpe de efecto: enviar al planeta una misión de sobrevuelo tripulada. Para ello se utilizaría una nave modificada del programa Apolo desde la que, en 1978, tres astronautas observarían el exterior del planeta y lo analizarían durante su máxima aproximación, regresando a la Tierra tras un año de viaje en total. Pero esta idea, que se comenzó a estudiar en 1965, fue desestimada dado su elevado riesgo para los tripulantes, gran complejidad y altísimo coste económico. De forma más pragmática, en 1978 la agencia norteamericana

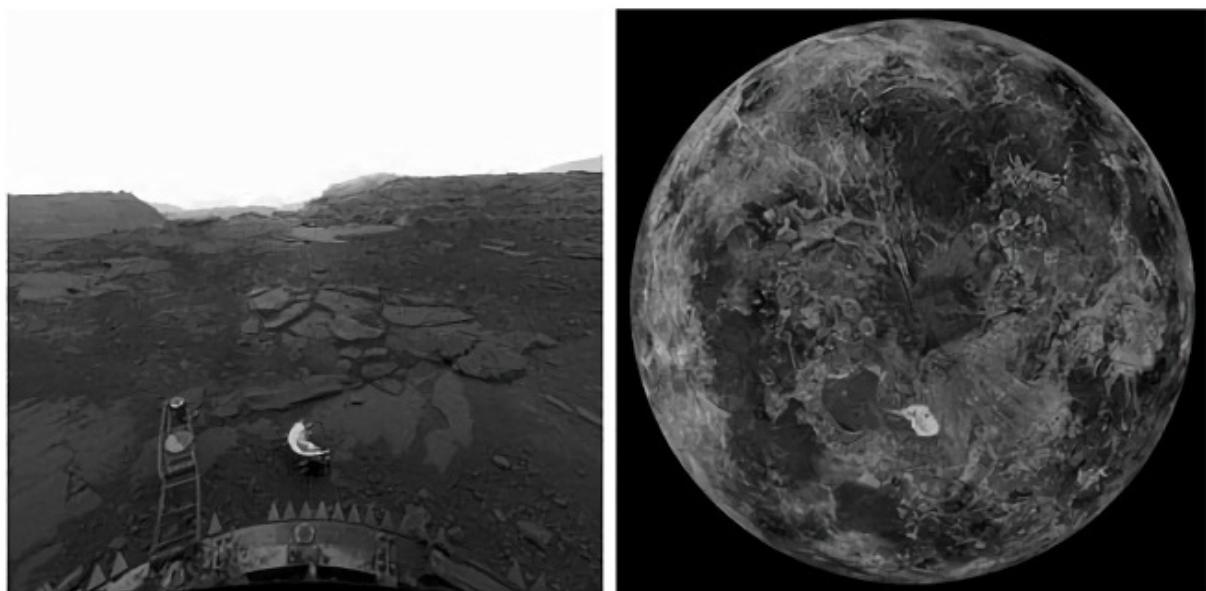
envió la misión *Pioneer Venus*, formada por un orbitador que incluía diecisiete instrumentos y además cuatro sondas atmosféricas, de las que una sobrevivió al descenso y se mantuvo activa en la superficie del planeta durante 45 minutos.

En 1982, los aterrizadores soviéticos *Venera 13* y *Venera 14* analizaron la superficie venusiana y fueron pioneros en tomar fotografías en color de ella. Además, la segunda de estas sondas logró grabar, por primera vez en la historia, los sonidos de un planeta distinto de la Tierra. Un éxito aún mayor tuvieron las misiones *VeGa 1* y *VeGa 2* lanzadas por la URSS en 1984, que contenían sendos módulos de aterrizaje y además globos aerostáticos. Éstos fueron los primeros en surcar los cielos de otro planeta, llevando sondas que incluían varios instrumentos para el análisis de la atmósfera: se soltaron a una altura de 54 km sobre la superficie, flotaron transmitiendo datos y empujados por el viento durante 40 y 60 horas respectivamente, con lo que recorrieron casi 12 000 km cada uno.

En 1989, la NASA envió la misión *Magellan* rumbo a Venus, siendo la primera vez que se utilizaba un transbordador espacial (el *Atlantis*, en la misión STS-30) para lanzar una sonda planetaria. El explorador Magallanes, esta vez estadounidense en vez de portugués, orbitó Venus entre 1990 y 1994, proporcionando datos muy valiosos sobre su topografía y vulcanismo. Además, el radar que llevaba permitió realizar la cartografía más detallada que tenemos hasta la fecha, aunque no de toda su superficie. La primera misión de la ESA al planeta, *Venus Express*, fue lanzada en 2005 desde el Cosmódromo de Baikonur, y durante una larga vida útil de nueve años ha estudiado en detalle su atmósfera, su superficie y las interacciones entre ambos. Por su parte, la JAXA se sumó en 2010 a la exploración de Venus con la misión *PLANET-C* (también llamada, de una forma más poética, *Akatsuki*, que significa «amanecer»). Tras un primer intento fallido se situó en órbita del planeta en 2015, y desde entonces está enviando información relevante sobre su vulcanismo y dinámica atmosférica.

Como resultado de la larga historia de observación y exploración de Venus, mucho es lo que sabemos sobre el segundo planeta del Sistema Solar, al que se suele considerar «gemelo» de la Tierra por la cercanía entre ambos y porque su tamaño es sólo ligeramente menor que el nuestro (12 104 km de diámetro ecuatorial, frente a los 12 756 km terrestres). Sin embargo su atmósfera es muy diferente, pues contiene un 96,5 % de dióxido de carbono (CO_2), casi un 3,5 % de nitrógeno molecular (N_2), y trazas de otros gases, entre ellos 0,015 % de dióxido de azufre (SO_2), 0,007 % de argón (Ar) y 0,002 % de vapor de agua. Por tanto, el agua es unas cien veces menos abundante en la atmósfera venusiana que en la terrestre. En conjunto, su densidad es mucho mayor que la de la Tierra, ejerciendo en su superficie una presión más de noventa veces superior a la presente a nivel del mar en nuestro

planeta. Por su densidad y composición, esta atmósfera impide siempre la observación directa de la superficie de Venus, incluso desde las sondas que lo orbitan. Por ello, las representaciones que tradicionalmente se hicieron del planeta a partir de imágenes de telescopios ópticos (entre ellas, las realizadas por Schiaparelli o Lowell, de quienes hablamos en el capítulo dedicado a Marte) no tienen nada que ver con su topografía. Algo que se ha podido medir desde el exterior, en la longitud de onda del ultravioleta, es que grandes masas de nubes se mueven a mucha velocidad por su atmósfera, en paralelo al ecuador, pudiendo dar una vuelta completa al planeta en menos de cuatro días terrestres.



Una de las fotografías (originalmente en color, mostrando el suelo grisáceo y un cielo amarillento) tomadas por la sonda soviética *Venera 13* sobre la superficie de Venus, el 1 de marzo de 1982. Crédito de la imagen: NASA National Space Science Data Center/Harvard Micro Observatory/Don P. Mitchell. A la derecha se muestra la superficie del hemisferio norte de Venus, con el polo en su centro, reconstruida principalmente a partir de los datos de altimetría obtenidos con el radar de la misión *Magellan*, completados con otros tomados por radares terrestres y por los orbitadores *Venera* y *Pioneer Venus*. Imagen cortesía de NASA/JPL-Caltech/Massachusetts Institute of Technology/US Geological Survey.

Debido a las características de su atmósfera, Venus lleva millones de años sufriendo un efecto invernadero imparable: la radiación solar que llega al planeta interacciona con los gases atmosféricos y con la superficie, las ondas electromagnéticas menos energéticas generadas como resultado (entre ellas, radiación térmica en la longitud de onda del infrarrojo) no salen del planeta sino que son absorbidas por el gran contenido de dióxido de carbono atmosférico, y este gas reenvía mucha de esa energía a la superficie, que sigue así calentándose progresivamente. Como resultado, la temperatura media de la superficie de Venus es en la actualidad de 464 °C, mayor que la de Mercurio pese a estar al doble de distancia del Sol, y suficiente para fundir el

plomo o el zinc. Si excluimos al astro rey, no existe un lugar con temperatura media más alta en el Sistema Solar. Además, como esa temperatura superficial se debe a su atmósfera, resulta independiente de que sea de día o de noche en cualquier zona del planeta. Desde sus densas nubes, numerosos rayos golpean constantemente la superficie de Venus. Y los volcanes activos producen erupciones masivas con constantes emanaciones de dióxido de carbono y gases azufrados. Frente a lo que propusieron los autores de ciencia ficción de hace un siglo, nuestro gemelo se parece muy poco a la Tierra actual.

Volviendo a la historia de su exploración, cuando se enviaron a Venus los primeros módulos de aterrizaje soviéticos y norteamericanos que hemos comentado siempre se perdía el contacto con ellos al llegar a la parte baja de su densa atmósfera. Al principio se pensaba que durante la aproximación habían chocado contra los altos y escarpados volcanes del planeta. Pero cuando fue posible medir la temperatura de su superficie y se conoció la topografía real, los ingenieros asumieron que la electrónica y gran parte de los componentes de esos aterrizadores literalmente se habían fundido antes de llegar al suelo, lo que hacía imposible que pudieran enviar datos durante su descenso a los infiernos.

EL PASADO HABITABLE DE VENUS

Aunque en la actualidad Venus parece un lugar muy poco propicio para la vida, cuando se formó nuestro sistema planetario estaba situado dentro de su banda de habitabilidad. Y se originó por acreción del mismo tipo de planetesimales que dieron lugar a la Tierra, muchos de los cuales contenían minerales hidratados en sus rocas. También sufrió el bombardeo masivo de meteoritos y núcleos de cometas, que llevaron más agua y un rico repertorio de moléculas hasta su superficie. Por ello, se considera que hace más de 4000 millones de años (Ma) Venus contenía un gran océano de agua líquida superficial con abundantes compuestos orgánicos, como ocurría en la Tierra y en Marte. Esta idea se ha reforzado con los datos obtenidos por las misiones *Pioneer* y *Magellan* en las décadas de 1980 y 1990.

Sin embargo, Venus está más cerca de nuestra estrella que la Tierra y su velocidad de rotación es extremadamente lenta, ya que el día venusiano dura 243 días terrestres (y curiosamente es el único planeta del Sistema Solar con rotación retrógrada, por lo que allí el Sol sale por el oeste y se pone por el

este). Así, desde su origen recibió mucha radiación sobre la superficie, que al mantenerse caliente fomentaba la evaporación del agua. En la atmósfera, las moléculas de vapor de agua eran disociadas por la radiación ultravioleta solar, y el hidrógeno molecular (H_2) formado escapó al espacio al no poder ser retenido por la gravedad del planeta. Además, dado que su campo magnético es muy débil (lo que parece deberse a su rotación tan lenta, ya que Venus sí posee un núcleo metálico fundido similar al terrestre), las partículas cargadas del viento solar llegaban sin apantallar y arrastraron los iones de oxígeno e hidrógeno de la atmósfera.

Por otra parte, como sabemos desde 2016 gracias a *Venus Express*, este planeta posee un campo eléctrico vertical muy intenso por encima de su atmósfera, al menos cinco veces mayor que los estimados para la Tierra y Marte. Dicho campo puede desencadenar reacciones que acabarían con el oxígeno en las capas altas atmosféricas, con lo que la formación de agua sería definitivamente inviable. En paralelo, la intensa actividad volcánica de Venus (que aún continúa en la actualidad) ha ido incrementando la densidad de la atmósfera y su contenido en dióxido de carbono, a la vez que rejuvenecía constantemente las capas superiores de la corteza hasta hace unos 800 Ma. A ello se debe que haya muy pocos cráteres de impacto en su superficie: pocas rocas han logrado atravesar esa densa atmósfera sin desintegrarse, y las grandes coladas de lava han ido cubriendo gran parte de los cráteres formados por los meteoritos que sí llegaron a impactar.

A partir de esa época, y ante la falta de tectónica de placas en Venus, la superficie ha sido poco alterada. Su topografía muestra una llanura que ocupa todo el planeta, sobre la que se elevan dos grandes mesetas que podríamos asociar a continentes: la llamada Ishtar Terra en el hemisferio norte (con el tamaño de Australia y en la que se encuentra el Maxwell Montes, una montaña de unos 11 km de altura), y Aphrodite Terra en el sur (similar en tamaño a Sudamérica). En toda la superficie aparecen morfologías típicamente volcánicas: largos canales por donde fluía la lava, grietas provocadas por hundimientos locales del terreno, así como estructuras características de este planeta como las *coronae* y *arachnoids*.

Algunos modelos climáticos recientes, que se basan en todos los datos disponibles y suponen una atmósfera inicial del planeta tan ligera como la de la Tierra primitiva, sugieren que Venus pudo tener condiciones compatibles con la presencia de agua líquida en su superficie durante un período más largo que el considerado tradicionalmente: desde hace 2900 Ma hasta hace sólo 715 Ma. El final de ese intervalo marcaría la época en que se evaporaron sus océanos y comenzaron los procesos ya comentados... mientras en la Tierra, habitada desde unos 3000 Ma antes, estaban surgiendo los animales. Aún no tenemos datos experimentales que apoyen estos modelos sobre el pasado de Venus, por lo que no está claro si la vida pudo florecer en nuestro planeta

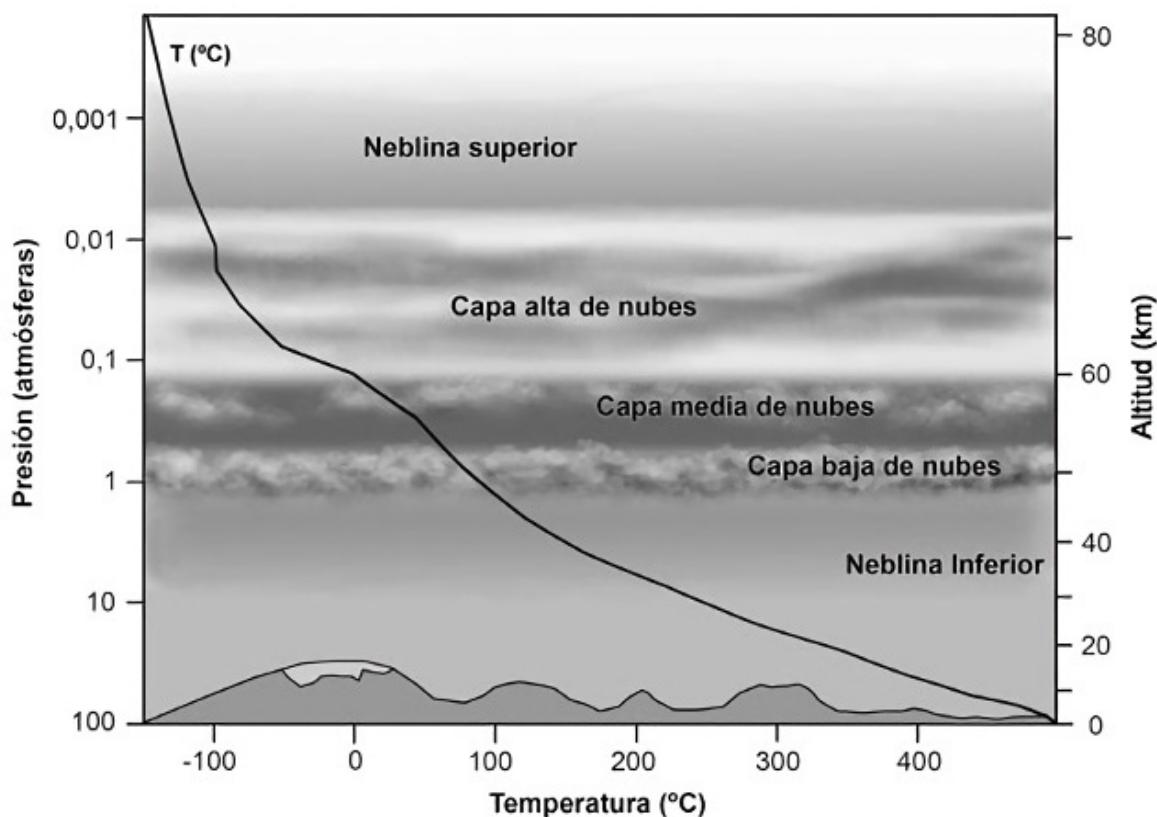
gemelo y evolucionar en él durante una época tan larga de su historia. Si fuera así, quizá bajo su abrasadora superficie actual podríamos encontrar signos de aquella biología endógena pasada, aunque las biomoléculas no resisten temperaturas muy altas y los eventuales fósiles estarían enterrados bajo gruesas capas de rocas ígneas. Los partidarios de la panspermia microbiana proponen que también podría haber llegado allí vida formada en nuestro planeta y transportada por meteoritos, pero (como hemos comentado) además de otros problemas no sería fácil que hubieran resistido el paso por su atmósfera.

¿VIDA ACTUAL EN LAS NUBES DE VENUS?

Varios investigadores han propuesto que podría haber seres vivos desarrollándose actualmente en Venus. Pero, evidentemente, no en su infernal superficie ya que ni los microorganismos hipertermófilos más resistentes que podamos imaginar sobrevivirían allí. Tampoco esperamos que sea habitable el subsuelo, cuyas condiciones distarán de ser acogedoras. Se trataría de formas de vida que se desarrolle en las nubes de su densa atmósfera, en concreto las situadas a una altitud cuya temperatura sea compatible con los procesos bioquímicos necesarios. El conocimiento que tenemos sobre la estructura y composición de la atmósfera venusiana, así como del gradiente térmico vertical en ella, muestra que la denominada «capa baja de nubes» (situada entre los 48 y 52 km de altitud) tiene temperaturas comprendidas entre aproximadamente 70 y 40 °C, respectivamente, mientras que su «capa media» (con nubes entre 52 y 62 km) está a temperatura de entre 40 y -30 °C. Dentro de esta última, se cree que a unos 55 km de altura sobre la superficie las condiciones pueden ser «agradables», con temperaturas de entre 20 y 30 °C y la mitad de presión que sentimos a nivel del mar. Eso sí, en las capas de nubes media y superior abundan los aerosoles de agua líquida y ácido sulfúrico, en forma de microgotas mantenidas en suspensión dentro del gas.

En conjunto, se ha planteado que a distintos niveles de estas capas de nubes podrían darse condiciones de habitabilidad adecuadas para microorganismos extremófilos, quizá similares a los hipertermófilos terrestres que crecen en medios ácidos, como *Acidianus infernus*, o análogos a los acidófilos caracterizados en nuestro río Tinto. Vivirían asociados a esos aerosoles, o adheridos a gránulos de polvo que proporcionen microambientes con la energía y nutrientes necesarios. Incluso, algunos autores han

especulado con que las colonias de microorganismos flotando en las nubes podrían estar implicadas en la absorción de algunas longitudes de onda de la radiación que se transmite por la atmósfera de Venus, produciendo el contraste observado entre sus diferentes capas. Además, lógicamente, en las nubes podría haber algún tipo de vida no relacionado con nuestra bioquímica y capaz de sobrevivir en un entorno como ese. En cualquier caso, moderemos nuestro entusiasmo: a día de hoy no hay ninguna evidencia, directa o indirecta, sobre la presencia de vida en el subsuelo, la superficie o la atmósfera de Venus.



Variación de la presión y la temperatura a través de la atmósfera de Venus, mostrando la altura a la que se encuentran sus principales capas de nubes. Ilustración de María Lamprecht.

La investigación de las nubes venusianas es uno de los objetivos de la misión *Venera-D*, propuesta por la agencia Roscosmos. Se trataría de continuar la exitosa trayectoria de las *Venera* y las *VeGa* de la URSS, para lanzar en 2026 una sonda que analizaría los procesos que transcurren en la atmósfera, y los que la conectan con la superficie y el interior del planeta. Pero, dadas las restricciones económicas que actualmente lastran a la agencia rusa, sus responsables han propuesto participar en esta misión a su antiguo competidor: la NASA. El planteamiento podría encajar bien con los planes norteamericanos para seguir estudiando Venus, donde no han vuelto desde las *Magellan*. Según los diseños que se manejan, esta compleja misión podría

incluir un orbitador (con una vida útil de al menos 2 años), dos sondas para estudiar la atmósfera (una de las cuales sería un globo aerostático capaz de volar durante 8 días, entre 50 y 70 km de altura) y un aterrizador (que debería funcionar entre 1 y 2 horas sobre la superficie del planeta). Dentro de esta propuesta, la NASA podría aportar una de las sondas atmosféricas (quizá su combinación entre avión y dirigible llamada *Venus Atmospheric Maneuverable Platform, VAMP*) y/o el *lander (Long-Lived In-Situ Solar System Explorer, LLISE)*. En cualquier caso, la posibilidad de colaborar en una misión conjunta a Venus, que desde el punto de vista científico y tecnológico sería beneficiosa para ambas agencias espaciales, va a depender finalmente de los intereses geopolíticos y económicos de ambos países... y de la imprevisible relación personal entre sus presidentes.

En paralelo, es probable que en 2026 despegue otra misión más modesta de la NASA con destino a Venus, ya que dos de las cuatro propuestas preseleccionadas en febrero de 2020 para el programa Discovery van dirigidas a este planeta. Son la sonda atmosférica *Deep Atmosphere Venus Investigation of Noble Gases, Chemistry, and Imaging Plus (DAVINCI+)* y del orbitador *Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy (VERITAS)*. El objetivo principal de la primera es estudiar la composición y dinámica de la atmósfera durante su lento descenso hasta la superficie (donde la sonda sobreviviría unos 20 minutos), proporcionando información sobre la posible habitabilidad de este planeta en su pasado remoto. Por su parte, *VERITAS* se dedicaría a analizar la composición geológica de la superficie y a cartografiarla por completo, con una resolución lateral media de 30 m (hasta 15 m en algunas zonas) y de 5 m en vertical. En 2021 sabremos si una de estas sondas es finalmente seleccionada.

Además, aunque aún no hay nada aprobado ni publicitado, se sabe que la agencia espacial china (CNSA) está trabajando sobre una futura misión a Venus, también para mediados de la década de 2020. Según el modelo manejado, podría incluir un orbitador con tecnología para cartografiar la superficie y una sonda atmosférica. Y, adicionalmente, la NASA maneja otro proyecto novedoso, llamado *High Altitude Venus Operational Concept (HAVOC)*, para mandar naves tripuladas (sí, lo hemos escrito bien) a Venus, que deberían mantenerse volando por su tóxica y corrosiva atmósfera durante largos períodos. Aunque se trata de una idea aún no definida y para un futuro lejano, tales naves podrían desplazarse a unos 55 km de altura, donde como hemos comentado las condiciones de presión y temperatura son similares a las existentes en determinados lugares de la superficie terrestre. Parte de su desplazamiento se lograría gracias al viento dominante a esa altura, y al estar llenas de aire respirable su menor densidad respecto de la atmósfera les proporcionaría flotabilidad. Quizá, al final, la ficción se convierta en realidad.

Por último, merece la pena comentar que a las investigaciones sobre la posibilidad de encontrar vida en la atmósfera de Venus contribuirán también los avances en aerobiología terrestre. Esta reciente disciplina científica, que combina el muestreo (desde aviones tripulados, drones o globos aerostáticos) con la utilización de técnicas de biología molecular, está permitiendo caracterizar la biodiversidad microbiana presente en las nubes de nuestra atmósfera a diferentes alturas. En algunos estudios ya publicados se han descrito comunidades que contienen 2600 especies diferentes de microorganismos eucarióticos (con densidades de entre 100 y 1000 células/cm³ de aire), y diez veces más (tanto en diversidad como en concentración) de bacterias y arqueas. Así, tal vez una instrumentación basada en la que se está utilizando en nuestro planeta (que iría montada sobre las sondas atmosféricas en desarrollo, o incluso en misiones tripuladas tipo *HAVOC*) permita en el futuro encontrar microorganismos en un entorno tan sugerente como las nubes que rodean Venus, diosa romana del amor y la belleza. Y de la fertilidad.

En nuestro viaje alejándonos del Sol llegaríamos a otros dos planetas rocosos de los que ya hemos hablado con detenimiento en capítulos anteriores: uno en el que los seres vivos han triunfado y otro en el que quizá existieran en el pasado... o incluso estén hoy escondidos bajo su desértica superficie. Gea y Ares, Tellus y Mars, Tierra y Marte. O, refiriéndonos a la vida y recordando la poesía de Luis Cernuda, *La realidad y el deseo*.

EN BUSCA DEL PLANETA PERDIDO

A comienzos del siglo XVII, el astrónomo y pionero de la ciencia ficción Johannes Kepler, el mismo que en su tratado *Harmonices mundi* había asignado notas musicales a cada planeta (en función de la velocidad angular que adquirían al recorrer su órbita elíptica), fue el primero en preguntarse por el inmenso vacío que se extendía entre las órbitas de Marte y Júpiter. Y propuso que en ese «hueco» debería haber un planeta aún no descubierto. Otros científicos y filósofos, entre ellos Immanuel Kant, siguieron interesándose por este tema hasta que, ya en siglo XCIII, se empezó a resolver el enigma. En 1766, Johann Daniel Titius, inspirado por la lectura de la obra *Contemplation de la Nature* de su contemporáneo Charles Bonnet, planteó una hipótesis que dos años después sería asumida como propia (hoy diríamos

plagiada) por Johann Elert Bode. Aunque algunos autores postulan que ni siquiera Titius fue el primero en idearla.

Dejando aparte la polémica y el siempre espinoso tema de la ética en los descubrimientos científicos, la que hoy conocemos como ley de Titius-Bode relaciona la distancia de un planeta al Sol (el semieje mayor de su órbita, a , medido en unidades astronómicas, ua) con su número de orden, según la sencilla sucesión matemática $a = (n + 4)/10$. El parámetro n refleja el orden del planeta dentro el Sistema Solar, siendo $n_1 = 0$, $n_2 = 3$, y a partir del tercero $n_i = 2(n_{i-1})$. Es decir, $n = 0; 3; 6; 12; 24; 48; 96; 192; 384$. Por tanto, se obtenían los valores $a = 0,4; 0,7; 1,0; 1,6; 2,8; 5,2; 10,0; 19,6; 38,8$. Éstos resultaban muy similares a las distancias entre el Sol y los planetas entonces conocidos: Mercurio (0,39 ua); Venus (0,72 ua); Tierra (1 ua, por definición); Marte (1,52 ua); Júpiter (5,20 ua) y Saturno (9,54 ua). Pero realmente parecía faltar un planeta entre Marte y Júpiter, que debería orbitar a unas 2,8 ua del Sol. La validez de esta ley fue refrendada cuando poco después, en 1781, William Herschel descubrió el planeta Urano... y se comprobó que distaba del Sol casi lo que le correspondía en función de ella: 19,18 ua. Varias décadas más tarde se mostraría que para Neptuno la ley pierde aplicabilidad, ya que el último planeta orbita a 30,10 ua del Sol, un 77 % de lo predicho.

Desde que se planteó la ley de Titius-Bode, los astrónomos se movilizaron para encontrar el planeta que debería orbitar a unas 2,8 ua del Sol. El 1 de enero de 1801, Giuseppe Piazzi descubrió un objeto muy pequeño que se movía sobre el fondo de estrellas a la distancia adecuada y que no era un cometa. Bautizó al nuevo «planeta» como Ceres, en honor a la diosa romana de la agricultura y patrona de Sicilia, donde él trabajaba. En marzo de 1802, Heinrich Olbers descubrió otro objeto cerca de Ceres y de tamaño menor, al que llamó Palas en recuerdo de Atenea, diosa de la sabiduría en la mitología griega. Se empezó a pensar que ambos quizás fueran fragmentos del planeta que Kepler había propuesto casi dos siglos antes, y se postuló que podrían encontrarse más objetos similares entre las órbitas de Marte y Júpiter.

Un mes después del hallazgo de Olbers, William Herschel llegó a la conclusión de que los pequeños Ceres y Palas (hoy sabemos que tienen diámetros de 952 y 545 km, respectivamente) eran un nuevo tipo de cuerpos, para los que acuñó el término de «asteroides» porque vistos a través del telescopio parecían pequeñas estrellas. No obstante, él mismo consideraba que ese nombre era sólo «la mejor de muchas malas ideas» que había estado barajando. En cualquier caso, tal denominación no tuvo buena acogida y ambos se siguieron considerando planetas. Pero en los dos años posteriores se descubrieron Vesta y Juno (que, como hoy sabemos, son el tercero y quinto por tamaño), cuatro décadas más tarde los siguientes (incluido Hygiea, el cuarto más grande), y a principios del siglo xx ya se había generalizado el nombre de asteroides para los cerca de mil cuerpos rocosos similares

detectados hasta entonces. Sin embargo, el 24 de agosto de 2006, con la nueva definición de «planeta» acordada por la Unión Astronómica Internacional (IAU), Ceres fue reclasificado de nuevo, esta vez como «planeta enano», debido a su forma esférica y a sus características orbitales. Por tanto, usando la terminología actual, Palas fue el primer asteroide descubierto y es el mayor de todos.

LOS ASTEROIDES

Hoy en día conocemos cerca de 500 000 asteroides de distintos tamaños y formas, pero se estima que puede haber en torno a un millón de cuerpos con una de sus dimensiones mayor de 1 km, además de un número indefinido de otros más pequeños. Los que tienen un tamaño menor de 50 m se llaman meteoroides, y los gránulos por debajo de 100 µm se consideran polvo cósmico. La gran mayoría de los asteroides orbita en el denominado cinturón principal, a distancias del Sol entre 2 y 3,5 ua. Para los más cinéfilos merece la pena recordar que, debido a la enorme región del espacio que ocupan, su densidad en el cinturón es muchísimo menor que la habitualmente mostrada en las películas de ciencia ficción... cuando las naves que atraviesan un «campo de asteroides» tienen que ir sorteándolos constantemente para evitar chocar contra las rocas que salen a su paso. Otros asteroides están distribuidos en distintas zonas del Sistema Solar, asociados o no a las órbitas de los planetas. Entre ellos, se han estudiado mucho los llamados «troyanos de Júpiter», asteroides que comparten órbita con este planeta gigante y se mueven en grupos relativamente compactos por delante o por detrás de él. Además, merece la pena recordar que los dos pequeños e irregulares satélites de Marte, Fobos y Deimos (en la mitología griega, personificaciones del miedo y el terror), son probablemente asteroides que quedaron capturados por el campo gravitatorio de su padre Ares, el dios de la guerra.

Entre los nombres oficiales asignados a los asteroides encontramos (tras un número entre paréntesis, que hace referencia al orden de descubrimiento del propio objeto o de la familia a la que pertenece) una enorme variedad de seres mitológicos, personajes históricos, científicos, astronautas, músicos, pintores, escritores, protagonistas de obras de ficción, géneros de animales o plantas, ciudades, países, conceptos abstractos y un largo etcétera. Por ejemplo, uno de los asteroides del cinturón principal, descubierto por Max Wolf en 1929, fue nombrado (1134) Kepler en honor al primer científico que

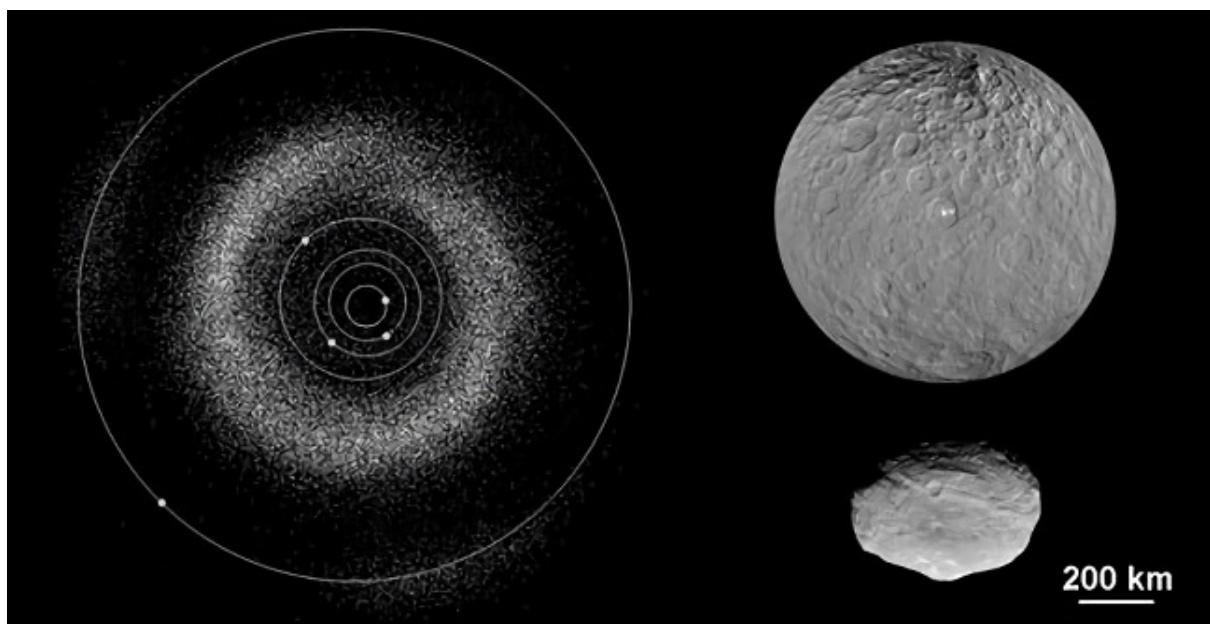
reflexionó sobre el espacio vacío entre las órbitas de Marte y Júpiter... y que soñó con viajes espaciales. Aunque, en el mundo de los sueños, probablemente el asteroide más interesante sería el B 612: de él provenía el Principito y, según nos contaba Antoine de Saint-Exupéry en su maravillosa obra, «no fue visto más que una vez con telescopio, en 1909, por un astrónomo turco».

Dado que la composición de los asteroides analizados es muy diferente, y teniendo también en cuenta que si sumamos la masa de todos (incluyendo al planeta enano Ceres) sólo resulta un 4 % de la Luna, ha quedado descartada la idea original de que pudieran ser los restos de un planeta que se destruyó entre las órbitas de Marte y Júpiter. Así, hoy consideramos que los asteroides son remanentes del material original de la formación del Sistema Solar, que debido al intenso campo gravitatorio de Júpiter no pudieron llegar a acumularse en la cantidad suficiente como para formar un planeta, quedando así sometidos a la red de interacciones que mantienen la dinámica del sistema. La composición y estructura de los asteroides (por lo general inalteradas desde su origen, aunque en algunos casos modificadas por procesos geológicos de «diferenciación», como veremos), así como las trayectorias que siguen, resultan fundamentales de cara a su posible influencia en la aparición y evolución de la vida.

Una de las formas de clasificar los asteroides se basa en el tipo espectral que presentan, ya que «su color» (es decir, la longitud de onda de la luz reflejada por ellos) y su albedo (la fracción de la luz incidente que nos devuelven, según indicamos en capítulos anteriores) informan sobre la composición de su superficie. Y como, a excepción de los más grandes, son cuerpos sin estructura interna diferenciada, su superficie nos habla también acerca del interior. Siguiendo este criterio, los tipos principales de asteroides son: S (silíceos y ricos en metales, que suponen en torno al 17 % de los conocidos); C (carbonáceos y muy oscuros, siendo más del 50 % del total); M (metálicos, ricos en níquel y hierro, que son los más brillantes y proceden del núcleo de asteroides diferenciados); V (llamados «vestoides» por tener un espectro similar al del (4) Vesta, asteroide del que probablemente surgieron tras un impacto recibido hace unos 1000 Ma, y cuya composición es parecida a la de los S); G (carbonáceos y similares a los C, que son el 5 % del total e incluyen al planeta enano Ceres); D (ricos en carbono, con baja reflectividad y muy poco abundantes). No obstante, se sabe que la porosidad, el nivel de exposición a la radiación solar, la fragmentación o el contenido en hielo de la superficie de un asteroide pueden afectar al espectro de la luz reflejada por ella, y por tanto se introducen varios matices en esta clasificación.

Los asteroides y meteoroides más cercanos a la Tierra se denominan «Near Earth Asteroids» (NEA) y están clasificados en tres categorías en función de su similitud a los prototipos (2062) Atón, (1862) Apolo y (1221)

Amor. Por tanto, paradójicamente, un asteroide Amor podría acabar con nosotros. Los NEA, junto con los cometas cuyas trayectorias intersectan en algún momento la órbita de nuestro planeta, se agrupan en los llamados «Near Earth Objects» (NEO). Entre ellos, unos 800 se someten a observación constante por encontrarse a menos de 7,5 millones de kilómetros de nosotros y representar un peligro potencial, como de vez en cuando recoge la prensa de forma siempre alarmista... y el cine ha reflejado en películas tan impactantes como carentes de asesoría científica. A nivel de divulgación se ha establecido la «Escala de Turín», que evalúa del 1 al 10 la peligrosidad de la colisión de un NEO teniendo en cuenta tanto su probabilidad de impacto como la energía (medida en megatones) que se liberaría en él. El riesgo mayor está en los asteroides pequeños y meteoroides, con tamaños entre 15 y 150 m, dada su dificultad para ser detectados con telescopios hasta que están «muy cerca» en términos astronómicos. La tecnología para desviar asteroides va a comenzar a probarse por la NASA gracias a la misión *Double Asteroid Redirection Test* (*DART*), que se lanzará en julio de 2021 con el objetivo de impactar contra el asteroide menor del sistema binario (65 803) Didymos, situado a 11 millones de kilómetros de nosotros: tras algo más de un año de viaje colisionará contra ese cuerpo, de unos 160 m de diámetro, modificando su velocidad y trayectoria de forma muy sutil pero comprobable con telescopios terrestres. En cualquier caso, a pesar del interés evidente que tiene realizar este tipo de demostraciones hemos de recordar que de momento no hay peligro a la vista.



Representación de las órbitas de los planetas interiores y Júpiter junto a la localización (el 9 de mayo de 2006) de los principales asteroides conocidos en el cinturón principal (puntos de color blanco entre las órbitas de Marte y Júpiter), los NEA (de color gris, en órbitas interiores a la de Marte) y los troyanos de Júpiter (también grises, compartiendo órbita con este planeta). Imagen de Wikimedia Commons. A la derecha se muestra el planeta enano Ceres (de 952 km de diámetro), en cuya región ecuatorial aparece una zona brillante dentro del cráter Occator, formada principalmente por carbonato de sodio. Bajo él, a

la misma escala, el asteroide (4) Vesta, que es el más masivo de todos y el segundo en tamaño tras (2) Palas, con 530 km de diámetro principal. Imágenes tomadas por la sonda *Dawn* (cortesía de NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA).

MISIONES A CERES Y A LOS ASTEROIDES

Los principales asteroides conocidos se han observado desde los telescopios terrestres y desde el *Hubble*. Además, algunas misiones con destino a los planetas exteriores han sobrevolado varios de estos cuerpos para estudiarlos a distancia, y otras han sido diseñadas específicamente para llegar a ellos y tomar muestras de su superficie. El primer asteroide visitado por una sonda espacial fue (951) Gaspra, de tipo S, cuando en 1991 lo sobrevoló a 1600 km la misión *Galileo* en su ruta hacia Júpiter. Esta sonda llegó dos años más tarde a las proximidades de (243) Ida, el primer asteroide en el que se detectó un diminuto satélite orbitándolo, que fue denominado Dactyl en un nuevo guiño a la mitología griega. Otras misiones que han fotografiado asteroides durante sus sobrevuelos han sido *Deep Space 1* y *Stardust* de la NASA, *Rosetta* de la ESA y *Chang'e 2* de la CNSA.

La primera sonda dedicada específicamente a la investigación de un asteroide fue *NEAR Shoemaker*, que con su lanzamiento en 1996 inauguraba el programa Discovery de la NASA. Tras sobrevolar (253) Matilde en 1997, orbitó (433) Eros durante un año y (aunque no estaba inicialmente previsto) en 2001 aterrizó sobre su superficie y siguió funcionando allí durante varios días. Los seis instrumentos científicos que llevaba permitieron cartografiar este asteroide, de tipo S, y aportar nuevos datos sobre la relación que existe entre asteroides y cometas.

Otro gran hito se produjo con la misión *Hayabusa* (que en japonés significa «halcón peregrino») de la JAXA, ya que fue la primera que permitió recoger material de la superficie de un asteroide y traerlo de vuelta a la Tierra. Su diana fue (25 143) Itokawa, de tipo S, con forma alargada y tamaño de 600 × 300 m, que orbita entre la Tierra y Marte. La sonda llegó a su destino en 2005 y, aunque el aterrizador *Minerva* no llegó a tocar la superficie del asteroide y se perdió en el espacio, el propio halcón se posó sobre ella en dos ocasiones, en la segunda de las cuales pudo tomar material. *Hayabusa* regresó exitosamente a la Tierra en 2010 y en el momento adecuado liberó una cápsula con las muestras. Tras su reentrada atmosférica, ese contenedor fue recogido en el complejo aerospacial RAAF Woomera Range Complex de Australia, y los minúsculos fragmentos del asteroide visitado se analizaron en

instalaciones de Japón, con todas las precauciones de protección planetaria requeridas en una misión de clase V. Estos minuciosos análisis han permitido confirmar que los asteroides de tipo S son el origen de los meteoritos condríticos, mayoritarios entre los recogidos en nuestro planeta. Además, han mostrado que (25 143) Itokawa contiene grandes cantidades de agua, y que en ella la relación isotópica es idéntica a la de nuestros océanos. Así, se ha llegado a estimar que la mitad del agua de la Tierra nos pudo llegar gracias a los impactos de este tipo de asteroides.

Mientras *Hayabusa* volaba de vuelta a la Tierra, en 2007 se lanzó la misión *Dawn* de la NASA con destino a dos cuerpos clave del cinturón de asteroides, que (debido a su tamaño y a diferencia de casi todos los demás) sí tienen una estructura interna diferenciada: (4) Vesta y el planeta enano Ceres. Tras sobrevolar Marte orbitó el asteroide durante ocho meses (entre 2011 y 2012), estudiando en detalle su estructura, topografía y las evidencias de la actividad volcánica que tuvo en el pasado. Posteriormente *Dawn* se convirtió en la primera sonda que orbitaba un planeta enano, ya que comenzó a hacerlo el 6 de marzo de 2015, cuatro meses antes de que (como veremos) *New Horizons* llegara a Plutón. Su misión terminó en 2018, aunque se supone que seguirá en órbita de Ceres, ya sin poder comunicarse con la Tierra, durante al menos otros veinte años. En las imágenes de alta resolución que *Dawn* envió del planeta enano descubierto por Piazzi se observa un cuerpo esférico altamente craterizado. Sus instrumentos determinaron que el fondo siempre en sombra de más de 600 cráteres cercanos al polo norte de Ceres contiene hielo de agua que se mantiene a -213°C , formando capas de hasta varios metros de espesor. De hecho, toda la superficie de Ceres es una mezcla de rocas y hielo, por lo que este planeta enano contiene una gran cantidad de agua tan antigua como el propio Sistema Solar. *Dawn* ha detectado señales de minerales hidratados (entre ellos, carbonatos de sodio y amonio, así como arcillas) en las zonas más brillantes de su superficie, lo que ha llevado a proponer que el agua pudo mantenerse en estado líquido en el pasado formando un océano global, y que quizás parte de ella se encuentre aún en depósitos estables bajo su superficie, gracias al calor interno residual de este planeta enano.

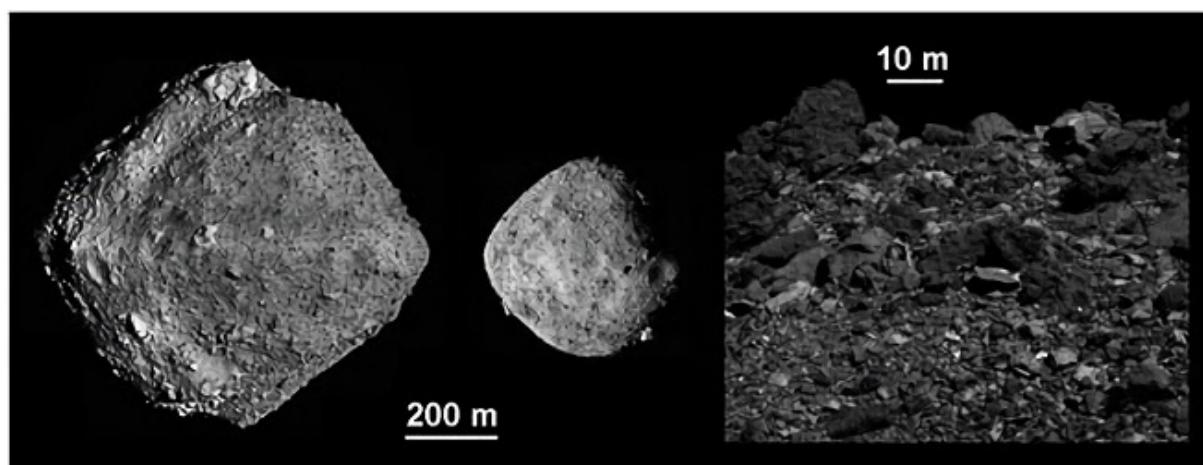
Además, utilizando espectrometría visible e infrarroja, *Dawn* también mostró que Ceres contiene compuestos orgánicos, concentrados principalmente en una zona de unos 1000 km^2 y color rojizo en torno al cráter Ernutet, situado en su hemisferio norte. Los datos obtenidos hasta ahora indican que se trataría de metano (CH_4) y otros hidrocarburos. Se está analizando el contexto geológico de esa región, para intentar determinar si dicho material orgánico se pudo sintetizar en Ceres debido a la acción de la radiación solar y cósmica sobre el hielo y las sales, por procesos químicos en el agua superficial o subsuperficial hasta concentrarse después en esa zona, o

bien por el impacto de un asteroide o un cometa. Previamente, algunas señales compatibles con materia orgánica se habían encontrado en al menos dos asteroides: (24) Themis y (65) Cybele. A pesar de que los datos son aún escasos, la presencia de agua, sales con nitrógeno y compuestos orgánicos está permitiendo aventurar que quizá Ceres (y tal vez también algunos de los asteroides más grandes) podría haber sido un entorno adecuado para el desarrollo de una química prebiótica que permitiese un origen alternativo de la vida en esa región del Sistema Solar. No obstante, aunque tal posibilidad resulta muy atractiva, las reducidas dimensiones de todos estos cuerpos difícilmente podrían haber ofrecido la variedad de escenarios geoquímicos aparentemente necesarios para producir el repertorio de biomoléculas (fueran éstas las que fueran) que darían lugar a seres vivos. No cabe duda: hay que volver a Ceres, y la próxima vez hemos de tocar (con todas las restricciones de protección planetaria requeridas) su superficie.

En 2014, la JAXA dio un nuevo paso al lanzar la sonda *Hayabusa 2* con destino a (162 173) Ryugu, un asteroide Apolo de tipo C y sólo 865 m de diámetro, al que llegó en junio de 2018. En septiembre de ese año depositó sus robots móviles *Minerva II 1A* y *1B*, con lo que estos dos pequeños prismas hexagonales de 18 cm de diámetro y 7 cm de altura, dotados de cámaras y sensores de temperatura, han sido los primeros *rovers* que operan en la superficie de un asteroide. Sobre ella han estado literalmente dando saltos (como los de alegría de los ingenieros japoneses que los habían diseñado) durante más de un año. Ésta es la forma más eficiente de desplazarse por un cuerpo de tan pequeño tamaño como un asteroide o el núcleo de un cometa, ya que su muy débil campo gravitatorio hace inviable el uso de ruedas o patas móviles. Días más tarde del aterrizaje de los *Minerva II*, la sonda puso sobre (162 173) Ryugu otro módulo más grande, el franco-alemán *Mobile Asteroid Surface Scout (MASCOT)*, que durante unas dieciséis horas estuvo realizando análisis con un espectrómetro infrarrojo, un radiómetro y un magnetómetro. Además, su cámara logró tomar las imágenes más cercanas jamás obtenidas de la superficie de un asteroide, mostrando diferentes tipos de rocas de entre centímetros y metros de tamaño, y algunas de las cuales poseen incrustaciones brillantes similares a las presentes en las condritas carbonáceas (de las que más tarde hablaremos) recogidas en la Tierra.

Por si este despliegue tecnológico fuera poco, la propia sonda *Hayabusa 2* tocó el asteroide en dos ocasiones (en febrero y julio de 2019) para recoger muestras: la primera en su superficie, y la segunda tras haber realizado una pequeña explosión en ella, que generó un cráter de 10 m de profundidad y dio acceso a los materiales de su interior, nunca alterados por la radiación. Una vez terminada su exitosa misión, en diciembre de 2019 la sonda se despidió de (162 173) Ryugu y puso rumbo hacia la Tierra: llegará a finales de 2020 y

al sobrevolarnos lanzará su cápsula de 40 cm de diámetro con las muestras, tras haber recorrido más de 5000 millones de kilómetros. Si todo continúa funcionando tan bien como hasta el momento de escribir estas líneas, será la segunda misión que traiga a nuestro planeta fragmentos de un asteroide. Y la primera en hacerlo de uno de tipo C, rico en materia orgánica, que además ha tomado muestras tanto de su superficie como de su interior inalterado. Quizá en esa auténtica cápsula del tiempo nos lleguen algunas de las claves sobre el origen de la vida en la Tierra... o fuera de ella. Esta exhibición de lo que hoy en día resulta posible gracias a la ciencia y la tecnología es realmente emocionante. Como escribió Julio Verne: «Todo lo que una persona puede imaginar, un día alguien lo realizará».



Fotografías a escala de dos asteroides visitados por sendas misiones japonesa y norteamericana: (162 173) Ryugu (de 865 m, al que llegó la sonda *Hayabusa 2*; imagen de JAXA, University of Tokyo, Kochi University, Rikkyo University, Nagoya University, Chiba Institute of Technology, Meiji University, University of Aizu y AIST) y (101 955) Bennu (de 490 m, estudiado por la sonda *OSIRIS-REx*; imagen de NASA/Goddard/University of Arizona). A la derecha se muestra una fotografía de muy alta resolución de la superficie del hemisferio norte de (101 955) Bennu, tomada por una de las cámaras de *OSIRIS-REx* el 28 de marzo de 2019, cuando sobrevolaba el asteroide a sólo 3,6 km de distancia (imagen de NASA/Goddard/University of Arizona).

Ante la supremacía de Japón en la recogida de muestras de asteroides, la NASA lanzó en 2016 su sonda *Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security, Regolith Explorer (OSIRIS-REx)* rumbo a (101 955) Bennu, un Apolo también de tipo C y con 490 m de diámetro. En esta ocasión, el nombre del asteroide fue puesto después de ser escogido como diana de la misión, por lo que se eligió un ave de la mitología egipcia (equivalente al Fénix griego) siempre asociada al dios Osiris. Su objetivo es muy ambicioso: tomar entre 60 g y 2 kg de muestras de la superficie del asteroide usando un brazo robótico retráctil y traerlas de vuelta a la Tierra. *OSIRIS-REx*, equipada con seis instrumentos científicos y tres cámaras, llegó a su destino en diciembre de 2018. Tres meses después se comprobó que (101 955) Bennu es en realidad un conglomerado de fragmentos de diferentes

tamaños, que dada su rápida rotación se están desprendiendo de él y volviendo a ser atraídos constantemente.

Aunque este imprevisto añadió complejidad a la misión, en diciembre de 2019 se escogió el lugar para la toma de muestras a partir de cuatro opciones preseleccionadas. El punto de muestreo, que siguiendo con la inspiración ornitológica se ha denominado *Nightingale* (en español, ruiseñor), se encuentra en un cráter de 70 m de diámetro, a una latitud alta del hemisferio norte del asteroide. Fue elegido por ser suficientemente plano, estar en una de las zonas más frías de la superficie (y por tanto menos alteradas térmicamente), y además presentar materiales con tamaño de grano pequeño que serán más fáciles de recolectar. La sonda tomará las muestras en agosto de 2020, abandonará el asteroide en 2021 y lanzará a la Tierra la valiosa cápsula con el material recogido en septiembre de 2023. El resultado de su análisis permitirá conocer mucho mejor el repertorio de moléculas que había en los materiales primordiales del Sistema Solar y complementará la información proporcionada por las muestras traídas por *Hayabusa 2*. Con ello, estamos cada vez más cerca de saber qué tipo de ingredientes exóticos pudieron ser añadidos desde el exterior de nuestro planeta a la sopa primitiva que aquí se estaba cocinando, y de la cual acabó surgiendo la vida.

Siguiendo esta línea de investigación, están en desarrollo otras misiones que visitarán asteroides durante los próximos años. Entre ellas hay dos de la NASA: *Lucy*, cuyo objetivo es sobrevolar cinco troyanos de Júpiter, y *Psyche*, que orbitará el asteroide metálico (16) Psyche. Por su parte, la Agencia Espacial Brasileña está trabajando en su sonda *ASTER*, diseñada para orbitar el asteroide triple de tipo C provisionalmente llamado (153 591) 2001 SN₂₆₃.

LOS METEORITOS

Independientemente del éxito de las misiones de exploración que se han ido sucediendo durante las últimas décadas, como más hemos aprendido sobre los asteroides ha sido gracias al análisis de los fragmentos de ellos que han llegado hasta nuestro planeta. En este sentido resultó fundamental el trabajo pionero de Ernst Chladni, que además de físico era músico... y de hecho está considerado como el padre de la acústica, pues convirtió en campo de investigación lo que se había iniciado dos siglos antes con aquellos estudios sistemáticos de los Galilei en Pisa. En su obra *Sobre el origen del Hierro de Pallas y otros similares, y algunos fenómenos naturales asociados*, publicada

en 1794, argumentó que varias rocas que había estado examinando (entre ellas un meteorito metálico encontrado en Siberia, del que el botánico Peter Pallas le había entregado un fragmento) tenían un origen extraterrestre. Con su arriesgada propuesta, que inicialmente se consideró absurda, daba los primeros pasos el campo de la meteorítica.

Hoy sabemos que si, tras vagar por el espacio interplanetario, la trayectoria de un asteroide o meteoroide intersecta la de la Tierra, estos pequeños cuerpos pueden quedar atrapados por nuestro campo gravitatorio. Al atravesar la atmósfera terrestre, las enormes temperaturas y presiones que resultan de la fricción con los gases producen su desintegración total o parcial: se conoce como «meteoro» a la señal luminosa detectada en el cielo, y dicho trazo se considera un «bólido» cuando la magnitud de su brillo es igual o mayor que la del planeta Venus, pudiendo ir acompañado de un estallido visible y/o audible. Si un fragmento de la roca original resiste tan complicado viaje (mostrando generalmente una «corteza de fusión» en su parte exterior, producida durante la entrada atmosférica) y es recogido de la superficie terrestre se denomina «meteorito». Siendo puristas, tal nombre únicamente debería darse a una roca extraterrestre cuando se ha observado y documentado su caída, pero se estima que esto sólo ocurre en uno de cada diez casos.

Casi todos los más de 60 000 meteoritos que se conocen nos han llegado desde el cinturón principal de asteroides, aunque al menos 130 de ellos provienen de Marte y más de 150 de la Luna. Su lugar de origen se determina analizando la composición química y desbalances isotópicos que presentan, tanto en su matriz rocosa como en las microburbujas de gas incluidas en ella. En el caso de los meteoritos marcianos y lunares, el material que cae a la Tierra fue eyectado en un pasado más o menos remoto desde el planeta rojo o desde nuestro satélite, tras haber impactado contra ellos otro meteorito suficientemente grande como para formar un cráter y despedir rocas de su corteza a gran velocidad. El meteorito marciano ALH84001, del que hablamos en el capítulo 7, es un buen ejemplo de ello.

A su vez, hay meteoritos terrestres que han llegado a la Luna, y curiosamente uno de ellos fue traído de vuelta sin saberlo por los astronautas del *Apolo 14*, según se pudo determinar a comienzos de 2019. De hecho, debido al gran número de impactos meteoríticos que ha recibido nuestro planeta a lo largo de su historia, se ha estimado que podrían haber llegado hasta 28 toneladas de material de la Tierra a cada 100 km² de superficie lunar. Y esto ha permitido plantear una hipótesis muy inquietante: las rocas terrestres que fueron alcanzando la Luna podrían contener restos de los organismos que habitaban en nuestro planeta en el momento del impacto meteorítico correspondiente, por lo que quizás en los casos más favorables (por ejemplo, si la roca se ha mantenido congelada en el hielo del fondo de

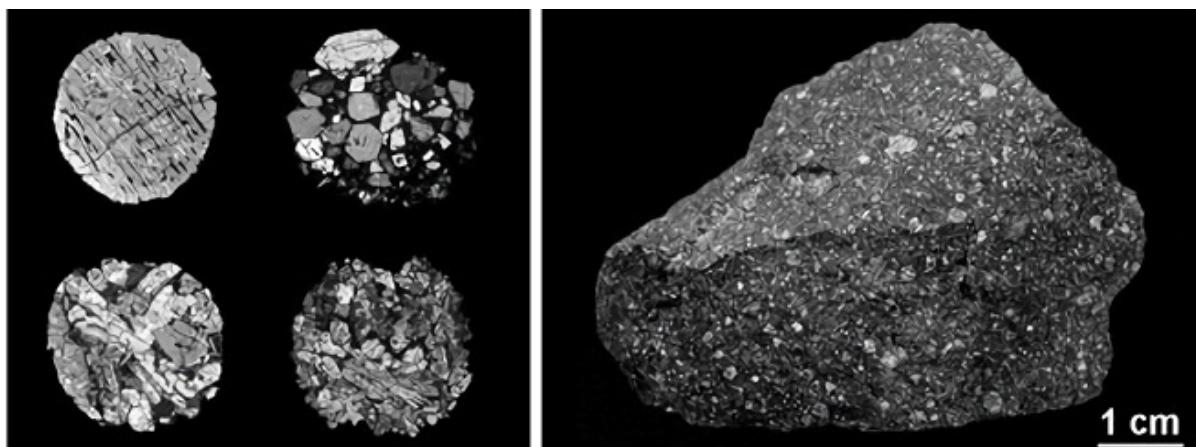
los cráteres cercanos a los polos lunares) podría haberse preservado su material genético, proteínas u otras biomoléculas con menos alteración que en la Tierra. Por ejemplo, es bien conocido que hace unos 66 Ma nos impactó el llamado meteorito de Chicxulub, una gigantesca roca de en torno a 11 km de diámetro que chocó contra nuestra superficie a 70 000 km/h, produciendo cambios globales en el planeta que acabaron con el 75 % de la biodiversidad pluricelular, incluidos los dinosaurios. Dado que muy probablemente una parte de las rocas extraídas de la Tierra llegaron hasta nuestro satélite, ¿podría guardar la Luna el secreto para montar un *Parque Jurásico*?

Además, aunque mucho menos abundantes, también habrá meteoritos originados en la Tierra que hayan caído sobre la superficie de Venus (si han resistido la entrada en su densa atmósfera) o de Mercurio, e incluso alguno puede haber llegado (a pesar de suponer un viaje «hacia afuera» por el Sistema Solar) hasta Marte. Así, el científico de la NASA Chris McKay dijo muy gráficamente en una ocasión que «Marte y la Tierra se han estado escupiendo mutuamente durante miles de millones de años». Por otra parte, como es lógico muchos meteoritos provenientes del cinturón de asteroides también han caído sobre Júpiter, Marte, la Luna, Venus y Mercurio y otros cuerpos, originando en los cuatro últimos casos casi todos los cráteres de impacto que presentan sus superficies. Tenemos pruebas directas de la caída de fragmentos de asteroides en Marte gracias a los meteoritos metálicos encontrados por *Opportunity* y *Spirit* en 2005 y 2006, respectivamente, y también uno hallado en 2015 por *Curiosity*. Por tanto, pensando en la panspermia como mecanismo para que viajen biomoléculas (o, con mucha menor probabilidad, microorganismos) por el Sistema Solar a bordo de rocas, pueden proponerse diferentes rutas asteroide-planeta y «caramolas» asteroide-planeta-planeta.

Se han establecido diversas formas de clasificar los meteoritos, entre las cuales una muy útil para el propósito de este libro es la basada en su composición y procedencia. Usando tal criterio se distinguen inicialmente los «no diferenciados» y los «diferenciados». Los primeros provienen de asteroides generalmente pequeños (menores de unos 60 km), formados por acreción de polvo y granos de material durante el origen del Sistema Solar (como se comentaba al principio del capítulo 3), y que al no haber sufrido procesos de fusión, mezcla y recristalización mantienen inalterados sus constituyentes primordiales. Estos meteoritos se denominan «condritas» debido a que dentro de su matriz rocosa se distinguen cóndrulos: formaciones esferoidales vítreas ricas en silicatos (principalmente olivino, feldespatos y piroxenos) y de tamaño milimétrico o menor, que son los auténticos tesoros encerrados en ellas ya que contienen el material original de la nube protoplanetaria que había hace unos 4600 Ma, de la cual provenimos. En las condritas abundan los minerales hidratados, lo que indica que los asteroides

de procedencia contenían inicialmente hielo de agua con posibilidad de fundirse posteriormente y alterar su matriz rocosa. Las condritas son los meteoritos más abundantes, suponiendo en torno al 85 % de los recogidos en la Tierra. Una fracción muy pequeña de ellas, aproximadamente un 5 %, son condritas carbonáceas: las más porosas y menos densas, que al tener la mayor proporción de compuestos volátiles se supone que provienen de cuerpos parentales formados más lejos del Sol. Éstas resultan especialmente interesantes en la investigación sobre el origen de la vida, ya que sus cóndrulos contienen un amplio repertorio de moléculas orgánicas, como veremos a continuación. Si las condritas carbonáceas fueran botellas arrojadas al mar interplanetario desde el cinturón de asteroides, sus cóndrulos serían el papel introducido en ellas... y las moléculas orgánicas que contienen son el mensaje que nos llegó.

Por el contrario, los meteoritos diferenciados provienen de cuerpos parentales que sí han sufrido procesos de fusión y otras alteraciones, por lo que han perdido la memoria geoquímica sobre su origen. Se clasifican en tres tipos, de los que el primero (al que pertenece un 8 % del total de los meteoritos recogidos) son las acondritas, de naturaleza rocosa y ricos en silicatos, pero sin cóndrulos en su interior ya que éstos se fusionaron por efecto de la temperatura existente durante los procesos de diferenciación. Entre las acondritas se encuentran los meteoritos que provienen de Marte (clasificados en shergottitas, nakhilitas y chassignitas), los de la Luna (a veces llamados en nuestro idioma lunalitos) y también los del subgrupo HED (que se originaron en el asteroide (4) Vesta). El segundo tipo son los metálicos, con alto contenido en hierro y níquel, que probablemente provienen de fragmentos del núcleo diferenciado de asteroides destruidos por el impacto con otros. Son muy densos y brillantes, suponen un 5,5 % del total de los meteoritos recogidos y se clasifican en función de su estructura (hexaedritas y octaedritas) o composición química (con varios grupos y subgrupos). El tercer y último tipo de meteoritos diferenciados son los sideritos o litosideritos, que constituyen sólo el 1,5 % del total y están compuestos por silicatos y metales casi en las mismas proporciones, por lo que también se denominan metalorocosos.



Ejemplos de cóndrulos contenidos en diferentes condritas, observados al microscopio petrográfico: dos de ellos son ricos en olivino (arriba) y dos en piroxeno (abajo). Selección a partir de una imagen original de Antonio Ciccolella disponible en Wikimedia Commons. A la derecha, fragmento del meteorito Murchison, una de las condritas carbonáceas más estudiadas y con mayor variedad de moléculas orgánicas identificadas, mostrando gran cantidad de cóndrulos (imagen de los New England Meteoritical Services, Estados Unidos).

EL METEORITO MURCHISON

Las condritas probablemente trajeron gran parte del agua que contiene nuestro planeta, y en el caso de las carbonáceas además aportaron un amplio repertorio de compuestos orgánicos. A ello también colaboraron, como veremos, los cometas. Por tanto, las condritas carbonáceas atesoran una información muy valiosa acerca de las moléculas extraterrestres ricas en carbono que pudieron contribuir a la transición entre la química y la biología en nuestro planeta. Uno de los meteoritos de este tipo más estudiados fue el que cayó en la localidad de Murchison (en Victoria, Australia) el 28 de septiembre de 1969, y del cual fueron recuperados más de 100 kg de fragmentos. Se analizó la parte interna de ellos, que no había estado en contacto con el suelo, en condiciones muy controladas para evitar la contaminación con moléculas terrestres durante el proceso. Así, se descubrió que su materia orgánica contenía mayoritariamente una matriz insoluble formada por hidrocarburos aromáticos (es decir, cíclicos) y alifáticos (lineales), que también aparece en ciertas rocas terrestres y se denomina kerógeno, junto a fullerenos de 60 o más átomos de carbono. Pero también se detectó un gran número de familias de moléculas pequeñas con carbono, más o menos solubles en agua, que podrían servir como índice de un curso completo de química orgánica: alcanos cortos, alcoholes y polioles, cetonas,

formaldehído y otros aldehídos, ácidos carboxílicos e hidrocarboxílicos, ácidos sulfónicos y fosfónicos, urea, aminas, amidas, bases nitrogenadas (purinas y pirimidinas), aminoácidos y diaminoácidos.

En cuanto a los aminoácidos, en el meteorito Murchison se han detectado algunos de los que están presentes en las proteínas de los organismos terrestres (glicina, alanina, valina, leucina, isoleucina, prolina, ácido aspártico y ácido glutámico) junto a otros poco habituales en nuestro planeta como pseudoleucina e isovalina. Por el contrario, no se encontraron otros de los contenidos en nuestras proteínas, entre ellos la serina o la treonina. Prácticamente todos los análisis han mostrado que cada aminoácido se encuentra en una mezcla racémica (al 50%) de sus formas quirales L y D (como vimos al comienzo del libro, variantes estructurales que son simétricas entre sí). Sin embargo, algunos investigadores han detectado pequeños «excesos» en ciertos aminoácidos de este meteorito a favor de la forma L, que es precisamente la que aparece en las proteínas de todos los descendientes de LUCA. Aunque éste es un resultado controvertido, de ser cierto indicaría que algún mecanismo extraterrestre de «selección quiral» de aminoácidos podría haber proporcionado preferencialmente una de sus variantes estructurales a la química prebiótica de nuestro planeta, desde la que se habría organizado la bioquímica que conocemos.

Merece la pena destacar que buena parte del repertorio de los aminoácidos y las demás biomoléculas presentes en el meteorito Murchison (y también en otras condritas carbonáceas intensamente analizadas, incluyendo los meteoritos de Allende, Orgueil o Murray) se obtuvieron como resultado del experimento con descargas eléctricas que realizó Stanley Miller en 1953, con el que se inauguraba el campo de la química prebiótica, y en las variantes llevadas a cabo después por él mismo y por otros investigadores. Esto resulta muy relevante de cara al origen y la posible distribución de la vida, dado que probablemente los mismos procesos químicos abióticos que se han llevado a cabo en algunos asteroides (y en varios laboratorios de nuestro planeta) habrán tenido lugar en muchos más lugares del Universo cuando las condiciones hayan sido propicias, generando así parte de los componentes más básicos de la vida.

De hecho, el listado de ingredientes potenciales es aún más extenso que lo indicado: un análisis exhaustivo realizado en 2010 del meteorito Murchison, tras utilizar diferentes disolventes para extraer la mayor cantidad posible de sus compuestos orgánicos, identificó más de 14 000 moléculas distintas y entre ellas 70 aminoácidos. Además, a finales de 2019 se publicó un descubrimiento muy importante: tanto este meteorito como el denominado NWA 801 (una condrita carbonácea encontrada en Marruecos en 2001) contienen varios azúcares, y entre ellos el que forma parte de la estructura del DNA y el RNA: la ribosa. La composición isotópica de su carbono demuestra

claramente que no es fruto de la contaminación durante o después de las caídas de estos meteoritos, lo que indica que esta molécula esencial para la vida también se puede formar, como las señaladas anteriormente, en los asteroides.

LAS CONDRITAS CARBONÁCEAS Y EL ORIGEN DE LA VIDA

Lo que acabamos de comentar resulta interesante porque muestra la riqueza de los procesos químicos que se pueden realizar en los cuerpos menores de nuestro sistema, por interacción de la radiación solar y cósmica con sus sustratos minerales y el hielo. Además, conocer este repertorio creciente de moléculas orgánicas nos sirve para excluir las del listado de posibles biomarcadores que podrían servir para detectar vida extraterrestre, pues queda patente que se pueden producir en condiciones abióticas. Por ejemplo, como adelantábamos en el capítulo 5, si en el futuro un biosensor a bordo de un *rover* detecta alanina, ácido glutámico o incluso ribosa en la superficie o el subsuelo de Marte, eso no implicaría necesariamente que dichas moléculas hayan sido producidas por alguna forma de vida marciana: podrían haberse sintetizado químicamente en el planeta, o haber llegado hasta allí a bordo de condritas carbonáceas procedentes del relativamente cercano cinturón de asteroides.

Por otra parte, al analizar ese listado queda patente que hay un límite superior en el grado de complejidad de las moléculas detectadas hasta ahora en las condritas carbonáceas. Algunos de los hidrocarburos alifáticos y aromáticos que forman el kerógeno son grandes y complejos, pero las moléculas solubles relacionadas con la vida que conocemos (y con otras que por el momento podamos imaginar) no van más allá de los diaminoácidos en meteoritos como el Murchison u otros similares. No parece haber en ellas, por ejemplo, péptidos de más de 3 aminoácidos (aunque algunos autores mantienen haber encontrado polímeros de glicina más largos en ciertos meteoritos), lípidos, nucleótidos, otras biomoléculas relativamente sencillas, ni por supuesto polímeros como polisacáridos, proteínas de distinta composición o ácidos nucleicos. Es decir, con una condrita carbonácea delante podemos estudiar un curso de química orgánica... pero no de bioquímica avanzada. Parece que las reacciones de síntesis prebiótica que tienen lugar en los cuerpos menores del Sistema Solar llegan a un límite a partir del cual no se avanza más, quedando lejos de la producción de

biopolímeros con capacidades funcionales que puedan dar lugar a seres vivos. Quizá para ello se requiera un entorno más grande y geoquímicamente diverso que un asteroide (o un cometa), que además contenga agua líquida en su superficie o subsuperficie: un planeta, un planeta enano o un satélite. En otras palabras, tal vez los cuerpos menores sean necesarios... pero no suficientes para que surja la vida.

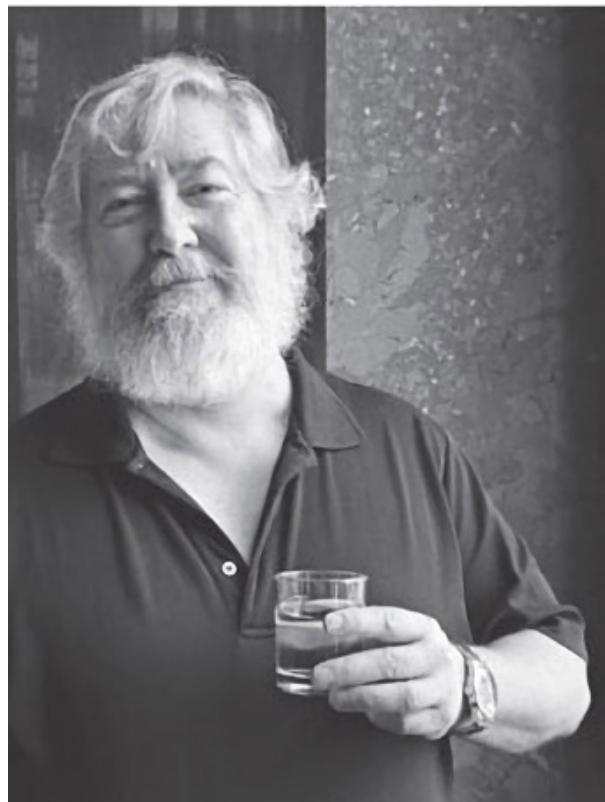
Otra enseñanza interesante derivada de ello es que hasta el momento no hay ninguna evidencia de que a bordo de los meteoritos pueda habernos llegado una bioquímica compleja, ni mucho menos microorganismos ya formados. Como avanzábamos en el capítulo 3, la hipótesis de la panspermia microbiana, tan socorrida en la ciencia ficción y en la cultura popular, no está apoyada por lo que sabemos sobre la química del Sistema Solar o sobre la composición de los meteoritos analizados.

Sin embargo, según hemos visto, la panspermia molecular sí puede haber sido clave en la transición de la química a la biología en nuestro planeta, pues los meteoritos y núcleos cometarios pudieron aportar moléculas sencillas que por uno u otro motivo no se formaban en la Tierra, o no lo hacían en la concentración suficiente, o bien se estaban sintetizando en entornos distintos a los que podían ser adecuados para las siguientes etapas biosintéticas. En el capítulo 3 comentábamos que tales moléculas extraterrestres (incluida buena parte del agua que acabaría formando nuestros océanos) nos pudieron llegar en gran cantidad durante el bombardeo inicial de meteoritos y cometas que se produjo hace entre 4540 y 4400 Ma (en un sistema planetario aún en formación) y en el bombardeo masivo tardío que tuvo lugar entre 4000 y 3850 Ma (cuando una fluctuación en la órbita de Júpiter desvió muchos asteroides hacia el interior del Sistema Solar). Por tanto, probablemente no existiríamos si se hubiera llegado a formar el planeta que Kepler echaba de menos, a una distancia de 2,8 ua del Sol. Una vez más, el azar y la necesidad combinándose en la receta del origen de la vida.

En cualquier caso, llega el momento de abandonar el cinturón de asteroides. Tras él nos encontraremos con los dos planetas gigantes, Júpiter y Saturno, que en conjunto contienen el 92,5 % de la masa de los cuerpos que orbitan en torno al Sol. Ya hemos hablado sobre ambos dioses de nuestro olimpo planetario en capítulos anteriores, deteniéndonos en sus lunas más prometedoras para la vida. Así que ahora sólo usaremos a estos dos gigantes de gas para realizar sendas maniobras de asistencia gravitatoria y continuar nuestro viaje.



Un café con... Joseph A. Nuth



Doctor en Química. Investigador senior de cuerpos primitivos del Sistema Solar en el Goddard Space Flight Center de la NASA (Greenbelt, Maryland, Estados Unidos) y miembro del equipo científico de la misión OSIRIS-REx.

Eres un claro ejemplo de investigador transdisciplinar ya que tu formación y trayectoria científica han estado ligadas tanto a la astrofísica como a la geoquímica, lo que te ha llevado a trabajar en diferentes temas de gran interés desde hace muchos años. En la actualidad, ¿cuál es tu campo de investigación en Goddard?

En pocas palabras, fabrico polvo y suciedad... y eso es lo que he hecho desde que me gradué. Concretamente, tratamos de producir en el laboratorio materiales que sirvan como análogos simples a los sólidos que se condensan en varios entornos astrofísicos. Estos van desde la materia que emiten las estrellas moribundas (las gigantes rojas) hasta los gránulos de polvo formado tras las violentas colisiones entre planetesimales, los productos de vaporización del polvo de las nebulosas y otros materiales resultantes de procesos que tienen lugar en la nebulosa solar o en otras regiones de

formación de estrellas. En mi laboratorio sintetizamos tales análogos en condiciones muy controladas, quedando listos para ser sometidos a análisis químicos y estructurales que permiten correlacionar sus propiedades físicas y espectrales. También realizamos otros experimentos utilizando dichos materiales, en los que determinamos cómo cambian sus propiedades espectrales a medida que se exponen al agua (en fase vapor o líquida) o a altas temperaturas. Todos estos trabajos nos ayudan a comprender los espectros de materiales observados en entornos astrofísicos por telescopios infrarrojos terrestres y espaciales.

Dado que es poco probable que vayamos a recoger muestras de esos lugares, también me interesé por los meteoritos, sus cuerpos parentales (los asteroides) y otros materiales de la nebulosa solar temprana. Aunque éstos pueden ser bastante primitivos, fueron sometidos a un procesamiento significativo tanto en el medio interestelar como en el Sistema Solar durante los últimos 4500 Ma. Podemos utilizar los análogos producidos en nuestro laboratorio como punto de partida para comprender el alcance de los procesos que han experimentado los materiales meteoríticos individuales, estableciendo así el límite más alto de temperatura que soportaron o el grado de exposición al agua, sea líquida o en fase vapor.

Con todo ello, en realidad, estás convirtiendo el Sistema Solar en tu laboratorio...

Así es. Y resulta muy interesante, sobre todo porque a medida que llevamos a cabo estos experimentos vamos teniendo sorpresas, como descubrir que los condensados frescos son excelentes catalizadores para la síntesis de compuestos orgánicos a partir de CO, N₂ y H₂, o que los sólidos orgánicos recién formados constituyen en sí mismos superficies óptimas para producir otras moléculas con carbono. Algunos de estos sorprendentes resultados los describimos en un artículo de revisión publicado en 2016 en la revista *Chemie Der Erde*. Tales estudios condujeron a trabajos adicionales en el campo de la astrobiología y a la participación de mi grupo en la misión OSIRIS-REx con destino a Bennu. Formar parte de ella me hizo, a su vez, ser consciente de los posibles riesgos asociados a impactos de asteroides en la Tierra, y de la dificultad para defendernos de tales amenazas. Ésta es otra área en la que actualmente investigo, diseñando sistemas que podrían ser utilizados en caso de que se detecte un peligro de impacto y tengamos un tiempo de respuesta muy corto.

Antes de centrarnos en los asteroides y cometas fijémonos por un momento en el planeta Venus: ¿qué opinas sobre la posibilidad de que sus nubes puedan proporcionar un entorno capaz de sostener la vida microbiana?

Hace cincuenta años se pensaba que no había vida en el fondo de los océanos, excepto los microbios que metabolizaban los restos de ballenas en descomposición. Ahora sabemos que los organismos quimiolitotróficos son abundantes en tales ambientes extremos. Ese mismo tipo de microorganismos vive también en rocas que están a varios kilómetros de profundidad bajo la superficie terrestre. En nuestro planeta, muchos microbios se transportan a través de la atmósfera y algunos de ellos recorren grandes distancias sobre partículas de polvo atmosférico. Por tanto, no hay razón que impida pensar que los seres vivos pueden evolucionar hasta existir únicamente en la atmósfera... cuando vivir sobre la superficie se haya vuelto imposible, como ocurre en Venus. Y una pregunta aún más interesante sería: ¿puede la vida originarse en una atmósfera planetaria que no tiene superficie real, como la de Júpiter u otros gigantes de gas?

Gran pregunta... a la que creo que de momento nadie puede responder. Por otra parte, se ha descubierto materia orgánica en el planeta enano Ceres. ¿Podría ser clave este hallazgo para la posibilidad de encontrar vida en la superficie o en el interior de algunos asteroides? En otras palabras, ¿es el tamaño de un cuerpo planetario relevante para acomodar la química compleja que puede dar lugar a los seres vivos?

Como te comentaba, Carlos, es muy difícil predecir dónde la vida *no puede* existir. Ceres ha pasado por importantes etapas de evolución geológica y podría contener una hidrosfera subterránea significativa, calentada por la desintegración radiactiva de algunos de sus materiales. Los seres vivos quimioautotróficos podrían haber evolucionado, y tal vez aún estén prosperando, bajo la superficie de Ceres. Mientras siga produciéndose energía en el interior de este planeta enano, la vida puede existir allí. De hecho, es interesante conjeturar cuánto tiempo podría persistir algún tipo de vida después de que la energía interna cayera por debajo de un nivel umbral.

Centrándonos en los cuerpos más pequeños del Sistema Solar, en tus artículos y charlas apoyas la idea de que la distinción entre asteroides y cometas no está clara. ¿En qué te basas para ello?

La «vida activa» de un cometa está en el orden de 1000 perihelios o pases cerca del Sol, mientras que la «vida dinámica» del núcleo cometario en el Sistema Solar interior es de aproximadamente 500 000 años. Para los cometas de la familia de Júpiter (JFC), los períodos orbitales son de entre 5 y 20 años, por lo que su fase activa dura 10 000 años en promedio. Esto implica que hay cincuenta veces más cometas de tipo JFC inactivos (es decir, detectables como asteroides) que cometas activos en órbitas similares. Sin embargo, si por cualquier razón un cometa inactivo o asteroide se fragmenta puede ser

reactivado como un cometa, ya que los volátiles interiores que antes estaban protegidos ahora quedarán expuestos al Sol. En muchos sentidos, podemos decir que un cometa es realmente sólo una fase activa por la que pasan algunos asteroides ricos en volátiles cuando se acercan al Sol.

La exitosa misión Rosetta, de la ESA, orbitó y tocó el núcleo del cometa «Chury». Por su parte, otras sondas han sobrevolado diferentes cometas, incluso tomando muestras de su superficie. ¿Cuáles han sido, en tu opinión, los principales hallazgos obtenidos in situ en los cometas?

Efectivamente, *Rosetta* fue pionera porque sólo esa misión ha orbitado un cometa y enviado una sonda (*Philae*) a su superficie, mientras que todas las demás han sido sobrevuelos, alguno con recogida de muestras. Para mí, las mayores sorpresas que nos han deparado los cometas han sido la diversidad de materiales encontrados en ellos (desde hielos volátiles hasta minerales altamente refractarios), la abundancia de morfologías alargadas que constituyen sus núcleos (que posiblemente son cuerpos binarios débilmente unidos entre sí) y las similitudes químicas que presentan con asteroides y meteoritos.

La mayoría de los científicos considera que los cometas y meteoritos pudieron traer materia orgánica a la Tierra primitiva, con lo que irían añadiendo ingredientes a la «sopa primordial» de la que surgió la vida. Además de su papel como mensajeros químicos, ¿qué opinas sobre la posibilidad de que estos pequeños cuerpos también pudieran haber servido como vehículos de transferencia de microorganismos completos entre planetas o satélites, según plantea la controvertida hipótesis de la panspermia?

Casi ninguno de los cuerpos pequeños de los que hablas tocaron otra superficie planetaria antes de aterrizar en la Tierra primitiva. Por tanto, a menos que la vida se iniciara en un asteroide o en el cuerpo parental de un cometa, no habrían podido transferirnos microorganismos. Sin embargo, como sabemos, algunos meteoritos que se han analizado sí se originaron en otros cuerpos planetarios, por ejemplo en Marte o en la Luna. Entonces, si la vida comenzó primero en Marte, por ejemplo, teóricamente sí podría habernos llegado de esta forma a la Tierra. No obstante, la panspermia microbiana simplemente cambia de lugar el problema de entender el origen de la vida. Si lo imaginamos en Marte, hemos de tener en cuenta que no conocemos sus condiciones de contorno tan bien como en la Tierra, y además allí no disponemos de un registro fósil que nos pueda servir como guía. Todo ello abre la puerta a especulaciones descabelladas, que no pueden ser sometidas a restricciones rígidas... y esto realmente no resulta muy útil.

Ahora mismo tienes un vaso de agua en la mano. En tu opinión, ¿qué porcentaje de esa agua que vas a beber es extraterrestre, porque llegó a nuestro planeta a bordo de cometas y/o meteoritos durante los bombardeos masivos inicial y tardío, después de la formación del sistema Tierra-Luna?

Si se produjeron los procesos que propone el Modelo de Niza o el Grand Tack, hubo un número significativo de pequeños cuerpos ricos en materia orgánica, agua y otros compuestos volátiles que se incorporaron a la Tierra durante su formación, al igual que a los demás planetas interiores del Sistema Solar. En ese caso, los magmas y minerales terrestres podían contener hasta un 3 % de agua disuelta a medida que la Tierra crecía, y si hacemos los cálculos esto representa el volumen de cientos de océanos actuales. El bombardeo masivo tardío (que se produjo desde hace unos 4100 hasta 3800 Ma, aproximadamente) pudo aportar algo de agua a la superficie terrestre, y es probable que nos trajera la mayoría de los elementos conocidos como «tierras raras». Esta agua superficial aportada por meteoritos y cometas tal vez fue suficiente para dar cuenta de toda la hidrosfera de la Tierra, pero según el modelo que estamos comentando la cantidad que podría haber surgido en forma de vapor de agua desde el interior del planeta sería mucho mayor.

Por el contrario, si los planetesimales ricos en volátiles no estaban presentes en el Sistema Solar interior, entonces tendríamos una Tierra relativamente «seca» cuando se formó. En ese caso, prácticamente toda el agua de este vaso será extraterrestre, ya que habrá sido aportada fundamentalmente por cometas durante el bombardeo masivo tardío. Como estamos viendo, comprender los procesos dinámicos en la nebulosa solar temprana es clave para responder a tu pregunta de forma cuantitativa. Y todavía se requiere mucho trabajo antes de conocer el grado de mezcla de materiales producido en el disco protoplanetario por los movimientos resonantes de los planetas gigantes.

Merece la pena pensar en la fascinante historia del agua cada vez que la bebemos... Para terminar, Joe, una última pregunta con la que volvemos al comienzo de nuestra conversación: ¿puedes resumir las principales características de la misión OSIRIS-REx de la NASA, en la que estás directamente implicado, que orbita el asteroide (o cometa inactivo) Bennu y que en 2023 regresará a la Tierra con muestras de su superficie?

La máxima prioridad de la misión OSIRIS-REx es traer a la Tierra un mínimo de 60 gramos de material prístino recogido de la superficie de Bennu, documentando el contexto geológico del lugar de recolección, que ya hemos seleccionado y se llama *Nightingale*. Siguiendo la normativa de protección planetaria, los miembros del equipo de la misión hicimos todo lo posible para

garantizar que el sistema de recogida de muestras estuviera libre de contaminantes orgánicos antes y durante el lanzamiento, de modo que el inventario químico del material que nos llegue representará el contenido real y la distribución de las moléculas que pudieron ser aportadas por los meteoritos a la Tierra primitiva.

Además, para comprender mejor cómo es Bennu debemos documentar su forma, masa, densidad, giro, posición de los polos, propiedades espectrales, rugosidad de la superficie, diversidad de materiales y otras características. Por otra parte, este conocimiento podrá extrapolarse a otros asteroides que sólo pueden ser observados de forma remota. Tales datos, junto con el análisis detallado de las muestras recogidas, se utilizarán para intentar explicar una amplia gama de procesos que van desde los efectos YORP y Yarkovsky (importantes para la defensa de nuestro planeta ante posibles impactos meteoríticos) hasta la cuantificación del contenido en volátiles y materia orgánica de los cuerpos menores primitivos (lo que resultará clave para la futura minería de asteroides y los estudios de utilización de recursos *in situ*, ISRU), así como para el modelado de las condiciones iniciales y los procesos ocurridos durante la infancia del Sistema Solar.



11. Entre Urano y los confines del Sistema Solar



Eres lo que soñaban
los primates que alzaron la cabeza
para mirar al cielo,
el fruto de su sed, de sus preguntas.

Encontraste la roca perseguida,
ese núcleo desnudo
 del cometa:
sobre el fondo sin nombre del espacio
un perfil desgarrado recortándose
como un grito en la noche.

Has dudado al tocar su piel primera,
las huellas de aquel tiempo detenido
que atesora la luz de la memoria.

Tras diez años de frío y de silencio,
a quinientos millones de kilómetros
llegas
 para decirnos
 lo que somos.

Compuse este poema, titulado «*Philae*», el 12 de noviembre de 2014. Ese día, un pequeño módulo con el mismo nombre se desprendió de la sonda *Rosetta* de la ESA y se ancló, tras un par de intentos fallidos, en la superficie del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Nunca pensé que un robot pudiese ser el destino de mis versos, pero la emoción de aquellas horas me empujó a viajar hasta allí. Al concluir la exitosa misión *Rosetta-Philae*, la ESA seleccionó este poema como uno de los que formarían parte del proyecto *Rosetta Legacy*, en el que se recogieron diferentes contribuciones inspiradas por la llegada al cometa. Así, estos versos comenzaron a convivir con otros textos literarios escritos en diferentes idiomas, ilustraciones, cuadros o vídeos que se pueden descargar libremente desde la página web de la agencia europea. Dicho proyecto fue un ejemplo más de que la ciencia y la tecnología no están tan alejadas de otras manifestaciones de la cultura como las humanidades y las artes.

Llegar al núcleo de un cometa suponía un hito para la exploración espacial, y también era muy sugerente porque todos hemos visto alguno en el cielo y nos hemos hecho grandes preguntas durante esas noches tan

especiales. Desde el punto de vista científico, los cuerpos situados a las afueras del Sistema Solar, de cuyos confines provienen casi todos los cometas, resultan fundamentales para seguir preguntándonos sobre el origen y la posible distribución de la vida en el Universo. Sobre lo que somos. Sobre si estamos solos.

URANO

El 20 de agosto de 1977 se lanzó la sonda espacial *Voyager 2* de la NASA, una de las más largas y exitosas de la historia, que fue la primera en proporcionar imágenes detalladas de los planetas del Sistema Solar exterior y de algunos de sus satélites. A día de hoy, se mantiene como la única en haber visitado Urano y Neptuno. Más de cuatro décadas después, en noviembre de 2018, la *Voyager 2* alcanzó el espacio interestelar al dejar atrás la heliopausa, y actualmente está a unas 120 ua (18 000 millones de km), siendo la tercera nave más alejada de la Tierra. El récord de distancia recorrida por las que ya son sondas interestelares lo tiene su gemela *Voyager 1*, de la que hablamos al comienzo de este libro, mientras que la segunda es la *Pioneer 10*, que también ha sobrevolado los capítulos anteriores y volverá a aparecer en el último. La *Voyager 2* fue un ejemplo de la importancia de las maniobras de asistencia gravitatoria comentadas al hablar sobre Bepi Colombo: cuando la sonda llegó a las inmediaciones de Júpiter en el año 1979 su velocidad era de 36 000 km/h, y tras ser fuertemente acelerada por el planeta se estabilizó en unos 70 000 km/h en su viaje hacia Saturno, donde una operación similar la llevaría hasta Urano.

Así, el 24 de enero de 1986, la *Voyager 2* sobrevoló Urano, pasando a 81 500 km de su superficie gaseosa. Por tanto, gran parte de la información que tenemos acerca del planeta se la debemos a esta fugaz visita de la sonda viajera, que estudió la composición y dinámica de su atmósfera, analizó su tenue sistema de anillos previamente detectado desde la Tierra, investigó su estructura interna y además descubrió diez de sus satélites. Desde entonces, las campañas de observación de Urano realizadas por telescopios terrestres y por el telescopio espacial *Hubble* también han contribuido decisivamente a aumentar la información que tenemos sobre este planeta.

Urano era el dios del cielo en la mitología griega (Caelus para los romanos), hijo y esposo de Gea (Terra), padre de Crono (Saturno), abuelo de Zeus (Júpiter), Poseidón (Neptuno) y Hades (Plutón), y bisabuelo de Ares

(Marte) y Hermes (Mercurio). Además, en una venganza urdida por Gea, de los genitales de Urano cortados por Crono y arrojados al mar se formó una espuma de la que nació la diosa Afrodita (Venus). En el Sistema Solar, todo queda en familia. Pero el patriarca del clan es el único que recibió el nombre de una divinidad del panteón griego en vez del romano. Aunque su magnitud aparente (entre 5,3 y 5,9) sí le hace visible a simple vista con condiciones de observación óptimas, por su movimiento muy lento sobre el cielo parecía una estrella más, y no había sido identificado como un planeta ni siquiera por los pacientes astrónomos del siglo XVII. Fue el 13 de marzo de 1781 cuando William Herschel, empleando su potente telescopio, descubrió el séptimo planeta más alejado del Sol. Urano dista de nuestra estrella 19,18 ua, tiene un período orbital de 84,3 años, y muestra la particularidad de que su eje de rotación está inclinado casi 98° con respecto al plano de la eclíptica, un ángulo mucho mayor que el de cualquier otro planeta del Sistema Solar. El hecho de que sus movimientos de rotación y traslación sean prácticamente perpendiculares hace que los hemisferios norte y sur del planeta reciban la radiación del Sol en períodos alternos de unos 42 años.

El diámetro de Urano es de 51 118 km, el tercero mayor de nuestro sistema, mientras que su masa es equivalente a 14,5 tierras, la cuarta tras los dos gigantes y Neptuno. Con ello, su densidad es la segunda más baja del Sistema Solar. Tiene una estructura interna formada por un pequeño núcleo rocoso de silicatos, hierro y níquel, envuelto por un grueso manto que consiste en un fluido denso y caliente (aunque en ciencias planetarias se suele llamar coloquialmente «hielo») compuesto por agua, amoníaco (NH_3) y metano (CH_4). La atmósfera del planeta contiene un 83 % de hidrógeno molecular (H_2), un 15 % de helio (He), casi un 2 % de metano y trazas de amoníaco, etano (CH_3CH_3), acetileno ($\text{CH} \equiv \text{CH}$), metilacetileno ($\text{CH}_3-\text{C} \equiv \text{CH}$), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y monóxido de carbono (CO). Su temperatura media superficial es de -205°C . Las capas gaseosas más externas tienen un característico color cian o verde-azulado, debido a la absorción de la luz roja por el metano, y muestran nubes con una dinámica compleja asociada a la peculiar climatología del planeta.

Sus 27 satélites conocidos no se han nombrado como dioses u otros protagonistas de la mitología grecorromana, a diferencia de los demás en el resto del Sistema Solar. Por el contrario, siguiendo una propuesta inicial de John Herschel, hijo del descubridor del planeta, los nombres corresponden a personajes (la mayor parte, femeninos) que aparecen en obras de dos escritores ingleses. El primero es William Shakespeare, una de las más altas cimas de la literatura mundial de todos los tiempos. El segundo, Alexander Pope, extraordinario poeta, que en este contexto merece la pena recordarlo también como el autor del epitafio para Isaac Newton, aunque no se permitió

escribirlo en su imponente tumba de la abadía de Westminster: «La naturaleza y sus leyes yacían ocultas en la noche; / dijo Dios “que sea Newton” y todo se hizo luz». Entre las lunas de Urano, las de mayor tamaño y mejor estudiadas son Miranda, Ariel, Umbriel, Titania (la más voluminosa de todas) y Oberon, que están compuestas por diferentes proporciones de roca y hielo.

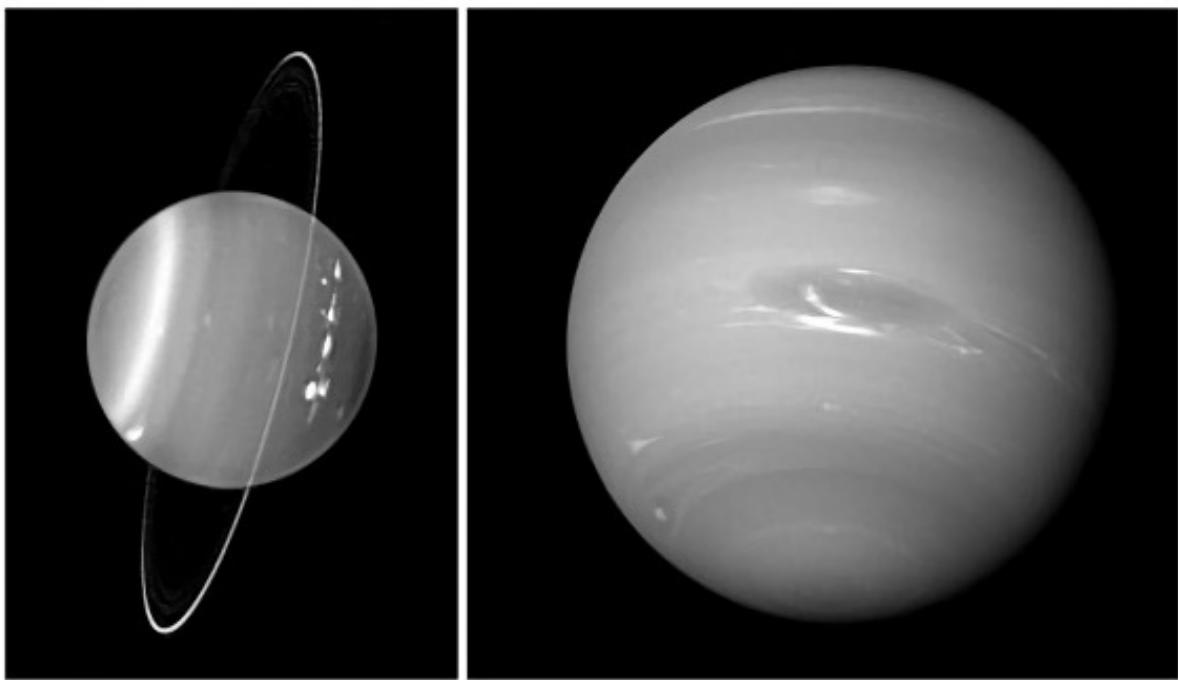
A pesar de la existencia de moléculas orgánicas en determinadas capas gaseosas de Urano, y de las interfases químicamente activas que probablemente contienen varias de sus lunas, hasta ahora nada indica que el dios del cielo pueda ser tan poderoso como para haber generado alguna forma de vida en su entorno. En la ficción sí se ha conseguido, lógicamente, con relatos como *The Insects from Shaggai* (Ramsey Campbell, 1964), *Into the Blue Abyss* (Geoffrey A. Landis, 2001) y *Uranian Gleams* (Robert Gibson, 2015), o películas como la clásica *Journey to the Seventh Planet* (Sid Pink, 1962). Y para aproximarnos a algunos de sus satélites, nada mejor que escuchar la inspirada canción «Astronomy Domine», publicada por Pink Floyd en 1967.

NEPTUNO

El planeta Neptuno, con una magnitud aparente en torno a 8, no es visible con el ojo desnudo. Por tanto, nadie podía aventurar su existencia hasta que el cielo comenzó a ser escrutado con un telescopio. Y fue precisamente Galileo Galilei quien primero lo vio con el suyo, como documentan los dibujos que realizó a finales de 1612 y comienzos del año siguiente, mientras seguía preocupado porque la forma de Saturno había cambiado y ya no mostraba sus protuberancias laterales. Sin embargo, el astrónomo de Pisa no asoció a un planeta aquel punto prácticamente inmóvil y muy poco brillante, suponiendo que era otra estrella cerca de la posición de Júpiter en esa época. Durante los dos siglos siguientes continuó pasando desapercibido, y no fue descubierto hasta el 23 de septiembre de 1846, al ser encontrado por Johann Gottfried Galle en la posición predicha por los cálculos matemáticos realizados de forma independiente por Urbain Le Verrier y John Couch Adams. Siete décadas después de su descubrimiento, y cuando aún no se conocía prácticamente nada sobre este planeta, el compositor Gustav Holst le dedicó el séptimo y último movimiento de su suite *Los planetas*, que tituló «Neptuno, el místico».

El planeta más alejado del Sol tomó el nombre del dios del mar y las aguas en la mitología romana, cuya genealogía ya conocemos. Orbita en torno a nuestra estrella a una distancia media de 30,10 ua, por lo que su luz tarda unas cuatro horas en llegarle. Su período orbital es de casi 165 años, lógicamente el mayor de todos los planetas. Es el cuarto más voluminoso de nuestro sistema, con un diámetro de 49 572 km, y el tercero en cuanto a masa ya que equivale a unas 17,1 tierras. Casi todo lo que conocemos acerca de Neptuno se lo debemos, una vez más, a la sonda viajera *Voyager 2*: tres años después de sobrevolar Urano realizó su máxima aproximación a este planeta el 25 de agosto de 1989, terminando así su histórico recorrido por los cuatro gigantes del Sistema Solar. Además, el telescopio espacial *Hubble* y otros desde la superficie terrestre también han aportado datos muy valiosos sobre Neptuno.

Su estructura interna es similar a la de Urano, con un núcleo de silicatos, níquel y hierro, rodeado por un fluido denso de agua, amoníaco y metano que forma el manto (responsable, en este caso, de más del 80 % de su masa). La atmósfera es también parecida a la del planeta anterior, con un 80 % de hidrógeno molecular, 19 % de helio, 1,5 % de metano y trazas de otros compuestos como deuteruro de hidrógeno (HD) y etano. Sus capas superiores muestran un color azul cobalto y se encuentran a una temperatura media de -218°C . En ellas se han detectado trazas de monóxido de carbono y cianuro de hidrógeno (HCN), y nubes más claras formadas por metano, amoníaco y sulfuro de hidrógeno (H_2S). La *Voyager 2* fotografió varias tormentas de diferentes tamaños, entre ellas un anticiclón similar en algunos aspectos al famoso de Júpiter, que se denominó Gran Mancha Oscura. Los vientos detectados en estas tormentas son los más intensos del Sistema Solar, con velocidades supersónicas de hasta 2400 km/h. El planeta también muestra un tenue sistema de anillos, formados por partículas de hielo y silicatos. No hay ninguna evidencia de vida en Neptuno, aunque muchos escritores se han aproximado a ella: desde novelas clásicas como *Last and First Men* (Olaf Stapledon, 1930) hasta películas recientes como *Ad Astra* (James Gray, 2019). Además, distintas especies de neptunianos han protagonizado numerosas obras, incluyendo relatos de Howard P. Lovecraft, capítulos de las series *Doctor Who*, *Space Patrol* y *Futurama*, o películas de la factoría Marvel.



El planeta Urano, en una imagen tomada por el telescopio *W. M. Keck* de Hawái en 2004 que muestra claramente su tenue sistema de anillos. Se observan también nubes en el hemisferio norte, que queda en la parte derecha debido a la gran inclinación de su eje de rotación con respecto al plano de la eclíptica. Imagen de Lawrence Sromovsky, University of Wisconsin-Madison/W.M. Keck Observatory. A la derecha (y a distinta escala) se muestra Neptuno, fotografiado por la sonda *Voyager 2* en agosto de 1989, cinco días antes de realizar el sobrevuelo del planeta. En su región ecatorial observamos la Gran Mancha Oscura, rodeada de nubes. Imagen de NASA/JPL/Voyager-ISS/Justin Cowart.

En torno al más lejano de los cuatro planetas gigantes se conocen hasta la fecha 14 satélites. Antes de que la *Voyager 2* lo visitara sólo se habían observado desde la Tierra los dos más grandes: Tritón y Nereida. La sonda de la NASA descubrió otras seis lunas, más interiores al planeta: Náyade, Talasa, Despina, Galatea, Larisa y Proteo. Y posteriormente el número ha ido creciendo, con satélites de variadas formas que describen órbitas de excentricidades muy diferentes. Entre todas estas lunas, sin duda la más importante y mejor estudiada es Tritón, que posee el 99,5 % de la masa total de los satélites neptunianos... y además está cobrando una importancia creciente en astrobiología.

TRITÓN

El satélite más grande de Neptuno y el único con masa suficiente para mantener una forma esférica, fue descubierto el 10 de octubre de 1846, sólo

17 días después que el planeta, por el maestro cervecero y astrónomo aficionado William Lassell. Se nombró como uno de los dioses griegos del mar, hijo de Poseidón (el romano Neptuno) y Anfitrite, que se suele representar con cuerpo humano y cola de pez, soplando una caracola. En la mitología vive con sus padres en un palacio de oro situado en el fondo del mar, pero en el cielo sólo acompaña a Neptuno, en un barrio de las afueras del Sistema Solar. La sonda *Voyager 2* lo sobrevoló pocos días después de visitar al padre, y nos mostró imágenes de su hemisferio sur.

Con un diámetro de 2710 km, casi un 80 % de nuestra Luna, es el séptimo satélite más grande del Sistema Solar. Tiene la particularidad de ser el único de tamaño importante que muestra una órbita retrógrada, es decir, se desplaza en sentido opuesto a la rotación del planeta. Debido a este hecho, y a que su composición es similar a la de Neptuno, se considera que puede tratarse de un cuerpo no muy diferente de Plutón, capturado por su padre desde el cinturón de Kuiper.

El núcleo y manto de Tritón son parecidos a los de Urano. La corteza es de hielo, compuesto por un 55 % de nitrógeno molecular (N_2), un 20-35 % de agua, prácticamente el resto de dióxido de carbono (CO_2), un 0,1 % de metano y trazas de monóxido de carbono y amoníaco. Su superficie se encuentra a una temperatura media extremadamente fría: $-235^{\circ}C$ en verano. La parte de ella que se ha podido topografiar (en torno a un 40 % del total, en el hemisferio sur) muestra muy pocos cráteres de impacto y tiene mucha rugosidad. Esto indica que la superficie es muy joven y que Tritón parece ser uno de los pocos satélites geológicamente activos que conocemos, junto a los ya mencionados de Júpiter y Saturno. De hecho, se observan partes del terreno deformadas por la actividad tectónica y los criovolcanes. También aparecen géiseres de hasta 8 km de altura, pero no emiten vapor de agua como las plumas de Encélado o Europa, sino nitrógeno molecular procedente de la sublimación del hielo, mezclado con polvo. Como consecuencia, presenta una atmósfera muy tenue e inestable de este gas.

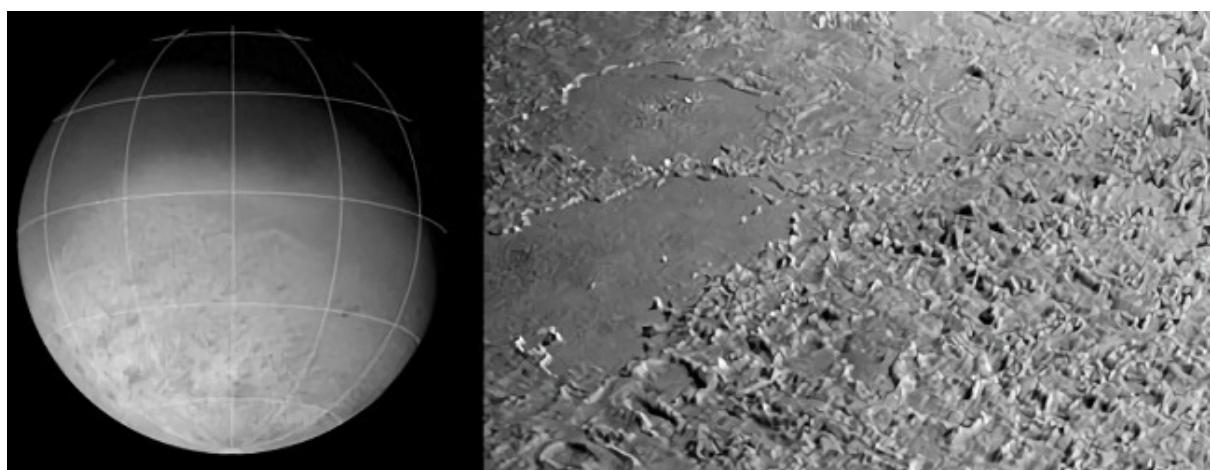


Imagen del hemisferio sur de Tritón obtenida durante el sobrevuelo de la sonda *Voyager 2* en agosto de 1989, con una resolución de 5 km por píxel y con la rejilla de latitud y longitud superpuesta (seleccionada por el autor a partir de una galería cortesía de NASA/JPL/USGS). A la derecha se muestra un fragmento de la superficie de este satélite, utilizando mapas topográficos realizados por la *Voyager 2* durante su sobrevuelo, en los que se ha aumentado 25 veces la dimensión vertical para facilitar la interpretación geológica. Esta región se conoce como «Cantaloupe terrain» (debido a su similitud con la piel de la variedad de melón llamada cantalupo) y su aspecto rugoso parece deberse a que grandes placas de su corteza de hielo se voltearon sobre el agua líquida, exponiendo al exterior el lado que había estado en contacto con el océano subsuperficial. Esos montículos de hielo tienen (a escala real) pocos cientos de metros de altura y algunos kilómetros de anchura. Las dos zonas planas que se observan a la izquierda (de entre 200 y 250 km de diámetro) podrían haberse originado por criovulcanismo. Imagen cortesía de NASA/JPL/Universities Space Research Association/Lunar & Planetary Institute.

Debido al calor interno que aún mantiene Tritón, se cree que podría contener un océano de agua líquida subsuperficial similar a los conocidos en varias lunas que ya hemos visitado. Además, en su superficie de hielo se han descubierto depósitos oscuros, probablemente formados por compuestos orgánicos complejos como las tolinas, emitidos en forma de polvo por los géiseres. En consecuencia, actualmente consideramos que este satélite constituye otro mundo oceánico habitable: en su palacio del fondo del mar, Tritón podría proporcionar un refugio para la vida.

Ya se está pensando en mandar allí una nueva delegación desde nuestro planeta, en forma de sonda dotada de una variada instrumentación que sobrevolaría a los dioses del agua, padre e hijo, durante la próxima década. Así, entre las cuatro propuestas a misiones Discovery de la NASA que han sido preseleccionadas en febrero de 2020, una de ellas, llamada *Taking Remote and In-situ Data to Explore Neptune and Triton (Trident*, un acrónimo inmejorable), despegaría hacia ese lejano destino en 2026 si fuera elegida. Permanezcamos atentos a la decisión final, que se conocerá en 2021. En cualquier caso, una vez más la ciencia ficción se adelantó y ya ha visitado esta luna en varias ocasiones, desde que Samuel R. Delany la colonizara con humanos en su novela *Trouble on Triton: An Ambiguous Heterotopia*, publicada un año antes de que fueran lanzadas las *Voyager*.

PLUTÓN

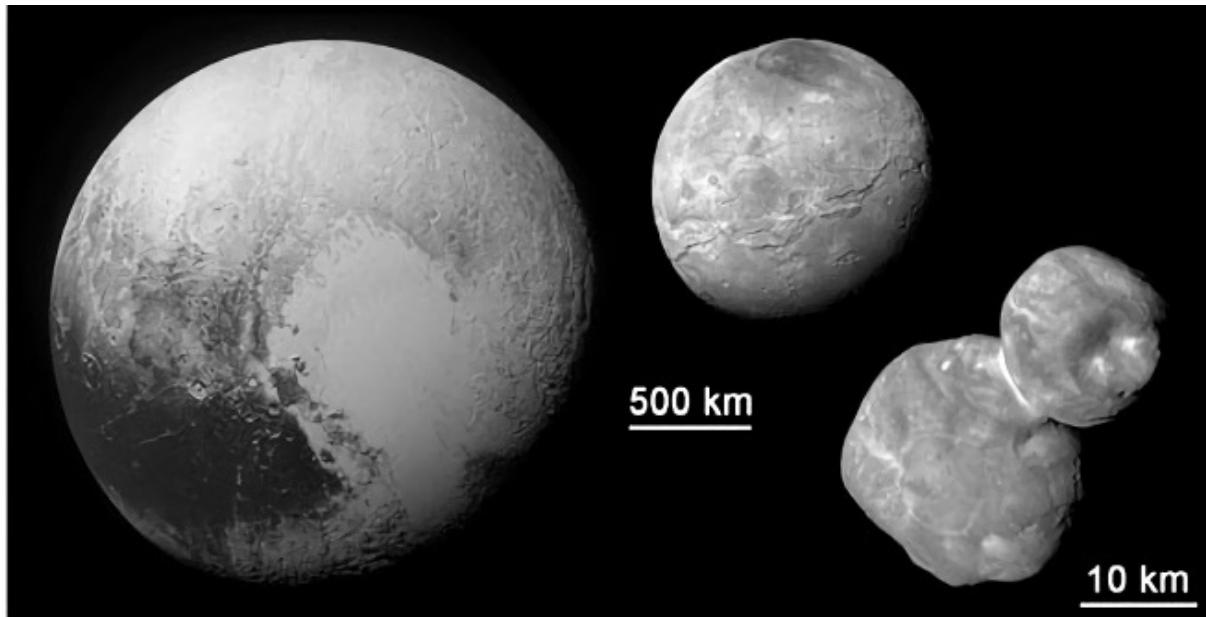
Plutón fue descubierto el 18 de febrero de 1930 por el astrónomo Clyde W. Tombaugh cuando sólo tenía 24 años, desde el Observatorio Lowell en Flagstaff (Arizona, Estados Unidos). Nombrado como el dios romano del

inframundo, sigue una órbita altamente excéntrica entre 30 y 49 ua del Sol, en un plano muy inclinado con respecto al de la eclíptica. Su tamaño es de sólo 2375 km de diámetro (un 68 % de nuestra Luna) y similar al de otros cuerpos transneptunianos de los que hablaremos posteriormente. Estas características llevaron a que, siete décadas después de su descubrimiento, fuera «degradado» por la IAU: en 2006, pasó de ser el noveno planeta del Sistema Solar al más grande de los cinco planetas enanos reconocidos hasta ahora. De cola de león a cabeza de ratón. Se han identificado cinco satélites orbitándolo, cuyos nombres también nos llevan a los territorios mitológicos de la muerte y los infiernos: Caronte, Nix, Hidra, Cerbero y Estigia. El primero de ellos es muy grande en comparación con el planeta, ya que tiene más de la mitad de su diámetro (1208 km). De hecho, no se desplaza en torno a él como un auténtico satélite, sino que Plutón y Caronte orbitan alrededor de su centro de masas común, por lo que algunos astrónomos los consideran como un planeta enano doble.

El conocimiento sobre Plutón ha avanzado extraordinariamente gracias a la misión *New Horizons*, la primera del ambicioso proyecto New Frontiers de la NASA aunque su presupuesto total fue unas diez veces menor que el de las *Voyager*. Se lanzó en enero de 2006 con el objetivo de llegar hasta los confines del Sistema Solar para investigar Plutón, Caronte y otras de sus lunas, así como diversos objetos del cinturón de Kuiper. Gracias a uno de los vuelos más rápidos en la historia de la exploración espacial, poco más de un año después llegó a las inmediaciones de Júpiter, donde realizó una maniobra de asistencia gravitatoria para poner rumbo al primero de sus destinos: Plutón, que había perdido su estatus de planeta cuando la sonda estaba a mitad de camino entre la Tierra y el gigante de gas.

El 14 de julio de 2015 *New Horizons* realizó su mayor aproximación a Plutón, y en dicho sobrevuelo ofreció las primeras imágenes jamás obtenidas de su superficie. Además de extraordinarias por su calidad, resultaron totalmente sorprendentes: aquel lejanísimo mundo exhibe una topografía muy rica, incluyendo una gran zona con mucha reflectividad (nombrada Tombaugh Regio en homenaje a su descubridor) que ocupa casi una cuarta parte de su hemisferio sur y, curiosamente, tiene forma de corazón. Los datos proporcionados por esta misión muestran que la superficie de Plutón, a una temperatura de -240°C , está formada casi exclusivamente por hielo de nitrógeno molecular, con trazas de metano y monóxido de carbono. Cerca de su polo sur existen criovolcanes de varios kilómetros de altura, y en las imágenes aparecen también zonas con grandes fracturas, cráteres de impacto, terrenos escarpados, extensas planicies y fragmentos poligonales de hielo dentro de ellas. En otras regiones hay montañas de más de 3 km formadas por hielo de agua, que desde hace 10 millones de años (Ma) parecen estar

desplazándose lentamente como si fueran icebergs «flotando» sobre la superficie más densa de nitrógeno y monóxido de carbono sólido.



El planeta enano Plutón y su satélite Caronte, fotografiados por separado por la sonda *New Horizons* al sobrevolarlos el 14 y 15 de julio de 2015. Las tonalidades de gris de sus superficies indican diferentes composiciones y propiedades. Se han representado a escala, a partir de imágenes cortesía de NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Center. En la parte inferior derecha se muestra a (486 958) Arrokoth (a escala mucho mayor), en una composición de imágenes tomadas por *New Horizons* el 1 de enero de 2019 (cortesía de NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute/Roman Tkachenko).

Tras analizar todas sus características geológicas se ha propuesto que Plutón podría contener un gran océano global de agua líquida, de 100 a 180 km de profundidad, entre el núcleo de silicatos del planeta (en el que la desintegración de materiales radiactivos supondría una fuente de calor interno) y su corteza helada. En este mundo oceánico, la interfase entre el agua líquida y sólida estaría sometida a lento ciclos de congelación y descongelación que habrían producido las morfologías observadas en su superficie. Un escenario muy sugerente, sin duda, en la línea de lo indicado previamente sobre Europa o Encélado.

Plutón posee una atmósfera muy tenue y sujeta a notables cambios estacionales, cuya composición es similar a la de su superficie: mayoritariamente nitrógeno molecular, con trazas de metano (entre el 0,25 y el 0,60 %) y monóxido de carbono (menos del 0,08 %). Por influencia de la radiación cósmica, y de la ultravioleta que llega desde el lejano Sol, estos gases reaccionan para formar etano, etileno ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$), acetileno y nitrilos como el cianuro de hidrógeno (según sabemos, una molécula clave para la química prebiótica), que pueden originar neblinas en la atmósfera y también precipitar sobre su superficie. Además, se pueden formar compuestos

orgánicos complejos como las tolinas, que serían responsables del color marrón y anaranjado de buena parte de la superficie de Plutón. La presencia de agua y materia orgánica hace de Plutón otro de los candidatos a haber desarrollado (o estar desarrollando) una química suficientemente compleja como para formar sistemas biológicos. Por tanto, quizá este planeta enano se acabe convirtiendo en un gigante para la astrobiología.

En el universo de la ficción, el lejano Plutón ha sido uno de los cuerpos que más fascinación ha despertado, apareciendo en gran número de relatos, cómics, series de televisión y videojuegos. La primera novela que muestra un hipotético noveno planeta es anterior a su descubrimiento, pues Howard P. Lovecraft comenzó a escribir su *The Whisperer in Darkness* en 1929, refiriéndose a un mundo remoto llamado Yuggoth. Se publicó en 1931, y ese mismo año apareció, ya transcurriendo en el planeta recién descubierto, *In Plutonian Depths* (de Stanton A. Coblenz). Otros cinco ejemplos de novelas interesantes escritas en distintas épocas son *El secreto del noveno planeta* (Donald A. Wollheim, 1959), *The Forever War* (Joe Haldeman, 1974), *Icehenge* (Kim Stanley Robinson, 1985), *The Sunborn* (Gregory Benford, 2006) o *Agents of Dreamland* (Caitlín R. Kiernan, 2017, en la que ya aparece la sonda *New Horizons*).

OTROS CUERPOS DEL CINTURÓN DE KUIPER

Al igual que había ocurrido tres siglos y medio antes con el cuerpo o cuerpos que deberían encontrarse entre las órbitas de Marte y Júpiter, la existencia de objetos transneptunianos como remanente de la formación del Sistema Solar fue predicha tiempo antes de su descubrimiento. Lo postuló en 1951 el astrónomo de origen holandés Gerard Kuiper, a quien también debemos hallazgos como una luna de Neptuno y otra de Urano, la atmósfera de Titán o la presencia de dióxido de carbono en la de Marte. Pero hasta 1992 no se detectó el primer objeto (además de Plutón) en esta región circunestelar de forma toroidal, que dista del Sol entre 30 y 55 ua. El llamado «cinturón de Kuiper», como homenaje a quien lo había predicho, está formado por un gran número de objetos menores de 1100 km de diámetro («Kuiper Belt Objects», KBO), que básicamente son bloques de hielo primitivo como los que se unieron por acreción para formar planetas durante los orígenes del Sistema Solar. Ya se conocen más de 900, incluidos los más grandes: (50 000) Quaoar, (307 261) 2002 MS₄, (90 482) Orcus y (120 347) Salacia. Además,

forman parte del cinturón de Kuiper tres planetas enanos: el ya visitado (134 340) Plutón, (136 108) Haumea y (136 472) Makemake.

El día de Año Nuevo de 2019, *New Horizons* marcó un nuevo hito al sobrevolar a 3500 km de distancia (486 958) 2014 MU₆₉, un objeto del cinturón de Kuiper descubierto por el telescopio espacial *Hubble* en 2014, y extraoficialmente llamado Ultima Thule tras una campaña de votación pública realizada tres años después. El resultado del concurso fue realmente adecuado: esta expresión significaba metafóricamente «más allá de los límites del mundo conocido» en la literatura clásica y medieval, pues según las leyendas grecorromanas Thule era una isla mitológica situada en el extremo noroeste de los mapas... y ya el poeta Virgilio se preguntaba qué podría haber más allá de aquel lugar rodeado de tinieblas y monstruos. Adaptándolo a nuestras latitudes podemos decir que, si siguiéramos considerando a Plutón una especie de *Finis Terrae* del Sistema Solar, este objeto estaría aún más lejos de Roma, el lugar ocupado por el Sol. En cualquier caso, a finales de 2019 recibió su nombre oficial definitivo: (486 958) Arrokoth, cuyo significado era «cielo» o «nube» en powhatan, lengua extinta de la tribu nativa norteamericana que vivía en los actuales estados de Maryland (desde el que se descubrió este cuerpo) y Virginia, y a la cual pertenecía una joven llevada al cine en varias ocasiones, Pocahontas.

Arrokoth es el cuerpo más distante visitado por una sonda espacial, pues estaba situado a unas 44 ua (o 6600 millones de km) de nosotros cuando *New Horizons* llegó a él. Entre las celebraciones que se organizaron el día de ese exitoso sobrevuelo, Brian May, mítico guitarrista de Queen y además doctor en astrofísica, lanzó un tema musical con el mismo nombre de la misión, lo que suponía su primer trabajo en solitario durante los últimos veinte años. Dos de los versos de su letra resultan especialmente adecuados para nuestro libro: «Esta noche la mano del hombre se extiende / para arrojar luz sobre cómo comenzó la vida».

Las imágenes de alta resolución de Arrokoth obtenidas, con sólo 33 m² por píxel, mostraron que tiene una forma nunca antes observada claramente en el espacio (aunque quizá los satélites Cerbero e Hidra se parezcan): un lóbulo mayor de morfología aplanada (que se sigue conociendo como Ultima, de unos 22 km de diámetro y 7 km de grosor) unido a otro esferoide más redondeado (Thule, con un diámetro de 14 km y grosor de 10 km, que presenta una gran depresión central). El alineamiento de los dos lóbulos y el hecho de que su «cuello» o zona de unión sea una línea brillante indicaría que ambos bloques de hielo (formados, a su vez, a partir de fragmentos más pequeños por acreción) se adhirieron o fusionaron lentamente tras haber orbitado entre sí. La superficie de los lóbulos de este auténtico «muñeco de nieve» es suave, está poco craterizada, y tanto su color rojizo como su baja reflectividad sugieren la presencia de materia orgánica. De hecho, el

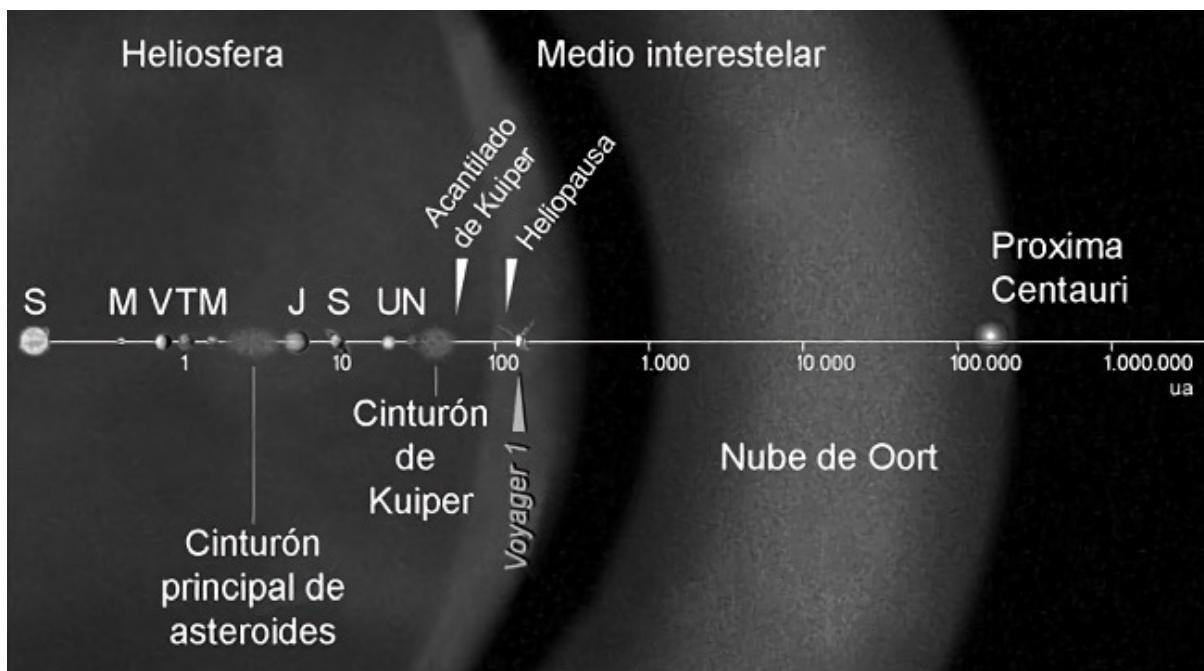
espectrómetro de infrarrojo a bordo de *New Horizons* ha determinado que la capa más externa de Arrokoth contiene metanol (CH_3OH) y tolinas formadas a partir de metano y amoníaco. Se ha propuesto que la irradiación de otras moléculas orgánicas, como el acetileno, el etano o el cianuro de hidrógeno, podría haber contribuido también a la coloración roja de este objeto tan interesante.

Dado que a esta misión aún le quedan unos veinte años de vida, se están escogiendo los próximos cuerpos del cinturón de Kuiper que visitará, para seguir ampliando los horizontes de nuestras preguntas. Tal vez se decida sobrevolar alguno de los otros dos planetas enanos que, además de Plutón, forman parte del cinturón de Kuiper. Por el momento, los datos que tenemos sobre ellos provienen únicamente de observaciones realizadas con telescopios terrestres y con el *Hubble*. El llamado (136 108) Haumea (con un diámetro de 1632 km y orbitando a 43,1 ua del Sol) fue descubierto en 2003 y se nombró en honor a la diosa patrona de Hawái. Su interior es rico en silicatos, y presenta una superficie muy brillante de hielo de agua con estructuras amorfa y cristalina mezcladas, en la que se han detectado hidrocarburos y cianuro de hidrógeno. Por su parte, (136 472) Makemake (de 1430 km de diámetro y que orbita el Sol a 45,8 ua), descubierto en 2005, se nombró como el dios creador de la humanidad en la mitología de la isla de Pascua. Su interior es también rocoso, mientras que la superficie de hielo de agua y nitrógeno molecular es rica en materia orgánica, conteniendo metano, etano, etileno, acetileno y tolinas probablemente responsables de su color rojizo. Ambos planetas enanos parecen carecer de atmósfera y tienen satélites (dos y uno, respectivamente).

En la región del cinturón de Kuiper más alejada del Sol, en torno a 55 ua, se produce una disminución muy drástica en la densidad de objetos detectados. Para indicar este aparente límite, los astrónomos usan un concepto que demuestra su gusto por las metáforas: «el acantilado de Kuiper». Más allá de él, como pequeñas islas, aparecen algunos objetos transneptunianos (TNO) en medio de la inmensidad del espacio. Así, a 67,2 ua del Sol orbita uno de tamaño considerable, con 1230 km de diámetro, llamado (225 088) 2007 OR₁₀. Y un poco más alejado se encuentra el planeta enano (136 199) Eris, inicialmente denominado Xena, cuya órbita dista 67,7 ua del Sol. Fue descubierto en 2005, tiene 2326 km de diámetro (por lo que es el segundo más grande de la familia después de Plutón) y posee un satélite. Su superficie parece similar a la de Plutón, con hielo de agua y de metano, lo que da una idea de la ubicuidad de la materia orgánica más sencilla en el Sistema Solar. Más allá, a unas 120 ua, se localiza la heliopausa: el límite de la región denominada heliosfera a la que llegan las partículas cargadas del viento solar. Y mucho más lejos, a 518,6 ua, se ha detectado otro objeto de tamaño considerable: (90 377) Sedna, con 995 km de diámetro.

LA NUBE DE OORT

El Sistema Solar no termina en el acantilado de Kuiper ni en los islotes que se adentran tímidamente en el océano del medio interestelar. A una abrumadora distancia de entre 2000 y 50 000 ua (o, expresado en una unidad que ya comienza a resultar útil y que nos acompañará en el siguiente capítulo, entre 0,03 y 0,75 años luz), existe una distribución de pequeños fragmentos de hielo que se denomina «nube de Oort» en honor al astrónomo holandés Jan Oort, quien en 1950 propuso que los cometas podrían provenir de esa zona situada en el límite de nuestro sistema planetario. Se divide en dos regiones, una interior con forma toroidal y otra exterior cuasiesférica.



Probablemente, la nube de Oort se formó después de que los planetas surgieran por acreción de planetesimales a partir del disco protoplanetario. Una vez finalizada esa etapa, las interacciones gravitatorias entre los planetas gigantes habrían dispersado un gran número de cuerpos menores remanentes hacia las posiciones más exteriores del sistema, donde adquirieron órbitas

muy elípticas. En cualquier caso, hasta el momento no se ha podido confirmar alguna observación directa de objetos situados en la nube de Oort, por lo que la información sobre ellos se extrae a partir de la composición de los cometas de período largo analizados, o de otros relacionados con Júpiter (conocidos como Centauros). En función de ello, los objetos de la nube de Oort estarían formados por hielos de agua, monóxido de carbono, cianuro de hidrógeno, metano y etano.

Los límites exteriores de la nube de Oort, a 50 000 ua del Sol (aunque algunos modelos los extienden hasta 200 000 ua o 3,2 años luz, e incluso más allá) presentan ya muy poca relación gravitacional con nuestro astro rey y suponen los auténticos confines del Sistema Solar. A partir de allí otras estrellas, con sus correspondientes sistemas planetarios, ofrecerán escenarios alternativos para que la vida haya surgido en nuestra galaxia.

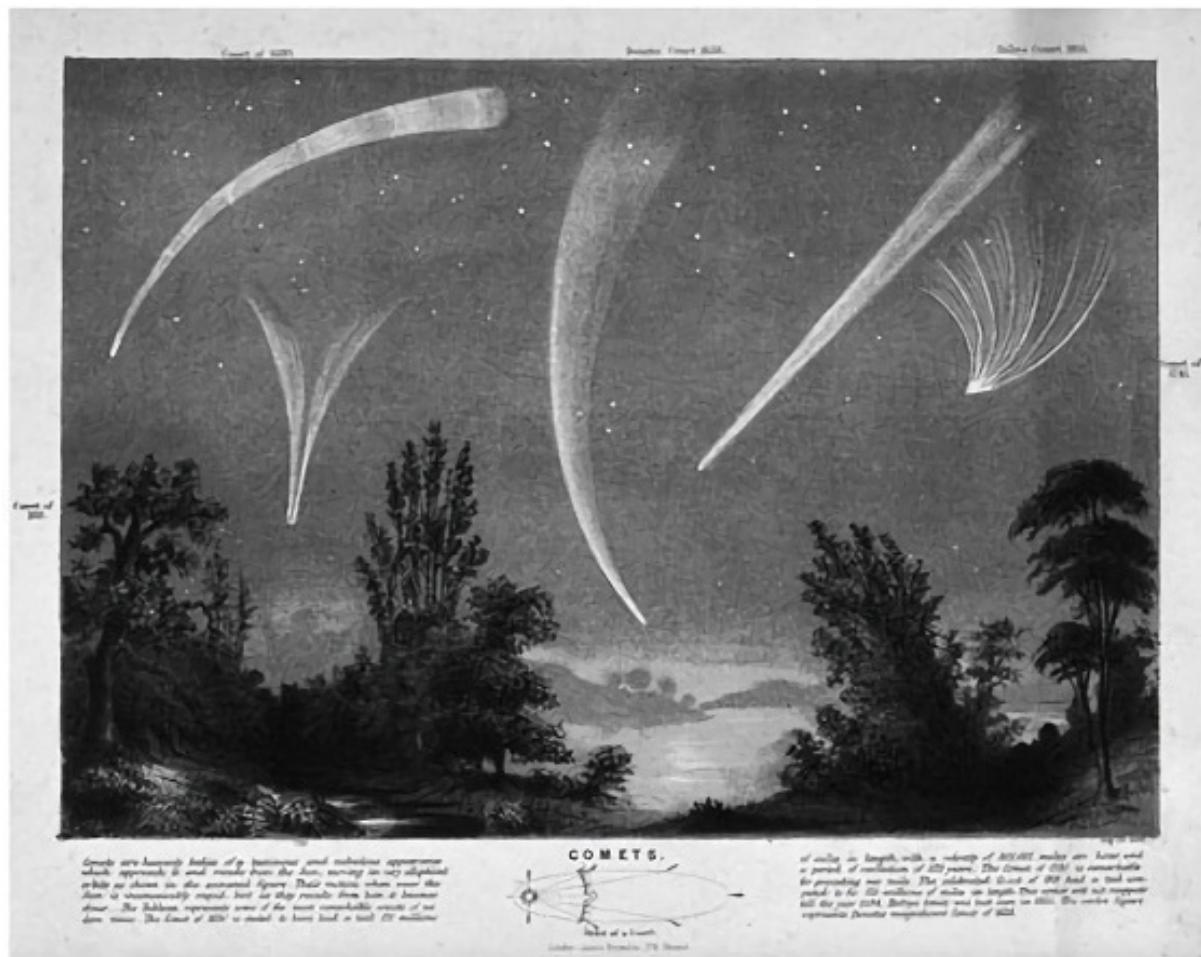
LOS COMETAS

Para la astrobiología, los TNO del cinturón de Kuiper y eventualmente de la nube de Oort resultan muy importantes porque son la fuente principal de los cometas: los mensajeros del espacio (y del tiempo) que pueden haber sido claves, además de los meteoritos, para traer a la Tierra algunos de los ingredientes necesarios para la vida. Así, a comienzos de la década de 1960 el bioquímico Joan Oró ya propuso un papel clave de los cometas en la transición entre la química y la biología. En su viaje hacia el interior del Sistema Solar describen órbitas elípticas, generalmente muy excéntricas, por lo que sus aproximaciones a nuestra estrella siguen una periodicidad, tal como estableció Edmund Halley en 1705 para el cometa que lleva su nombre... aunque no vivió lo suficiente para comprobarlo en 1759. Se supone que los de «período corto» llegan desde el cinturón de Kuiper, mientras que los de «período largo» lo hacen desde la nube de Oort (aunque hay excepciones, como precisamente el cometa llamado formalmente 1P/Halley, que a pesar de tener un período de sólo 76 años proviene de los confines del Sistema Solar). Cuando los cometas se acercan lo suficiente al Sol (a partir de 5 o 10 ua) sus núcleos, que como veremos son básicamente «bolas de hielo sucio», se subliman y forman una atmósfera de gas y polvo que se ioniza por interacción con las partículas cargadas del viento solar. Esto da origen a una cola, cabellera o «coma», de donde proviene su nombre. En ocasiones la coma es

doble, con un trazo curvo que informa sobre su trayectoria y otro lineal que indica la dirección en la que llega el viento solar hasta el núcleo cometario.

A medida que un cometa va describiendo órbitas alrededor del Sol, el hielo de su núcleo y sus materiales volátiles se van sublimando y disipando en el espacio. Por tanto, se estima que al cabo de unos mil pases cercanos al Sol (perihelios) puede acabar perdiendo todos sus volátiles y convirtiéndose en un asteroide rocoso que ya no dejará ninguna señal de su paso por el cielo. Por poner un ejemplo familiar, así ha ocurrido con el ahora asteroide de tipo Amor llamado (3552) Don Quixote. A su vez, un buen número de asteroides que contienen proporciones importantes de hielo con relación a su masa rocosa pueden considerarse «cometas durmientes» que serán activados si se acercan lo suficiente al Sol. Esto se ha propuesto recientemente para el asteroide (101 955) Bennu, del que hemos hablado en el capítulo anterior. Además, hoy se considera que debido a las interacciones gravitacionales que tuvieron lugar durante la infancia de nuestro sistema planetario (protagonizadas por Júpiter) los cuerpos menores más cercanos al Sol (en principio, secos y rocosos) pudieron mezclarse con los más alejados (ricos en hielo), de forma que parte de los primeros llegarían a órbitas transneptunianas, mientras que algunos de los segundos habrían quedado confinados en el cinturón principal de asteroides. Así, como ya hemos comentado, cada vez es menos evidente la distinción entre asteroides y cometas.

Los núcleos cometarios son básicamente fragmentos de hielo de agua (y en menor medida, de monóxido y dióxido de carbono) mezclado con silicatos, y con presencia de amoníaco, dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno (H_2S), metano, cianuro de hidrógeno y varios radicales inorgánicos. Además, pueden contener un repertorio de compuestos orgánicos sintetizados sobre el hielo por la radiación ultravioleta solar o los rayos cósmicos. Aunque es menor que el presente en las condritas carbonáceas, contiene moléculas relevantes como metano y otros hidrocarburos, metanol, formaldehído ($HCHO$) y ácido fórmico ($HCOOH$): un listado que, como veremos más adelante, se ha incrementado a partir de 2015. En general, los cometas son mucho más frágiles que los asteroides por lo que, al carecer de una matriz rocosa, si su núcleo entra en la atmósfera terrestre el hielo se sublima hasta vapor de agua. Por su parte, cuando en distintas épocas del año nuestro planeta atraviesa la cola de cometas lejanos, la desintegración de sus pequeños fragmentos de hielo y roca en la atmósfera origina las popularmente conocidas como «lluvias de estrellas».



Grabado Astronomía: *cometas en un cielo nocturno*, fechado en 1860 y de autor desconocido, que muestra representaciones artísticas de «los cometas más notables de los tiempos modernos». En el sentido de las agujas del reloj aparecen el «cometa de 1811» (que corresponde al catalogado como C/1811 F1), el «cometa de 1680» (cometa Kirch o cometa de Newton, con número de catálogo C/1680 V1), el cometa Donati en su paso de 1858, el cometa Halley visible en 1835, y el «cometa de 1741» (cometa de Chéreau, con número C/1743 X1, que en realidad se observó en 1744 y fue muy espectacular al mostrar seis colas abiertas en abanico). © Wellcome Images / Science Source/Album.

Desde la antigüedad se han observado y seguido los cometas, ya que suelen ofrecer imágenes muy atractivas en el cielo nocturno tanto a simple vista como con telescopios. Así, dada la forma sugerente de sus colas y su carácter periódico, han ido apareciendo en muchas obras literarias y artísticas. Un caso muy curioso es el del escritor y humorista norteamericano Mark Twain, que nació tres meses después de una de las aproximaciones del 1P/Halley a la Tierra. En 1909 escribió: «Vine al mundo con el cometa Halley en 1835. Vuelve de nuevo el próximo año, y espero marcharme con él. Será la mayor desilusión de mi vida si no lo hago». Y, en efecto, falleció el 21 de abril de 1910: un día después del siguiente perihelio del cometa. Por su parte, en la cultura popular numerosas leyendas, mitos y creencias han pretendido relacionar la presencia de los cometas en el cielo, o su regreso tras varios años de ausencia, con malos presagios y desgracias de lo más variopinto. En concreto, desde meses antes de esa visita del Halley en 1910 gran parte de la

prensa mundial estuvo difundiendo el bulo de que, cuando nuestro planeta cruzara su cola a mediados de mayo, los gases tóxicos que contenía envenenarían a toda la humanidad. Pero sólo murieron quienes, presa del pánico, se suicidaron durante aquellos días.

MISIONES A LOS COMETAS

Además de toda la información obtenida con telescopios, varias sondas han sido enviadas para estudiar los cometas desde sus proximidades. La primera de ellas fue la *International Cometary Explorer (ICE)*, que se lanzó en 1978 como la tercera misión del programa de la NASA y la ESA International Sun-Earth Explorer (ISEE). En 1985, esa sonda ICE/ISEE-3 atravesó la cola del cometa 21P/Giacobini-Zinner a 7800 km de distancia de su núcleo. Dicho cometa es uno de los de período largo (con un perihelio cada 6621 años) y su cola se cruza con la órbita terrestre cada mes de octubre, produciéndose en nuestros cielos nocturnos la (recordemos, mal llamada) lluvia de estrellas de las Dracónidas. Entre finales de 1984 y mediados de 1985 se lanzaron cinco sondas para estudiar el cometa 1P/Halley durante su paso de 1986 (que muchos lectores recordarán), en lo que se conoció como la *Halley Armada*. Eran las soviéticas *VeGa 1* y *VeGa 2* (cuyo objetivo principal fue la investigación de Venus, tal como comentamos), las japonesas *Sakigake* y *Suisei*, y la europea *Giotto*. Esta sonda de la ESA fue la primera que obtuvo imágenes en color de un núcleo cometario, al aproximarse hasta sólo 596 km de él. El nombre de la misión se escogió como homenaje al pintor italiano Giotto di Bondone, quien en su famosa obra *Adoración de los Magos*, pintada al fresco en Padua en 1305, mostró la estrella de Belén tal como él mismo había visto el paso del Halley cuatro años antes.

En 1998 se lanzó la misión *Deep Space 1* de la NASA, que sobrevoló exitosamente el asteroide (9969) Braille y el cometa 19P/Borrelly, probando numerosas tecnologías que serían utilizadas después en otras sondas. El año siguiente la agencia norteamericana lanzó otra misión, la *Stardust*, que en 2004 se aproximó hasta 237 km del núcleo del cometa 81P/Wild (también llamado Wild 2) y tomó fotos de ese esferoide de 5,5 km. Pero el auténtico hito de la misión consistió en que al atravesar la coma de este cometa fue capaz de tomar muestras de sus partículas de polvo, que quedaron atrapadas en una retícula de aluminio en cuyo interior había espacios rectangulares llenos de «aerogel». Éste es uno de los materiales más ligeros que se ha

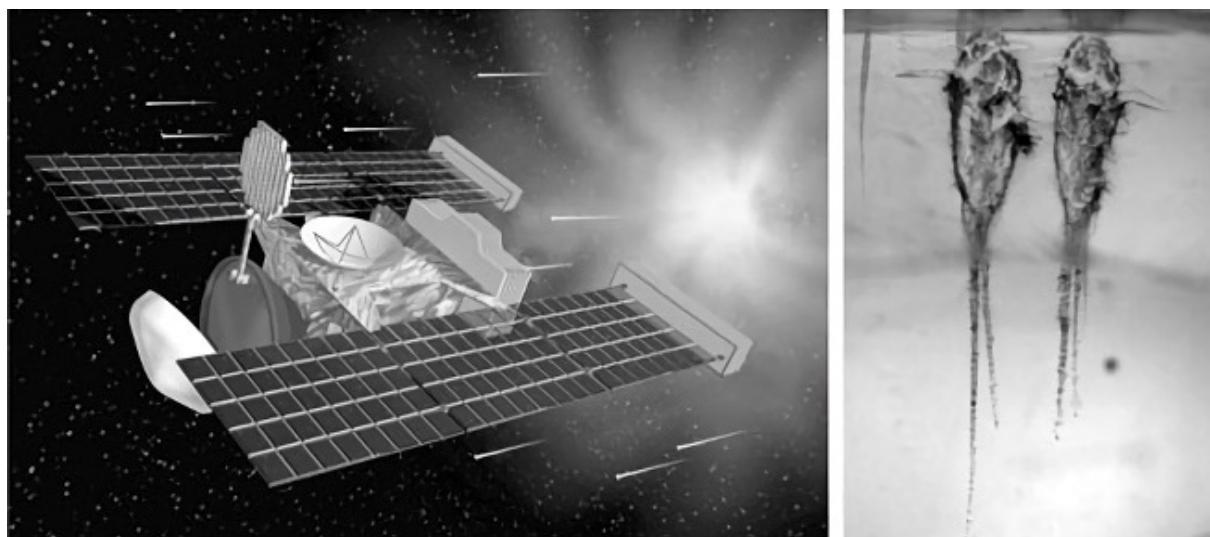
logrado fabricar, cuya estructura esponjosa basada en silicatos es tan porosa que se encuentra literalmente vacía en un 99,8 % de su volumen. Una de las ventajas del aerogel es que cuando un fragmento sólido de muy pequeño tamaño (típicamente, menor de 1 mm) entra en ese material transparente, al frenarse no es alterado significativamente y además deja un trazo claramente visible que permite localizarlo y recuperarlo. El histórico logro de *Stardust* se completó cuando a comienzos de 2006 ese valioso contenedor (que también había recolectado, en otra zona independiente, muestras de polvo interestelar durante su viaje posterior) fue cerrado herméticamente en su cápsula, ésta se liberó por la sonda en un sobrevuelo de la Tierra, entró a nuestra atmósfera a más de 46 000 km/h y tras un frenado espectacular pudo ser recogida prácticamente inalterada en nuestra superficie. Después, con la satisfacción del deber cumplido, la misión de *Stardust* fue extendida y al volver a alejarse de nosotros sobrevoló el cometa 9P/Tempel, como veremos.

Los microscópicos granos de polvo recuperados por *Stardust* de la coma del cometa 81P/Wild cuando pasaba a unos 100 millones de kilómetros de nosotros fueron analizados por 150 científicos en sus respectivos laboratorios, utilizando las técnicas más sensibles y teniendo en cuenta todas las medidas de protección planetaria de una misión de categoría V. Sin duda, merece la pena volver a leer esta frase para ser conscientes de todo lo que supone. Los resultados mostraron que el cometa contiene, además de silicatos amorfos, olivino y otros silicatos cristalinos. Dado que estos últimos sólo se forman a altas temperaturas se ha postulado que habrían sido originados en regiones más cercanas al Sol, o bien durante una colisión que destruyera el cuerpo parental del que provendría este cometa. Además, se detectaron sulfuros metálicos que podrían haberse formado en presencia de agua líquida, quizás debido a choques que fundieran el hielo temporalmente. Por tanto, la historia del agua en los cometas, clave para la aparición de la vida en la Tierra, sigue siendo un fascinante tema de investigación.

En cuanto a la materia orgánica de 81P/Wild, se comprobó que no es homogénea en todos los gránulos analizados, pero que en general tiene características diferenciales con respecto a la presente en los meteoritos. Así, se han encontrado hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH, entre ellos naftaleno y fenantreno) pero en menor proporción que los alifáticos o lineales, y aparecen más cantidad y variedad de grupos funcionales con oxígeno y nitrógeno que en las condritas carbonáceas. Ambas características irían a favor de una menor degradación térmica de la materia orgánica presente en los cometas con respecto a la de los meteoritos. En el conjunto de las partículas de 81P/Wild analizadas se han detectado señales compatibles con heterociclos (algunos con N y O), alcoholes, éteres, aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, aminas [incluyendo metilamina ($\text{CH}_3\text{--NH}_2$), etilamina ($\text{CH}_3\text{--CH}_2\text{--NH}_2$) y el aminoácido glicina ($\text{NH}_2\text{--CH}_2\text{--COOH}$)], además de

nitrilos (con el grupo $-CN$, que tantas alegrías ha dado en el campo de la química prebiótica).

De todas estas moléculas, lógicamente la que más interés despertó fue la glicina. Pero cabía la posibilidad de que correspondiera a una contaminación terrestre introducida antes del envío de la sonda, o bien durante la recogida y análisis de las muestras, por lo que se analizó su composición isotópica. Y el resultado fue claro: el alto contenido de los isótopos más pesados del carbono en esta molécula demostraba que su presencia no se debía a una contaminación. Estábamos ante una prueba directa de que al menos una parte de los constituyentes de las proteínas que configuran nuestra bioquímica pudieron llegarnos a bordo de estos mensajeros del Cosmos.



Interpretación artística del vuelo de la sonda *Stardust* a través de la coma del cometa 81P/Wild, el 2 de enero de 2004. Se observa la estructura con forma de raqueta de tenis que incluye los contenedores de aerogel, extendida desde la cápsula posteriormente utilizada para la reentrada atmosférica. A la derecha se muestra la fotografía de uno de los fragmentos de aerogel en el que se recogieron dos partículas cometarias: entraron desde arriba (según esta orientación) y sus fragmentos son identificables al final de cada trazo. Imágenes cortesía de la NASA.

ROSETTA Y EL COMETA 67P/CHURYUMOV-GERASIMENKO

En 2004, la ESA lanzó otra misión llamada a pasar a la historia de la exploración espacial. Se trataba de *Rosetta*, cuyo nombre es un homenaje al famoso fragmento de una estela egipcia del siglo II antes de nuestra era, que contiene un decreto del faraón Ptolomeo V escrito en tres idiomas (jeroglíficos egipcios, egipcio demótico y griego antiguo) y que sirvió para

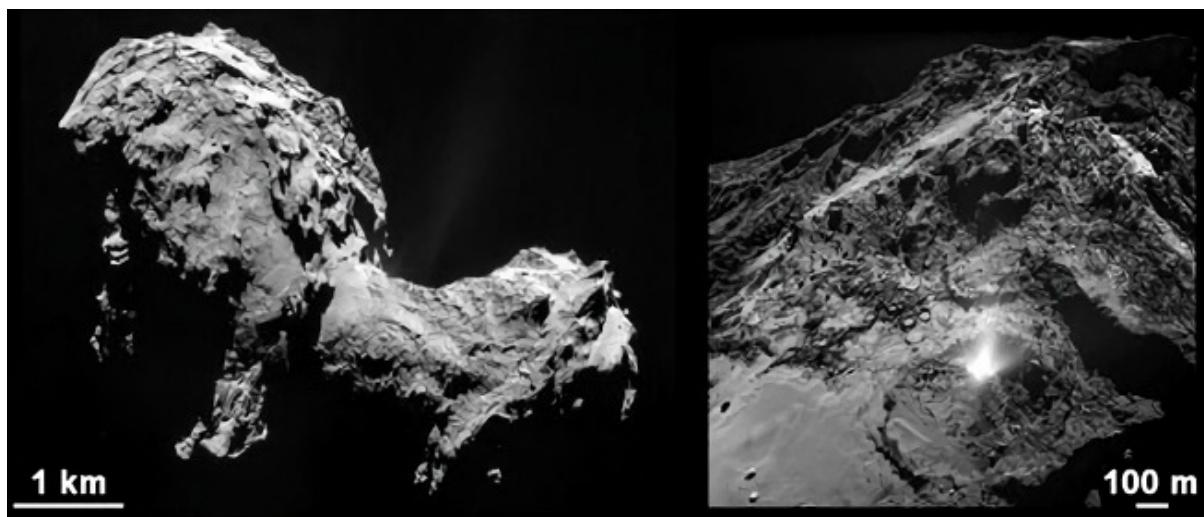
descifrar el significado de los jeroglíficos. Tras un viaje de 10 años y 6000 millones de km en el que sobrevoló los asteroides (2867) Šteins y (21) Lutetia, en 2014 alcanzó su objetivo principal, el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, para intentar descifrar el mensaje geológico, químico y tal vez bioquímico que contenía. Este cuerpo, con un período de sólo 6,6 años, había sido descubierto en 1969 por Klim I. Churyumov a partir de las fotografías realizadas por Svetlana I. Gerasimenko: de ellos toma su complicado nombre, que todos preferimos resumir como «67P» o «Chury».

Rosetta orbitó su núcleo (la primera misión en conseguir algo tan complicado) durante más de dos años y proporcionó una información valiosísima sobre la estructura y composición de este cometa, que rota sobre su eje cada 12,4 horas. En los miles de imágenes de alta resolución (y gran belleza plástica) tomadas por las cámaras de su instrumento *Optical, Spectroscopic and Infrared Remote Imaging System (OSIRIS)* se comprobó que está formado por dos lóbulos (uno alargado de aproximadamente $4,1 \times 3,2 \times 1,3$ km y otro más esférico con unos 2,5 km de diámetro mayor) unidos por un cuello, lo que permite proponer que se originó por interacción gravitatoria entre ambos a baja velocidad. Su superficie es muy accidentada, con grandes rocas y otras más pequeñas dispersas por ambos lóbulos, pronunciadas pendientes y un acantilado de más de 1 km de altura. Cuando se hicieron públicas las primeras fotografías algunos dijeron, llevados por sus recuerdos de infancia, que la forma de «Chury» se parece a un patito de goma... pero esto no se ha demostrado científicamente.

Otro hecho diferencial de esta misión es que el 12 de noviembre de 2014, cuando *Rosetta* estaba a 22,5 km del centro del cometa, se separó de la sonda el módulo aterrizador *Philae* (nombrado como la isla situada en el río Nilo, en la que estaba situado el famoso templo de Isis y un obelisco cuyas inscripciones ayudaron a descifrar la piedra Rosetta) y tras un descenso controlado de 7 horas logró posarse sobre su escarpada y rugosa superficie. No lo hizo en el lugar previsto (una zona del lóbulo menor a la que se había llamado Agilkia, como la isla egipcia a la que fueron trasladados los templos y otros tesoros de la isla de Filae cuando ésta fue inundada por la presa de Asuán), ya que dada la bajísima atracción gravitatoria ejercida por el núcleo cometario (en torno a una diezmilésima parte de la terrestre), el módulo debía activar unos arpones en sus tres patas para anclarse a su superficie... y éstos no funcionaron bien. En cualquier caso, tras un par de lentes rebotes consiguió posarse con dos de sus patas sobre «Chury», en un lugar más escarpado que el previsto, al que se llamó Abydos (como una de las ciudades más influyentes del alto Egipto).

Aquella fue la primera vez en la historia que un instrumento aterriza sobre el núcleo de un cometa, tras haberse logrado previamente en planetas, satélites y asteroides. Los europeos celebramos con especial alegría este éxito,

para el que una cuidada campaña de la ESA había estado preparando a todos los aficionados a la exploración espacial. Se puede sentir emoción con los logros de la ciencia y la ingeniería, no cabe duda. Mientras tanto, a 500 millones de km de nosotros, el módulo *Philae* estuvo obteniendo información con algunos de sus instrumentos (aunque no pudo usar el taladro, que habría perforado la superficie si su aterrizaje hubiese sido el previsto) y transmitiéndola a la sonda durante tres días. Después entró en estado de hibernación por falta de potencia, aunque aún mandaría algunas señales esporádicas a mediados de 2015.



El cometa «Chury», en una imagen compuesta a partir de cuatro fotografías tomadas por la cámara NAVCAM de la sonda *Rosetta* de la ESA en septiembre de 2014, cuando lo orbitaba a 28,6 km de su centro. Imagen cortesía de ESA/Rosetta/NAVCAM, disponible en Wikimedia Commons. A la derecha, fotografía de la superficie del cometa tomada por las cámaras OSIRIS de *Rosetta* en julio de 2017, mostrando una oquedad cilíndrica en el terreno desde la cual emerge un chorro brillante de vapor de agua, fragmentos de hielo y polvo, que contribuye a formar la cola cometaria. © ESA/Rosetta/MPS/OSIRIS; UPD/LAM/ IAA/SSO/INTA/ UPM/DASP/IDA.

LA MATERIA ORGÁNICA DE «CHURY»

Entre los resultados obtenidos por los once instrumentos científicos de *Rosetta* y los diez de *Philae*, se observó que el cometa carece de campo magnético y que su superficie está cubierta por unos 20 cm de polvo y rocas de diferentes tamaños sobre el núcleo de hielo de agua y monóxido de carbono. Se comprobó que la composición isotópica del agua (la relación entre la cantidad de deuterio e hidrógeno en ella) que contiene «Chury» es diferente de la de nuestros océanos, lo que apoyaría que la mayor parte del

agua llegada desde la formación de la Tierra no provendría de los cometas sino de los asteroides, a través de meteoritos. En cualquier caso, la discusión sobre el origen del agua en nuestro planeta sigue estando lejos de zanjarse, siendo un tema recurrente en ciencias planetarias y astrobiología. Por su parte, el instrumento *Cometary Sampling and Composition* (COSAC) de *Phylae*, provisto de un cromatógrafo de gases y espectrómetro de masas, permitió «oler» las moléculas volátiles mientras rebotaba sobre la superficie y durante sus tres días de análisis en Abydos. Detectó agua y monóxido de carbono, pero no cantidades apreciables de dióxido de carbono ni amoníaco, que se esperaban encontrar en el hielo cometario: probablemente estas moléculas son demasiado volátiles y no permanecieron en el detector el tiempo suficiente para ser identificadas.

Además, COSAC pudo detectar un total de catorce compuestos orgánicos, varios de ellos con nitrógeno aunque ninguno con azufre. Diez de esas pequeñas moléculas ya se habían detectado previamente en otros cometas: metano, cianuro de hidrógeno, metilamina, acetonitrilo ($\text{CH}_3\text{--CN}$), ácido isociánico (HN=CO), acetaldehído ($\text{CH}_3\text{--CHO}$), formamida (CHO--NH_2), etilamina, glicolaldehído, ($\text{CH}_2\text{OH--CHO}$) y etilenglicol ($\text{CH}_2\text{OH--CH}_2\text{OH}$). Además, se descubrieron otras cuatro nunca antes encontradas en cometas: acetona ($\text{CH}_3\text{--CO--CH}_3$), acetamida ($\text{CH}_3\text{--CO--NH}_2$), isocianato de metilo ($\text{CH}_3\text{--N=CO}$) y propionaldehído ($\text{CH}_3\text{--CH}_2\text{--CHO}$). En conjunto, la existencia de estos compuestos volátiles de entre uno y tres átomos de carbono permite proponer rutas de síntesis hacia biomoléculas más complejas (y no detectables por COSAC, al no ser volátiles), como azúcares o bases nitrogenadas, aún no identificadas en ningún cometa.

Volviendo por un momento a nuestro planeta, algunas de estas biomoléculas sí se han podido sintetizar en laboratorios, mediante experimentos de irradiación de hielos artificiales en cámaras de vacío y a temperaturas criogénicas (inferiores a -250°C). Esos hielos se obtienen condensando agua, monóxido y/o dióxido de carbono, metanol y amoníaco sobre gránulos de polvo formados por silicatos, con lo que se simula el proceso de producción de planetesimales en los discos protoplanetarios. El tipo de radiación que se puede usar va desde los fotones muy energéticos (ultravioleta o rayos X) a los sistemas que simulan los rayos cósmicos (empleando protones, electrones o núcleos pesados). Por ejemplo, en un experimento realizado en 2016 se irradiaron hielos de este tipo con luz ultravioleta, en condiciones análogas a las que se supone que existían durante el origen del Sistema Solar, y luego se calentaron para simular el proceso experimentado por el cometa al ir acercándose hacia el Sol. Con ello se fueron perdiendo las moléculas volátiles sintetizadas por efecto de la radiación, y sus productos de reacción se depositaron en una delgada película

de material refractario sobre el hielo. Los resultados mostraron que se habían formado tres azúcares: ribosa (constituyente de los nucleótidos que forman los ácidos nucleicos), arabinosa y xilosa. Por tanto, sería esperable que los cometas contengan alguno de estos azúcares, al igual que ya se han encontrado en los meteoritos Murchison y NWA 801 (como vimos en el capítulo anterior). En otros experimentos de este tipo se ha logrado sintetizar diversos aminoácidos, diaminoácidos y bases nitrogenadas, así como compuestos orgánicos con fósforo: nuevos retos para la exploración espacial.

Por su parte, el instrumento *Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis (ROSINA)* de la sonda *Rosetta* analizó las partículas de polvo presentes en la coma de 67P/Churyumov-Gerasimenko y realizó otro gran descubrimiento: la primera detección aparentemente inequívoca e *in situ* del aminoácido glicina en un cometa (junto a sus precursores metilamina y etilamina, también «olidos» por COSAC). Esto confirmaba los datos previamente obtenidos al analizar el polvo de la coma de 81P/Wild recolectado por *Stardust* y ponía de manifiesto que el aminoácido más sencillo de los que forman las proteínas se puede sintetizar en diferentes entornos del Universo, incluidos los asteroides y cometas. Además, *ROSINA* confirmó la presencia de agregados de hidrocarburos similares a los identificados en la materia orgánica insoluble de las condritas carbonáceas, y el compuesto organoclorado cloruro de metilo (CH_3Cl , del que hablamos en el capítulo 5). Otro dato muy relevante es que *ROSINA* detectó señales de fósforo: gracias a la colaboración con el radiotelescopio *ALMA*, se pudo determinar en 2019 que provenían principalmente del monóxido de este elemento (la molécula P–O, también detectada en el medio interestelar según vimos en el capítulo 3). ¿Podría ser el P–O la fuente del fósforo que los cometas aportaron a la Tierra primitiva y que hoy tenemos en nuestro DNA y RNA... o en el ATP, la molécula energética que nuestras neuronas están consumiendo ahora mismo, mientras leemos estas líneas? Si es así, realmente los cometas tendrían mucho que decir sobre lo que somos.

Finalmente, un hallazgo adicional de esta exitosa misión es que el núcleo de «Chury» emite grandes cantidades de oxígeno molecular (O_2), no detectado previamente en ningún cometa. Los datos muestran que el oxígeno no se ha sintetizado recientemente en la superficie de «Chury» por interacción del agua y los silicatos, sino que se tuvo que formar al comienzo del Sistema Solar y quedar incorporado desde entonces a su núcleo. Tomada en conjunto, toda la información obtenida por la misión *Rosetta* confirma las hipótesis iniciales de que los cometas son auténticos laboratorios de química prebiótica que recorren el Sistema Solar (y, casi con total seguridad, también los demás sistemas planetarios), pudiendo haber resultado fundamentales para el origen de la vida. En cualquier caso, tanto los asteroides como los cometas nos están proporcionando los ingredientes... pero la receta para combinarlos es aún

desconocida. Dada la relevancia de los hallazgos realizados en «Chury», años más tarde se propuso volver a este cometa con una nueva misión, esta vez de la NASA, llamada *Comet Astrobiology Exploration Sample Return* (CAESAR). Su objetivo era recoger muestras de la superficie del cometa y traerlas a nuestro planeta para ser analizadas en profundidad. Esta propuesta llegó a ser finalista del programa New Frontiers de la agencia norteamericana, pero a mediados de junio de 2019 fue desbancada por su competidora, *Dragonfly*, que como hemos comentado sobrevolará Titán en la próxima década. Tuvo que ser difícil elegir entre dos destinos tan extraordinarios.

EL ÚLTIMO COMETA VISITADO

Poco después del lanzamiento de *Rosetta*, en enero de 2005, la NASA envió la última misión que hasta ahora ha estado específicamente dedicada al estudio de los cometas. Se trata de *Deep Impact*, que logró sobrevolar y analizar 9P/Tempel (también llamado Tempel 1), un cometa de 6,5 años de período, con forma esferoide y 7,6 km de diámetro mayor, a una distancia de sólo 575 km. Lo más interesante y novedoso de esta sonda es que liberó un módulo impactador que el 4 de julio de 2005 (un día no elegido al azar en esta misión estadounidense) chocó a una velocidad de 37 000 km/h contra una posición preestablecida del núcleo cometario. Como indicaban las predicciones, se produjo un cráter de al menos 100 m de diámetro y 30 m de profundidad, que levantó una brillante nube de vapor de agua y polvo sobre él. Fue la primera vez que se conseguía algo así, y entre las celebraciones del impactante éxito obtenido hubo una muy oportuna: los miembros aún activos del mítico grupo Bill Haley & His Comets ofrecieron un concierto especial para los ingenieros y el resto de empleados del Jet Propulsion Laboratory (JPL). De vuelta al cometa, el cráter producido permitió analizar la composición del material extraído de su superficie y del interior, tanto con los instrumentos de la propia *Deep Impact*, como con los de la lejana *Rosetta*, aunque en ese momento se encontraba a unos 80 millones de km de este cometa. Además, apuntaron hacia 9P/Tempel varios telescopios terrestres y el *Hubble*. Junto al hielo de agua, en las finas partículas liberadas por el impacto se detectaron silicatos cristalinos, pirita y otros sulfuros metálicos, además de arcillas y carbonatos (que, como vimos, se forman en presencia de agua líquida). Entre la materia orgánica liberada se identificó carbono amorfo, etano, otros hidrocarburos y PAH.

El propio impactador tomó imágenes de la superficie del cometa hasta tres segundos antes de chocar violentamente contra ella y desintegrarse en la explosión (equivalente a la de 5 toneladas de TNT). Por su parte, las fotografías del cráter obtenidas por *Deep Impact* tras el choque resultaron ser de poca calidad, debido al polvo y al material acumulado sobre él. Por tanto, dos años después se decidió utilizar la aún operativa sonda *Stardust* para visitar este cometa, en una nueva misión llamada *NExT*. Así, tras el necesario cambio de órbita, en 2011 esta veterana sonda logró sobrevolar 9P/Tempel a sólo 181 km de distancia, con lo que se pudo observar el cráter con nitidez y además comparar el estado del cometa tras el perihelio por el que había pasado después del sobrevuelo de *Deep Impact*. Hoy en día está tan dominada la tecnología de las misiones espaciales robóticas que es posible realizar exhibiciones tecnológicas como ésta.

Como colofón de este repaso a las sondas que han explorado los cometas, hacemos una recomendación. A mediados de 2019, el artista austriaco Christian Stangl combinó más de 100 000 fotografías tomadas por las cámaras de la sonda *Rosetta* y el aterrizador *Philae* durante su misión, para montar un vídeo de tres minutos que resulta espectacular. En él se incluyen, por ejemplo, imágenes tan recordadas como los «copos de nieve» desprendidos del propio cometa y cayendo de nuevo sobre su superficie. La obra se titula simplemente *The Comet* y es fácil de localizar en internet, por lo que los lectores podrán disfrutar de ese emocionante recorrido en blanco y negro sobre la piel de «Chury», que es también un viaje a los orígenes de lo que somos.



Un café con... Luisa Lara



Doctora en Física. Investigadora en el Departamento de Sistema Solar y vicedirectora de Tecnología del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA, CSIC, Granada).

Dada tu experiencia en la investigación de varios cuerpos del Sistema Solar, vamos a plantear esta conversación como un viaje imaginario a través de él, comenzando por Mercurio. Has trabajado intensamente en la misión BepiColombo, que llegará a ese planeta en 2025: en tu opinión ¿cómo mejorará nuestro conocimiento sobre Mercurio? ¿Crees que este planeta es un objetivo interesante para la astrobiología?

Comienzo a responderte por la última pregunta, porque es la más sencilla. Creo que Mercurio no es, *per se*, un objetivo interesante para la astrobiología. La vida, tal y como hoy la conocemos, tendría dificultades para desarrollarse sobre ese planeta o para mantenerse allí si pudiera surgir. Mercurio se encuentra muy cerca del Sol, carece de atmósfera protectora, está sujeto a variaciones térmicas extremas, a la abrasión del viento solar, a una frecuencia de impactos muy alta... En pocas palabras, no es un lugar idílico para la vida.

BepiColombo nos dará información muy valiosa sobre el origen y evolución de un planeta tan cercano a su estrella, su estructura y composición interior, la dinámica y origen de su campo magnético, y su magnetosfera. También mostrará cómo se forman los cráteres de impacto en su superficie, la tectónica y el vulcanismo, así como la composición, origen y dinámica de la exosfera y de los depósitos polares. Adicionalmente permitirá comprobar la teoría de la relatividad de Einstein aunando los datos de tres instrumentos, y tomará imágenes con las cámaras de alta resolución *SIMBIOSYS* y *AOCS*.

Siguiendo en los planetas interiores del Sistema Solar, ¿qué opinas sobre la posibilidad de que exista algún tipo de vida microbiana en las nubes de la densa atmósfera de Venus?

Cuando me he cuestionado la posibilidad de que exista vida en otros planetas, si te soy sincera siempre he notado mi poco entusiasmo ante el tema. Reconozco que es un campo de investigación muy amplio en el que veo incluso matices filosóficos... pero ¡a mí nunca me gustó la filosofía! Centrándome en tu pregunta, Carlos, debo admitir que la existencia de formas de vida microbiana en las nubes de Venus sería algo muy exótico, pero me surgen muchas preguntas después de la sorpresa y excitación inicial por esa posibilidad.

Y en cuanto a Marte, el planeta más visitado hasta el momento por nuestros orbitadores, landers y rovers, a pesar de lo que comentas... ¿crees que se podría encontrar vida pasada, o incluso presente, allí?

En mi opinión, si hay vida en Marte se encontrará, no dudo de la tenacidad del ser humano. Sin embargo, soy poco optimista sobre la posibilidad de que Marte realmente albergue vida en la actualidad. Y si la hubo en el pasado (decenas, centenas o miles de millones de años atrás), me pregunto qué restos pudieron dejar esas formas de vida que hoy pudiéramos identificar para concluir que el planeta rojo estuvo habitado. Quizá mis dudas surgen de no tener una formación muy amplia en biología ni en astrobiología...

También has trabajado en el desarrollo de modelos sobre las atmósferas de Júpiter, Urano y Neptuno, utilizando datos del telescopio espacial Herschel. ¿Podrías resumir las conclusiones principales obtenidas para cada uno de estos planetas?

Las observaciones que el telescopio espacial *Herschel* realizó de estos tres planetas estaban sobre todo orientadas a conocer el origen de los compuestos oxigenados, especialmente monóxido de carbono (CO) y vapor de agua, en las estratosferas de sus atmósferas. El CO resulta importante porque es un gas trazador de las condiciones físico-químicas que se dieron en la nebulosa

protoplanetaria. Por su parte, el agua de su estratosfera indica la conexión de estos planetas con el medio interplanetario, porque esta molécula no puede provenir de regiones más profundas de la atmósfera: existe una altitud a la que se produce una «trampa fría», de forma que si el agua subiera desde capas inferiores a la estratosfera por movimientos convectivos, al pasar por dicha trampa fría se congelaría, y precipitaría sin llegar a las capas altas. Por lo tanto, la abundancia de agua en la estratosfera de los cuatro planetas gigantes gaseosos y helados (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) nos dice con qué frecuencia llegan los cometas a ellos. Y esto, a su vez, informa sobre la composición del material helado interplanetario: la proporción CO:H₂O:CO₂ (reliquia de las fases tempranas del Sistema Solar) y el origen de esos granos helados (que pueden ser restos cometarios, de anillos alrededor de los planetas o de material del cinturón de objetos transneptunianos).

La conclusión actual es que muchos resultados deben explicarse invocando a varios escenarios: impacto cometario, ablación de material helado en el que la proporción CO:H₂O:CO₂ es diferente dependiendo del planeta, o bien una combinación de ambos. Está claro: necesitamos más investigación, si es posible *in situ*.

En cuanto a los satélites de los gigantes de gas, algo me dice que tus preferidos son Titán y Europa. Quizá también Encélado... Empezando por Europa, ¿qué resultados esperamos de la misión JUICE de la ESA, en la que también estás implicada?

Casi has acertado con mis preferidos. Titán (y su atmósfera) me permitió iniciar mi carrera investigadora y aprender muchísima ciencia planetaria, sin duda. Pero desde el punto de vista estético mi satélite favorito es Hiperión, al que por su forma yo llamo «la esponja espacial»... Y luego irían Encélado y Europa.

La misión *JUICE* podrá hacer muy pocos sobrevuelos a Europa, ya que es un entorno muy dañino para su electrónica, pero aun así se espera que nos enseñe con una precisión no conocida hasta ahora la estructura de su interior, que puede albergar hasta el doble de agua que la Tierra. También estudiará qué procesos rejuvenecen la superficie del satélite (en la que prácticamente no existen cráteres de impacto), qué son esas afloraciones de material más oscuro que se ven sobre el terreno fracturado, y las eyecciones de vapor de agua desde la subsuperficie (similares a las vistas en Encélado). Con ello conoceremos mucho mejor la química de la superficie europea, cuyo origen podría ser endógeno o debido al material exógeno que llega a ella (desde su vecino Ío, o desde el medio interplanetario). Europa es un riquísimo laboratorio, cuyo estudio puede responder a muchas preguntas astrobiológicas

que conectarían la ¿viable? vida en la subsuperficie del satélite con su ¿ posible? supervivencia en la irradiada superficie del mismo.

Pues yo también le tengo mucho cariño a Hiperión: al satélite... y a la editorial. Centrándonos en Titán, Luisa, ¿crees que además de su gran interés geológico y para la química prebiótica, el océano de agua líquida subsuperficial que posee lo hace también candidato a que actualmente pueda haber vida en él?

Como sabes, mi formación académica y mi carrera profesional no han estado orientadas hacia el aspecto astrobiológico de los cuerpos del Sistema Solar. Si un astrobiólogo me dice que es así, que el océano subsuperficial de Titán es un candidato para que la vida pueda existir en él, esperaré entusiasmada que sea encontrada. Pero ¿cómo se hará?, ¿qué buscar?, ¿qué identificar?, ¿qué descartar?

En este rápido viaje por el Sistema Solar llegamos a sus confines, las regiones desde las que nos llegan los cometas. ¿Te parece que estos mensajeros del espacio fueron fundamentales para el origen de la vida en la Tierra? ¿Tendrían más o menos importancia que los asteroides, cuyos fragmentos nos han llegado en forma de meteoritos? ¿O en el fondo la diferencia entre cometas y asteroides no está tan clara?

El continuo asteroide-cometa está bien establecido y aceptado en la comunidad de investigadores sobre cuerpos menores del Sistema Solar. Estos objetos parecen abarcar todo el rango de propiedades observables, físicas y dinámicas, clásicamente atribuidas a asteroides o a cometas. Ahora sabemos que hay objetos en el cinturón principal de asteroides que presentan actividad debida a sublimación de hielos, cuyo origen podría estar en el propio cinturón o en el Sistema Solar exterior, pero también existen objetos que muestran una actividad similar a la de un cometa aunque sin contenido de hielo volátil. Por su parte, hemos encontrado objetos compuestos de material similar al del cinturón de asteroides en órbitas parecidas a las de los cometas de período largo, y objetos activos en órbitas cometarias cuyo origen puede estar en el cinturón. Además, los cometas inactivos se encuentran tanto en órbitas cometarias como no cometarias. Gracias a esta gran diversidad, cada objeto puede desvelar nuevas y emocionantes ideas sobre nuestro Sistema Solar. Una vez más, la naturaleza nos sorprende y se rebela contra nuestro afán de categorizar y clasificar cuando tratamos de explicarla. ¡La ciencia es fascinante!

Sobre tu primera pregunta, no me cabe la menor duda de que los mensajeros del espacio, asteroides y cometas, han jugado un papel fundamental en el origen de la vida en la Tierra. Por ejemplo, la glicina se ha

descubierto en los dos cometas cuya exploración contaba con la instrumentación para detectarla: *Stardust* trajo muestras del cometa 81P/Wild 2 a la Tierra y había glicina en ellas, y *Rosetta* (gracias al instrumento *ROSINA*) la detectó en el coma gaseoso del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. En el 67P también se ha descubierto fósforo, elemento crucial para el origen de la vida. El agua cometaria todavía no ha tenido tanta tasa de éxito: las mediciones son más numerosas pero la coincidencia entre la proporción de agua deuterada en ellos y en los océanos terrestres es limitada.

Quiero terminar con un par de preguntas sobre tu (y mi) cometa favorito, al que acabas de referirte: el 67P o «Chury». Fuiste investigadora del instrumento OSIRIS a bordo de Rosetta, por lo que las espectaculares imágenes de alta resolución de su núcleo que todos hemos visto son, en parte, tuyas. ¿Cuál es la principal información que aportó OSIRIS sobre el origen y la dinámica de este cometa?

Las cámaras *OSIRIS* han proporcionado una información valiosísima *per se*, pero cuando esta información se ha puesto en común con la de los demás instrumentos y experimentos de la misión, ha multiplicado su valor hasta límites insospechados.

Personalmente, destacaría algunos descubrimientos en los que el análisis de las imágenes captadas por las cámaras *OSIRIS* ha sido clave. Al determinar la densidad, midiendo su masa y volumen, hemos visto que 67P tiene una porosidad superior al 70 %... pero no sabemos si esa porosidad es macro o micro, desconocemos el tamaño de los «huecos», y esto es frustrante porque si lo supiéramos tendríamos más información sobre cómo se formó por aglomeración de los constituyentes primordiales. La forma bilobulada de su núcleo y la disposición de los «estratos» o estrías que se aprecian, casi ortogonal en ambos lóbulos, indica que 67P no nació tal como lo vemos sino que es el resultado de una colisión a muy baja velocidad de otros dos «cometitas».

Las imágenes de *OSIRIS* tenían que desvelar cómo se produce la actividad cometaria, es decir, cómo los componentes helados subliman y dónde se localizan éstos. Observaciones desde la Tierra nos habían llevado a pensar que había zonas activas en el núcleo cometario (muy ricas en hielo) de las que salían los gases y arrastraban el material refractario (es decir, el polvo). Pero *OSIRIS*, con la elegancia de sus imágenes, nos ha dicho que esto no es así: no hay grandes regiones ricas en hielo superficial, sino que la actividad surge de zonas muy pequeñas, sobre todo en la subsuperficie. Lo más espectacular es que en la superficie vemos unas pozas u oquedades perfectamente cilíndricas: cuando su interior es iluminado por el Sol, algunas de las capas que se

observan en las paredes se convierten en «manantiales» de gas que procede de la sublimación de los hielos. Ahora nos estamos preguntando si este inesperado fenómeno ocurre así de manera primordial, o si es el resultado de cómo el polvo (atrapado por el débil campo gravitatorio de 67P, a lo largo de los múltiples «pases» que ha hecho alrededor del Sol) ha ido cubriendo las zonas ricas en hielo superficial que pudo tener cuando se formó en la nebulosa protoplanetaria.

Fascinante tema para pensar sobre él la próxima vez que veamos un cometa surcando el cielo... Y más allá de lo estrictamente científico, ¿cómo valorarías el interés y la emoción que despertó en todos los aficionados a la exploración espacial, y a la ciencia en general, el éxito de la misión Rosetta y el complicado anclaje de su módulo Philae en el escarpado núcleo de «Chury»?

Me alegró mucho la expectación que la misión *Rosetta*, el módulo *Philae* y el propio cometa «Chury» despertaron durante tres años. La ESA hizo una gran labor. Ahora, en el campo de exploración interplanetaria, quisiera ver cómo esa actividad, innovación e implicación se extiende a Mercurio, Venus (si la misión *EnVision* es seleccionada), Júpiter y sus satélites... o a otro cometa aún no determinado (incluso desconocido) que visite el Sistema Solar interior por primera vez y que explorará la misión *Comet Interceptor*.



12. Planetas extrasolares



El quinto planeta era muy curioso. Era el más pequeño de todos. Había en él justo el lugar necesario para alojar un farol y un farolero. El principito no lograba explicarse para qué podían servir, en algún lugar del cielo, en un planeta sin casa ni población, un farol y un farolero. Sin embargo, se dijo a sí mismo: «Posiblemente este hombre es absurdo. Pero es menos absurdo que el rey, que el vanidoso, que el hombre de negocios y que el bebedor. Al menos, su trabajo tiene un sentido. Cuando enciende su farol, es como si hiciera nacer una estrella más, o una flor. Cuando apaga su farol, se duermen la flor o la estrella. Es una ocupación muy linda. Es verdaderamente útil porque es linda».

Antoine de Saint-Exupéry,
El Principito

Todos los seres vivos conocidos compartimos un pequeño planeta que gira en torno al Sol, una estrella de la Burbuja Local dentro del Brazo de Orión de la Galaxia (cuya vista de perfil desde la Tierra llamamos, a partir de los relatos mitológicos, la Vía Láctea). Esta galaxia espiral barrada, de unos 100 000 años luz de diámetro y que alberga entre 100 000 y 400 000 millones de estrellas, forma parte del Grupo Local, dentro del Supercúmulo Virgo. Éste, a su vez, es uno de los que integran la región llamada Laniakea (palabra hawaiana que significa «cielo inmenso», como corresponde a sus 520 millones de años luz de diámetro), dentro del Complejo de Supercúmulos Piscis-Cetus, en algún lugar del Universo observable, que supone sólo una parte de la desconocida totalidad del Universo. Pensémoslo. Sintamos ese vértigo. Y asumamos que nuestro hogar es muy poquita cosa, casi nada. Sería muy pretencioso pensar que la vida sólo ha surgido en la Tierra, que esta insignificante mota de polvo tenía algo especial. Incluso creer que únicamente puede haber seres vivos en el Sistema Solar.

EL PODER DE LOS NÚMEROS

Se estima que el Universo que podemos observar contiene unos 100 000 millones de galaxias parecidas a la nuestra, con un promedio de unos 300 000 millones de estrellas cada una. Multiplicar estos dos números da lugar a la cantidad astronómicamente grande (nunca mejor dicho) de estrellas que quizá existan en la parte conocida del Cosmos: 3×10^{22} , es decir, un 3 seguido de 22 ceros. Escribamos ese número, algo que los científicos casi nunca hacemos porque resulta muy poco práctico... aunque en casos como éste sirve para permitirnos reflexionar aún más: probablemente haya unas 30 000 000 000 000 000 000 000 estrellas en el Universo observable, 30 000 trillones. Un cálculo equivalente a éste lo realizaron en 1966 Carl Sagan y Iósif S. Shklovski en su libro *Vida inteligente en el Universo*, cuando se creía que había cien veces menos galaxias que las actualmente estimadas.

Si el lector se está preguntando cuántas de ellas podemos distinguir a simple vista en el cielo, en una de esas noches memorables (como diría el poeta Jaime Gil de Biedma) en las que surgen las grandes preguntas... el número es abrumadoramente menor: en las mejores condiciones de observación posibles, sin contaminación lumínica y suponiendo que nuestra agudeza visual nos mostrara todas las estrellas hasta una magnitud aparente de 6, no pasarían de unas 2500 en cada uno de los hemisferios. Lógicamente, todas ellas están en nuestra propia galaxia. Pero también podemos ver otras galaxias, como Andrómeda o las dos que forman las Nubes de Magallanes. Andrómeda es el objeto detectable a simple vista más lejano de nosotros y la luz que nos llega desde allí salió hace unos 2,5 millones de años (Ma), aproximadamente cuando el género *Homo* aparecía en nuestro planeta: durante el viaje de esos fotones hasta nuestras retinas hemos pasado de comenzar a tallar cantos rodados a enviar a Marte el robot *Perseverance*.

Los astrofísicos actualmente consideran que la mayoría de las estrellas del Cosmos desarrollan un disco protoplanetario en alguna etapa de su formación, en el que se acabarán originando sistemas planetarios con más o menos cuerpos. Los planetas son la regla, no la excepción. Por tanto, se supone que el número de ellos será mayor al de estrellas, y es posible que *ahí fuera* exista cualquier tipo de planeta extrasolar en el que queramos pensar: gigantes de gas muy calientes o helados, rocosos y pequeños, con océanos, con anillos, con lunas. De hecho, ya sabemos que hay exoplanetas orbitando en torno a estrellas en sistemas múltiples, mundos con vapor de agua en sus atmósferas, otros tan calientes que desde sus nubes llueve hierro líquido, uno que podría contener un diamante más grande que nuestra Tierra. Quizá incluso exista ese planeta que sólo aloja un farol y un farolero. Si además consideramos los satélites que tal vez estén orbitando alrededor de tantos exoplanetas, multipliquemos su número por, al menos, un factor 10. Por tanto, si en una primera aproximación fueran unos 10^{22} los planetas y 10^{23} los satélites estimados, ¿realmente es razonable pensar que los seres vivos de la Tierra

estamos solos, por muy improbable que sea el proceso que lleva a la aparición de la vida?

LOS PRIMEROS EXOPLANETAS DETECTADOS

Como indicábamos en el segundo capítulo, desde los filósofos Anaximandro, Demócrito y Epicuro se creía que, en palabras de este último, «hay un número infinito de mundos». Sin entrar en detalles sobre la controversia que tales ideas alimentaron a lo largo de los siglos, casi dos mil años después fue Giordano Bruno quien, en su obra *Sobre el infinito universo y los mundos*, escrita en forma de diálogo y publicada en Inglaterra en 1584, afirmó que el espacio no tiene fin y acoge un número también infinito de cuerpos planetarios semejantes al nuestro. Incluso argumentaba que en otros planetas y estrellas existen seres vivos e inteligentes: «Todos aquellos mundos contienen animales y habitantes no menos de los que puede contener éste, habida cuenta de que no poseen menor capacidad ni una diferente naturaleza». Estas irreverentes afirmaciones constituyeron uno de los cargos por los que la Inquisición lo encarceló, y que finalmente, en el año 1600, lo llevaron a ser quemado vivo en el Campo de' Fiori de Roma. Actualmente, en esa animada plaza en la que todas las mañanas hay mercado y bulle la vida, una imponente estatua de bronce recuerda la altura intelectual de Giordano Bruno: precursor, junto con su admirado Nicolás Copérnico, de la revolución científica y filosófica que durante el Renacimiento sentaría las bases del mundo moderno.

En 1687, Isaac Newton incluyó en sus *Principia* la tesis de que las estrellas fijas podrían ser los centros de sistemas planetarios similares al nuestro. Pero en 1862, en su obra *La pluralidad de mundos habitados*, el astrónomo y divulgador francés Camille Flammarion se lamentaba de que la ciencia aún no hubiera podido detectar planetas en torno a otras estrellas: «La certeza filosófica de mundos no existe todavía porque no se ha establecido esta verdad por el examen de los hechos astronómicos que la demuestren». Gracias a los avances tecnológicos que se fueron produciendo en los telescopios, durante la segunda mitad del siglo XIX hubo varias propuestas de detección de exoplanetas o planetas extrasolares, llamados así porque orbitan estrellas diferentes al Sol, aunque no pudieron ser probadas. En el siglo XX, la existencia de aquellos «innumerables mundos» de Giordano Bruno se fue considerando como una consecuencia natural del propio proceso de formación

de las estrellas, que los astrofísicos iban comprendiendo cada vez mejor. No obstante, hasta la década de 1980 se carecía de la tecnología necesaria para buscar cuerpos tan pequeños, de muy escaso brillo y que están realmente lejos.

El año 1992 ha pasado a la historia de este campo porque los astrónomos Aleksander Wolszczan y Dale A. Frail comunicaron la detección, utilizando el radiotelescopio de Arecibo, de tres objetos de masa subestelar que orbitan el púlsar PSR B1257+12.1, también conocido como Lich. Un púlsar es un tipo de estrella de neutrones que gira a gran velocidad y emite radiación muy intensa en una única dirección, que podemos detectar cuando ésta atraviesa nuestra línea de visión, análogamente a como vemos desde el mar los pulsos de luz de un faro en la costa. En este caso nos separaba de Lich un gran océano de espacio vacío, pues se encuentra a unos 980 años luz de la Tierra, localizado en la constelación de Virgo. Esos primeros planetas extrasolares descubiertos pudieron ser confirmados por otros astrónomos, y se nombraron como seres de distintas mitologías europeas: Draugr, Poltergeist y Phobetor. La masa del primero es aproximadamente cincuenta veces menor que la Tierra, mientras que los otros dos son unas cuatro veces más masivos que nuestro planeta.

Tras una intensa competición entre grupos de Suiza y Estados Unidos, el primer exoplaneta orbitando alrededor de una estrella de tipo solar, en la secuencia principal de la evolución estelar, fue descubierto tres años después por los astrónomos suizos Michel Mayor y Didier Queloz: un prestigioso profesor y su joven estudiante de doctorado de la Universidad de Ginebra. Así, el 6 de octubre de 1995 publicaron en *Nature* un artículo comunicando que, en torno a la estrella 51 Pegasi (abreviada como 51 Peg, que tiene una masa similar a la del Sol pero cuya luminosidad es un 30 % superior, situada a 50,1 años luz de nosotros y localizada en la constelación de Pegaso) orbitaba un planeta de tipo «Júpiter caliente», al que denominaron 51 Pegasi b (o 51 Peg b). Con este nombre se iniciaba un sistema de nomenclatura que consiste en utilizar una letra minúscula a continuación del nombre de la estrella, empezando con la b para el primer planeta descubierto en torno a ella y continuando alfabéticamente en caso de que haya más en ese sistema planetario: si no se detectan todos a la vez, las letras son correlativas según su orden de detección, pero si todo el sistema es descubierto simultáneamente las letras irán sucediéndose desde el planeta más interior al más alejado de la estrella.

En ocasiones, algunos exoplanetas han recibido después nombres propios a iniciativa de la Unión Astronómica Internacional (IAU), generalmente mediante concursos en los que cada país propone denominaciones más o menos imaginativas para estrellas y planetas concretos. En el caso de 51 Pegasi b fue apodado Bellerophon, a medio camino entre la mitología griega

y un guiño a la película de ciencia ficción *Planeta prohibido* (dirigida por Fred M. Wilcox en 1956). Pero desde 2015 pasó a denominarse oficialmente Dimidium, que en latín significa «un medio», como referencia a que su masa es aproximadamente la mitad que la de Júpiter. Por su parte, la estrella 51 Pegasi pasó a llamarse Helvetios en honor al país de los descubridores del planeta que la orbita, ya que los helvéticos fueron la tribu céltica que hasta la llegada del Imperio Romano vivía en lo que hoy es Suiza.

Para esta histórica detección, confirmada posteriormente por grupos norteamericanos, Mayor y Queloz utilizaron el espectrógrafo ELODIE en el Observatorio de Haute-Provence, en Francia, empleando el método de la velocidad radial que más tarde comentaremos: la estrella oscila con un período de 4,2 días (lo que indica la rapidísima traslación del planeta en torno a ella) y la amplitud de la curva de velocidad radial detectada sólo podía explicarse si la orbitaba un objeto con masa equivalente a, al menos, un 47 % de la de Júpiter. Lo más sorprendente es que un gigante de gas como Dimidium orbitaba en torno a Helvetios a una distancia de sólo 0,05 ua (unos 7,5 millones de kilómetros), es decir, casi ocho veces más cerca de ella que Mercurio del Sol. Esto no podía explicarse con los modelos vigentes sobre formación de planetas a partir de los discos protoplanetarios, que lógicamente hasta entonces se habían desarrollado utilizando los únicos datos conocidos, correspondientes al Sistema Solar. Con ello se inició una línea de trabajo muy activa en la actualidad, dada la diversidad de masas y distancias que se han ido encontrando en planetas que orbitan numerosas estrellas. La proximidad de Dimidium a Helvetios hace que su temperatura superficial sea de unos 1000 °C, y la investigación posterior sobre este planeta ha mostrado, entre otras cosas, que su atmósfera contiene señales de vapor de agua.

Unos meses después de este hallazgo, un equipo de la Universidad de California comunicó la detección de otros dos nuevos planetas extrasolares. La carrera para encontrar más (y más variados) exoplanetas había comenzado, y como veremos ésta sigue siendo una de las líneas de investigación más activas en la actualidad, fuertemente apoyada por la NASA y la ESA. En 1996 también se descubrió el primer planeta orbitando una estrella que forma parte de un sistema binario: 55 Cancri Ab (luego bautizado como Galileo), en órbita de la estrella 55 Cancri A, similar al Sol y que forma el sistema Copérnico junto a su compañera 55 Cancri B, a unos 41 años luz de la Tierra. De hecho, hoy sabemos que 55 Cancri A aloja un sistema de al menos cinco planetas, de los que 55 Cancri Af se encuentra en su zona de habitabilidad. Es decir, según comentábamos en el capítulo 5, ése sería el planeta que Ricitos de Oro escogería si viviera en dicho sistema. Y el mismo año se detectó además el primer planeta en torno a una estrella de un sistema ternario: 16 Cygni Bb (o HD 186427 b), que orbita la estrella 16 Cygni B, parte del sistema 16 Cygni.

El descubrimiento de planetas extrasolares suponía dar un paso más en la revolución copernicana: no sólo la Tierra dejó de ser el centro de Universo sino que el Sol tampoco lo es, y ahora además sabíamos que realmente hay otros mundos orbitando en torno a otros soles. Quedaba claro que, desde el punto de vista de la astronomía, nuestro planeta no tiene nada de especial.

En reconocimiento al trascendental hallazgo realizado por Michel Mayor y Didier Queloz, 24 años después les fue concedido el Premio Nobel de Física (compartido con el cosmólogo James Peebles) «por el descubrimiento de un exoplaneta orbitando una estrella de tipo solar». La casualidad quiso que el 9 de octubre 2019, sólo un día después de conocer que había sido galardonado con la mayor distinción que un físico puede conseguir, Michel Mayor tuviera una visita previamente concertada al Centro de Astrobiología. En la mesa redonda organizada como homenaje a nuestro ilustre colega, nos dejó unas frases que para algunos pueden suponer un jarro de agua fría, pero que están plenamente fundamentadas: «Desengaños. Podremos observar los planetas extrasolares desde la superficie o la órbita de la Tierra, aprenderemos cada vez más sobre ellos e incluso quizás encontraremos señales moleculares de vida en algunas de sus atmósferas. Ésa es la ciencia real. Pero están a tantísima distancia de nosotros, incluso los más cercanos, que es una fantasía pensar que en algún momento vamos a poder viajar hasta allí. Por tanto, limitemos nuestro entusiasmo». En esa misma línea, aunque quizás algo menos rotundo, su antiguo alumno Didier Queloz afirmaba dos meses después en una entrevista: «No podremos llegar a ninguno de los exoplanetas en los próximos mil años». Por tanto, parece que la realidad es menos prometedora que las ideas basadas en el uso de velas solares o en las ambiciosas propuestas planteadas por Stephen Hawking durante los últimos años de su productiva y compleja vida.

Y es que, realmente, los exoplanetas están muy lejos de nosotros. Para hacernos una idea imaginemos que el Sol es una esferita amarilla de 1 cm de diámetro, y la Tierra un minúsculo grano de arena azul de 0,1 mm que lo estaría orbitando a una distancia media de 1 m. La distancia del Sol al planeta enano Plutón sería de 40 m, por lo que en principio podríamos construir el Sistema Solar dentro de una plaza de nuestra ciudad o pueblo. Pues bien, a esa escala, el planeta extrasolar más cercano (*Proxima b*, del que más tarde hablaremos, situado a 4,2 años luz de nosotros) se encontraría a 270 km. Una hormiga podría ir caminando sin problema de un lugar a otro de la plaza en la que vivimos, aunque llegar a alguno de los planetas le requiriese seguir trayectorias complejas y aprender a realizar asistencias gravitacionales. Pero sería inviable para ella alcanzar la ciudad más cercana en la que hay otra plaza con granos de arena de colores.

Desengaños: no podremos ser autoestopistas galácticos. La constatación de que es inviable mandar naves robóticas (y, mucho menos,

tripuladas) ni siquiera a los planetas extrasolares más cercanos resultaría especialmente frustrante si alguna vez se descubriera que uno de ellos contiene seres vivos: sabríamos que están ahí, pero nos sería imposible analizarlos *in situ*. En cualquier caso, como veremos a lo largo de este capítulo, otros expertos en exoplanetas parecen ser algo más optimistas sobre la posibilidad de llegar algún día, en cualquier caso en un futuro muy, muy lejano, a alguno de esos mundos.

PLANETAS Y ENANAS MARRONES

Antes de describir brevemente las metodologías desarrolladas hasta ahora para detectar exoplanetas, recordemos los criterios básicos que debe cumplir cada uno de ellos. En primer lugar ha de ser un planeta, es decir, un objeto astronómico con las siguientes características: orbita en torno a una estrella, ha despejado sus inmediaciones de planetesimales por lo que su órbita está libre de obstáculos, tiene una masa suficiente para mantener una forma redondeada estable debida a su propia gravedad, y no es tan masivo como para desencadenar procesos de fusión termonuclear. En cualquier caso, merece la pena comentar que desde hace dos décadas se conocen en nuestra galaxia muchos planetas aislados, no ligados gravitacionalmente a ninguna estrella, cuyo origen constituye una de las preguntas abiertas en este campo: podrían haberse originado lejos de cualquier sol, o haber sido expulsados de los sistemas planetarios a los que pertenecían por interacciones dinámicas entre otros planetas. De hecho, se estima que el número de planetas aislados puede superar al de los que orbitan estrellas. A pesar de que resultan muy interesantes en investigación, no hablaremos sobre ellos en las próximas páginas ya que son cuerpos más fríos que los ligados a estrellas (aunque podrían conservar cierto calor interno) y probablemente ofrecen menos opciones para la aparición y mantenimiento de algún tipo de vida alienígena.

Adaptando la clasificación realizada por el Grupo de Trabajo de Planetas Extrasolares de la IAU, se considera que: i) son planetas extrasolares aquellos que orbitan una estrella o un remanente estelar, o bien flotan libremente como planetas aislados, cuya masa y tamaño mínimo son similares a los considerados para los planetas del Sistema Solar, y cuya masa máxima es inferior a la que desencadena la fusión termonuclear del deuterio (lo que equivale a 13 veces la masa de Júpiter para cuerpos de metalicidad solar); ii) los objetos astronómicos subestelares, que no orbitan en torno a estrellas y

cuyas masas están comprendidas entre 13 y 72 veces la masa de Júpiter se consideran «enanas marrones», sin importar su origen ni ubicación.

Por tanto, en cuanto a su masa las enanas marrones son cuerpos intermedios entre los planetas y las estrellas, cuya temperatura interior resulta insuficiente para iniciar procesos de fusión termonuclear (la fuente de energía de las estrellas similares al Sol). Así, se van enfriando con el tiempo y por sus propiedades físico-químicas se parecen más a los planetas que a las estrellas. La existencia de enanas marrones, fundamentales para profundizar en la comprensión de la evolución estelar y la formación planetaria, se había teorizado desde la década de 1960. Pero la primera enana marrón no se descubrió hasta el año 1995, en un artículo publicado en *Nature* (tres semanas antes que el de Mayor y Queloz), por los astrónomos españoles Rafael Rebolo, María Rosa Zapatero Osorio y Eduardo L. Martín, trabajando en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Esta primera enana marrón conocida se denominó Teide Pléyades 1, en referencia al observatorio desde el que se observó inicialmente y al cúmulo estelar en el que se encuentra, en la constelación de Tauro y a unos 400 años luz de Tenerife. Su masa es de aproximadamente 55 veces la de Júpiter, lo que equivale a un 5 % de la del Sol, y tiene una edad de sólo 120 Ma.

TÉCNICAS DE DETECCIÓN INDIRECTAS

Una vez establecida la distinción entre enana marrón y planeta extrasolar en función de su masa, vamos a conocer los fundamentos de las técnicas utilizadas para detectarlos y para caracterizar alguna de sus propiedades. El método que se empleó para el descubrimiento del planeta Dimidium es el de *velocidad radial*, también conocido como *espectroscopía Doppler*, y se basa en que cuando un planeta gira alrededor de su estrella, en realidad ambos están orbitando en torno al centro de masas del sistema. En el caso de que la masa de la estrella sea mucho mayor que la del planeta dicho centro de masas queda dentro de ella, pero cuando el planeta es muy masivo y está cerca de su estrella, es posible detectar el movimiento de vaivén que ésta realiza. Si dichas oscilaciones tienen una amplitud medible en la dirección al observador, podemos detectarlas gracias al efecto Doppler, el mismo que aplicado al sonido hace que oigamos más aguda la sirena de una ambulancia cuando se acerca, y más grave cuando se aleja. En el caso de la luz de la estrella, sus líneas espectrales sufrirán un sutil desplazamiento hacia

frecuencias más altas (o, coloquialmente, «hacia el azul») cada vez que ésta se acerca a nosotros, seguido de un corrimiento hacia el rojo cuando se aleja. La cuantificación de este efecto, además de indicar la presencia de un planeta permite determinar la distancia a su estrella y la «masa mínima» que éste debe tener para producirlo.

La principal limitación de dicha técnica está en que, aunque permite detectar planetas de gran tamaño cercanos a su estrella (como era el caso de Dimidium), por muy sensibles que sean los espectrómetros utilizados y muchas veces que se repita la observación, no es eficiente para descubrir planetas de pequeño tamaño, entre ellos los similares a la Tierra. De hecho, como ejemplo se ha calculado que la Tierra induce en el Sol un movimiento en torno al centro de masas del sistema (suponiendo que no hubiera más planetas en el Sistema Solar) que desplaza a nuestra estrella a una velocidad de sólo 0,1 m/s: aproximadamente la misma a la que caminan las tortugas. Y algo así no resulta fácil de medir en otras estrellas, situadas a grandes distancias. Otro problema de este método es que sus resultados se ven alterados cuando la fotosfera de la estrella es inestable. Además, lógicamente las variaciones espectrales resultan más difíciles de medir e interpretar cuando en lugar de un único planeta existe un sistema planetario en torno a la estrella observada.

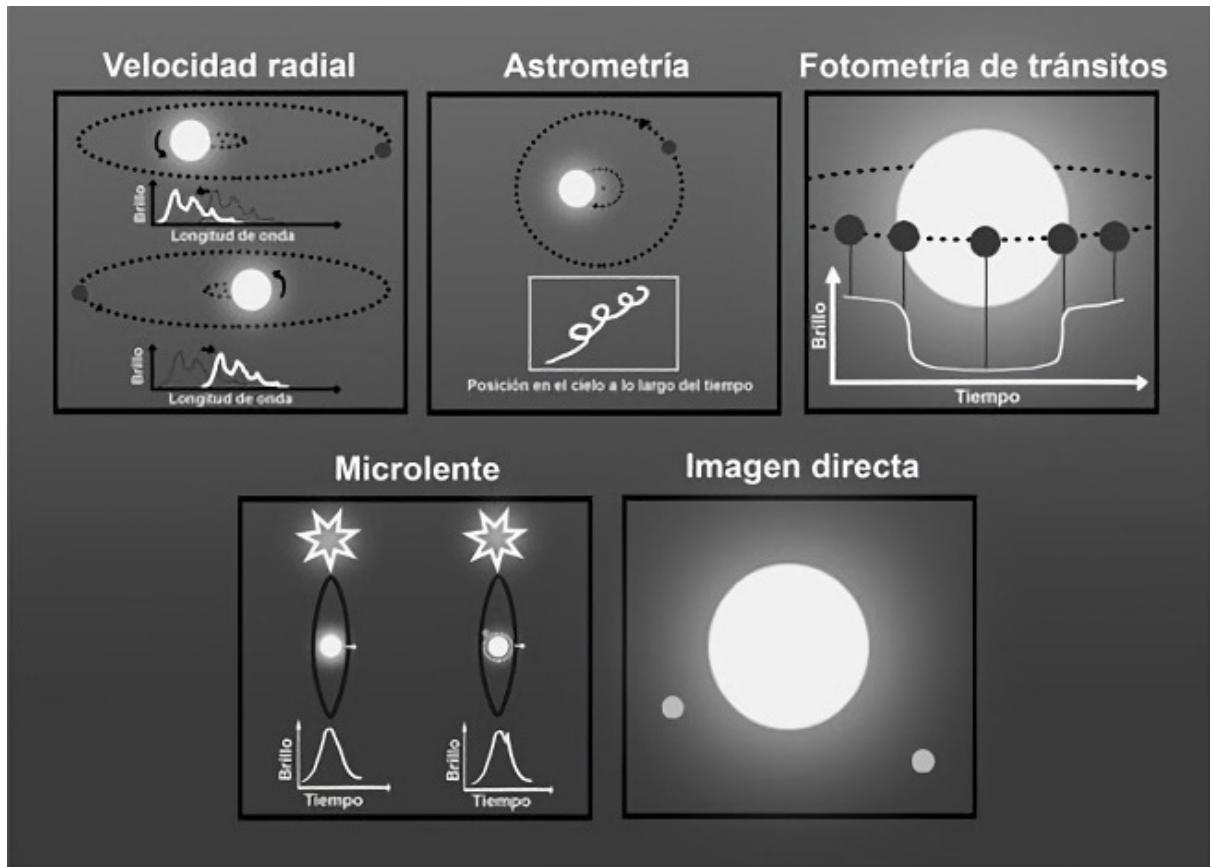
Entre los muchos planetas descubiertos utilizando esta técnica, en 1998 se detectó Gliese 876b, el primero que orbitaba una enana roja: el tipo de estrellas más pequeñas y frías de la secuencia principal (por lo que también se llaman «enanas M», en función de su tipo espectral), que suponen en torno a un 70 % de todas las de nuestra galaxia. Otro exoplaneta peculiar detectado en 2004 con este método fue 55 Cancri Ae, luego bautizado como Janssen, que es el más cercano a su estrella en un sistema planetario que ya hemos comentado. Su masa es de sólo 8 veces la terrestre, por lo que se considera la primera «supertierra» descubierta en torno a una estrella de tipo solar. Orbita 25 veces más cerca de ella que Mercurio del Sol, y su superficie podría contener un inmenso océano de lava fundida, a una temperatura media de 1800 °C. Este planeta se hizo muy popular en los medios de comunicación porque uno de los modelos sobre su composición sugería que podría ser mucho más rico en carbono que en oxígeno, por lo que su corteza estaría dominada por los carburos mientras que en el interior, dada su presión y temperatura, el carbono se encontraría en forma de diamante. En cualquier caso, no se ha confirmado que exista una piedra preciosa de tales dimensiones... a unos tentadores 41 años luz de nosotros.

Otro sistema de detección relacionado con éste es el de la *astrometría*, en el que la oscilación de la estrella inducida por el planeta (o planetas) se mide por su desplazamiento periódico en dirección «lateral» desde nuestro punto de vista. Un símil que se suele utilizar es el de un lanzador de martillo, que antes

de soltarlo lo hace girar en torno a él a gran velocidad: si nos fijamos sólo en la posición del atleta, lo vemos desplazarse lateralmente mientras la bola de acero de algo más de 7 kg «orbita» en torno a él. Lógicamente las variaciones de posición de la estrella observada sobre el fondo del cielo y su velocidad son muy pequeñas, por lo que han de medirse con extrema precisión y como en el caso anterior resulta mucho más fácil detectar planetas de gran tamaño. Todavía no se ha descubierto ningún exoplaneta mediante este sistema, aunque se ha empleado para caracterizar la masa de algunos previamente detectados utilizando otros métodos. En cualquier caso, se espera que a partir de 2021 el observatorio espacial *Gaia* (del que hablaremos al final de este capítulo) descubra mediante astrometría planetas y enanas marrones en torno a estrellas cercanas al Sol.

El método de *medida de la frecuencia de los púlsares* se emplea para buscar exoplanetas orbitando en torno a este tipo de estrellas de neutrones. En tal caso, lo que se mide con extrema precisión son fluctuaciones en la frecuencia de emisión de radiación electromagnética, generalmente muy energética, que puedan estar inducidas por la presencia de dichos planetas. De esta forma, precisamente, se logró en 1992 el descubrimiento pionero de los tres planetas que orbitan el púlsar PSR B1257+12.1.

Por su parte, la técnica de *detección de tránsitos astronómicos* se basa en la medida de la luminosidad de una estrella, empleando fotometría de tan alta sensibilidad que permita cuantificar la insignificante disminución producida cuando un planeta que orbita en torno a ella pasa por delante desde nuestro punto de vista. Así, además de detectar la existencia del exoplaneta se puede determinar su tamaño o volumen (no la masa, como con las técnicas anteriores), ya que lógicamente cuanto más grande sea un planeta más «profunda» será la disminución del brillo de su estrella anfitriona durante el tránsito. Para hacernos una idea del casi imperceptible descenso de luminosidad que observamos cuando un planeta cruza por delante de su estrella y produce un «eclipse en miniatura», se ha cuantificado que si pudiéramos ver desde fuera el efecto del paso de la Tierra por delante del Sol detectaríamos un descenso en el brillo de nuestra estrella de sólo 80 partes por millón. A su vez, en un tránsito de Mercurio (como el que pudimos observar durante la tarde del 11 de noviembre de 2019, o el que siguió Johannes Kepler en 1607), el descenso de brillo del Sol es mucho menor, de unas 12 partes por millón.



Principales métodos utilizados para la detección y caracterización de exoplanetas. Ilustración de María Lamprecht, a partir de esquemas realizados por la ESA.

Por tanto, en el ámbito extrasolar, la detección de un tránsito planetario resulta más sencilla cuando la diferencia entre el tamaño de la estrella y el planeta es pequeña, y si éste orbita a poca distancia de ella. Ése es el caso, por ejemplo, del planeta HD 189733 b, situado a unos 63 años luz de nosotros: tiene el tamaño de Júpiter y orbita muy cerca de su estrella, que es una enana naranja, por lo que su tránsito resulta muy profundo y supone una caída en la luminosidad de HD 189733 de casi el 3 %. En el otro extremo, uno de los planetas más pequeños que se han podido detectar mediante este método fue descubierto por el telescopio espacial *Kepler*, del que hablaremos posteriormente. El minúsculo planeta Kepler-37b, con un diámetro de sólo el 30 % del de la Tierra (similar a nuestra Luna), orbita la estrella Kepler-37, cuyo tamaño es el 70 % del Sol y está situada a 210 años luz de distancia de nosotros. Detectar el paso de Kepler-37b por delante de su estrella sería equivalente a imaginar una bombilla de 5 cm de diámetro situada en una zona oscura del cielo, a la mitad de distancia que nos separa de la Luna... y ser capaces de medir desde aquí el descenso de luminosidad que se produce cuando la cruza por delante una minúscula mota de polvo de 0,1 mm. Ése es el nivel de sensibilidad tan extraordinario al que actualmente se llega con esta técnica.

Lógicamente, la fotometría de tránsitos requiere que nuestra línea de visión esté en el mismo plano que la órbita del planeta (o sistema planetario) alrededor de su estrella. Por tanto, tendremos acceso a una fracción muy pequeña de planetas dado que el ángulo que forman dichos planos con respecto a nuestro punto de vista es aleatorio. Además, como pueden producirse «falsos positivos» si la luminosidad de la estrella cambia periódicamente debido a otros motivos, sus hallazgos han de ser confirmados mediante una técnica alternativa. A cambio, entre las grandes ventajas de este método está que durante los tránsitos puede estudiarse mediante espectroscopía de transmisión la composición de las atmósferas de los planetas observados, ya que la luz de la estrella pasa a través de dicha capa de gases y las moléculas que ésta contiene absorben la radiación a frecuencias concretas. Al analizar el espectro, las frecuencias absorbidas habrán originado líneas negras, formando el auténtico «código de barras» de la composición de dicha atmósfera.

Así, por ejemplo, se determinó la presencia de vapor de agua en la atmósfera del planeta HD 189733 b que citábamos anteriormente. Por tanto, este sistema podría servir para detectar moléculas biomarcadoras en una atmósfera exoplanetaria, o bien desequilibrios entre sus gases que apunten hacia la posible existencia de alguna forma de vida en el planeta estudiado. Precisamente en el primer planeta que, en 2002, se descubrió por este método (llamado HD 209458 b y posteriormente Osiris, con un 70 % de la masa de Júpiter), pudo determinarse que tiene una atmósfera en constante evaporación debido a su temperatura cercana a los 900 °C. Al analizarla durante los tránsitos se determinó la presencia en ella de hidrógeno molecular (H_2), vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Ser capaces de obtener esta información del gas que rodea un objeto astronómico que detectamos como una diminuta sombra, a 150 años luz de nosotros, es realmente asombroso.

Como extensión de este método, el denominado *variación en el tiempo de tránsito* (TTV) permite determinar si la aceleración o desaceleración en la periodicidad del tránsito de un exoplaneta ya conocido es indicativa de la presencia de otro u otros en el mismo sistema planetario. La sensibilidad de esta técnica es muy alta y permite detectar planetas con tamaños similares a la Tierra... o incluso exolunas: satélites que están orbitando en torno a planetas extrasolares. Así, mediante TTV se han detectado muchos sistemas planetarios por el telescopio espacial *Kepler*, sirviendo por ejemplo para proponer la existencia (luego confirmada) del planeta Kepler-19c a partir del análisis de los tránsitos de Kepler-19b, y también para calcular las masas de los seis cuerpos que forman un sistema planetario en torno a la estrella Kepler-11. Además, empleando este método se descubrió el espectacular

sistema planetario en torno a la estrella TRAPPIST-1, del que más tarde hablaremos.

El sistema de las *binarias eclipsantes* se utiliza para detectar planetas que orbitan en torno al centro de gravedad de un sistema estelar binario. En esos casos, la presencia del planeta se pone de manifiesto al analizar en detalle las variaciones en los eclipses que ambas estrellas producen entre sí desde nuestro punto de observación. En 2011 se descubrió y confirmó el primer exoplaneta circumbinario, situado a unos 200 años luz de la Tierra, en la constelación del Cisne: Kepler-16b (o, de forma más correcta, Kepler-16 (AB)-b), que describe una órbita en torno al sistema formado por Kepler-16A y Kepler-16B, una enana naranja y una enana roja que a su vez orbitan sobre su centro de masas cada 41 días. En este caso, además, se pudo detectar el tránsito de este planeta, con el tamaño aproximado de Saturno, por delante de cada una de las dos estrellas. Kepler-16b es un gigante de gas, su superficie está por debajo de los -70°C y desde ella la luminosidad de ambas estrellas es respectivamente del 14 % y 5 % con respecto a la del Sol para nosotros. Por tanto, aunque pudiéramos ir allí no observaríamos atardeceres tan sugerentes como los que disfrutaban los Skywalker en el desértico Tatooine, con música de John Williams de fondo. Pero se encontrará un planeta similar a este del universo *Star Wars*, sin duda, pues los cálculos indican que un alto porcentaje de los exoplanetas de nuestra galaxia orbitan en torno a estrellas binarias.

Otro método de detección de exoplanetas es el de las *microlentes gravitacionales*. El efecto conocido en astrofísica como lente gravitacional o gravitatoria consiste en la desviación de la luz procedente de una fuente distante (por ejemplo, un quásar o una galaxia) debido a la atracción gravitatoria producida por un objeto masivo (como otra galaxia o un agujero negro) situado entre la fuente y el receptor. Esta curvatura de la luz por el campo gravitatorio, predicha por la teoría de la relatividad general de Albert Einstein, fue comprobada en 1919 durante un famoso eclipse de Sol. Pues bien, un cuerpo mucho menos masivo (como una estrella) también pueden actuar a modo de pequeña lente gravitacional, y el efecto que produce sobre la luz que le llega «desde detrás» se modifica sutilmente cuando uno o más exoplanetas están orbitando en torno a ella. Así, gracias al comportamiento como microlente gravitacional se pueden detectar planetas extrasolares, y también determinar su masa y distancia orbital. El primero descubierto mediante este sistema, en 2004, fue el llamado OGLE-2003-BLG235Lb (o MOA-2003-BLG-53Lb), un gigante de gas con una masa más del doble que la Júpiter, orbitando a 4,3 ua de una enana naranja situada a 19 000 años luz de nosotros. Es esperable que el sistema de microlentes gravitacionales se muestre muy eficiente en la detección de exoplanetas de baja masa (incluso menor que la de nuestra Luna), y también de aquellos situados muy lejos de

su estrella. No obstante, su principal limitación es la falta de repetitividad de las observaciones que se realizan.

LA OBSERVACIÓN DIRECTA DE EXOPLANETAS

Hemos dejado para el final el sistema aparentemente más sencillo, pero en realidad el más difícil desde el punto de vista técnico: la *observación directa* de los planetas extrasolares. Obtener imágenes, en el espectro visible o infrarrojo, de planetas situados en las proximidades de sus estrellas es una meta largamente perseguida en este campo. Pero para lograrlo había que vencer dos importantes dificultades: el tamaño muy pequeño del planeta que se deseaba fotografiar en comparación con su estrella, y sobre todo la enorme diferencia de brillo entre ambos.

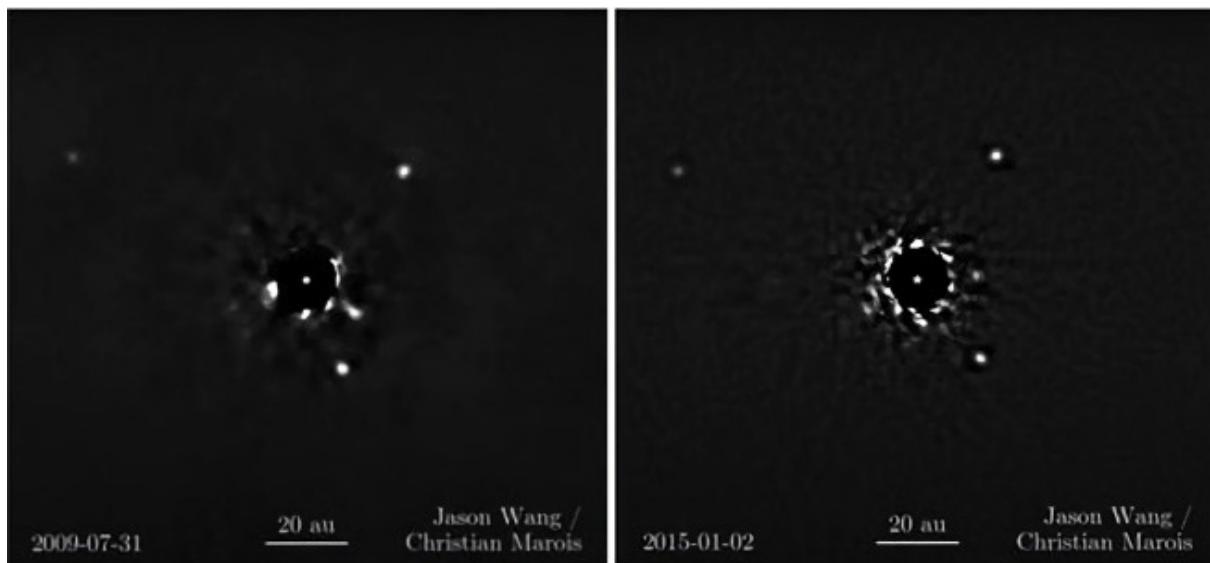
La luz que nos llega de un planeta es la que refleja de su estrella, sumada a su propia emisión intrínseca (que en el rango del infrarrojo es importante cuando el planeta aún está caliente porque es joven, es decir, no ha superado los cientos de millones de años tras su formación). Por tanto, esta técnica es especialmente eficiente en la detección de planetas jóvenes. Si sólo nos fijamos en el espectro visible, por lo general las estrellas son, al menos, millones de veces más brillantes que los planetas que las orbitan. Como mencionábamos en el segundo capítulo del libro, esto es lo que hizo imposible detectar la imagen de Mercurio en la foto de familia de los planetas del Sistema Solar captada por la sonda *Voyager 1* en 1990. Nuestro punto azul pálido sí se veía, pero la luz que reflejaba y llegaba a la cámara era 10 000 millones de veces menor que la procedente del Sol.

Afortunadamente, las innovaciones tecnológicas incorporadas durante los últimos años a los grandes telescopios terrestres y espaciales han permitido importantes avances en este campo. Para ello resultan claves dos técnicas con las que se logra anular la cegadora luz de la estrella en torno a la cual orbitan los planetas buscados. La primera es la coronografía, basada en la adaptación al ámbito de los planetas extrasolares de un dispositivo inventado hace casi un siglo para bloquear la luz del Sol: tapándolo con una máscara circular era posible estudiar su atmósfera o corona (y de ahí proviene el nombre del instrumento) como hasta entonces sólo podía hacerse de forma natural las escasas veces que nuestra estrella era totalmente eclipsada por la Luna. El segundo método se conoce como interferometría de cancelación, que anula la

luz proveniente de la estrella mediante interferencia destructiva con dicha radiación.

El primer candidato a planeta extrasolar del que se tomó una imagen directa fue GQ Lupi b en 2004, desde el *Very Large Telescope* (VLT) del Observatorio de Paranal, en Chile. Orbita una estrella de tipo solar situada a 495 años luz de nosotros, y su masa se encuentra en el rango de entre 1 y 36 veces la de Júpiter, por lo que aún no está claro si realmente se trata de un planeta o de una enana marrón. Ese año, y desde el mismo observatorio, también se logró fotografiar en infrarrojo el exoplaneta 2M1207b, un gigante de gas de entre 3 y 10 masas jovianas que orbita la enana marrón 2M1207 (situada en la constelación de Centauro, a unos 170 años luz del Sol) a una distancia de 40 ua, similar a la que separa a Plutón del Sol. Éste es un sistema curioso, porque tanto la enana marrón como el joven planeta emiten una cantidad similar de radiación infrarroja.

Cuatro años más tarde se tomó una imagen en el infrarrojo del planeta 1RXS J160929.1-210524 b, que posee una masa unas 8 veces mayor que la de Júpiter y orbita una joven enana naranja o enana roja a la enorme distancia de 330 ua. También merece la pena mencionar el caso de la estrella HR 8799, situada a 129 años luz de nosotros. Desde el observatorio *W. M. Keck* se descubrieron en 2008 tres planetas en torno a ella, de tamaño mayor que Júpiter, al que se sumaría otro en 2010: ése fue el primer sistema planetario múltiple del que se obtuvo una fotografía en el infrarrojo. De hecho, las animaciones generadas al superponer imágenes de este sistema tomadas a lo largo de siete años son espectaculares ya que nos permiten ver a los cuatro planetas orbitando su estrella anfitriona, debidamente bloqueada por coronografía. Casi exactamente cuatrocientos años después de que Galileo Galilei observara con su telescopio los cuatro satélites más grandes de Júpiter orbitando el planeta, situado a unos 40 minutos luz de Padua, el desarrollo tecnológico que él y sus contemporáneos iniciaron permitía ver cuatro planetas en torno a una estrella que está 1,5 millones de veces más lejos, en la constelación de Pegaso.



El sistema planetario formado por cuatro cuerpos que orbita en torno a la estrella HR 8799 (oculta mediante coronografía), observado por imagen directa en el infrarrojo. Fotogramas correspondientes a julio de 2009 y enero de 2015 tomados de un vídeo realizado para el European Southern Observatory (ESO) por Jason Wang a partir de datos obtenidos por Bruce Macintosh, Travis Barman y Ben Zuckerman, analizados por Christian Marois y con órbitas determinadas por Quinn Konopacky.

El método de observación directa ha seguido avanzando desde entonces y ya ha permitido detectar más de 40 exoplanetas. No obstante, aún resulta imposible utilizarlo para ver cuerpos similares a la Tierra, tanto en tamaño como en edad y distancia a su estrella. En el futuro, propuestas como la del telescopio *LUVOIR* (del que más adelante hablaremos) promete una revolución en el uso de esta técnica, gracias a la cual también se podrá analizar con precisión la composición atmosférica de los planetas estudiados.

Por tanto, cuando hablamos de observar directamente o ver un exoplaneta nos estamos refiriendo a que con los mejores telescopios jamás desarrollados somos capaces de percibir un tenue punto de luz infrarroja, propia o reflejada de su estrella, una vez que el brillo de ésta ha sido bloqueado. Combinando la información así obtenida con la derivada de métodos indirectos, en el mejor de los casos podremos estimar la masa del planeta, su volumen (y, por tanto, la densidad), su edad aproximada, si es de gas o de roca, si su superficie es clara u oscura, la temperatura superficial y algunos datos sobre su atmósfera en caso de que la tenga. Esto es muchísimo conocimiento de un objeto tan pequeño y lejano, algo impensable hace sólo tres décadas. Pero hasta ahí se puede avanzar hoy en día. Todo lo demás que nos suelen mostrar los medios de comunicación o las propias agencias espaciales cuando presentan un nuevo planeta extrasolar (textura de su superficie, accidentes geográficos, costas, océanos, bloques de hielo, formas de sus nubes, etc.) no son más que licencias artísticas para recrear cómo podríamos imaginarlo. Algunas de las ilustraciones más espectaculares se las debemos a Martin Kornmesser, que trabaja para la ESA y forma parte del equipo de divulgación del *Hubble*, y al

equipo de diseñadores gráficos del Exoplanet Exploration Program de la NASA en el Jet Propulsion Laboratory. Como veremos al final de este capítulo, incluso a veces aparece en la ilustración una nave aproximándose a aquel lejano mundo. Desde nuestros orígenes somos exploradores, y nuestro cerebro sigue generando endorfinas cuando soñamos con un viaje hasta un lugar tan exótico, aunque sepamos que es imposible realizarlo.

EL CENSO CRECIENTE DE PLANETAS EXTRASOLARES

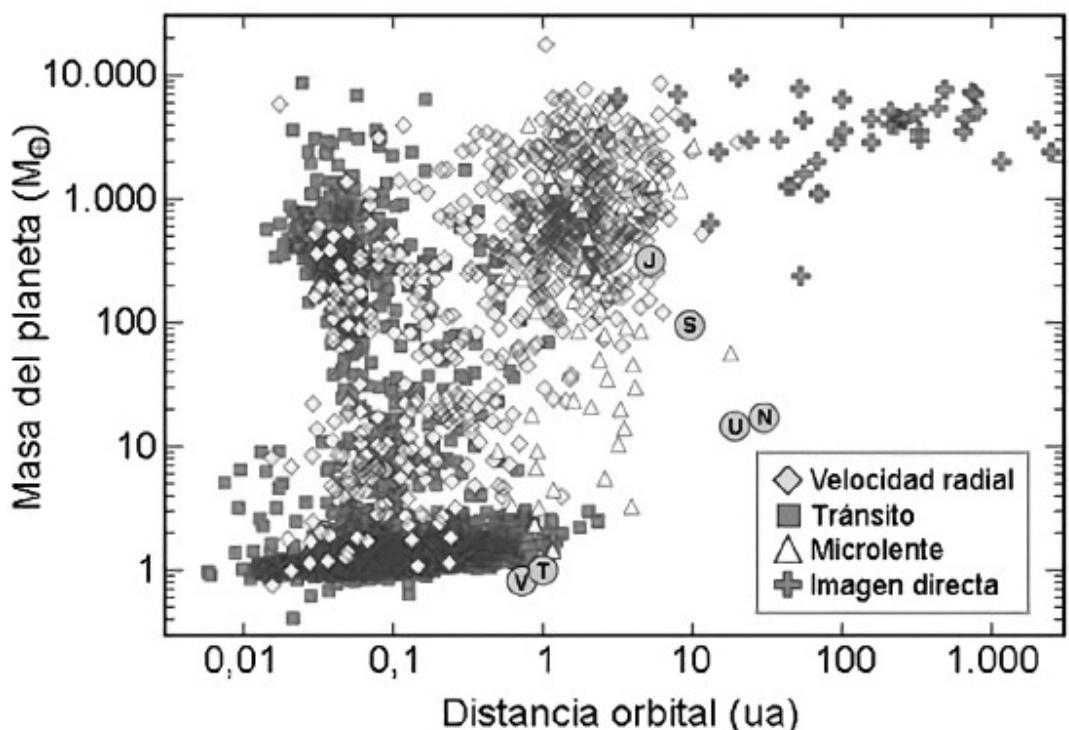
Haciendo un balance, gracias al empleo de todas las técnicas de detección mencionadas en los apartados anteriores, hasta mediados de junio de 2020 se han descubierto y confirmado (al ser validados por dos o más métodos) un total de 4164 exoplanetas, que forman parte de 3085 sistemas planetarios. La técnica de fotometría de tránsitos ha sido utilizada en un 76 % de estas detecciones. Además, están en estudio más de otros 5200 planetas candidatos. Estos números crecen día a día y se incrementarán de forma muy rápida durante los próximos años. Un dato prometedor es que, aunque por las limitaciones técnicas al principio sólo se podían detectar planetas gigantes muy cercanos a su estrella (llamados genéricamente «júpiteres calientes»), el cómputo actual indica que los pequeños son muy frecuentes: en la mitad de las estrellas similares al Sol donde se han detectado exoplanetas, al menos uno de ellos tiene un tamaño entre el de la Tierra y el de Neptuno.

Estos planetas pequeños, cuando son rocosos se denominan genéricamente «tierras» (si su masa está comprendida entre la de Mercurio y 2 veces la de la Tierra) o «supertierras» (con masas entre 2 y 10 veces la terrestre, o diámetros entre 1 y 1,75 veces el nuestro). Hasta junio de 2020 se han descubierto 160 «tierras» y 1292 «supertierras». Por su parte, los «minineptunos» son planetas helados y con atmósferas densas, cuyas masas son de hasta 10 veces la terrestre y tienen tamaños entre 1,75 y 10 veces mayores que el de nuestro planeta. Finalmente, se llama «neptunos» a los gigantes congelados formados por hidrógeno, helio y compuestos volátiles, con masas de 10 a 100 veces la terrestre y tamaños entre 2 y 6 veces mayores que la Tierra. Además, se han detectado muchos exoplanetas que no son fácilmente clasificables en estos grupos. Así, cuando los astrofísicos continúen su búsqueda durante las próximas décadas podrán llegar a saber si el Sistema Solar es una anomalía (ya que no tiene júpiteres calientes ni supertierras, y en él los planetas interiores son más pequeños) o si somos un

ejemplo de una solución frecuente en torno a muchas estrellas. En cualquier caso, como sólo conocemos un planeta vivo, no sabemos si la arquitectura de los sistemas planetarios puede condicionar el paso de la química a la biología en uno de sus mundos.

Además, merece la pena mencionar que también se conoce la existencia de cometas en torno a sistemas planetarios diferentes al nuestro, denominados genéricamente exocometas. Los primeros se detectaron en torno a Beta Pictoris en 1987, y hasta ahora se han encontrado o propuesto en más de 20 estrellas, la mayoría de ellas muy jóvenes. Su estudio sirve para profundizar en la investigación sobre la formación y dinámica de sistemas planetarios en general, sin estar restringidos a lo que ocurre en torno al Sol, y también para proponer un posible tráfico de moléculas químicas entre los cuerpos de dichos sistemas mediado por exocometas.

Para terminar este apartado, detengámonos en dos sistemas planetarios cuyos nombres se asignaron en nuestro país en una de las votaciones auspiciadas por el proyecto NameExoWorlds, iniciativa de la IAU para nombrar algunas estrellas (lo que las distintas culturas ya han hecho durante milenios con las visibles en el cielo) y los planetas que las orbitan. En 2015 se celebró uno de estos concursos, que tenía como objetivo renombrar la estrella μ Arae, similar a nuestro Sol y situada a 49,8 años luz de distancia, en la constelación Ara. Además, había que proponer un nombre propio para cada uno de los cuatro exoplanetas que forman su sistema planetario, descubiertos entre 2001 y 2007, de los que tres son gigantes de gas y el cuarto podría ser rocoso o también gigante de gas pero menos masivo. Tras una competición entre seis opciones presentadas por distintos países, la denominación ganadora fue la que había propuesto el Planetario de Pamplona, a la que se sumaron la Sociedad Astronómica Española y el Instituto Cervantes, y que además contó con gran apoyo desde distintos ámbitos de nuestra cultura. Así, a partir de entonces el nombre de esta estrella es un homenaje a Miguel de Cervantes, el más grande de nuestros escritores y cuyos amplios conocimientos sobre astronomía ya comentamos en el capítulo dedicado a los satélites de Júpiter. Como no podía ser de otra forma, los cuatro planetas que orbitan la estrella Cervantes y la acompañan en sus andanzas por el cielo son Dulcinea, Quijote, Sancho y Rocinante.



Distribución de los exoplanetas conocidos, en función de la distancia a su estrella anfitriona (medida en unidades astronómicas) y de su masa (en relación con la de la Tierra). Los símbolos indican el método de detección utilizado y se incluyen las posiciones que ocuparían los planetas del Sistema Solar (excepto Mercurio y Marte, que debido a su pequeña masa quedan fuera de la escala del eje y). Gráfica adaptada por el autor a partir de la original, preparada por Joshua Winn (Princeton University) utilizando datos del NASA Exoplanet Archive (NASA/California Institute of Technology).

A finales de 2019 un proceso similar llevó a que la estrella HD 149143, de tamaño algo mayor que el Sol y situada a 240 años luz, en la constelación de Ovícuo, pasara a llamarse Rosalía de Castro. Y el planeta que gira en torno a ella, el júpiter caliente HD 149143 b, comenzó a denominarse Río Sar, como el afluente del Ulla que inspiró parte de su obra. A muchos lectores les vendrán a la mente cuatro versos de los *Cantares gallegos*, escritos por esta extraordinaria poeta: «As estrelliñas todas / que aló no espazo están, / sorrindo nos miraban / con soave craridá».

INSTRUMENTOS EN BUSCA DE EXOPLANETAS

Las técnicas que mencionábamos anteriormente han sido utilizadas en telescopios terrestres y/o desde telescopios espaciales a partir de la década de 1980. Entre los primeros, merece la pena destacar los instrumentos instalados

en el *Large Binocular Telescope Observatory (LBTO)* en Emerald Peak (Arizona, Estados Unidos), el *W. M. Keck Observatory* en Hawái (Estados Unidos), el *Observatorio Hispano-Alemán de Calar Alto (CAHA)* en Almería, el *Very Large Telescope (VLT)* del European Southern Observatory (ESO) en Atacama (Chile) y el más grande de todos hasta el momento, con un espejo de 10,4 m: el *Gran Telescopio de Canarias (GTC)* en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma, Canarias). En el futuro, la búsqueda y caracterización de exoplanetas desde instalaciones terrestres podrá revolucionarse cuando los astrónomos dispongan del *Extremely Large Telescope (ELT)*, que con un diámetro de 39 m está siendo construido por el ESO en el cerro Armazones del desierto de Atacama. También se espera el *Thirty Meter Telescope (TMT)*, que como su nombre indica será de 30 m: en principio se va a construir en Mauna Kea, Hawái, pero si las protestas en contra de su instalación allí continúan quizá finalmente acabe trayéndose a Canarias. Además, ha colaborado en el descubrimiento y caracterización de varios exoplanetas la red de telescopios robóticos llamada *Las Cumbres Observatory* (que permite trabajar coordinadamente con 23 instrumentos diferentes, situados en siete lugares del mundo). Y una mención especial, debido al espectacular descubrimiento que mencionaremos más adelante, merece el pequeño telescopio robótico de 60 cm situado en la cumbre de La Silla en Atacama, pero diseñado y operado desde la Universidad de Lieja en Bélgica tal como queda patente por su apetecible acrónimo: *Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope (TRAPPIST)-South*.

Por su parte, los telescopios espaciales ofrecen dos ventajas principales con respecto a los situados sobre la superficie terrestre, aunque estos últimos se hayan construido en los mejores lugares de observación posibles: al estar fuera de nuestra atmósfera no se ven afectados por las perturbaciones que ésta introduce en las medidas, y además permiten enfocar a las estrellas deseadas sin que influyan los ciclos de día y noche. No se puede comenzar a hablar sobre los telescopios en órbita sin mencionar que el *Hubble Space Telescope (HST)*, uno de los instrumentos más longevos y exitosos desde su lanzamiento en 1990 (que además supone un ejemplo de colaboración continuada entre la NASA y la ESA), ha sido también decisivo en el descubrimiento y caracterización de numerosos planetas extrasolares. Entre los pioneros también hay que recordar que, en el año 2003, la NASA puso en órbita en torno al Sol el telescopio espacial *Spitzer*, dedicado a analizar en el infrarrojo nebulosas, estrellas jóvenes y galaxias. Aunque no estaba previsto cuando se lanzó, hasta su definitivo fin de misión a finales de enero de 2020 *Spitzer* también ha contribuido decisivamente a detectar y caracterizar varios exoplanetas empleando el método de tránsito y el de microlentes gravitacionales.

Posteriormente se comenzaron a lanzar algunos específicamente diseñados para la detección de exoplanetas. El telescopio espacial *Convection, Rotation and planetary Transits (CoRoT)*, construido por la Agencia Espacial Francesa (CNES) y la ESA, tuvo como objetivo fundamental la búsqueda de exoplanetas mediante el método de tránsito. Este telescopio de 27 cm de diámetro fue lanzado en 2006, y durante los seis años que estuvo orbitando la Tierra descubrió 557 exoplanetas candidatos en las 163 665 estrellas observadas, de los cuales 37 fueron confirmados y caracterizados.

En 2009 se lanzó el telescopio espacial *Kepler*, de la NASA, dedicado específicamente a la búsqueda de planetas extrasolares de tamaño similar a la Tierra y situados en la zona de habitabilidad de sus estrellas. Orbitando alrededor del Sol, con su espejo primario de 1,4 m y un conjunto de 42 CCD en su cámara (que le proporcionaban una resolución de 95 megapíxeles por imagen), *Kepler* podía analizar decenas de miles de estrellas simultáneamente durante 27 días seguidos y, al comparar la luz recibida de ellas cada 2 minutos, identificar los tránsitos planetarios que pudieran ser claramente visibles desde su punto de observación. Además, en ocasiones utilizó otros métodos de detección alternativos a los tránsitos. El rendimiento de *Kepler* ha sido espectacular, ya que ha permitido estudiar más de 150 000 estrellas en una zona concreta del cielo y descubrir 2662 planetas: casi dos tercios de los conocidos hasta el momento. Varios de ellos tienen un tamaño similar al terrestre, y algunos se encuentran además en la zona de habitabilidad.

Gracias a la precisión con la que mide la profundidad y la forma de las curvas de luz durante los tránsitos, este telescopio también buscó exolunas en torno a algunos planetas detectados. Esto constituyó el proyecto Hunt for Exomoons with Kepler (HEK), realizado en colaboración con el *Hubble*. Así, aunque las pruebas aún no son concluyentes, en 2017 se anunció que tras analizar cerca de 300 candidatos podría haberse descubierto el primer satélite fuera del Sistema Solar: orbitaría en torno a Kepler-1625b, un planeta con tamaño equivalente a la mitad de Júpiter y cuya estrella anfitriona está situada a 4000 años luz de nosotros, en la constelación del Cisne. La exoluna sería tan grande como Neptuno y con ella se ha iniciado un nuevo sistema de nomenclatura: si es confirmada, se llamará Kepler-1625b i. Pensemos en lo que supondría este descubrimiento: algunos de los miembros más creativos y sistemáticos de nuestra especie habrían sido capaces de detectar una luna que orbita en torno a un planeta que a su vez gira alrededor de una estrella, y ese sol está tan lejos de nosotros que su luz, mínimamente eclipsada, salió de allí poco después de que se construyeran las pirámides de Giza. Gracias a la exploración espacial, nuestra imaginación puede realizar estos fascinantes viajes en el espacio y en el tiempo sin movernos de nuestro asiento.

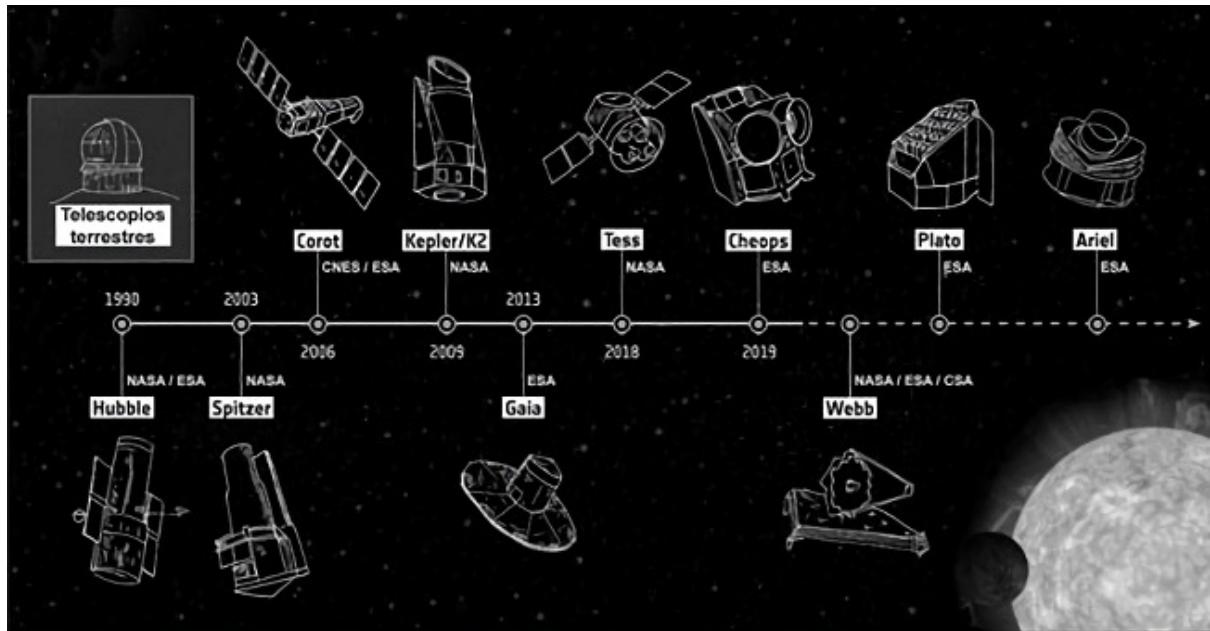
Volviendo a un pasado mucho más cercano, el 15 de noviembre de 2018, tras una inversión total de unos 600 millones de dólares durante los nueve

años de exitoso servicio que habían agotado por completo su combustible, y coincidiendo con el 388 aniversario de la muerte de Johannes Kepler, la NASA desconectó este telescopio espacial. Así, *Kepler* quedó orbitando para siempre alrededor del Sol... igual que los miles de exoplanetas descubiertos por él orbitan en torno a otras estrellas de nuestra galaxia.

Por su parte, la ESA lanzó en 2013 el observatorio espacial *Gaia*, con un propósito muy ambicioso: utilizar su telescopio de 3 m de diámetro para medir con una precisión sin precedentes las distancias, posiciones y movimientos de 1000 millones de objetos astronómicos por encima de la magnitud aparente 20: la mayor parte de ellos serán estrellas, pero también detectará planetas, asteroides y cometas (así como cuásares situados fuera de nuestra galaxia). Con ello, hasta el final de su misión primaria en 2024 permitirá construir el catálogo estelar tridimensional más grande y detallado que se ha logrado nunca, en el que las medidas espectrofotométricas de cada objeto informarán sobre su luminosidad, temperatura, masa y composición elemental. Aun así, hemos de seguir siendo humildes frente a las dimensiones del Cosmos: los objetos analizados por *Gaia* sólo representarán el 0,5 % de la totalidad de nuestra galaxia. En el contexto que estamos tratando aquí, dado que a lo largo de su vida operativa este telescopio espacial observa cada objeto al menos setenta veces, permite detectar exoplanetas mediante el método de la astrometría. De hecho, está previsto que descubra hasta 35 000 nuevos planetas. Por tanto, el número de bolas en el bombo seguirá creciendo muy rápidamente durante los próximos años, y con ello la probabilidad de que a alguna de ellas le toque el «premio gordo»: la detección de vida en dicho exoplaneta.

En 2018, la NASA puso en órbita terrestre el *Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)*: un telescopio específicamente diseñado para detectar, empleando el método de tránsito que tan exitoso había sido con *CoRoT* y *Kepler*, planetas de tamaño terrestre en torno a las 200 000 estrellas más brillantes situadas en las proximidades (teniendo en cuenta lo que esto significa en el contexto astronómico) de nuestro Sistema Solar. El telescopio observa el 85 % de la bóveda celeste (un área 350 veces mayor que la rastreada por *Kepler*), que se ha dividido en 26 sectores solapantes, y puede analizar cada uno de ellos durante al menos 27 días. Una ventaja de buscar tránsitos planetarios en las estrellas más cercanas a nosotros es que sus hallazgos pueden ser complementados por las observaciones hechas desde observatorios terrestres. Se ha previsto que *TESS* llegue a descubrir unos 20 000 exoplanetas, entre los que unos 300 podrían ser del tamaño comprendido entre algo menos que la Tierra y el doble que nuestro planeta: es decir tierras y supertierras. De hecho, como veremos más adelante, a comienzos de 2020 este telescopio ha cobrado protagonismo ya que permitió

detectar un planeta similar a la Tierra situado en la zona de habitabilidad de la estrella TOI 700.



Línea temporal con las fechas de lanzamiento de los telescopios implicados en la detección y caracterización de exoplanetas. Los que se muestran en la parte superior están específicamente dedicados a tal fin, y los situados por debajo de la línea también han hecho aportaciones fundamentales a este campo. Algunos de los que actualmente se encuentran en desarrollo o en diseño no se han incluido en este diagrama. Figura modificada por el autor a partir de la original elaborada por la ESA.

EL FUTURO YA ESTÁ AQUÍ: LA CARACTERIZACIÓN DE EXOPLANETAS

Como hemos visto, durante los próximos años la detección de exoplanetas va a crecer exponencialmente gracias al trabajo de los científicos e ingenieros implicados en numerosos telescopios terrestres y espaciales. El siguiente reto es caracterizar los planetas más interesantes con el mayor nivel de detalle posible, es decir, iniciar el campo de investigación que algunos ya llaman «exoplanetología». Para ello la ESA ha diseñado un ambicioso plan dentro de su estrategia Cosmic Vision 2015-2025, basado en tres misiones consecutivas en el tiempo y complementarias en cuanto a sus objetivos: *Cheops*, *Plato* y *Ariel*. La primera pertenece a lo que la ESA considera «clase S» (pequeñas, con un presupuesto inferior a los 50 millones de euros) mientras que las otras dos son de «clase M» (intermedias, pudiendo tener un coste hasta diez veces mayor).

Esta nueva etapa de la ciencia europea ya ha comenzado, pues el telescopio *Characterising Exoplanet Satellite (Cheops)* fue lanzado desde Kourou, en la Guayana Francesa, el 18 de diciembre de 2019. Su espejo de 33 cm de diámetro va contenido en un satélite de 280 kg que orbita nuestro planeta a 700 km de altura. El objetivo principal del equipo científico de *Cheops*, liderado por el astrónomo suizo (y Premio Nobel, como ya comentamos) Didier Queloz, es utilizar la fotometría de tránsitos para caracterizar con gran precisión el tamaño de planetas extrasolares pequeños (en un rango comprendido entre los de la Tierra y Neptuno) que ya se conocen en torno a estrellas brillantes cercanas (entre unos 10 y 200 años luz), y además investigar las atmósferas de los júpiteres calientes.

La ventaja de centrar la mayor parte de su investigación en sistemas previamente detectados es que podrá dedicar mucho tiempo de observación a los tránsitos de los planetas conocidos que tengan períodos orbitales cortos, equivalentes a 50 días terrestres o menos. Esto permitirá determinar con precisión el volumen del exoplaneta, y su comparación con la masa (calculada previamente mediante otros métodos) indicará su densidad. Con ello se podrá incluso postular su composición, pues la densidad es muy diferente en planetas gaseosos y rocosos, y dentro de estos últimos depende de si están cubiertos o no por océanos globales. En conjunto, con *Cheops* se avanzará notablemente en uno de los temas más interesantes de la astrofísica actual: la formación y evolución de sistemas planetarios. Merece la pena destacar que este proyecto tiene un claro acento español, porque la empresa Airbus Defence & Space España ha sido la principal contratista y el telescopio se ha construido fundamentalmente en Madrid. Además, el centro de operaciones de la misión estará en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), siendo la primera vez que este cometido se realiza fuera de Alemania en un proyecto de la ESA. Y en el equipo científico de *Cheops* tienen un papel relevante investigadores del Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) e Institut de Ciències de l’Espai (ICE, Institut d’Estudis Espacials de Catalunya).

Por otra parte, en marzo de 2021 está previsto (aunque probablemente el calendario se retrase debido a los efectos de la pandemia de COVID-19) el lanzamiento del *James Webb Space Telescope (JWST)*, a veces llamado únicamente *Webb*, un telescopio infrarrojo de grandes dimensiones con un espejo primario de 6,5 m formado por 18 segmentos hexagonales. Su compleja y muy costosa construcción ha sido posible gracias a la colaboración de la NASA con la ESA y la Agencia Espacial Canadiense (CSA). Empleando sus cámaras y espectrómetros de última generación, este discípulo muy aventajado del *Hubble* orbitará a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra y estudiará la mayor parte de las etapas de la evolución del Universo, desde las primeras señales tras el *Big Bang* hasta el origen del Sistema Solar.

Dado que tendrá una gran capacidad para investigar la formación de sistemas planetarios, también permitirá detectar exoplanetas y en particular analizar la composición molecular de sus atmósferas. Así, la presencia en alguna de ellas de gases como dióxido de carbono, metano, vapor de agua u oxígeno molecular (O_2) permitirá avanzar sobre la habitabilidad de los planetas extrasolares... e incluso postular si las concentraciones relativas de dichos gases podrían en algún caso estar sugiriendo la presencia de biosferas globales en ellos. Al final de este capítulo profundizaremos algo más en este interesante tema.

En torno a 2025 la NASA pondrá en órbita el *Nancy Grace Roman Space Telescope*, inicialmente llamado *Wide Field Infrared Survey Telescope* (*WFIRST*), un telescopio de infrarrojos con 2,4 m de diámetro que permitirá captar imágenes con una nitidez similar a la del *Hubble* pero en campos de visión cien veces mayores. Además de sus objetivos en el campo de la cosmología, permitirá detectar y caracterizar exoplanetas empleando los métodos de microlentes gravitacionales y de observación directa mediante coronografía.

En paralelo, la ESA continuará su programa centrado en la investigación de exoplanetas como parte de la estrategia Cosmic Vision. Así, en 2026 tiene previsto lanzar el telescopio *Planetary Transits and Oscillations of Stars* (*Plato*), que buscará nuevos exoplanetas rocosos (tierras y supertierras) en órbita de estrellas similares al Sol a distancias que incluyen su banda de habitabilidad. Es decir, el foco ya va a estar claramente puesto en los planetas con más posibilidades de tener agua líquida en su superficie y, quizás, de albergar vida. Para ello empleará el método de tránsitos, teniendo previsto investigar cerca de un millón de estrellas. Como resultado de su análisis identificará exoplanetas cuya atmósfera sea prometedora y merezca ser analizada espectroscópicamente en detalle. Además, *Plato* medirá las oscilaciones de las estrellas anfitrionas con el fin de avanzar en el conocimiento de su estructura interna, lo que a su vez dará información sobre el origen, edad y evolución de los sistemas planetarios detectados. Dos años más tarde, si todo va según lo previsto, la ESA completará su triplete de telescopios espaciales dedicados a la caracterización de planetas extrasolares con el lanzamiento del *Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey* (*Ariel*). Utilizando todo su potencial se investigará el origen y composición de al menos un millar de exoplanetas grandes, y se analizarán las moléculas presentes en sus atmósferas mediante espectroscopía visible e infrarroja.

Aún más hacia el futuro, y sin fecha establecida, la misión *Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics* (*SPICA*) es una colaboración entre la ESA y la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) que tendrá como objetivo estudiar la formación de estrellas y planetas, incluyendo la visualización

directa de discos protoplanetarios y exoplanetas mediante la técnica de coronografía. Por último, una de las propuestas más prometedoras para un futuro telescopio espacial que está en estudio por parte de la NASA es la del *Large UV/Optical/IR Surveyor (LUVOIR)*. Si fuera aprobado se lanzaría a finales de la década de 2030, y con él se podría detectar y caracterizar un amplio repertorio de exoplanetas, incluidos los más parecidos a la Tierra y situados en las bandas de habitabilidad de sus estrellas. Al final de este capítulo hablaremos sobre *LUVOIR* mientras tomamos café con una de las astrofísicas que forman parte de su equipo científico.

¿QUÉ HACE HABITABLE UN PLANETA EXTRASOLAR?

Cuando se va en busca de otras vidas fuera de nuestro sistema planetario, la secuencia de etapas es la siguiente: primero han de detectarse exoplanetas, lo que está garantizado gracias a los instrumentos comentados; a continuación hay que determinar cuáles de los descubiertos son rocosos y potencialmente habitables, por estar en la zona de habitabilidad; entre estos últimos, teniendo en cuenta otros factores como la edad, luminosidad y estabilidad de su estrella, se deberá consensuar cuáles son realmente habitables; y por último, con mucha suerte, sería posible descubrir si alguno de ellos está habitado. Ése es el sueño: encontrarnos con otra canica azul parecida a la Tierra, en la que se haya desarrollado la vida. Cualquier tipo de vida. Por un camino tan estimulante como éste va a avanzar la investigación durante las próximas décadas.

Para ello, lógicamente hay que adoptar algunos criterios que nos permitan buscar exoplanetas habitables con más probabilidades de éxito que si lo hiciéramos escogiendo estrellas al azar entre el abrumador número de las que existen en nuestra galaxia, como indicábamos al comienzo del capítulo. Es algo parecido a lo que, a mucha menor escala, nos preguntamos al observar el cielo en una noche estrellada: ¿en cuáles de todos esos puntos luminosos puede haber un planeta propicio para la vida? O, dicho de forma más cinematográfica, ¿desde dónde podrían estar observándonos a nosotros ahora mismo?

Una iniciativa interesante en este sentido es el *Catálogo de Exoplanetas Habitables (HEC)*, desarrollado a partir de 2003 por el Laboratorio de Habitabilidad Planetaria, en la Universidad de Puerto Rico en Arecibo: un entorno muy adecuado para ello ya que su radiotelescopio fue la base del

proyecto SETI, del que hablaremos en el próximo capítulo. Los criterios originalmente seguidos, y que distintos proyectos han ido matizando, para considerar que una estrella puede contener planetas habitables a su alrededor son los siguientes: i) ha de tener una antigüedad de al menos 3000 Ma, para asegurar que los planetas que la orbiten han dispuesto de tiempo suficiente para dar el salto de la química a la biología, al menos si tal proceso ha sido similar al seguido en nuestro planeta; ii) no ha de ser variable ni presentar fulguraciones de radiación que podrían acabar con la vida una vez formada en alguno de sus planetas; iii) su metalicidad debe ser suficientemente alta como para suponer que el disco protoplanetario que dio lugar a los cuerpos que la orbiten era rico en metales (en especial, hierro), lo que habría permitido formar planetas rocosos de tipo terrestre a su alrededor, en alguno de los cuales podría haberse desarrollado una química compleja; y iv) ha de poder mantener una zona habitable estable en torno a ella, lo que se calcula en función de su masa y temperatura, a su vez derivadas de la luminosidad que presenta. Así, partiendo de más de 118 000 estrellas contenidas en el *Catálogo Hipparcos*, con los criterios de *HEC* se seleccionaron 17 129 que podían ser candidatas a albergar planetas habitables. Y ésta no es la única iniciativa desarrollada con tal fin, por lo que el trabajo de búsqueda es y será muy intenso.

Cuando una estrella cumple estos criterios, cualquier planeta que orbite en torno a ella se considerará habitable si: i) está situado en la zona de habitabilidad, preferentemente en su parte central, por lo que tendrá una temperatura de equilibrio compatible con la existencia de agua líquida en su superficie; ii) su densidad indica que es rocoso; y iii) posee una atmósfera estable y relativamente compacta, lo que impone un límite mínimo y máximo a su tamaño (que se ha estimado en un diámetro entre 0,6 y 1,5 veces el terrestre). Además, algo que aún no se puede medir pero que ya se plantea como necesario es que se consideren los procesos geológicos que podrían estar produciéndose en el interior del exoplaneta. Como la historia comparada de la Tierra y Marte nos ha enseñado, sólo un mundo geológicamente activo puede garantizar el reciclado constante de materiales que la vida precisa para desarrollarse y diversificarse en él. Y, además, cuando el núcleo del planeta es metálico y se mantiene en estado líquido produce un campo magnético que protege su superficie de gran parte de la radiación nociva para la vida que le llega desde su estrella. Gracias a eso hemos llegado hasta aquí los herederos de LUCA.

LOS EXOPLANETAS MÁS PROMETEDORES PARA LA VIDA

Con las restricciones que acabamos de comentar, entre todos los planetas extrasolares conocidos hasta junio de 2020, 160 son «tierras» pero poco más de 60 pueden considerarse habitables. Este número se reduce a unos 20 si somos más estrictos en cuanto a su posición centrada dentro de la banda de habitabilidad correspondiente. Entre estos últimos, cinco de los más prometedores que ha descubierto el telescopio espacial *Kepler* son Kepler-62f, Kepler-186f, Kepler-442b, Kepler-452b y Kepler 1649c, situados respectivamente a 1200, 582, 1120, 1400 y 300 años luz de nosotros. En particular, Kepler-186f está recibiendo mucha atención porque tiene un diámetro sólo un 20 % mayor que el de nuestro planeta, forma parte de un sistema de al menos 5 cuerpos, y orbita en la zona de habitabilidad de una enana roja formada hace unos 4000 Ma. Por su parte, Kepler 1649c fue descubierto en abril de 2020 al reanalizar los datos obtenidos años antes por este telescopio. También orbita una enana roja y resulta especialmente interesante porque es el más similar a la Tierra en dos características simultáneamente: su tamaño (sólo 1,06 veces superior al nuestro) y la energía que recibe de su estrella (un 75 % de la que nos llega del Sol). Debido a ello, actualmente tanto este planeta como su estrella están siendo estudiados en detalle por varios grupos de investigación.

Otro exoplaneta habitable que merece una mención especial es Proxima Centauri b (también conocido como Proxima b), cuya particularidad es que orbita en torno a la estrella más cercana al Sol: Proxima Centauri, situada a sólo 4,2 años luz de nosotros. Se trata de una enana roja con masa y luminosidad en torno al 12 % y 0,15 % de la solar, respectivamente, que junto con Alpha Centauri AB y Beta Centauri forma el sistema triple Alpha Centauri, en la constelación de Centauro. Este planeta, el octavo más cercano a la Tierra, fue descubierto por un equipo internacional liderado por Guillem Anglada-Escudé desde la Queen Mary University de Londres, y tal hallazgo fue publicado en la revista *Nature* el 24 de agosto de 2016. Debido a su cercanía (en términos astronómicos) a la Tierra, el artículo en el que se describía su detección terminaba con una frase mucho más optimista que las que hemos leído al principio del capítulo, pues sugería que Proxima b podrá ser investigado «por medio de imagen directa y espectroscopía de alta resolución en las próximas décadas y —quizá— mediante exploración robótica en los siglos venideros». Nuestros descendientes podrán comprobar, antes o después, si realmente es posible llegar hasta allí.

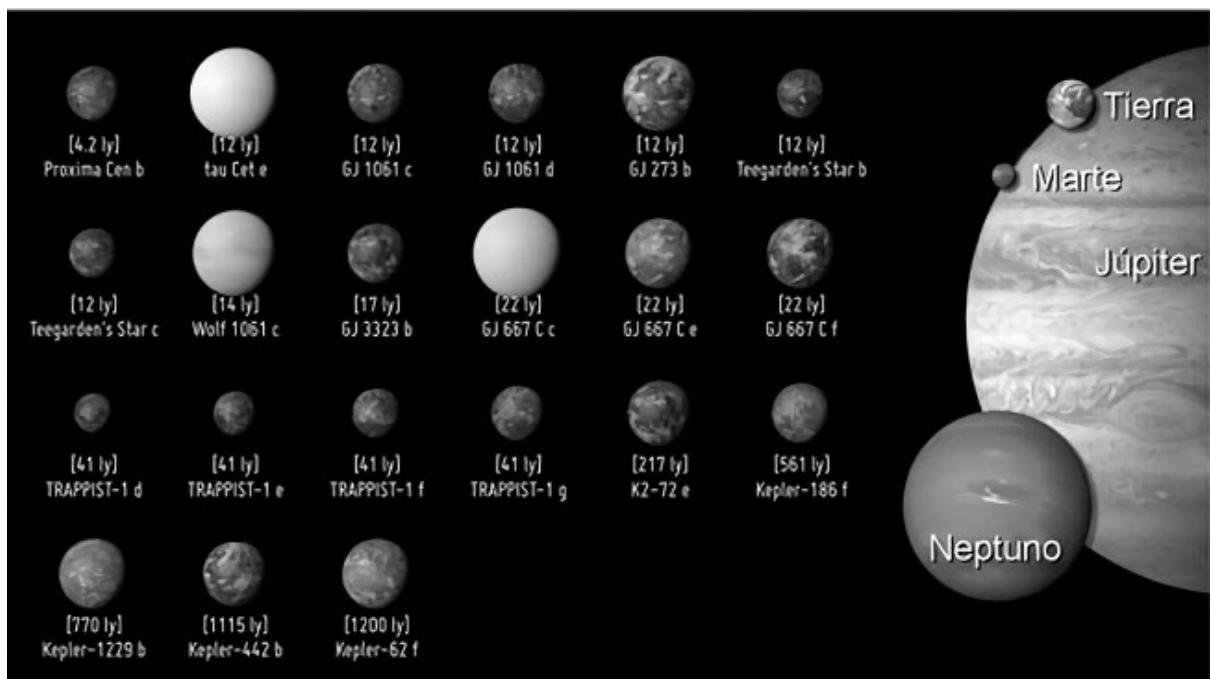
Para la detección de Proxima b se utilizó el método de la velocidad radial, trabajando con dos instrumentos situados en sendos telescopios del ESO en

Chile. Como resultado de tales medidas se determinó que su masa mínima es de 1,3 veces la de la Tierra y que orbita Proxima Centauri a una distancia de sólo 0,05 ua, es decir, casi 8 veces más cerca que Mercurio del Sol. La combinación de la baja luminosidad de su estrella con una distancia tan pequeña al planeta hace que éste se encuentre en la banda de habitabilidad. Proxima b presenta una rotación síncrona, por lo que un día y un año duran lo mismo allí, en concreto 11,2 días terrestres. Por tanto, este planeta siempre muestra el mismo lado a su estrella: ése estará constantemente iluminado, mientras que el otro será oscuro y frío. Pero donde termina la luz y comienza la sombra hay una franja (llamada en astronomía «terminador») siempre en crespúsculo y con temperatura moderada, que podría ser acogedora para la vida. No obstante, aún se desconoce si el planeta realmente tiene atmósfera y si posee agua líquida en su superficie, algo en lo que el método de tránsitos no puede ayudar porque su plano orbital no está alineado con nosotros. Por otra parte, la gran actividad y flujo magnético de Proxima Centauri está haciendo llegar al planeta mucha radiación de alta energía, con una intensidad en rayos X que se ha estimado en cuatrocientas veces mayor a la que la Tierra recibe del Sol. Y esto probablemente sea incompatible con el mantenimiento allí de alguna forma de vida, a no ser que el planeta posea un campo magnético protector. Tal actividad también afectaría al planeta candidato Proxima c, en caso de confirmarse su existencia en ese mismo sistema. Por tanto, si tenemos vecinos fuera del Sistema Solar, quizá no vivan tan cerca.

Otro de los descubrimientos más impactantes en el campo de los exoplanetas habitables fue publicado en *Nature* el 22 de febrero de 2017: la enana roja TRAPPIST-1, con una masa equivalente a sólo el 9 % del Sol y situada a unos 39 años luz de nosotros, contiene un sistema planetario formado por al menos 7 planetas. Sus órbitas están muy comprimidas y más cerca de su estrella que Mercurio del Sol, todos tienen un tamaño similar a la Tierra, y los últimos estudios indican que son rocosos. Pero este sistema nos reservaba algo aún más interesante: sus tres planetas centrales (TRAPPIST-1e, TRAPPIST-1f y TRAPPIST-1g) se encuentran en la zona de habitabilidad y reciben una energía equivalente a la que llega desde el Sol a Marte, por lo que podrían contener océanos de agua líquida en su superficie. De hecho, se estima que el 5 % de la masa de TRAPPIST-1f y TRAPPIST-1g podría ser agua en estado líquido, lo que proporcionalmente supone 250 veces más que la contenida en la Tierra. Imaginémoslo. A partir de una estimación como ésa es fácil llegar a pensar que ambos cuerpos podrían estar habitados por algún tipo de vida, pero sobre ello evidentemente no hay ninguna prueba. Al comienzo de este capítulo nos decía el Principito que el quinto planeta era muy curioso: en torno a TRAPPIST-1, el sexto también.

Con todo, el hallazgo y caracterización de este sistema planetario supuso un ejemplo del nivel de refinamiento al que se puede llegar empleando el

método de variación en el tiempo de tránsito. Y fue posible gracias a la colaboración entre el telescopio belga que da nombre a la estrella (como comentábamos anteriormente), el *VLT* y los telescopios espaciales *Spitzer* y *Kepler*. A día de hoy el sistema de TRAPPIST-1, que precisamente está situado en la constelación de Acuario (el portador del agua), sigue siendo uno de los que más planetas extrasolares nos han mostrado y también el único que posee tres en la zona de habitabilidad. Como el lector puede imaginar, actualmente el *Hubble* y



Representación artística de algunos de los exoplanetas de tipo terrestre y potencialmente habitables detectados hasta comienzos de 2020. Todos ellos son rocosos, tienen un diámetro de entre 0,5 y 1,5 veces el terrestre, masas entre 0,1 y 5 veces la de nuestro planeta, y se encuentran en la zona de habitabilidad en torno a su estrella correspondiente. Se indica la distancia en años luz (*light years*, ly) a nosotros. Por comparación se muestran, a la misma escala, los tamaños de la Tierra y otros tres planetas del Sistema Solar. Figura adaptada por el autor a partir de la elaborada por el Planetary Habitability Laboratory de la Universidad de Puerto Rico en Arecibo. Otros telescopios están analizando las atmósferas de estos planetas, aparentemente compactas y no enriquecidas en hidrógeno molecular (como suele ocurrir en los gigantes de gas). A esta investigación, que también es fundamental para la habitabilidad planetaria, contribuirá activamente el *JWST* cuando esté operativo. Mucho se seguirá escribiendo en el futuro sobre este sistema solar en miniatura.

Mientras tanto, sentémonos por un momento frente a la gran pantalla. La película *Interstellar*, dirigida por Christopher Nolan en 2014, se ha convertido desde su estreno en una referencia para la ciencia ficción actual. Tras mostrar durante su primera parte un planeta Tierra seco y exhausto como consecuencia del cambio climático, una misión tripulada despegó en busca de otros mundos donde la humanidad pueda desarrollarse en el futuro. Y se va realmente lejos para intentar encontrarlos: a otra galaxia, gracias a que en la ficción es posible viajar a través de los agujeros de gusano... sobre todo si el

Premio Nobel Kip Thorne ha asesorado a los guionistas. Independientemente de las controvertidas cuestiones sobre física teórica subyacentes, que han sido y serán comentadas en muchos cine-fórum científicos, lo que en nuestro contexto resulta más interesante es que los exploradores, dirigidos por el piloto Joseph Cooper, llegan a un sistema que contiene tres planetas extrasolares (y extragalácticos): uno que aparentemente estaría situado en la banda de habitabilidad y presenta un inmenso océano de agua líquida superficial, otro congelado que posee una atmósfera de amoníaco, y un tercero desértico cuya atmósfera curiosamente sí es respirable por los astronautas. Con todas las salvedades que requiere el cine, es una representación sugerente sobre la variedad de escenarios que podríamos encontrarnos en torno a alguna estrella afortunada. Pero, aun así, el sistema planetario de TRAPPIST-1 es aún más prometedor. La realidad vuelve a superar a la ficción.

Otro exoplaneta rocoso y habitable que también se está analizando en detalle desde que se publicó su detección a finales de 2017 es Ross 128 b. Orbita una enana roja a sólo 11 años luz de la Tierra, por lo que hasta el momento es el tercer planeta conocido más cercano al Sistema Solar. Recibe de Ross 128 un 38 % más de radiación que la Tierra del Sol, y esta estrella resulta prometedora porque su actividad es mucho menor que la de Proxima b o TRAPPIST-1, al no haberse detectado en ella grandes fulguraciones de radiación. El planeta fue descubierto utilizando el método de la velocidad radial, y su masa es al menos 1,3 veces superior a la de la Tierra. Sin embargo, no produce tránsitos por delante de Ross 128 y no disponemos de información sobre la atmósfera que pudiera tener.

Una situación análoga, de un exoplaneta habitable que orbita una enana roja muy tranquila y cercana a nosotros, es la disfrutada por Teegarden b. Se descubrió en junio de 2019 desde el Observatorio de Calar Alto, en Almería, como parte de un sistema con al menos dos planetas, en torno a una estrella situada a 12 años luz del Sol, en la constelación de Aries. Orbita unas 15 veces más cerca de Teegarden que Mercurio del Sol, por lo que su período es de sólo 4,9 días. Se trata de un planeta rocoso con una masa mínima cercana a la de la Tierra y un volumen también parecido al de nuestro planeta, por lo que sus densidades son similares y se ha propuesto que podría incluso tener una estructura interna equivalente. De hecho, en el *Índice de Similitud con la Tierra* (*Earth Similarity Index, ESI*), que algunos autores han propuesto para valorar entre 0 y 1 cuánto se nos parece un exoplaneta (considerando su tamaño, densidad, velocidad de escape y temperatura superficial), Teegarden b resulta hasta el momento el más similar, con un valor de 0,95. Este índice no proporciona en sí mismo una medida cuantitativa de la habitabilidad del exoplaneta, pero cuanto mayor sea su valor más adecuado podría ser para mantener en él una vida similar a la que conocemos. De hecho, casi todos los

planetas que hemos mencionado en este apartado tienen valores de *ESI* mayores de 0,85.

Por su parte, el primer planeta rocoso y situado en la zona habitable en el cual se ha confirmado la presencia de una atmósfera con vapor de agua es K2-18b, una supertierra con masa 8,6 veces mayor que la terrestre en torno a una enana roja localizada a 124 años luz de nosotros, en la constelación de Leo. Tras combinar los datos obtenidos por *Kepler*, *Spitzer* y *Hubble*, en septiembre de 2019 se comunicó que éste es probablemente un mundo oceánico en el que podría estar produciéndose un ciclo hidrológico similar al que sostiene nuestra biosfera. Sigamos muy atentos a lo que se publique sobre este planeta durante los próximos años.

A comienzos de 2020, el equipo del telescopio espacial *TESS* comunicó la detección de un sistema formado por tres exoplanetas que orbitan la estrella TOI 700, una enana roja con el 40 % del tamaño del Sol y situada a 101 años luz, en la constelación de Dorado. Su planeta interior (TOI 700 b) y el exterior (TOI 700 d) son rocosos y de tamaño similar a la Tierra, mientras que TOI 700 c es gaseoso y tiene un tamaño 2,6 veces mayor que el terrestre. Entre ellos el más prometedor es TOI 700 d, sólo un 20 % más voluminoso que la Tierra y que orbita su estrella cada 37 días mostrando rotación síncrona. Recibe de su estrella un 86 % de la energía que nos llega a nosotros del Sol, por lo que la temperatura superficial del planeta es compatible con la existencia de agua líquida. Así, TOI 700 d es el primer planeta habitable descubierto por *TESS*. Además, en casi un año de observación no se han detectado fulguraciones ni una gran actividad en la estrella TOI 700, por lo que en ese sentido no parece comprometida la habitabilidad del planeta. Una vez descubierto por *TESS* utilizando el método de tránsito, las medidas del tamaño de TOI 700 d y su posición dentro de la banda de habitabilidad se refinaron utilizando el telescopio espacial *Spitzer*, en lo que supuso una exitosa despedida de este último instrumento cuando estaba a punto de terminar su vida útil.

Desde la detección de este planeta habitable se han desarrollado para él, utilizando todos los datos disponibles, hasta veinte modelos climáticos, de dinámica y composición atmosférica, contemplando incluso opciones alternativas para su superficie. Con ellos se van acotando las características que puede poseer TOI 700 d, y además se usarán como guía para las observaciones futuras que se realicen en él. Uno de estos modelos computacionales, por ejemplo, considera condiciones similares a las que poseía Marte hace unos 3800 Ma: una atmósfera dominada por el dióxido de carbono y parte de la superficie del planeta cubierta por un gran océano. Así, cuando se hayan podido obtener datos espectrales reales de la atmósfera de este planeta, habrá que comprobar si son compatibles con un mundo tan propicio para la aparición de la vida como este modelizado. La investigación

interdisciplinar que ya se realiza sobre TOI 700 d ejemplifica muy bien cuánto ha avanzado el campo de los exoplanetas en relación con la búsqueda de vida, y cómo se plantea el futuro a corto y medio plazo en este fascinante ámbito de la astrobiología.

¿SEÑALES DE ACTIVIDAD BIOLÓGICA EN ALGÚN EXOPLANETA?

Uno de los primeros relatos de ciencia ficción conocidos, además de los que comentamos en el capítulo 7, es un cuento filosófico publicado en 1752 por François-Marie Arouet, más conocido por su pseudónimo: Voltaire. Se titula *Micromegas*, y precisamente en su primera frase ya aparece un planeta extrasolar, que además está habitado por seres inteligentes. Así comienza: «Había en uno de los planetas que giran en torno de la estrella llamada Sirio un mozo de mucho talento, a quien tuve la honra de conocer en el último viaje que hizo a nuestro mezquino hormiguero. Se llamaba Micromegas, nombre que cae perfectamente a todo lo grande, y tenía ocho leguas de alto, quiero decir veinticuatro mil pasos geométricos de cinco pies de rey». También es interesante el periplo que el protagonista, con sus aproximadamente 40 km de altura, realiza poco después: «Tras muchos viajes llegó un día Micromegas al globo de Saturno, y aunque estaba acostumbrado a ver cosas nuevas todavía le hizo detenerse, confuso, la pequeñez de aquel planeta y de sus moradores; y no pudo evitar soltar esa sonrisa de superioridad que a veces los más cuerdos no pueden contener. Es verdad que Saturno es sólo novecientas veces más grande que la Tierra, y los habitadores del país son enanos de unas dos mil varas, con corta diferencia, de estatura».

El caso es que Micromegas y un filósofo originario de Saturno entablan amistad y deciden continuar el viaje juntos. Al llegar al entorno de Marte observan sus dos satélites... y esto es muy sorprendente porque el relato está escrito más de un siglo antes de que, en 1877, Fobos y Deimos fueran descubiertos por Asaph Hall: «Al salir de Júpiter, atravesaron un espacio de cerca de cien millones de leguas y pasaron al costado del planeta Marte, el cual, como todos saben, es cinco veces más pequeño que nuestro globo; y vieron dos lunas que sirven a este planeta, y que no han podido descubrir nuestros astrónomos». En honor a este ejemplo tan claro de cómo la ficción puede adelantarse a la ciencia, se puso el nombre de Voltaire a uno de los mayores cráteres de impacto visibles en Deimos. Volviendo al relato, finalmente Micromegas y el filósofo de Saturno llegan a la Tierra y aquí

nos... Pero no, no continuamos: invitamos a los lectores a que disfruten por sí mismos de esta pequeña joya de Voltaire.

Utilizando las herramientas de la ciencia hemos llegado muy lejos en este campo, como se ha mostrado a lo largo del presente capítulo. Pero descubrir vida en un exoplaneta resulta mucho más difícil que hacerlo con la pluma y la imaginación de un gran escritor. Entre otras cosas porque, en el mejor de los casos, quien podría vivir allí son microorganismos y no *Micromegas*. Así que a día de hoy no hay ninguna evidencia, ni sombra de ella, sobre la presencia de vida en algún exoplaneta. Pero la búsqueda ya ha comenzado.

En la investigación de los planetas habitables rocosos más prometedores, telescopios como *JWST* y *Ariel* podrán ser especialmente informativos. Como resultado de los análisis espectroscópicos que realicen, la eventual detección de oxígeno molecular a concentraciones suficientemente altas en alguna de las atmósferas exoplanetarias dispararía las alarmas acerca de su posible origen biológico, pues podría proceder de procesos fotosintéticos similares a los que realizan en nuestro planeta las cianobacterias, las algas verdes o las plantas. Pero incluso en el caso de detectar una señal en el infrarrojo que corresponda inequívocamente al O₂ habrá que escribir los titulares con cautela, porque el oxígeno molecular también puede tener un origen meramente químico, por fotolisis del agua (favorecida en el caso de planetas con atmósferas ricas en vapor de agua que reciban mucha radiación ultravioleta de su estrella) o por otros procesos. Es decir, esta molécula podría existir en la atmósfera de un planeta estéril. Recordemos las dudas actualmente planteadas sobre las fluctuaciones del oxígeno molecular en la tenue atmósfera de nuestro cercano Marte.

Por otra parte, si al analizar los exoplanetas habitables centramos nuestra búsqueda únicamente en el O₂, incluso ampliéndola al ozono (O₃) que se puede formar a partir de este gas, podríamos pasar por alto entornos en los que la evolución de la vida aún no haya dado (o nunca vaya a dar) lugar a la fotosíntesis oxigénica. Ése era el caso de nuestro planeta durante los primeros 1000 Ma de su historia biológica. Imaginemos la Tierra hace por ejemplo 3000 Ma: sus océanos probablemente estaban ya llenos de una vida microbiana muy variada, pero estos seres vivos no habían producido ningún gas que modificara perceptiblemente la composición atmosférica. Por tanto, viendo nuestro planeta desde fuera y analizando espectroscópicamente su atmósfera, en aquella época la Tierra aparentemente no tendría vida: sería un planeta rocoso, situado en la banda de habitabilidad en torno al Sol y con agua líquida superficial, por lo que se consideraría habitable... pero no habitado. Merece la pena pensar sobre este tema, que suele surgir en las conversaciones entre bioquímicos y astrofísicos en el ámbito de la astrobiología.

De hecho, ha de tenerse en cuenta que la fotosíntesis oxigénica es un metabolismo muy complejo a nivel molecular, y nada en la bioquímica que

conocemos indica que deba producirse necesariamente a partir de otros posibles orígenes de la vida, totalmente independientes del nuestro y ocurridos a decenas o miles de años luz de la Tierra. Este mismo argumento también debe considerarse cuando lo que se propone es buscar señales de clorofila como indicador de vida en exoplanetas: el pigmento tan familiar para nosotros (hasta el punto de asociar habitualmente la vida con el color verde) es en efecto un buen biomarcador, porque se trata de una molécula que sólo producen algunos seres vivos y no puede originarse químicamente en un planeta... salvo que en él haya laboratorios de química orgánica, y aun así su síntesis sería muy difícil. Pero (sin entrar en detalles moleculares) únicamente los organismos fotosintéticos tienen clorofila, por lo que podría haber miles de mundos vivos en los que no exista este pigmento. La vida es mucho más que «las zonas verdes» que pudiéramos imaginar o detectar en la superficie de un planeta.



Tres carteles divulgativos sobre la exploración de exoplanetas, dedicados a 51 Pegasi b, Kepler-16b y TRAPPIST-1e. Imágenes elaboradas por el Exoplanet Exploration Program de la NASA, cortesía de NASA/JPL-Caltech.

Debido a estas limitaciones asociadas al oxígeno y a la clorofila, es necesario intentar detectar también otras moléculas que pudieran constituir biofirmas en los exoplanetas candidatos. Y así se hará con *JWST*, *Ariel* y otros telescopios. Aunque, una vez más, tendremos que ser precavidos si se detectan moléculas como el metano o compuestos con azufre [por ejemplo, sulfuro de hidrógeno (H_2S) o dióxido de azufre (SO_2)] en sus atmósferas, ya que podrían estar originadas tanto por microorganismos como por actividad volcánica en un planeta sin vida. De hecho actualmente se piensa que, en el ámbito de los exoplanetas, en vez de otorgar carácter de biomarcador a una molécula concreta, lo que realmente podría revelar el descubrimiento de una biosfera

global es que la atmósfera planetaria no esté en equilibrio sino que haya gases apareciendo y desapareciendo periódicamente de ella: esto indicaría que existen procesos activos que la modifican, y en el mejor de los casos podrían ser biológicos.

Para terminar, pensemos en otros escenarios. Si el subsuelo de un exoplaneta estuviera lleno de vida, como ocurre en el entorno de nuestro río Tinto, probablemente no habría nada en su superficie ni en la atmósfera que nos diera pistas sobre ello. Por otra parte, en el caso de algún mundo helado similar a las lunas Europa o Encélado, si escondiera un gran océano bajo su superficie y la vida fuera abundante en él tampoco podría saberse haciendo un análisis espectroscópico desde distancias estelares, salvo que se produjeran enormes eyeccciones de agua líquida atravesando el hielo. Además, no olvidemos que sólo una ínfima parte de nuestra galaxia va a poder investigarse durante las próximas décadas, y que ésta es la única entre cientos de miles de millones de ellas donde será posible buscar planetas y satélites. En consecuencia, las opciones de que haya mundos habitados superarán en varios órdenes de magnitud a las derivadas de los datos obtenidos por los mejores telescopios futuros. Por muy interesantes que sean los resultados que nos ofrezca la ciencia, siempre podremos soñar más allá de ellos. Lucrecio, Kepler, Voltaire o Saint-Exupéry ya lo sabían.



Un café con... Aki Roberge



Doctora en Astrofísica. Investigadora del Laboratorio de Exoplanetas y Astrofísica Estelar en el Goddard Space Flight Center de la NASA (Greenbelt, Maryland, Estados Unidos) y miembro del equipo científico del telescopio espacial LUVOIR.

Eres astrofísica e investigas en el fascinante campo de los exoplanetas, pero también te interesan mucho otras disciplinas científicas. Por tanto, me gustaría empezar nuestra conversación haciéndote una de esas «grandes preguntas» que supera las fronteras entre las ciencias tradicionales: ¿qué es la vida? O, de forma algo más concreta, ¿cuál sería tu definición de «vida», una que permita tanto estudiarla en la Tierra como buscarla en otros mundos?

Bueno, como sabes soy una astrónoma observacional, así que tengo una mentalidad práctica y me concentro en lo que puedo ver desde distancias interestelares. Pero me gusta mucho tu pregunta, porque realmente hasta este momento nunca había tratado de acuñar una definición personal de «vida». Así que voy a intentarlo ahora mismo... Si tengo en cuenta lo que he estudiado y leído, y además lo mucho que he reflexionado sobre este tema,

creo que mi definición sería algo como «un sistema que produce un desequilibrio que no puede ser explicado por la física o la química conocidas». Una forma más simple o tal vez más clara de decirlo, aproximándome a mi campo de investigación, implicaría que si detectamos «algo extraño» cuya explicación no sea posible con los procesos físicos y químicos conocidos que ocurren en los planetas, entonces hemos de recurrir a la otra ciencia que nos queda: la biología. Habremos encontrado algún tipo de sistema biológico. Porque, en realidad, la mejor forma de plantear un tema tan complicado como éste sería: «No sabemos qué es la vida, pero esperemos reconocerla cuando la veamos».

Ésa me parece la clave, sí: ser capaces de identificar un sistema vivo cuando lo tengamos delante de nuestros ojos o de nuestros instrumentos analíticos en un robot, por distinto que resulte de la vida terrestre... y sea cual sea el lugar que estemos explorando. En ese sentido, Aki, y siguiendo con las definiciones, ¿crees que se debería replantear el concepto de «zona habitable» alrededor de una estrella, dado que además de los planetas que se encuentran a la distancia adecuada para tener agua líquida superficial existen algunas lunas heladas con capacidad para albergar vida en sus océanos subterráneos?

En mi opinión creo que no debe cambiarse esta definición, Carlos. La «zona habitable estelar» es un concepto diseñado específicamente como una herramienta de observación para ayudar a los astrónomos a priorizar dónde han de comenzar a buscar la vida. Dicho de forma gráfica, hacia dónde deben enfocar sus telescopios en primer lugar. Porque hay muchísimas «inmobiliarias de exoplanetas» por ahí, en la inmensidad del Universo, y hemos de decidir «dónde compramos». La zona habitable estelar no está destinada a cubrir todos los posibles entornos habitables, sin duda, sino a delimitar dónde nos parece que podemos tener las mejores probabilidades de encontrar signos de vida en mundos alrededor de otras estrellas.

Las lunas heladas oceánicas del Sistema Solar son realmente ambientes habitables, bajo la suposición simple de que lo principal que se necesita para la vida es agua líquida y una fuente de energía. Pero ahora mismo no podemos saber si esos satélites tan interesantes están habitados, a pesar de que se encuentran muy cerca de nosotros, en torno a Júpiter y Saturno. Por tanto, pensando en otros sistemas planetarios, a distancias interestelares de decenas, miles o millones de años luz... la probabilidad de que pudiéramos determinar si las lunas que habrá en ellos son habitables, o incluso están habitadas, parece muy baja.

Sin duda... ¿Y qué estamos buscando, en realidad?

La búsqueda de vida en mundos que giran alrededor de otras estrellas consiste realmente en tratar de detectar biosferas globales, sistemas interconectados tan masivos que estén cambiando toda la atmósfera y la superficie del planeta de una forma realmente espectacular. El único mundo en el Sistema Solar que satisface este requisito es la propia Tierra, un planeta que fue modificado para siempre cuando apareció la vida sobre él. Y ésa es la razón por la que los astrónomos estamos tan concentrados en buscar y caracterizar «planetas terrestres»: aquellos que sean similares a la Tierra.

¿Eres optimista sobre la posibilidad de encontrar esos «signos de vida global» en algún mundo perteneciente a otro sistema planetario, utilizando los telescopios terrestres y espaciales actuales, y los que estarán operativos próximamente?

Sí, claramente lo soy. Como mencionaba antes, hay un montón de exoplanetas ahí afuera. Sabemos que los pequeños planetas rocosos similares al nuestro son abundantes, y muchos de ellos orbitan en las zonas habitables de sus estrellas. Por otra parte, no hemos de olvidar que los ingredientes para formar seres vivos en la Tierra (los requisitos físicos y los elementos químicos que permitieron dar el salto a la biología) son comunes en el Universo. Y además hay numerosas pruebas de que la vida en este planeta parece haber surgido muy temprano, sobrevivió a muchos cambios e incluso a extinciones globales, y actualmente prospera en una amplia gama de entornos físico-químicos.

Si tenemos todo esto en cuenta, y dado que el desarrollo tecnológico acumulado hasta este momento nos ha permitido diseñar el *hardware* adecuado para encontrar exoplanetas similares a la Tierra, así como para buscar en ellos los signos de vida que estamos comentando, probablemente los telescopios necesarios se podrán construir durante las próximas décadas.

Vamos a hablar sobre uno de ellos. Entre otros proyectos en los que estás directamente implicada, eres miembro del Equipo de Definición de Ciencia y Tecnología del telescopio espacial Large UV/Optical/IR Surveyor (LUVOIR) propuesto a la NASA, que si es aceptado se lanzará a finales de la década de 2030. ¿Puedes resumir los principales objetivos de este gran observatorio de longitud de onda múltiple, en relación con la búsqueda de vida extraterrestre?

Efectivamente, ésa es en la actualidad mi principal ocupación. En primer lugar quiero subrayar que, a día de hoy, *LUVOIR* es *un concepto* para un futuro telescopio espacial. Se trata de uno de los varios candidatos para futuras misiones espaciales de alto presupuesto que la NASA podría llevar a cabo a medio plazo.

El principal objetivo científico de *LUVOIR* es encontrar y estudiar una gran cantidad y variedad de exoplanetas rocosos en las zonas habitables de las estrellas cercanas, establecer qué fracción de ellos son realmente similares a la Tierra, y analizarlos con toda la tecnología disponible en busca de signos de vida. Podremos ver directamente tales planetas, a pesar de su pequeño tamaño, usando un instrumento llamado coronógrafo: gracias a él se logra bloquear el enorme resplandor de las estrellas en torno a las que orbitan los planetas, y así resulta posible detectar la débil luz reflejada por ellos. Analizaremos esa radiación que proviene de los planetas en un amplio rango de longitudes de onda, del ultravioleta al infrarrojo pasando por el visible, y con ello podremos detectar la presencia de diferentes moléculas en sus atmósferas. Si todo va según lo previsto, sería posible identificar biofirmas, entendidas en este contexto como gases que sólo podrían estar allí (o sólo en esa proporción) en el caso de que dicho planeta tenga vida. Un ejemplo clásico es el oxígeno molecular en nuestra atmósfera, que como sabemos fue producido por los seres vivos. Pero pensando en exoplanetas hay otras moléculas candidatas.

Este objetivo general se plasmó en varias opciones de diseño para el observatorio propuesto. La idea es que *LUVOIR* sea un gran telescopio espacial que nos permita encontrar una muy amplia muestra de candidatos a exoplanetas *habitables*. Esto aumentaría nuestras posibilidades de hallar exoplanetas *habitados*, que en el mejor de los casos serían una proporción muy pequeña de los habitables. Y si, por el contrario, no encontráramos mundos similares a la Tierra en torno a las estrellas estudiadas, también aprenderíamos algo importante: que nuestro hogar es un planeta muy raro desde el punto de vista astronómico.

Teniendo en cuenta que hasta este momento se han detectado y confirmado más de 4100 planetas extrasolares, ¿en cuál o cuáles de los ya conocidos se deberían centrar, en tu opinión, los esfuerzos científicos para tratar de encontrar evidencias espectroscópicas de vida?

Bueno, en realidad creo que el mejor exoplaneta para encontrar vida en él... aún no ha sido descubierto. Los planetas extrasolares rocosos y situados en zonas habitables que se conocen hasta ahora orbitan estrellas de baja masa (como es el caso de Proxima Centauri), muy diferentes al Sol. Y realmente no sabemos si ese tipo de estrellas son adecuadas o no para acoger en torno a ellas algún planeta con vida. La única certeza que tenemos, mirando a nuestro alrededor, es que una biosfera global sí puede surgir en un planeta rocoso situado en la zona habitable de una estrella similar al Sol. Por tanto, necesitamos encontrar más exoplanetas parecidos a la Tierra para aumentar nuestras posibilidades de descubrir y reconocer la vida. Afortunadamente

sabemos que los exoplanetas rocosos son bastante comunes, así que por mi parte estoy segura de que ahí fuera hay mundos adecuados para la vida. Algunos se podrían encontrar durante las próximas décadas, y ojalá *LUVOIR* detecte muchos.

El planeta extrasolar más cercano a nosotros, Próxima b, está a «sólo» 4,2 años luz de distancia... y a pesar de la gran actividad de su estrella se considera potencialmente habitable. Además, otros sistemas planetarios muy prometedores se han encontrado a unos 13 años luz de la Tierra. Dado que en realidad esas distancias son enormes en comparación con las dimensiones de nuestro vecindario cósmico, el Sistema Solar, ¿consideras factible visitarlos con misiones robóticas en el futuro, o tal idea es sólo ciencia ficción?

Probablemente, aunque fuera posible faltaría tanto tiempo para lograrlo que, a día de hoy, podemos considerarlo como mera ciencia ficción. El problema es que no disponemos de la tecnología necesaria, y ni siquiera somos capaces de diseñarla o intuirla en la actualidad. Pero no va en contra de las leyes de la física viajar a otra estrella, así que en el fondo creo que los humanos lo lograrán hacer algún día con sus misiones robóticas.

¡Te veo optimista, Aki! En cualquier caso, ¿crees que realmente valdría la pena llegar a algunos de esos planetas extrasolares o, en vez de dedicar mucho esfuerzo y financiación a ello, la comunidad científica y las agencias espaciales deberían centrarse en la búsqueda in situ de vida en los planetas y satélites que ya estamos estudiando dentro del Sistema Solar?

Yo diría que realmente no podemos plantearnos una elección como ésa. De manera realista, enviar orbitadores o *landers* a un planeta extrasolar no es factible en la actualidad, ni lo será en el futuro cercano. Si hacemos unas cuentas aproximadas, con la tecnología más rápida disponible hoy en día se requerirían decenas de miles de años para llegar a la estrella más cercana al Sol. Y ciertamente eso es demasiado tiempo. Así que, si queremos mandar allí nuestros robots necesitamos tener una idea tecnológica muy buena y novedosa que permitiera reducir drásticamente el tiempo del viaje... para lo que hasta ahora no se ha planteado ninguna opción realista.

Por tanto, estoy convencida de que primero debemos seguir explorando a fondo los mundos habitables del Sistema Solar, los planetas o satélites que nuestras naves pueden alcanzar en un viaje de meses o de pocos años. Para descubrir señales de vida en exoplanetas, en vez de mandar robots allí necesitamos centrarnos en técnicas de detección remota, como las que podrían emplearse con el concepto de misión *LUVOIR* del que hemos estado hablando.

Para terminar esta sugerente charla, que en poco tiempo nos ha llevado hasta lugares muy, muy lejanos... me gustaría preguntarte tu opinión sobre los programas como SETI, que tratan de encontrar inteligencias extraterrestres mediante el análisis de las señales electromagnéticas que eventualmente podrían enviarnos.

Yo los llamaría programas de alto riesgo y alto beneficio. Me parece apropiado que una parte de la financiación y del trabajo de los científicos e ingenieros se dedique a ello. Sin embargo, yo seguiría centrando la mayor proporción de nuestros esfuerzos en propuestas de observación y en líneas experimentales que puedan tener una mayor probabilidad de éxito. Hemos de recordar que, en la Tierra, las «formas de vida tecnológicas» únicamente aparecieron como resultado de la evolución de una especie (entre los millones que hay) y sólo han estado presentes sobre el planeta durante una fracción de tiempo extremadamente corta. Además, es importante tener en cuenta que, observando la Tierra desde fuera, los signos más prominentes de la existencia de actividad biológica provienen actualmente de las plantas y las bacterias, no de los humanos. Puede que nosotros tengamos el *hardware*, pero ellas tienen los *números*.



13. ¿Otras vidas inteligentes?



—¿Estamos solos en el Universo? —preguntó ella.
—Sí —dijo el Oráculo.
—Entonces, ¿no hay otra vida ahí fuera?
—La hay. Ellos también están solos.

James Miller,
A small fiction

Esta breve conversación es inquietante, pero puede que refleje una gran verdad. Porque quizás no estemos solos, sino lejos. Es posible que eso sea lo que nos mantiene aislados. O tal vez nuestra especie haya aparecido y se haya desarrollado tecnológicamente demasiado tarde (o demasiado pronto), en comparación con los ritmos seguidos por otras inteligencias extraterrestres con las que ya (o todavía) no tenemos opción de comunicarnos. En cualquier caso, los humanos seguiremos intentándolo.

EN BUSCA DE OTRAS INTELIGENCIAS

Si tecleamos en internet «vida extraterrestre» aparecerán todo tipo de imágenes de humanoides supuestamente inteligentes que viven en lugares exóticos, o que han llegado aquí para conocernos... y probablemente para invadirnos, como comentábamos en el capítulo dedicado a Marte. Sin duda, el campo de la búsqueda de otras inteligencias está más influido por la ciencia ficción que el resto de los tratados a lo largo de este libro (lo que siempre resulta sugerente) y por tanto demanda datos científicos claros que puedan ser confrontados con las creencias en hombrecillos verdes o grises, pulpos extraterrestres y ovnis. Siempre hemos de ser escépticos y utilizar nuestro pensamiento crítico, y tal actitud es aún más recomendable en un tema como éste. En cualquier caso, aunque desde la ciencia sabemos que es mucho más improbable encontrar otras vidas inteligentes que otras vidas, sin adjetivos, en la cultura popular ambas posibilidades se consideran equivalentes. Muchos piensan, incluso, que la búsqueda de vida sólo habrá tenido sentido si se detectan otras inteligencias con las cuales podamos comunicarnos. Está claro

que los miembros de la única especie de humanos que actualmente habitamos este planeta nos sentimos muy solos en el Universo.

Un buen número de científicos y filósofos han reflexionado sobre este tema. Pero no sólo ellos. Como ejemplo, en 2016 se encontró un ensayo de once páginas manuscritas que trataba sobre la vida en el Universo, y lo más curioso es que ese texto había salido de la pluma de Winston Churchill. Está fechado en 1939, poco antes del estallido de la segunda guerra mundial y cuando faltaba un año para que fuera elegido primer ministro del Reino Unido. En ese ambiente prebélico, y claramente influido por la locución radiofónica de *La guerra de los mundos* (como dijimos, realizada por Orson Welles en 1938), entre otras ideas interesantes Churchill escribe lo siguiente: «Con cientos de miles de nebulosas, cada una de ellas con miles de millones de soles, es muy probable que muchísimos de ellos posean planetas cuyas circunstancias no sean incompatibles con la vida. (...) No estoy tan impresionado por el éxito de nuestra civilización como para pensar que somos el único punto de este inmenso Universo que contiene criaturas vivas y pensantes».

Criaturas vivas y pensantes. Eso es lo que aparentemente la humanidad necesita encontrar para dar sentido a su propia existencia en el Cosmos. Resulta evidente que estamos rodeados de una amplia y variada biodiversidad, en la que algunas especies de animales muestran habilidades cognitivas que podríamos identificar con distintos grados de inteligencia, entendida como la capacidad para adquirir, recordar y aplicar conocimiento o aprendizajes, e incluso para usar herramientas de forma premeditada. Entre tales especies se han estudiado durante décadas insectos sociales como hormigas y abejas, pulpos, cuervos, loros, delfines, perros, elefantes... y por supuesto los primates no humanos más cercanos a nosotros: los chimpancés. Con ello ha sido posible demostrar que algunos utilizan sistemas de comunicación más o menos elaborados, pero ninguno ha desarrollado un auténtico lenguaje. De hecho, somos incapaces de comunicarnos de forma compleja con ellos. Por eso, nuestra inquieta mente parece necesitar el contacto con otros seres equivalentes a nosotros, con pensamiento abstracto y lenguaje estructurado: criaturas racionales que utilicen símbolos y transmitan emociones. Que perciban la belleza. Que construyan metáforas. Espejos en los que mirarnos, aunque la imagen reflejada sea muy diferente de la nuestra. Resulta complicado definir la inteligencia que nos caracteriza como especie, pero suponemos que reconoceríamos una similar si nos encontráramos con ella: en ese caso podríamos (y querríamos) comunicarnos con dichos seres. Lo hemos soñado e imaginado, y dado que nuestra capacidad de autosugestión es asombrosa algunos incluso han creído vivirlo. Además, la literatura y el cine de ciencia ficción nos lo han propuesto una y otra vez... y seguirán haciéndolo.

Pero ¿parece probable que nos encontremos con tales interlocutores? Como hemos ido comentando, en realidad ni nuestra galaxia ni el Sol son especiales, y la Tierra no es más que un planeta rocoso cuya órbita se estabilizó dentro de la banda de habitabilidad en torno a su estrella. Uno de los miles de millones de cuerpos similares que sin duda habrá en el Universo. Por tanto, a este punto azul pálido le sería aplicable el llamado «principio de mediocridad» según el cual no habitamos un lugar excepcional, ni siquiera especial, y estadísticamente es muy probable que existan «otras tierras» parecidas. Entonces, si la aparición de la vida fuera una consecuencia natural (o incluso necesaria) del progresivo aumento de la complejidad química, cosa que desconocemos, los seres vivos existirían en muchísimos planetas o satélites. En ese caso, la evolución de tales organismos podría haber originado otras especies inteligentes similares a la nuestra, y probablemente la mayoría de ellas habrían desarrollado tecnologías de comunicación. Pero, entonces, ¿cómo puede ser que no hayamos tenido noticias suyas?

¿DÓNDE ESTÁN TODOS?

Eso es lo que se planteó el físico Enrico Fermi en 1950, durante una conversación con sus colegas. Desde entonces se conoce como «paradoja de Fermi» la constatación de que aparentemente podrían existir muchas civilizaciones avanzadas, con tecnología suficiente para comunicarse con nosotros, pero nunca hemos tenido el más mínimo indicio sobre ello. Se han propuesto posibles soluciones para esta paradoja, que son más o menos imaginativas y plantean cómo tales civilizaciones podrían no haber existido realmente, o se habrían autodestruido (algo que el propio Fermi apoyaba, influido por las consecuencias que había tenido el Proyecto Manhattan, en el que trabajó), o no habrían llegado aún al grado de desarrollo suficiente para mandarnos pruebas de su existencia, o sí nos habrían enviado señales electromagnéticas en el pasado pero antes de que la humanidad fuera capaz de reconocerlas, o incluso lo estarían haciendo ahora mismo aunque de una forma que no podemos detectar ni descodificar. También podría ocurrir algo muy frustrante: que esos otros seres inteligentes no sepan de nuestra existencia, o bien que sí nos hayan localizado pero no tengan ningún interés en comunicarse con nosotros. Otra posibilidad, planteada por la investigadora en física teórica Beatriz Gato-Rivera, es la «conjetura de indetectabilidad»: las inteligencias extraterrestres camuflarían sus planetas por razones de

seguridad, evitando emitir señales que pudieran ser captadas por civilizaciones más avanzadas y potencialmente peligrosas. Hasta el momento no hay pruebas que apoyen ninguna de estas opciones, aunque constituyen interesantes hipótesis de trabajo.

Una alternativa a la existencia de muchas vidas inteligentes es la conocida como «Tierra rara» o «Tierra peculiar», que fue planteada por el paleontólogo Peter D. Ward y el astrónomo Donald Brownlee en su libro *Rare Earth. Why complex life is uncommon in the Universe*, publicado en el año 2000. Según estos autores, pueden existir numerosos planetas como el nuestro e incluso se podría haber originado vida microbiana en buena parte de ellos (es decir, en realidad la Tierra sí era mediocre al comienzo), pero su evolución hasta una especie pluricelular e inteligente es altamente improbable... salvo en aquellos lugares donde se hayan dado unas condiciones físicas, geológicas y químicas tan peculiares o raras como las que han ido sucediéndose a lo largo de la historia de la vida terrestre, repleta de eventos azarosos e impredecibles. Como decía Stephen Hawking: «Sólo somos una raza avanzada de monos en un planeta menor de una estrella promedio. Pero podemos entender el Universo y eso nos hace muy especiales». Por tanto, podría haber muchas otras vidas, aunque tal vez ninguna tenga opciones de comunicarse con nosotros.

En este contexto se enmarca la hipótesis conocida como «El Gran Filtro», propuesta por el economista Robin Hanson en 1996. Según ella, si no hemos encontrado (y no nos han visitado) otras civilizaciones extraterrestres es porque no se ha producido uno de los pasos físicos-químicos-biológicos-racionales-tecnológicos que han de sucederse para que éstas lleguen a existir. Tales etapas serían, básicamente, nueve: i) formación de la estrella y el planeta adecuados; ii) desarrollo de la química prebiótica y origen de la bioquímica; iii) aparición de la vida unicelular simple (microorganismos procarióticos); iv) origen de los eucariotas unicelulares; v) inicio de la reproducción sexual; vi) comienzo de la vida pluricelular; vii) evolución que conduzca a animales con cerebros grandes y complejos; viii) desarrollo de civilizaciones tecnológicas hasta el nivel actual de la nuestra; ix) colonización del Cosmos. Dentro de este largo periplo, se ha propuesto que la barrera más probable frente a la expansión de una vida inteligente en el Universo sería la propia autodestrucción de su civilización, lo que interrumpiría el paso de la etapa viii a la ix. Esto supone un toque de atención para la humanidad actual, que podría estar aproximándose a su gran filtro debido a las tensiones geopolíticas o a la degradación medioambiental desencadenada por el cambio climático y la contaminación. O incluso, como consecuencia de esto último y de la superpoblación, a causa de la próxima pandemia. Además, por supuesto, toda civilización está sujeta a desaparecer debido a factores externos, como

podría ser el impacto de un gran meteorito contra su planeta antes de haber desarrollado la tecnología de protección necesaria.

EL PREJUICIO DE BUSCAR VIDAS INTELIGENTES

Analicemos ahora esta cuestión desde el punto de vista biológico. Si algunos están tan obsesionados con encontrar vida inteligente fuera de la Tierra es porque suponen (erróneamente) que el origen aquí de nuestra especie, con su cerebro creativo y maravilloso, era a lo que *tendía* el proceso evolutivo. O, dicho de otra forma, que la aparición de la inteligencia era *la finalidad* con la que había surgido la vida. Pero no hay ninguna evidencia científica que apoye esta idea teleológica, tal como comentábamos al final del tercer capítulo del libro. Al igual que Nicolás Copérnico demostró que la Tierra no ocupaba el centro del Universo, Charles R. Darwin nos enseñó que el ser humano no es ni el centro de la vida ni la culminación del proceso evolutivo. Ambos hallazgos fueron revolucionarios. Ambos muy polémicos, porque suponían un duro golpe para el antropocentrismo que nos caracteriza y para una parte importante de los fundamentos de las religiones. Pero hoy tenemos claro que, del mismo modo que el Cosmos sería exactamente igual sin un planeta azul desde el cual puede ser fotografiado, la vida no necesitaba en absoluto la aparición de una especie inteligente capaz de preguntarse por ella. Somos prescindibles. Y cualquier otra inteligencia que pueda existir en el Universo también lo será.

Así, sabemos que en la Tierra podrían haberse producido trayectorias evolutivas muy diferentes de las que tuvieron lugar, que por ejemplo no hubieran originado las células eucariotas, los organismos pluricelulares, los animales, los vertebrados o los primates. Recordando la acertada metáfora del paleontólogo Stephen Jay Gould, si pudiéramos rebobinar la película de la vida a un punto del pasado remoto y volviéramos a dejarla avanzar hasta la actualidad, resulta imposible saber qué biodiversidad se originaría. Y es muy poco probable que aparecieran de nuevo los seres humanos. Como el lector puede imaginar, si esto es así en nuestro planeta, la situación se hace aún más imprevisible en otros mundos. La probabilidad de encontrar en eventuales biosferas alienígenas seres vivos similares a los que conocemos será menor cuanto más tarde hayan aparecido tales sistemas en la historia de la vida terrestre. Y sabemos que nuestra especie, inteligente y orgullosa, es una recién llegada a este planeta.

En concreto, dado el papel desempeñado por el oxígeno molecular en el inicio de la multicelularidad, se considera que el origen de la fotosíntesis oxigénica en la Tierra fue una condición necesaria para la emergencia de la inteligencia. En el fondo, debemos nuestro éxito a las cianobacterias. Si algo parecido se produjo fuera de nuestro planeta, la existencia de otras actividades fotosintéticas requeriría entornos con agua líquida superficial a la que pudiera llegar la radiación de su estrella. Por tanto, en principio sería más probable que se hayan originado otras vidas inteligentes en planetas situados en la zona de habitabilidad (equivalentes a la Tierra, Marte o varios exoplanetas ya detectados) que en mundos o lunas de hielo con océanos de agua líquida subsuperficial (similares a Europa o Encélado), salvo que en estos últimos existieran procesos químicos o geológicos que permitan conducir al interior líquido el oxígeno eventualmente producido en la superficie. En cualquier caso, ¿es posible realizar una estimación del número de lugares donde podría haberse desarrollado alguna vida inteligente?

LA ECUACIÓN DE DRAKE

Dos de los científicos que más se interesaron por las repercusiones que podría tener la paradoja de Fermi fueron el radioastrónomo Frank Drake y el astrofísico Carl Sagan. Asumiendo el principio de mediocridad de la Tierra y a la vez ese planteamiento teleológico que comentábamos, según el cual la vida *tiende* a originar una inteligencia similar a la nuestra (de lo que, insistimos, no hay ninguna prueba), Drake planteó en 1961 una ecuación para calcular el número de civilizaciones existentes en nuestra galaxia con las cuales podríamos comunicarnos. Dicho valor (N) resulta del siguiente producto de factores:

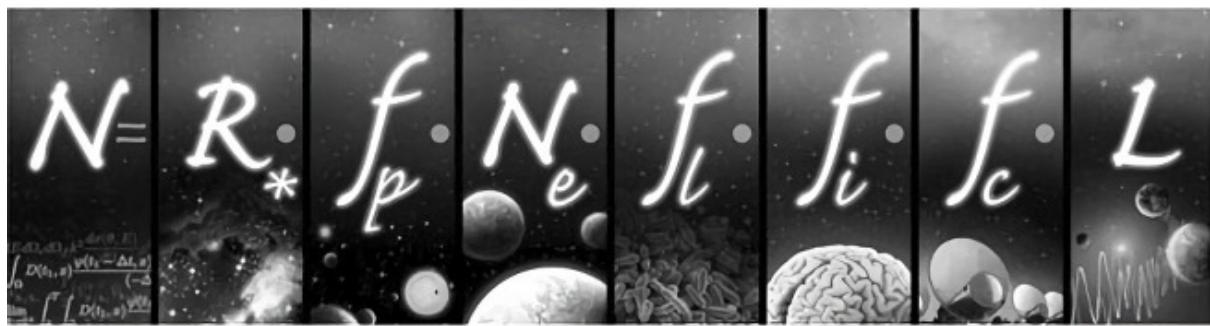
$$N = R^* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

En esta formulación clásica de la ecuación de Drake, sus siete términos son los siguientes: R^* , número medio de estrellas que se forman en la Galaxia cada año y son «adecuadas» para albergar sistemas planetarios que incluyan planetas habitables; f_p , fracción (en tanto por uno) de esas estrellas en torno a las cuales se forman sistemas planetarios; n_e , número de planetas de cada sistema que están situados en la zona de habitabilidad; f_l , fracción de planetas habitables en los que surge la vida; f_i , fracción de planetas con vida en los que

llegan a aparecer seres inteligentes; f_c , fracción de sociedades inteligentes que han desarrollado tecnologías de comunicación basadas en la radiación electromagnética y además están interesadas en establecer contacto con otras; L , duración promedio (en años) de una sociedad inteligente y con sistemas de comunicación disponibles.

Resultó muy interesante que una ecuación como ésta fuera planteada en los albores de la era espacial, ya que suponía el primer intento de cuantificar la probabilidad que tendríamos de comunicarnos con otras inteligencias extraterrestres, y trataba de identificar los parámetros más relevantes para ello. El problema, evidentemente, era (y sigue siendo) la elección del rango de valores en que puede moverse cada uno de los términos, lo que para los cuatro últimos no pasa de ser un ejercicio de especulación debido a que sólo conocemos un ejemplo de vida (que, entre otros, incluye seres inteligentes) en el Universo.

Drake y sus colaboradores fueron muy optimistas al asignar los siguientes valores mínimos a cada término: $R^* = 1$ (una estrella formada cada año); $f_p = 0,2$ (una quinta parte de las estrellas originarían sistemas planetarios); $n_e = 1$ (un planeta de cada sistema estaría en su zona de habitabilidad, lo que corresponde a la mitad de la situación actual en torno al Sol); $f_l = 1$ (aquí comienza el vuelo de la imaginación, al suponer que la vida surge en todos los planetas situados en la zona de habitabilidad); $f_i = 1$ (de nuevo, es muy aventurado pensar que cualquier tipo de vida originada llegará a desarrollar inteligencia, ya que sólo podemos hablar de lo sucedido en la Tierra); $f_c = 0,1$ (el 10 % de las vidas inteligentes han construido sistemas de comunicación y están interesadas en usarlos para contactar con otras, lo que en nuestro caso ha sido del 100 %); $L = 1000$ años (una duración que resulta imposible cuantificar, incluso en la Tierra, ya que la primera emisión de radio se realizó a comienzos del siglo xx). Con ello, resultaba $N = 1 \times 0,2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,1 \times 1000 = 20$. Es decir, en nuestra galaxia habría al menos otras 19 vidas inteligentes deseosas de comunicarse con nosotros utilizando ondas electromagnéticas. Si escogía valores aún más optimistas, sobre todo en los parámetros R^* y L , Drake llegaba hasta $N = 5 \times 10^9$: nada menos que cinco mil millones de posibles interlocutores, lo que (con los datos actuales) equivaldría a decir que una de cada sesenta estrellas de esta galaxia contiene un planeta con seres dispuestos a que les hablemos de lo nuestro. En tal caso, Fermi tendría toda la razón al preguntarse cómo puede ser que aún no hayamos sabido nada de esas inteligencias tan ubicuas.



Representación artística de la ecuación de Drake. Imagen adaptada por el autor a partir de la original realizada por el Instituto SETI.

Sin embargo, utilizando los datos obtenidos (o estimados) posteriormente, a lo largo del siglo XXI se han propuesto valores más conservadores: R^* sería el producto de las 7 estrellas que, de media, se forman anualmente en la Galaxia, multiplicado por la fracción de 0,197 de ellas que se consideran adecuadas (pues pertenecen a los tipos estelares G y K, con temperatura superficial media-baja), por lo que resulta un valor de 1,379; $f_p = 0,333$, ya que actualmente se estima que sólo un tercio de las estrellas adecuadas formarán sistemas planetarios a su alrededor; n_e es un factor controvertido y en continua revisión a medida que se van descubriendo más exoplanetas habitables, pero hoy en día lo podríamos estimar en 5 de cada 1000 planetas; en cuanto a f_l , desde 2002 se maneja una estimación (muy cuestionable, en cualquier caso) según la cual en 13 de cada 100 planetas habitables que hayan existido durante al menos 1000 años puede haberse originado la vida; f_i , tomando el único ejemplo que conocemos, se calcula dividiendo la duración de una especie con el tipo de inteligencia buscada en este contexto (los 200 000 años de *Homo sapiens*) entre la antigüedad de la vida en nuestro planeta (unos 3700 millones de años, Ma); el parámetro f_c se suele considerar (sin demasiada justificación) un 1 %, es decir, diez veces menor que lo planteado por Drake; y para L se ha calculado un valor de 420 años, como media de la duración de 60 civilizaciones humanas que en la antigüedad usaron la tecnología preindustrial disponible. De esta forma, $N = 1,379 \times 0,333 \times 0,005 \times 0,13 \times 0,000054 \times 0,01 \times 420 = 6,7 \times 10^{-8}$. Es decir, harían falta aproximadamente 15 millones de galaxias similares a la nuestra para encontrar una civilización en disposición de comunicarse con los terrícolas. Como comentamos en el capítulo anterior, el número de galaxias en el Universo observable es unas 7000 veces mayor que ése, pero en cualquier caso el uso de estos valores más realistas en cada factor de la ecuación supuso un auténtico despertar para quienes habían soñado con las optimistas previsiones de Drake. Una película reciente de ciencia ficción que plantea si los humanos somos o no la única vida inteligente en el Universo es *Ad Astra*.

(dirigida por James Gray en 2019). No desvelaremos la conclusión a la que se llega, pero la ecuación de Drake planea sobre toda esa historia.

Lógicamente, también se han propuesto valores intermedios para cada uno de los términos de esta ecuación, y quizá los más controvertidos han sido siempre los estimados para L : están sesgados por la idea que cada uno pueda tener sobre si el desarrollo tecnológico (con sus ventajas e inconvenientes) condiciona una mayor o menor duración de la sociedad en cuestión. Como vemos, en el fondo lo que la ecuación de Drake hace es dividir una gran pregunta en siete incógnitas más pequeñas pero igualmente abiertas, cuyo carácter especulativo es mayor cuanto más a la derecha de la fórmula aparecen. También se han publicado distintas variantes de ella que incluyen términos adicionales, por ejemplo la posibilidad de que la vida se haya desarrollado además en los satélites de planetas alejados de la banda de habitabilidad, u otros relacionados con los tipos de biomarcadores que podríamos detectar. De hecho, cada uno de nosotros podemos proponer los términos y valores que más nos gusten, e incluso hay páginas de internet dedicadas a ello. Pero, en todos los casos, lo que se demuestra es que el resultado de esta multiplicación de factores puede ser un número tan alto como nuestro optimismo (o el deseo de comunicarnos) nos dicte. No cabe duda: la ecuación de Drake supone la mejor fórmula para medir... nuestra incertidumbre.

EL PROGRAMA SETI

«La idea de comunicarse con los habitantes de otros mundos es antigua. Pero durante mucho tiempo se ha visto únicamente como el sueño de un poeta, algo que nunca sería realizable.» Así comienza el breve ensayo titulado *Hablando con los planetas* que publicó el ingeniero e inventor Nikola Tesla en 1901, mientras estaba preparando la construcción de su Torre Wardenclyffe. En él defendía que los experimentos realizados dos años antes en su laboratorio de Colorado Springs le habían permitido captar señales eléctricas periódicas procedentes de Marte, un planeta que en esa época (según comentamos en el capítulo 7) muchos consideraban habitado por seres inteligentes. Y, visionario como siempre fue, Tesla proponía que «en la etapa de progreso actual, no habría ningún obstáculo insuperable en la construcción de una máquina capaz de transmitir un mensaje a Marte». No lo logró, muy a su pesar. Y uno de sus competidores, el ingeniero Guillermo Marconi,

tampoco pudo demostrar que alguna de sus estaciones de radio hubiese detectado señales procedentes del planeta rojo. Pero, en cualquier caso, a partir de entonces nuestro desarrollo tecnológico ya nos permitía establecer contacto con otros seres inteligentes. Por el contrario, si los alienígenas intentaron comunicarse con nosotros hasta comienzos del siglo XX, todos esos mensajes se perdieron en el tiempo como lágrimas en la lluvia.

La idea de que se pudiera captar (y enviar) información a otros planetas utilizando la radiación electromagnética fue madurando durante las siguientes décadas, alimentada por científicos tan destacados como William Thomson (Lord Kelvin), David Peck Todd, Giuseppe Cocconi o Philip Morrison. Estos dos últimos fueron los coautores de un artículo pionero publicado en *Nature* en 1959, titulado «Buscando comunicaciones interestelares», en el que postulaban el uso de microondas y rayos gamma con tal fin. Siguiendo esa línea, y convencido como estaba de la alta probabilidad de que existan otras vidas inteligentes en el Cosmos, Frank Drake fue el impulsor en 1960 del Proyecto Ozma, dedicado a intentar detectar señales artificiales que pudieran llegar desde el espacio. Tomó el nombre de la princesa que protagoniza el relato *La maravillosa tierra de Oz*, escrito (como secuela de *El maravilloso mago de Oz*) por Frank L. Baum en 1904, y que había sido una de sus lecturas favoritas durante la infancia. Aquél fue el primer experimento moderno de tipo Search for ExtraTerrestrial Intelligence (SETI), una iniciativa que comenzaría a recibir financiación de la NASA en 1971. El planteamiento era (y sigue siendo) captar la radiación electromagnética que nos llegue desde algún lugar del Cosmos, procesarla e intentar encontrar señales especialmente intensas, anómalas, repetitivas o que sigan patrones no aleatorios, de forma que puedan ser atribuibles a una civilización extraterrestre. Lógicamente, tras la eventual detección de un mensaje el siguiente paso sería enviarles señales *a ellos* para comprobar si realmente están interesados en comunicarse con nosotros. ¿O tal vez fuera mejor no responder?

En esa misma época, aunque en otro contexto, la entonces estudiante de doctorado Jocelyn Bell descubrió en 1967 unos pulsos regulares de radio procedentes de la constelación de Vulpecula. Ante una detección tan extraña, tanto ella como su director de tesis, Antony Hewish, pensaron inicialmente que podrían corresponder a señales enviadas por alguna vida inteligente que existiera en nuestra galaxia. Así, estos pulsos fueron denominados coloquialmente «Little Green Men», LGM («hombrecillos verdes»), hasta que se demostró que tenían una causa natural: la radiación emitida por el primer púlsar que se había descubierto con ondas de radio, posteriormente denominado PSR B1919+21. La trascendencia de este hallazgo hizo que el jefe de Jocelyn y el también astrofísico Martin Ryle, pero lamentablemente no ella, recibieran el Premio Nobel de Física en 1974.

En 1980 Carl Sagan, el astrónomo y geólogo Bruce Murray y el ingeniero Louis Friedman fundaron la Sociedad Planetaria, con el objetivo de coordinar e impulsar el trabajo realizado dentro del programa SETI. El Instituto SETI se fundó en Mountain View (California) en 1984, y desde entonces acoge a astrónomos interesados en la búsqueda de vida extraterrestre... así como en muchos otros temas de investigación. Pero en 1993 la NASA decidió interrumpir la financiación del programa SETI, que desde entonces se mantiene con donaciones privadas: algunas de ellas muy generosas, como veremos.

Entre los diferentes radiotelescopios utilizados a lo largo de la historia del programa SETI el principal ha sido el de Arecibo, que aparece en la ilustración de portada de este capítulo y volveremos a ver más adelante: una gigantesca antena de 305 m de diámetro (la mayor del mundo hasta 2016) y 130 m de distancia focal construida en un cráter natural de la isla de Puerto Rico, que ha tenido distintos usos civiles y militares. Para trabajar en el contexto de SETI, su receptor está ajustado a la denominada «línea HI» del hidrógeno, que corresponde a la radiación electromagnética emitida por una transición electrónica en el átomo de hidrógeno neutro. Dicha emisión fundamental del hidrógeno se produce en la región de microondas del espectro, en una ventana libre de interferencias conocida como «agujero del agua», con una longitud de onda de aproximadamente 21,1 cm (correspondiente a una frecuencia de unos 1420,4 MHz). Se supone que otras vidas inteligentes conocerán perfectamente que esta radiación proviene del elemento más sencillo, abundante y antiguo del Universo. Por tanto, si *ellos* emiten pulsos en esa longitud de onda, con algún tipo de codificación o siguiendo un patrón claramente distinguible del que nos llega desde el hidrógeno que inunda el Universo (por ejemplo, utilizando secuencias de números primos), nos estarían enviando un mensaje. En cualquier caso, para dar más opciones a nuestros interlocutores también se analizan otras longitudes de onda en el espectro electromagnético, como la de 18 cm que corresponde al radical hidroxilo proveniente de la rotura de la molécula de agua.

Las señales detectadas son enviadas a la Universidad de California en Berkeley, donde comienza su procesamiento. Debido al enorme requerimiento de tiempo de cálculo para analizarlas, y dado que la NASA ya no financiaba a SETI, en 1999 se impulsó el proyecto de computación distribuida denominado SETI@Home. Gracias a él, millones de colaboradores en todo el mundo han puesto a disposición de esta iniciativa sus ordenadores privados, que tras descargar el *software* correspondiente trabajan en red mientras su procesador no está ejecutando otras tareas. Con ello, además, se lograba concienciar a la población de nuestro planeta sobre la importancia de intentar comunicarnos con otras inteligencias, lo que se

convirtió en la mejor campaña de *marketing* que alguien pudiera haber soñado para el programa SETI. Los resultados de todos los análisis realizados en hogares y oficinas de los cinco continentes se devuelven a Berkeley, donde son revisados detalladamente tratando de identificar posibles «señales candidatas».

LA SEÑAL WOW!

Inicialmente, la intensidad de las señales recibidas se cuantificaba utilizando números y letras: en sentido creciente, se usaban los caracteres 1-9 seguidos de A-Z. Por tanto, la relación señal/ruido más débil que se podía detectar correspondía a un 1, mientras que la más intensa merecería una Z. Pues bien, en más de medio siglo de «escucha» ininterrumpida, sólo en dos ocasiones han saltado las alarmas. La primera de ellas se produjo el 15 de agosto de 1977 y fue captada por el radiotelescopio de la Universidad Estatal de Ohio conocido como *Big Ear*, una «gran oreja» plana y de forma rectangular que estuvo operativa dentro del programa SETI entre 1973 y 1995. La señal duró 1 minuto y 12 segundos, provenía de la constelación de Sagitario y se registró a las 23.16 h de la noche. Nadie estaba allí para dar cuenta de ello: si era una llamada de los extraterrestres, nos había encontrado durmiendo. Pero a la mañana siguiente, cuando el astrónomo Jerry R. Ehman comenzó su turno revisando el papel continuo en el que se habían registrado las señales detectadas durante las últimas horas, descubrió una sucesión de caracteres absolutamente insólita: de arriba hacia abajo se había marcado «6EQUJ5». Por tanto, se trataba de una señal iniciada en la intensidad 6, que (al ir rotando la Tierra y enfocar exactamente al punto desde el que provenía) había crecido hasta la letra U (es decir, unas treinta veces superior al nivel de fondo correspondiente al ruido), para decrecer después de forma casi simétrica hasta el número 5.

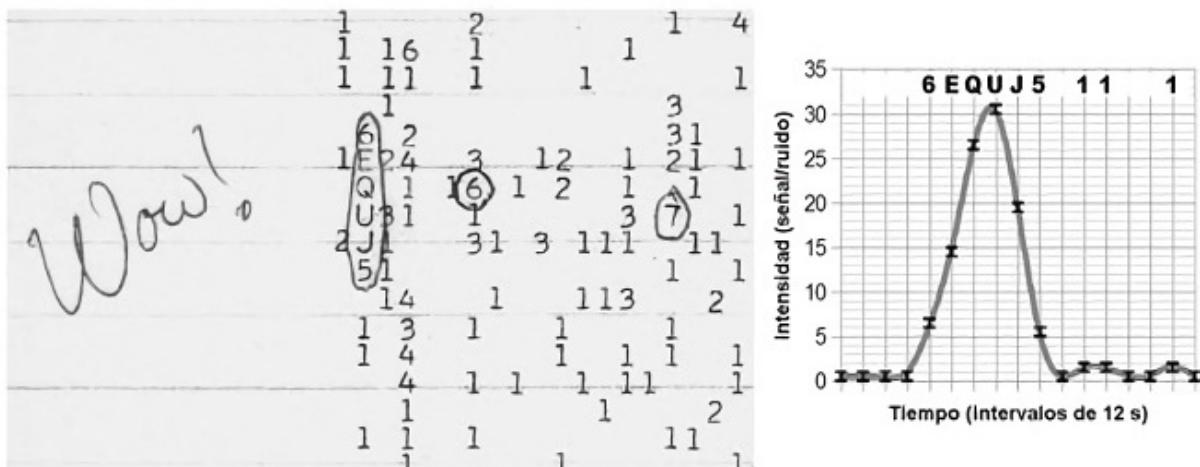


Imagen original del registro de la señal *Wow!*, con la anotación realizada por Jerry R. Ehman. A la derecha se representa la variación con el tiempo de la intensidad de la radiación captada en esta señal. Crédito: Big Ear Radio Observatory y North American AstroPhysical Observatory (NAAPO).

Ehman rodeó esos seis caracteres con un bolígrafo rojo y escribió al lado la exclamación «*Wow!*» (que leeríamos como «¡guau!»), para dejar constancia de su sorpresa por lo inusual de la señal. De hecho, en el registro de esa noche casi todos los demás puntos correspondían a una intensidad de 0 (el nivel de fondo, que aparecía como espacios en blanco) y 1, con algún esporádico valor entre 2 y 7. A partir de entonces, lo más cercano a la llamada de una civilización alienígena que se había detectado desde nuestro planeta comenzó a conocerse como «señal *Wow!*». Pero no se repitieron unas intensidades iguales (ni parecidas, o cuando menos considerables) al enfocar de nuevo hacia la misma zona de Sagitario, lo que finalmente hizo descartar que se tratara de una emisión realizada por alguna civilización tecnológica. De hecho, nunca se ha encontrado ninguna explicación convincente para esos valores 6EQUJ5, hasta el punto de que su propio descubridor ha afirmado que podría tratarse de alguna señal terrestre reflejada por un fragmento de chatarra espacial que aquella noche, por casualidad, formó el ángulo adecuado con la gran oreja que se mantenía a la escucha en Ohio. A nivel popular, como era esperable, corrieron ríos de tinta sobre la civilización que aparentemente nos había mandado aquella señal... y aún hoy se sigue hablando sobre ello en determinados círculos. También ha inspirado temas musicales, como la canción *Ballad of the 'Wow!' Signal*, compuesta por Paul Shuch en 1995, y ese icónico 6EQUJ5 protagoniza el vídeo *Oxygene, Pt. 17* de Jean-Michel Jarre, además de aparecer en la ya mencionada película *Ad Astra*.

LAS ÚLTIMAS SEÑALES ANALIZADAS

La segunda y hasta ahora última señal significativa detectada por SETI se conoce con el nombre *SHGb02+14a* y fue captada en marzo de 2003, en tres pulsos más débiles que el 6EQUJ5 y con menos de un minuto de duración total. Provenía de algún lugar entre las constelaciones de Piscis y Aries, una zona del cielo donde no hay estrellas a menos de 1000 años luz de nosotros. Tampoco ha vuelto a repetirse, y hoy en día se asume que fue ruido cósmico no relacionado con ninguna emisión realizada por una esquiva civilización extraterrestre.

Desde 2007, el programa SETI cuenta con una nueva «oreja»: el *Allen Telescope Array* (ATA, también conocido como *One Hectare Telescope, 1hT*), que es un conjunto o *array* de radiotelescopios dispuestos en una llanura de una hectárea de extensión situada al noreste de San Francisco. A partir de su configuración inicial con 42 antenas, ha ido creciendo y tiene como objetivo llegar a las 350. Para su construcción fue fundamental la donación de más de 30 millones de dólares realizada por Paul G. Allen, cofundador de Microsoft. Hasta el momento, las señales captadas con el ATA no han generado grandes titulares. Por otra parte, en febrero de 2020 el Instituto SETI ha firmado un acuerdo con el National Radio Astronomy Observatory (NRAO) de Estados Unidos para utilizar su *Karl G. Jansky Very Large Array* (VLA). Con ello se podrá beneficiar de la capacidad de esta red de 27 antenas de 25 m de diámetro cada una, en una disposición de «Y», que está situada en el estado de Nuevo México y con la cual se han obtenido datos fundamentales en astrofísica desde la década de 1980.

La iniciativa SETI más avanzada en la actualidad es la denominada *Breakthrough Listen* (que podríamos traducir como «escucha avanzada»), en desarrollo desde enero de 2016. Está dotada con 100 millones de dólares de presupuesto, principalmente aportados por el empresario, inversor y también físico ruso Yuri Milner. Implica a varios radiotelescopios muy potentes (entre ellos, el *Green Bank Telescope* en Estados Unidos y el *Parkes Observatory* en Australia) y a un telescopio óptico dedicado fundamentalmente a la búsqueda de planetas extrasolares (el *Automated Planet Finder*, también en Estados Unidos). Como en los casos anteriores, las señales se analizan gracias a la actividad de SETI@Home y todo el proceso está coordinado desde Berkeley. Su objetivo es realmente ambicioso: analizar la radiación electromagnética proveniente de un millón de estrellas «cercanas» (hasta 160 años luz de la Tierra) y del centro de cien galaxias, en busca de señales que puedan hablarnos de fuentes de emisión tecnológicas. Aún no se ha encontrado ninguna.

Más allá del programa SETI, con estos y otros radiotelescopios se buscan también pulsos muy cortos (de una billonésima de segundo o menos) de radiación, que la naturaleza no produce pero sí podrían haber sido enviados por alguna civilización que utilizara láseres similares a los construidos por los humanos. No ha habido suerte hasta ahora. En paralelo, sí se han detectado centenares de ráfagas rápidas de ondas de radio (o *Fast Radio Bursts*, *FRB*) provenientes de diferentes lugares del Cosmos, en forma de emisiones puntuales de radiación muy intensa y con una duración de pocos milisegundos. Lo curioso es que al menos en veinte ocasiones nos han llegado repetidamente desde exactamente los mismos puntos del cielo, por lo que hay quien piensa que podrían corresponder a «tecnofirmas» mandadas por inteligencias extraterrestres. Sin embargo, hasta ahora se considera que los *FRB* esporádicos estarían producidos por la colisión entre dos objetos de gran densidad, como estrellas de neutrones o agujeros negros, mientras que los repetitivos probablemente tengan su origen en la inestabilidad de objetos también muy masivos, individuales o en parejas.



Dos de las instalaciones utilizadas en diversos programas de investigación, entre ellos los asociados a SETI. A la izquierda se muestra el *Green Bank Telescope*, que gracias a su superficie colectora de 100 m de diámetro es el radiotelescopio orientable más grande del mundo (imagen cortesía de NRAO/AUI/NSF). A la derecha vemos una sección del *Very Large Array* (VLA), con el cielo estrellado y la Vía Láctea de fondo (imagen de Jeff Hellerman, cortesía de NRAO/AUI/NSF).

Otro caso muy comentado ha ocurrido con la estrella KIC 8462 852, conocida como «estrella de Tabby» o «estrella de Boyajian» dado que quien llamó la atención sobre ella fue la astrónoma Tabetha S. Boyajian. También tiene el apelativo coloquial de «estrella WTF», debido a la exclamación que suele producir en sus observadores angloparlantes. Está situada a unos 1470 años luz de la Tierra y se localiza en la constelación del Cisne. En 2015 se publicó la detección de fluctuaciones extrañas en la luz que nos llega desde ella, mucho más intensas que las correspondientes a un tránsito planetario como

los comentados en el capítulo anterior, y que se sumaban a la progresiva disminución de brillo medida desde su descubrimiento en 2011 por el telescopio espacial Kepler. Así, comenzó a conocerse como «la estrella más misteriosa de nuestra galaxia» y las personas impacientes por encontrar señales de inteligencias extraterrestres no tardaron en imaginar grandes estructuras construidas por seres altamente tecnológicos alrededor de Tabby. Tal vez la hubieran envuelto con una de aquellas «esferas de Dyson» propuestas por el físico y matemático Freeman Dyson en 1960, que podrían ser fabricadas por criaturas inteligentes (y con muchos recursos económicos) para aprovechar toda la energía procedente de su estrella. Con ello, se convertirían en una civilización de Tipo I en la escala planteada por el físico Nikolái S. Kardashov en 1964. Todo muy sugerente.

Pero el jarro de agua fría (de hecho, congelada) cayó sobre la ficción con los artículos publicados a partir de 2018, tras haberse analizado durante tres años su brillo a diferentes longitudes de onda. Los datos no apoyan en absoluto la existencia de ninguna estructura opaca alrededor de la estrella. Sin embargo, encajan bien con la hipótesis de que en torno a Tabby gira una nube cada vez más densa de polvo, fragmentos de roca y granos de hielo emitidos por una exoluna en descomposición, que habría sido previamente «robada» por la estrella a uno de sus exoplanetas, ya desaparecido. Se ha acuñado un neologismo en inglés, «*ploonet*», para referirse a este nuevo tipo de objeto hipotético, a medio camino entre planeta y luna, que orbitaría en torno a Tabby mientras su piel va siendo arrancada por ella. Esto podría explicar los cambios de luminosidad detectados, sin necesidad de que los alienígenas nos demuestren sus dotes constructivas. Como decía Arthur Conan Doyle por boca de Sherlock Holmes, «una vez descartado lo imposible, lo que queda, por improbable que parezca, debe ser la verdad».

MENSAJES A LOS EXTRATERRESTRES

Además de tratar de escucharles, también les hemos hablado. En primer lugar sin proponérnoslo y más tarde con la intención de iniciar una conversación con *ellos*. Tras la puesta a punto de la telegrafía sin cables a finales del siglo XIX, se considera que la primera transmisión de radio se realizó en Massachusetts en la noche de Navidad de 1906. Y parte de esa radiación electromagnética salió de la Tierra, a la velocidad de la luz. Por tanto, actualmente nuestra esfera tecnológica tiene un radio de más de 113 años luz

y ha sobrepasado varios de los sistemas planetarios que visitábamos en el capítulo anterior. Dentro de esa esfera, un sinfín de ondas de radio originadas en los cinco continentes se desplazan en todas direcciones, informando sobre lo que ocurre en este planeta, describiendo cómo somos o reproduciendo la música que nos gusta. Lógicamente, todas las señales se van atenuando con la distancia, así que cuanto más lejos hayan llegado menos intensidad tendrán. Pensando en los posibles seres que se mantengan a la escucha, podemos sentirnos orgullosos de algunos programas sobre literatura, ciencia o arte que se hayan emitido en todos los idiomas, de las reflexiones inspiradas que muchas noches surgieron ante los micrófonos, o de multitud de conciertos retransmitidos en directo. Pero estaremos avergonzados de que haya llegado a más de 80 años luz el discurso inaugural de los Juegos Olímpicos de 1936, así como la narración de las guerras u otras atrocidades cometidas por nuestra especie. Además, desde la primera retransmisión de televisión realizada por la cadena inglesa BBC en 1927, nuestras imágenes en blanco y negro o en color, basadas en tecnología analógica o digital, llevan también casi un siglo expandiéndose por el Universo. Probablemente, muchos extraterrestres no se animarán a conocernos si las sintonizan.

En cualquier caso, toda esa información ha sido emitida desde nuestro planeta sin la intención declarada de que les llegue a otras posibles inteligencias. Y preferimos pensar que no escucharon aquella locución de Orson Welles en 1938, sin duda. De hecho, el primer mensaje específicamente dirigido a los extraterrestres no fue ninguna señal electromagnética, sino los dibujos que se enviaron a bordo de una sonda de la NASA ya comentada en los capítulos 8 y 11: la *Pioneer 10*. Lanzada el 2 de marzo de 1972, fue la primera nave que sobrepasó la órbita de Neptuno, once años más tarde. Por iniciativa, una vez más, de Carl Sagan y Frank Drake, tanto en esta nave como en la *Pioneer 11* (lanzada el año siguiente) se fijaron a los soportes de la antena principal sendas placas idénticas de aluminio anodizado con oro, de dimensiones $22,9 \times 15,2$ cm, y con 1,27 mm de grosor, que incluían grabados basados en los dibujos realizados por la artista Linda Salzman, entonces esposa de Sagan.

En la parte derecha de esas placas aparecen un hombre y una mujer desnudos: él, saludando a todo aquel que pueda salir a su camino... y que tenga ojos con los que pueda verle. Ambos son rubios y con rasgos occidentales, lo que obedece más al entorno en el que fueron ideados que a la realidad estadística de lo que ya entonces era nuestro planeta. Tras ellos, una representación esquemática de la nave en la que viajan, a la misma escala que las figuras humanas: así, quien encuentre la placa podrá hacerse a la idea de la altura de esta pareja de alienígenas. A la izquierda, en la zona superior está representada la molécula de hidrógeno (H_2) y la transición electrónica de la que ya hemos hablado, para marcar una escala de tamaño basada en su

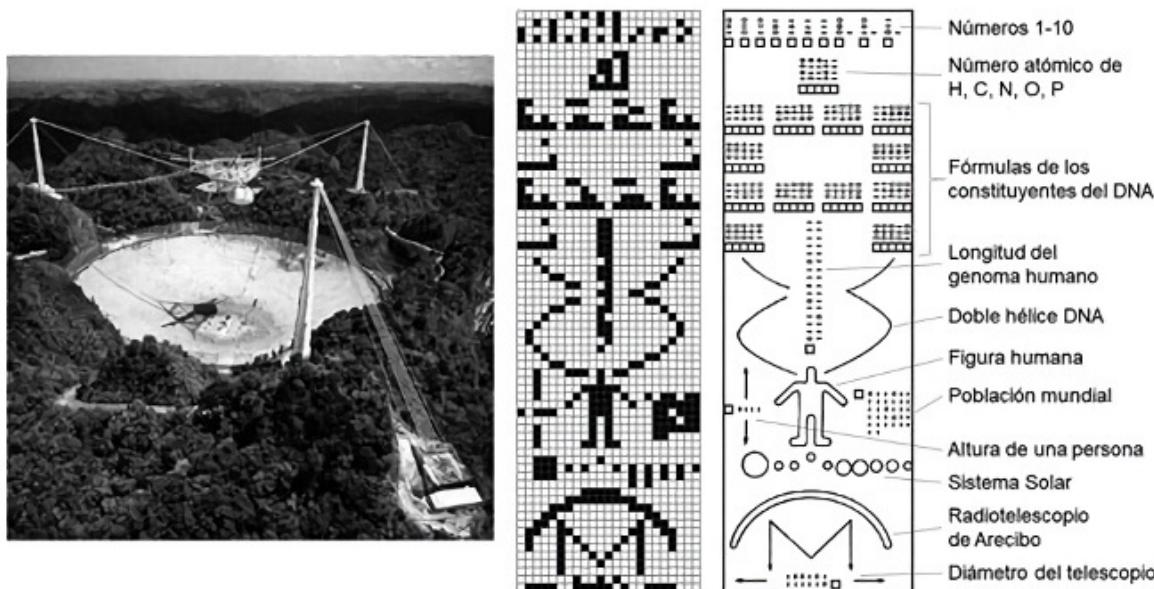
longitud de onda de 21,1 cm. Debajo, un conjunto de líneas que convergen en un punto constituye el mapa para encontrar el Sol tomando como referencia catorce pulsares, identificados por su período en notación binaria y referido a dicha escala de la transición del hidrógeno. Toda la parte inferior del dibujo está ocupada por una representación del Sistema Solar, con nuestra estrella a la izquierda y marcando cómo la nave salió del tercer planeta.

Por tanto, las *Pioneer 10* y *11* llevan consigo una auténtica postal enviada desde la Tierra, junto con las instrucciones para localizar a sus remitentes. Como el lector estará pensando, esto puede resultar muy útil para la humanidad sólo si los destinatarios tienen pensado venir en son de paz. De hecho, hubo mucha polémica dentro y fuera de la ciencia por el envío de estas placas. Pero en realidad aquel mensaje era sobre todo para nosotros mismos, ya que suponía una manera de autoafirmarnos como especie biológica y tecnológica. En cualquier caso, que sepamos, en el camino de las sondas *Pioneer* hacia las constelaciones de Tauro y del Escudo aún no han sido encontradas por nadie. Mientras tanto, en la Tierra han aparecido en numerosas películas y series de televisión.

El siguiente mensaje se envió el 16 de noviembre de 1974, y fue una señal de radio que en esa ocasión sí había sido pensada para ser recibida y descodificada por alguna otra inteligencia similar a la nuestra. Se lanzó desde el ya conocido radiotelescopio de Arecibo cuando apuntaba hacia el cúmulo globular M13, en la constelación de Hércules. Allí llegará este mensaje, muy atenuado, dentro de 25 000 años. Codificado en una onda de radio de 2380 MHz de frecuencia, consiste en un panel rectangular de 1679 bits: el producto de dos números primos, 23 y 73, que definen el número de columnas y filas de este mosaico dibujado con ceros y unos.

Resumiendo su contenido, de arriba hacia abajo aparece lo siguiente: i) una representación en base 2 de los números 1 al 10, por lo que básicamente estamos suponiendo que los extraterrestres también cuentan con dos manos de cinco dedos cada una; ii) una figura que contiene columnas correspondientes a la notación binaria de las cifras 1, 6, 7, 8 y 15, es decir, los números atómicos del hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno y fósforo: los destinatarios seguro que conocen la tabla periódica, así que les informamos sobre nuestra composición (aunque falta el azufre para tener el grupo CHONPS al completo); iii) la representación de los constituyentes del DNA (desoxirribosa y fosfato a los lados, y los pares de bases nitrogenadas adenina-timina y citosina-guanina en el centro) utilizando el código para los elementos indicado más arriba; iv) la clase de biología molecular continúa, mostrando un esquema de la doble hélice del DNA y una barra vertical central con el número de nucleótidos del genoma humano (un 30 % mayor que su longitud real, determinada posteriormente); v) la representación simbólica de una figura humana, flanqueada por los números correspondientes a la altura

de una persona (en concreto, los 1,76 m que medía Frank Drake) y a la población mundial (que entonces se estimaba en 4300 millones de habitantes); vi) el esquema del Sistema Solar, colocando por encima nuestro tercer planeta; y vii) un dibujo del radiotelescopio de Arecibo y el número que indica su diámetro.



Vista general del radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico, con su antena de 305 m de diámetro (imagen de Wikimedia Commons). En la parte central se muestra la representación gráfica del «Mensaje de Arecibo», en el que los bits de valor 0 se indican con cuadrados blancos, y los de valor 1 son negros. La composición con el significado de los símbolos ha sido realizada por el autor, a partir de una figura disponible en Wikimedia Commons.

Se ha criticado mucho la complejidad de este «Mensaje de Arecibo», que probablemente ni los humanos seríamos capaces de descifrar. A su favor, frente a las placas de las *Pioneer* no requería necesariamente un sentido de la vista operativo en los alienígenas... aunque no sabemos si *ellos* podrían haber construido radiotelescopios sin ver sus piezas. En cualquier caso, está claro que si algún extraterrestre puede interpretar esa colección de unos y ceros no sólo será inteligente... sino que tendrá talento matemático, afición por los crucigramas y mucha paciencia. Pueden ser buenas cualidades en caso de que un día venga a conocernos.

DE LOS DISCOS DE LAS *VOYAGER* A LOS ÚLTIMOS MENSAJES ENVIADOS

Animados por las «declaraciones de intenciones» que representaban los mensajes mandados hasta entonces, en 1977 se enviaron otros dos, mucho más elaborados, a bordo de las sondas *Voyager 1* y *Voyager 2* (lanzadas por la NASA el 5 de septiembre y el 20 de agosto, respectivamente, y que han sobrevolado varios capítulos de este libro). En aquel caso se trataba de sendos discos idénticos de una aleación de plata y cobre revestida en oro, con un diámetro de 30,5 cm, que podemos considerar versiones analógicas equivalentes a los DVD disponibles mucho después. Incluían las instrucciones de uso, información sobre el lugar desde donde se enviaban y una selección de imágenes y sonidos de la Tierra. Por una cara, los discos mostraban varios dibujos: i) el esquema de un tocadiscos (lógicamente, haría falta uno para acceder a la información grabada en los surcos del otro lado), indicando que se reproduce a 16 y 2/3 revoluciones por minuto y que la duración total es de 90 minutos; ii) las características de la pantalla de televisión donde se podrían visualizar las imágenes; y iii) al igual que en las placas de las *Pioneer*, la representación de la transición electrónica del hidrógeno y el mapa de los púlsares para encontrar nuestro sistema planetario.

En la «cara B» de los discos, con el título *The sounds of Earth* se habían grabado los sonidos y las imágenes que un comité de la NASA presidido por Carl Sagan consideró que podían representar mejor a la humanidad. Las pistas de audio incluían varios saludos (del secretario general de la ONU, el presidente de Estados Unidos, y 55 más, grabados en diferentes idiomas y dialectos del mundo), sonidos de la naturaleza (como la erupción de un volcán, lluvia, viento, olas, aullidos de lobos, croar de ranas o cantos de aves) y artificiales (motores, herramientas o la sirena de un barco), así como una selección de música (clásica, popular y folclórica). Además, las 115 imágenes contenidas formaban una completa enciclopedia de matemáticas, astronomía, física, bioquímica, zoología, botánica, paisajes del mundo, anatomía humana, nuestro sistema de reproducción, oficios, deportes, obras de arte, partituras, páginas de libros, edificios, medios de transporte o naves espaciales. Quienes deseen conocer todo el material enviado al espacio en estas cápsulas del tiempo, pueden visitar la página *The Golden Record* de la NASA. Como ya hemos comentado, la *Voyager 1* es el objeto construido por la humanidad que más lejos se encuentra de la Tierra. Dentro de unos 40 000 años llegará a su estrella más cercana: si alguien vive por allí y su gusto por lo *vintage* ha hecho que tenga a mano un tocadiscos analógico, podrá pasar un buen rato gracias a los terrícolas de la década de 1970.

Aunque menos conocidos que los mensajes comentados hasta ahora, posteriormente se han enviado otros. Así, por ejemplo, el 9 de octubre de 2008 se lanzó desde el radiotelescopio ucraniano Yevpatoria RT-70 la señal *A Message from Earth*, formada por la codificación de 501 saludos multimedia seleccionados por el público a partir de los publicados en una red social. Por

tanto, a diferencia de los anteriores, este mensaje no había sido diseñado por un comité de expertos nombrado por una agencia espacial y se parecía más a una invitación de un puñado de habitantes de la Tierra con ganas de expandir sus horizontes. El destino de la señal es el exoplaneta Gliese 581c, el segundo de un sistema formado por seis planetas y situado en su zona habitable. Además, está a sólo 20,5 años luz de nosotros... por lo que en 2049 podríamos saber si un gliesano se ha unido al grupo.

Desde 2015, los científicos están discutiendo sobre la conveniencia de mandar más mensajes para tratar de contactar con inteligencias extraterrestres, dado que (como entre otros advertía Stephen Hawking) podrían ser recibidos por una civilización más avanzada y no necesariamente bondadosa, sino que tuviera un afán colonizador o destructivo. Es decir, se está planteando (quizá demasiado tarde) que deberíamos ser discretos y aplicar a nuestro planeta la conjectura de indetectabilidad que comentábamos al principio de este capítulo. Así, buena parte de los investigadores actuales del Instituto SETI han pedido posponer el envío de las señales previstas en el programa Active SETI (también conocido como Messaging to Extra-Terrestrial Intelligence o METI), aunque dos de sus miembros más relevantes, Seth Shostak y el propio Frank Drake, no firmaron dicho documento. Mientras se producía esta controversia, el astrobiólogo Douglas Vakoch, presidente de la asociación METI International (con un nombre deliberadamente similar al del programa METI, y cuya finalidad no es otra que contactar con inteligencias extraterrestres) envió en 2017 un mensaje desde un radiotelescopio noruego. Contenía nociones básicas sobre matemáticas, la descripción de las ondas de radio utilizadas y una explicación sobre cómo medimos el tiempo y usamos los relojes en la Tierra. El punto de destino de esa señal es la estrella GJ273, situada a sólo 12,4 años luz y que tiene un sistema de dos planetas, en el que GJ273b está en la zona de habitabilidad. En 2042 podremos saber si fue prudente enviar dicho mensaje.

Paralelamente Nova Spivack, cofundador y presidente de la Arch Mission Foundation, está enviando mensajes a nuestro entorno más cercano en forma de «bibliotecas digitales», con la parte del conocimiento universal que en su opinión debería ser salvado de una posible destrucción de nuestra civilización. Así, como ya comentamos en el capítulo 6, en 2018 puso una de esas bibliotecas rumbo al cinturón de asteroides, en la guantera del *Tesla Roadster* de Elon Musk. Y en 2019 mandó otra a la Luna, como parte del que probablemente sea el envío más chapucero en la historia de la exploración espacial. Como sabemos, no existe ninguna otra vida inteligente (al menos, por ahora) que pueda encontrar estas bibliotecas en entornos tan cercanos, a minutos u horas luz de nosotros.

En cualquier caso, si una lejana civilización extraterrestre recogiera alguna de esas botellas en las que desde hace medio siglo hemos lanzado

nuestros mensajes al mar del espacio, lograra descifrarlos y apuntaran sus telescopios hacia nosotros... ¿cómo verían la Tierra? Para ellos, lógicamente, seríamos un exoplaneta. Si hubieran descubierto todo nuestro sistema a la vez podrían considerarnos el planeta Sol d. Como comentábamos en el capítulo anterior, sabrían que estamos en la zona de habitabilidad de nuestra estrella, junto a Sol e, y que ambos son planetas rocosos. Determinarían la masa y volumen de Sol d, y con ello calcularían su densidad media. Si por casualidad nuestros descubridores estuvieran en el plano de la eclíptica del Sistema Solar, al observar los tránsitos planetarios dominados por los dos gigantes Sol f y Sol g podrían llegar a distinguir la minúscula aportación de Sol d. Y serían capaces de analizar espectroscópicamente nuestra atmósfera, atravesada por la luz del Sol. Detectarían sobre todo nitrógeno molecular, pero también una cantidad inusualmente alta de oxígeno molecular, muy por encima del resto de los gases. Encontrarían también ozono. Y se harían preguntas. Con el tiempo, lograrían obtener la imagen directa de nuestro planeta: verían un punto azul pálido cada vez con mejor resolución. Tras un exhaustivo análisis, los astrobiólogos que formaran parte de esa civilización llegarían a una conclusión muy razonable: quien mandó el mensaje es una especie fotosintética inteligente, que produce oxígeno y tiñe de verde algunas zonas en las pequeñas regiones de la superficie de Sol d que no están cubiertas por el océano, bajo los blancos girones de las nubes.

LOS VISITANTES INTERESTELARES YA HAN LLEGADO

Mientras la búsqueda de vida inteligente sigue siendo un objetivo relevante para algunos científicos, la imaginación de muchos echó a volar el 19 de octubre de 2017, cuando el astrofísico Robert Weryk descubrió (usando el telescopio *Pan-STARRS* del Observatorio Haleakala, en Hawái) un extraño objeto que atravesaba el Sistema Solar siguiendo una trayectoria oblicua con respecto al plano de la eclíptica. Su órbita era claramente hiperbólica, a diferencia de las de los objetos de nuestro sistema como asteroides o cometas, que se mueven en órbitas elípticas más o menos excéntricas y con el Sol en uno de sus focos. En las semanas siguientes se determinó que ese cuerpo tenía forma de cilindro, con tan solo 230 m de largo y 35 m de diámetro (similar a un rascacielos de cincuenta pisos), y que viajaba a 95 000 km/h. Carecía de coma, por lo que no podía considerarse un cometa. Por tanto se clasificó como asteroide, aunque más recientemente se ha propuesto como un «iceberg

cósmico» que podría estar formado por hielo de hidrógeno originado en una nube interestelar.

Sin duda, se trataba del primer objeto caracterizado en nuestras proximidades que no pertenece al Sistema Solar, y la Unión Astronómica Internacional (IAU) acordó iniciar con él una nueva designación, la «I» de «interestelar». Se denominó 1I/‘Oumuamua, con un nombre muy adecuado ya que en hawaiano significa «explorador». Como era de esperar, los siempre ansiosos perseguidores de ovnis y naves extraterrestres llenaron las redes sociales de propuestas a cuál más extravagante. Mientras tanto, los buenos lectores habían tardado poco en recordar la novela *Cita con Rama*, escrita por Arthur C. Clarke en 1972. En cualquier caso, la realidad volvía a ser mucho más interesante que la ficción.

Pero lo que más sorpresa produjo en esta ocasión es que, llevados por un afán de visibilidad incomprendible, dos investigadores del Centro de Astrofísica Harvard Smithsonian hicieron públicos unos descabellados cálculos teóricos según los cuales 1I/‘Oumuamua podría ser una vela solar abandonada tras el paso de una sonda espacial alienígena, o incluso «una nave plenamente operativa enviada intencionadamente a las inmediaciones de la Tierra por una civilización extraterrestre». Una vez más, resultaba adecuado el sabio consejo de que las propuestas extraordinarias requieren evidencias extraordinarias. Y no era el caso. De hecho, incluso desde el Instituto SETI se quitó toda credibilidad a estos cálculos, con declaraciones tan irónicas como ésta: «Las observaciones astronómicas que tenemos son consistentes con que 1I/‘Oumuamua sea un asteroide, o bien un cometa. Tampoco se ha detectado ninguna emisión de radio de este objeto, nada divertido (...) Y, honestamente, si otra sociedad estuviera interesada de verdad en nuestro Sistema Solar, ¿no intentarían que su nave de reconocimiento pasara algo de tiempo en las inmediaciones de la Tierra para realizar mediciones, tomar muestras de nuestros programas de telebasura o algo así?».



Recreación artística del objeto interestelar 1I/'Oumuamua, realizada por Martin Kornmesser para el European Southern Observatory (ESO).

De hecho, hoy se sabe que éste es uno de los muchos objetos que visitan continuamente el Sistema Solar llegados desde el entorno de otras estrellas, y varios candidatos a serlo se encuentran en seguimiento por los grandes telescopios. Pero, curiosamente, fue un astrónomo aficionado ruso, Gennadiy Borisov, quien el 30 de agosto de 2019 detectó el segundo objeto inequívocamente interestelar en nuestras proximidades. Posteriormente se determinó que viajaba a más de 120 000 km/h y que su tamaño está entre 1,4 y 6,6 km. En honor a su descubridor recibió el nombre 2I/Borisov, y al presentar una coma brillante se convirtió en el primer cometa extrasolar del que tenemos constancia. Posee una composición superficial similar a la de los cometas que parten de la nube de Oort, pero es emocionante pensar que su agua congelada se formó fuera de nuestro sistema planetario. Para estudiar de cerca estos cuerpos, la ESA lanzará en 2028 la misión *Comet Interceptor*, que no tiene una diana concreta sino que funcionará como un auténtico centinela espacial, siempre listo para aproximarse a los cometas o asteroides (extrasolares o no) que estén a su alcance, y analizarlos con los nueve instrumentos que llevará a bordo.

VISITANTES DE FICCIÓN

Volvamos al reino de los sueños. A lo largo de este libro hemos ido citando un buen número de novelas, películas y series de televisión en las que la ciencia ficción nos hablaba, entre otras cosas, de visitantes inteligentes (cada uno, a su manera) llegados a la Tierra desde distintos lugares del Cosmos. Pero merece la pena comentar aquí dos más, en el contexto de esas otras vidas con las que nos gustaría poder comunicarnos.

Imbuidos como estaban en la filosofía del programa SETI, y dos años después de la señal *Wow!*, en 1979 Carl Sagan y su esposa Ann Druyan comenzaron a escribir el guion para una película que se titularía *Contact*. En ella (a diferencia de la cruda realidad) sí se detectaba una señal intensa y sin duda producida por una inteligencia extraterrestre, que llegaba desde las inmediaciones de la estrella Vega, a solo 26 años luz de nosotros. Ante la falta de interés de los productores de cine por esa propuesta, Carl Sagan publicó una novela con el mismo título en 1985. Finalmente, el guion de ambos se consideró y dio lugar a la emocionante película dirigida por Robert Zemeckis en 1997, aunque lamentablemente Sagan falleció un año antes y no pudo asistir a su estreno. En ella, la científica del Instituto SETI Eleanor «Ellie» Arroway, brillantemente interpretada por Jodie Foster, recibe un mensaje alienígena a través de las antenas del VLA (aunque, como hemos visto, este *array* de radiotelescopios no se ha comenzado a utilizar por el programa SETI hasta febrero de 2020) y tras una serie de acontecimientos es la escogida para establecer el primer contacto. En el contexto de todo lo hablado en este capítulo, merece la pena volver a disfrutar de la novela y la película.

Por otra parte, quizá uno de los visitantes más inteligentes (y famosos) que han llegado a nuestro planeta fue ET, esa adorable criatura salida de la imaginación de Steven Spielberg en la película de 1982 titulada *ET, el extraterrestre*. Era un ser muy peculiar ya que, volviendo a lo comentado en el capítulo 5, no sólo estaba compuesto por carbono y los demás elementos de la vida que conocemos, sino que compartía bioquímica con todos los terícolas. Deducimos esto por lo que le dice uno de los médicos a otro mientras están intentando salvarle la vida: «Tiene DNA. Afirmativo, tiene DNA». Probablemente, si al comienzo de aquella década de 1980 hubieran podido secuenciar ese DNA, habrían descubierto que era muy similar al nuestro. Además, al comparar a ET con su amigo Elliot se afirmaba que «sus ondas cerebrales son idénticas», es decir, neurológicamente era indistinguible del niño: quien nos estaba visitando era *casi* un humano, o al menos podía reorganizar su biología para parecerlo. De hecho, mostraba más empatía que muchos miembros de nuestra especie. Y toda una generación se identificó con él. Como finalmente ET no muere (esperamos no estar desvelando a nadie este secreto) y se recupera, logra construir un rudimentario transmisor. Él, que sabe mucho de esto, lo llama «teléfono»... y así logra mandar una señal a «su

casa». No nos queda claro si está usando la línea HI del hidrógeno pero, a diferencia de los mensajes enviados por nosotros, el suyo sí es recibido y en poco tiempo vienen a recogerle. Casi nunca, ante la pantalla o con un libro entre las manos, habíamos sentido tristeza cuando un alienígena se marcha de nuestro planeta. Pero es que ET era diferente y se mostraba como un ser racional en todos los sentidos, incluido el dominio de la inteligencia emocional: ese tipo de interlocutor es el que estamos buscando.

¿PODREMOS COMUNICARNOS?

Mientras esperamos que llegue una respuesta a nuestras llamadas, o una solicitud de amistad extraterrestre, ya hay quienes están pensando en qué protocolo habría que utilizar en las relaciones interplanetarias. Siguiendo con la ficción, podemos aprender de los aciertos y errores cometidos tomando como ejemplo algunas películas. En la pionera *Viaje a la Luna* (dirigida por Georges Méliès en 1902) los visitantes terrícolas se despiden de los selenitas a paraguazos: aquello no estuvo bien, y esperamos que no hagan lo mismo quienes vengan a conocernos. Por su parte, la edulcorada *Superman* (Richard Donner, 1978) es un ejemplo del cariño y los cuidados con que se puede recibir a un visitante llegado desde una galaxia remota, alimentándolo y pagándole una carrera hasta que pueda vivir de sus superpoderes. Algo equivalente a lo ocurrido con ese bebé llegado desde el planeta Krypton, pero en un contexto mucho más divertido y surrealista, es lo que les esperaba a los dos marcianitos que toman tierra junto a la casa de P. Tinto y Olivia en la inolvidable *El milagro de P. Tinto* (Javier Fesser, 1998). Por el contrario, para ser conscientes de lo mal que podría salir todo cuando llegue una visita extraterrestre, merece la pena volver a ver la iconoclasta *Mars Attacks!* (Tim Burton, 1996). Y hay muchísimas más obras con las que podemos entretenernos mientras esperamos a que se produzca el ansiado momento. En cualquier caso, probablemente no sabremos muy bien qué hacer hasta que tengamos a los alienígenas delante. O encima. O... ¿dentro?

Un tema aún más interesante es imaginar qué tipo de lenguaje podríamos necesitar para mantener una conversación con *ellos*. Si el contacto se establece sólo a distancia, parece evidente que dependemos de la radiación electromagnética como vehículo de intercambio de información. Así, podríamos enviar y recibir pulsos que nos reconfortaran con la sensación de sentirnos inteligentes, tanto por la frecuencia elegida (por ejemplo, la ya

comentada línea HI del hidrógeno) como por la forma de modular o codificar la señal. Para este segundo aspecto puede ser útil recurrir a los números primos (como ya se ha hecho), a la serie de Fibonacci, al uso de los irracionales π o e , y también emplear operaciones aritméticas más o menos complejas. De todos modos, con ello se está suponiendo que las matemáticas son universales, lo que no está tan claro pues (principalmente en la forma de expresarlas) tienen un componente subjetivo. Quienes estén interesados en estos temas pueden consultar los detalles de algunos lenguajes que se han ido proponiendo para la comunicación interestelar, desde los pioneros *Astraglossa* (en 1952) o *Lincos* (1960). Y no olvidemos que las conversaciones estarían lastradas por la enorme distancia que nos separa de otras estrellas: con la información viajando a la velocidad de la luz, el tiempo transcurrido entre una pregunta y su respuesta sería de años en el mejor de los casos (por ejemplo, si habláramos con un habitante del planeta Proxima b)... o incluso de miles de años (si nuestro interlocutor viviera en un mundo tan lejano como OGLE2003-BLG-235Lb).

De cualquier forma, el auténtico reto sería establecer un lenguaje y un marco referencial a partir de ese intercambio de señales, es decir, lograr la conexión lenguaje-pensamiento-realidad. Esto podría resultar más sencillo de conseguir en una siguiente etapa, si esos seres inteligentes decidieran visitarnos. Así, cuando estuvieran en nuestro planeta podríamos seguir comunicándonos con ondas de radio, o bien plantearles otros sistemas en función de sus gustos y de cómo operen (con o sin interfaces tecnológicas de por medio) sus sentidos. No olvidemos que quizá ya hayan escuchado nuestros programas de radio o visto nuestra televisión, por lo que parte del camino (para bien o para mal) estará avanzado. Entre las opciones alternativas que unos y otros tendríamos disponibles como forma de comunicación está el sonido. Así ocurría en la mítica película *Encuentros en la tercera fase* (Steven Spielberg, 1977), que nos hizo aprender una secuencia de cinco notas compuestas por el siempre inspirado John Williams y que quizá tengamos que utilizar alguna vez. En nuestra especie se ha podido estudiar cómo distintos tipos de música producen sensaciones diferentes, lo que está mediado por los complejos sistemas nervioso y endocrino que hemos ido adquiriendo a lo largo de la evolución. Quizá con *ellos* también funcionara, sobre todo si venían preparados porque en su camino hacia la Tierra se habían cruzado con una de las sondas *Voyager*... y en su nave tenían un tocadiscos en el que hicieron sonar a Johann Sebastian Bach, Ígor Stravinsky, Chuck Berry o un tema folclórico de Azerbaiyán.

También podríamos, si nuestros visitantes lo ven bien, utilizar imágenes. Algo tan sugerente es lo que plantea *La llegada* (Denis Villeneuve, 2016), una película en la que los extraterrestres (similares a grandes calamares, como manda la tradición, pero en esta ocasión heptápodos) logran enseñar a una

lingüista y a un físico, vigilados de cerca por tres militares, su lenguaje basado en símbolos gráficos: variantes de una circunferencia dibujadas en el aire con su propia tinta. El problema es que, dada nuestra escasa formación en las sutilezas de estos trazos, está a punto de declararse una guerra interplanetaria al no comprender que «arma» puede significar, precisamente, la lengua que se intenta compartir. Además, esta película nos enseña que podría haber seres inteligentes cuya percepción del tiempo fuera circular en vez de lineal. Algo realmente inquietante.

En cualquier caso, los cerebros (o las estructuras equivalentes en las que resida su inteligencia) y sistemas sensoriales de nuestros interlocutores alienígenas serían el resultado de una evolución muy diferente en su lugar de origen, algo coherente con todo lo comentado en este libro. Así, podrían responder a regiones del espectro visible o audible diferentes de las nuestras, o bien no centrarse tanto como los humanos en los estímulos recogidos por la vista y el oído para interaccionar con su entorno. En nuestro propio planeta, entre la biodiversidad que nos rodea abundan los ejemplos de estas posibilidades: conocemos animales que detectan la luz ultravioleta (desde insectos hasta mamíferos) o los ultrasonidos (como ocurre con los perros), y también otros que se comunican empleando señales de sónar (murciélagos o delfines), olores (gran parte de los mamíferos), feromonas (casi todos los insectos), o incluso estímulos táctiles y ondas de presión en el aire (como muchos animales que utilizan sus antenas). Si los alienígenas muestran alguna de tales habilidades, quizás nos convenga ir a su encuentro rodeados de esos animales que habitualmente consideramos poco o nada inteligentes... pues podrían servirnos como intérpretes.

Dada la complejidad que puede tener el problema de la comunicación, Nathalie Cabrol, investigadora del Instituto SETI y directora del Centro Carl Sagan para el estudio de la vida en el Universo, ha propuesto que la búsqueda de seres inteligentes debe plantearse de forma aún más interdisciplinar de como se hace ahora. Así, además de astrónomos y bioquímicos, en los grupos de trabajo deberían intervenir neurobiólogos, psicólogos, sociólogos y lingüistas. Sin duda, durante los próximos años habrá muchas conversaciones, artículos y reuniones sobre este tema.

En cualquier caso, la realidad es que por el momento nadie nos ha mandado ningún tipo de señal. Tampoco han respondido a nuestros mensajes, lo que podría indicar que no han sido recibidos, que los extraterrestres son unos maleducados, o que están preparando en secreto su llegada a nuestro planeta. A pesar de ello la humanidad seguirá a la escucha, ya que la probabilidad de encontrar otra vida inteligente es extremadamente baja... pero no nula. De todos modos, como hemos ido comentando, hoy en día los investigadores vamos principalmente en busca de vida microbiana, no de seres pluricelulares y menos aún de otras inteligencias. Nos parece que esto

puede tener muchas más probabilidades de éxito, aunque somos conscientes de que sería más difícil reconocer inequívocamente señales biológicas de vida pasada o presente (pues podremos toparnos con muchos falsos positivos) que detectar la actividad de otros seres inteligentes (ya que el Universo no emite señales tecnológicas). De cara al futuro, priorizar la búsqueda de microorganismos no hace que el esfuerzo sea menos atractivo, sino que precisamente lo convierte en más realista y eventualmente fructífero, por ser abordable con todo nuestro potencial científico y tecnológico. Recordando por penúltima vez a Carl Sagan: «En algún lugar, algo increíble espera ser descubierto».



Carteles de cuatro películas de ciencia ficción que, junto a otras mencionadas a lo largo de este libro, han tratado distintos aspectos del contacto y la comunicación con inteligencias extraterrestres: *Encuentros en la tercera fase* (Steven Spielberg, 1977), *ET, el extraterrestre* (Steven Spielberg, 1982), *Contact* (Robert Zemeckis, 1997) y *La llegada* (Denis Villeneuve, 2016). © Album.

Después de todas las páginas que hemos compartido, tras viajar en el tiempo y el espacio, aún no sabemos si estamos solos. Solos como biodiversidad surgida de LUCA, sin otros tipos de biología con los que compararla, y solos como especie dotada de inteligencia y lenguaje, sin nadie con quien comunicarnos. Pero el camino continúa: mientras existamos sobre este punto azul pálido, o en los planetas que logremos colonizar, seguiremos mirando al cielo estrellado cada noche, nos haremos grandes preguntas sobre nuestros orígenes... y buscaremos otras vidas en el Cosmos.



Un café con... David Dunér



Doctor en Filosofía. Profesor titular de Historia de la Ciencia y las Ideas en la Universidad de Lund (Suecia).

Me parecía importante tener la última conversación para este libro con un filósofo, ya que nos puedes aportar una visión más profunda y global sobre muchos de los temas que se tratan a lo largo de él. Comencemos hablando precisamente sobre astrobiología: ¿en tu opinión es una nueva ciencia, o simplemente la combinación de disciplinas científicas bien establecidas?

Las preguntas que la astrobiología trata de responder son algunas de las más antiguas de la humanidad: ¿de dónde venimos?, ¿cómo comenzó la vida?, ¿adónde vamos?, ¿hay vida en otros lugares, quizás detrás de esa montaña, donde termina el mar o en mundos lejanos? Supongo que estas cuestiones tan profundas surgieron en cuanto nuestra especie adquirió conciencia de su propia existencia. Las reflexiones sobre si había vida fuera de la Tierra serían meras especulaciones durante mucho tiempo. El escritor satírico Luciano de Samósata ya describía en el siglo II de nuestra era un viaje imaginario a otros planetas del Sistema Solar, donde conoció a sus habitantes. Aunque, desde el

punto de vista científico y filosófico, hasta el siglo XVI se consideró muy improbable que pudiera haber vida en algún otro lugar: según el modelo geocéntrico ptolemaico-aristotélico, la Tierra ocupaba el centro del Universo y todo lo que estaba más allá de nuestro planeta era intrínsecamente diferente.

Pero esas ideas cambiaron en el año 1543. La cosmovisión heliocéntrica de Copérnico hizo que la Tierra se convirtiera en lo que es, un planeta más, y esto permitía pensar que la vida también podría existir en Marte, Venus, la Luna u otros lugares. Aun así tal planteamiento era sólo una posibilidad, ya que no había forma de comprobar si la realidad estaba a la altura de las expectativas. Después de tres siglos de grandes avances en la observación del cielo, a finales del XIX algunos astrónomos afirmaron que habían visto signos de vida en otros planetas, como el famoso caso de los «canales de Marte» de Percival Lowell. Con la revolución tecnológica desencadenada por el programa espacial a partir de 1960, pudimos empezar a conocer realmente las superficies de otros cuerpos planetarios. Y allí no se veía vida. Pero hay dos descubrimientos que cambiaron radicalmente este campo: la detección y caracterización de los microorganismos extremófilos que viven en muchos ambientes «casi extraterrestres» de la Tierra, y el descubrimiento en 1995 del primer planeta extrasolar. A partir de entonces, los astrobiólogos ya tenían algo que estudiar.

Efectivamente, ahí empezó a gestarse esta aventura... La astrobiología se caracteriza por su inter-, trans- o multi-disciplinariedad. Desde el punto de vista epistemológico, ¿ofrece ventajas abordar las cuestiones más relevantes para los humanos combinando la visión y metodología de diferentes campos de la ciencia y la filosofía?

Todavía muchas preguntas dentro de la astrobiología se estudian desde una sola especialidad, pero está claro que para responder a las cuestiones más relevantes es necesario un enfoque interdisciplinario, o, tal vez, multidisciplinario. Para intentar saber si hay vida fuera de la Tierra, han de combinar esfuerzos los astrónomos, biólogos, geólogos, físicos, químicos, ingenieros... y también filósofos y científicos sociales. El Universo mismo y la naturaleza de las cosas «no se preocupan» por las disciplinas que los humanos hemos ido inventando para organizar nuestra educación superior y los programas de investigación. Lo que importa son las preguntas.

Las grandes preguntas, con sus múltiples enfoques... Debido a su conexión con la curiosidad y la creatividad humanas, ¿es la astrobiología un buen escenario para profundizar en las relaciones entre las tres facetas de la cultura: ciencia, humanidades y artes?

Sí, yo creo que sí. La astrobiología pone en contacto varias formas de entender el mundo que nos rodea, dentro y fuera de la ciencia. Lo que convierte este campo de investigación en algo tan intrigante para muchas personas no son sólo los interesantísimos temas científicos que engloba, sino también las preguntas existenciales que plantea. Porque trata de nosotros mismos: quiénes somos y de dónde venimos. Independientemente de que nunca sabremos cómo comenzó la vida, y de que podamos o no encontrar seres extraterrestres, somos los humanos quienes nos seguimos haciendo esas grandes preguntas, tanto los científicos y filósofos como los escritores o pintores. El factor humano es una parte fundamental de la ciencia y, en general, de la cultura.

Estamos totalmente de acuerdo, David. Otro tema interesante del que me gustaría conocer tu experta opinión es el referente a las cuestiones éticas que deben tenerse en cuenta en el campo de la astrobiología.

La ciencia es realizada por los científicos, que son parte de la sociedad. Y cuando los científicos priorizan temas y llevan a cabo investigaciones que afectan a los demás, o a nuestro entorno, surgen los debates éticos. Hay varias cuestiones relacionadas con la ética que ya se discuten en este campo, por ejemplo la protección planetaria, la terraformación o la minería de asteroides. Es muy probable que podamos contaminar otros planetas con nuestros propios microbios, y eso sería cuestionable por dos razones: tales microorganismos podrían conquistar el nuevo entorno y competir con la vida endógena o indígena que quizás haya en él, y por otra parte los científicos correrían el riesgo de confundirse y considerar como un hallazgo importante lo que sólo es contaminación terrestre. Pero, visto de otra forma, si la vida es algo intrínsecamente bueno... ¿no deberíamos hacer todo lo posible para difundirla en el Universo?

También hay riesgos con los usos comerciales del espacio, que muy probablemente cambiarán nuestras sociedades aquí, en la Tierra: las riquezas que puedan obtenerse, por ejemplo, a través de la minería espacial... ¿deberían pertenecer sólo a las empresas extractoras, o toda la humanidad tendría que beneficiarse de ello? En cualquier caso, personalmente creo que la pregunta ética más trascendental surgirá si un día se encuentra vida alienígena: ¿cómo nos comportaremos con ella?, ¿seremos capaces de mantener un enfoque sostenible y responsable? Teniendo en cuenta nuestra actitud durante las últimas décadas con la biodiversidad de nuestro propio planeta, ¿podremos evitar que continúe esta tendencia destructiva?

Realmente, encontrar vida extraterrestre tendría profundas consecuencias filosóficas para toda la humanidad. ¿Crees que esto significaría algo

adicional para las personas creyentes? ¿Podría ser distinto el impacto de tal descubrimiento en las religiones monoteístas y politeístas?

Hay varios estudios sobre el posible impacto social de encontrar vida fuera de la Tierra. Si se detecta un nuevo microorganismo en Marte, por ejemplo, supondría un descubrimiento trascendental para microbiólogos y genetistas. Esto daría lugar a estupendos artículos científicos y a grandes titulares en todos los periódicos, pero la mayoría de la gente probablemente dejaría de preocuparse por ello pronto: lo olvidaría y continuaría con sus quehaceres cotidianos. Sin embargo, si la vida encontrada es inteligente, si nos ponemos en contacto con una civilización extraterrestre y podemos compartir información con ella... eso probablemente sí cambiaría nuestra sociedad para siempre.

Entre las religiones, hay diferencias en el enfoque y la comprensión sobre este tema. En general, parece que las politeístas serían más proclives que los credos monoteístas a asumir la idea de la vida extraterrestre. Algunos estudios sugieren que acoger este hallazgo sería más fácil para los hindúes y budistas que para los cristianos evangélicos, por ejemplo. Lo que más inquieta a estos últimos es que, si Jesús murió crucificado en la Tierra por nuestros pecados, ¿eso implicaría que hay miles de millones de «otros jesuses» que dieron su vida en cada una de las cruces dispersas por el Cosmos, o el Jesús terrestre murió por todos los seres inteligentes del Universo? Pero, si sólo hubo uno, ¿cómo podrían saber de él desde sus respectivos planetas? Por otro lado, se podría contraargumentar que si Dios es omnípotente y bondadoso, y la vida es algo bueno... ¡llenaría todo el Universo de vida!

Curiosas reflexiones... Sobre la primera parte de tu respuesta, teniendo en cuenta que además de los humanos conocemos otras especies en nuestro planeta que muestran comportamientos que podrían considerarse inteligentes (como los chimpancés, delfines o cuervos, por nombrar algunos), ¿cuál sería una definición razonable de «inteligencia», suficientemente amplia como para incluir a todos los «seres pensantes» que puedan existir más allá de la Tierra?

Imaginar que existe vida fuera de la Tierra, ya sean seres unicelulares o incluso criaturas más complejas y extrañas, es realmente inquietante. La posibilidad de que algunos de esos extraterrestres también sientan, piensen, sueñen, busquen, se pregunten acerca de su propia existencia... sería aún más alucinante. Y si además pudiéramos intercambiar reflexiones con ellos sobre lo que significa vivir, sentir y pensar, estaríamos ante la experiencia más abrumadora posible para la mente humana. Por tanto, sin duda el descubrimiento de vida inteligente sería algo realmente asombroso, especialmente si pudiéramos establecer una comunicación.

Por eso tu pregunta es muy pertinente, Carlos: ¿qué es en realidad la inteligencia? La ecuación de Drake y gran parte de la investigación SETI utiliza una visión operativa y pragmática: es la capacidad de transmitir ondas electromagnéticas. Esto no tiene que ver, por supuesto, con lo que suponemos al reconocer un comportamiento «inteligente» en la vida ordinaria. Tampoco es una propiedad suficiente para ayudarnos a entender la posible distribución de la inteligencia en el Cosmos: cualquier criatura que elabore mensajes significativos podrá comunicarse, aunque no construya radiotelescopios u otros dispositivos avanzados.

Volvemos a estar de acuerdo. De hecho, nuestra especie ya era inteligente antes de descubrir las ondas electromagnéticas...

Ésa es la cuestión. Si definimos la inteligencia de forma «menos tecnológica», podemos entenderla como la capacidad para resolver problemas, tomar decisiones racionales, obrar lógicamente, manejar las limitaciones de tiempo, espacio o materiales. Y como concepto más amplio, la cognición no incluye únicamente las capacidades que llamamos racionales o lógicas, pues ser inteligente es también tener habilidades emocionales y saber vivir en sociedad: hacer frente no sólo al medio físico, sino también al entorno social. De hecho, en estudios con los animales que citabas parece que la inteligencia o las habilidades cognitivas avanzadas están conectadas con la sociabilidad y la flexibilidad. Los chimpancés, delfines o cuervos son sociales y se adaptan a diferentes ambientes, alimentos o comportamientos del grupo en su conjunto.

Pensando en la búsqueda de una forma de vida inteligente, esperaríamos que ésta tuviera dos características: capacidad para imaginar cosas que existen en otro tiempo u otro lugar, o que ni siquiera existen, y flexibilidad suficiente para participar en interacciones intersubjetivas, en las que resulte necesario entender cómo razonan otras mentes. Así somos nosotros, precisamente.

En caso de que alguna vez se encontrara una inteligencia extraterrestre con estas dos habilidades, los seres humanos seguramente intentarán comunicarse con ella. ¿Qué opciones tendríamos para establecer algún tipo de comunicación con una especie pensante que hubiera evolucionado por separado, sin ninguna conexión biológica o cultural previa con Homo sapiens?

La comunicación es una forma de transferir contenido mental, de una mente a otra, donde la codificación de un mensaje por el emisor es seguida por una decodificación por parte del receptor. Dado que tal comunicación implica la interpretación, que es cuando el destinatario dota de significado al mensaje, ¿cómo podría darse una comunicación efectiva entre seres inteligentes de distintos planetas que difirieran física, biológica y/o culturalmente? En mi

opinión, si queremos entendernos con otra civilización las limitaciones cognitivas y semióticas podrían ser más importantes que las tecnológicas.

Cuando en este campo reflexionamos sobre la posible «comunicación interestelar», se ha propuesto que la información transferida debería ser independiente del contexto, el tiempo y la naturaleza humana. Y típicamente se ha pensado en utilizar las matemáticas: por ejemplo, $1 + 1 = 2$, y el teorema de Pitágoras es verdadero en todos los lugares del Universo. Si los extraterrestres pueden construir transmisores y receptores, se supone que saben matemáticas y física. Pero, tal como yo lo veo, esta estrategia pasa por alto la coevolución biocultural de la comunicación, ya que nuestro interlocutor alienígena expresaría y comunicaría sus pensamientos, o incluso sus emociones, como resultado del proceso evolutivo que haya seguido con el entorno en el que vive.

En cualquier caso, supongo que en esa comunicación necesitaríamos símbolos...

Efectivamente, si queremos comunicar algo precisamos disponer de señales que «signifiquen» el contenido mental en cuestión. Necesitamos símbolos. Si los extraterrestres son inteligentes, probablemente tengan algún tipo de habilidades de simbolización y pensamiento abstracto desvinculadas de su medio ambiente, con las que podrán razonar sobre cuestiones más elaboradas. En otras palabras, para alcanzar un mayor grado de complejidad comunicativa, y por tanto para poder referirse incluso a cosas que no existen, deberán usar símbolos: signos en los que la expresión está separada del contenido.

El problema con los símbolos es que la conexión entre cómo se expresan y lo que significan es completamente arbitraria. Por ejemplo, la palabra que más estamos utilizando tú y yo hoy, «vida», no tiene en ningún idioma una relación causal con lo que representa, ni se parece a lo que significa. Es la expresión del mensaje, más que su contenido, lo que se convierte en dificultad para el intérprete. Quizá, aunque el alienígena en cuestión tenga un conocimiento «científico» de su entorno similar al que nosotros hemos adquirido acerca de la Tierra, su forma de expresarlo sea radicalmente distinta a la nuestra. Pero, a pesar de estos problemas... qué interesante sería poder comunicarnos con esas otras vidas, ¿verdad?



Agradecimientos

Aunque tiene su encanto viajar solo, siempre se disfruta más al compartir el camino. Sobre todo, si el itinerario va a llevarnos fuera de nuestro planeta. A lo largo de este recorrido por el Cosmos me han acompañado —de una u otra forma, durante más o menos etapas— bastantes personas. Y a todas ellas quiero agradecérselo.

En primer lugar a María Lamprecht, científica e ilustradora: las maravillosas láminas que encabezan cada capítulo han surgido de su talento e inspiración, y también son suyas algunas de las figuras que se integran en el texto. El Universo sería menos acogedor sin sus reflexiones artísticas sobre los posibles hábitats para otras vidas.

A Javier Armentia, compañero de momentos creativos, por escribir el prólogo para este libro. Sus palabras, llenas de conocimiento y rebosantes de cariño, son la mejor plataforma de despegue que yo pudiera haber soñado para iniciar un viaje espacial como éste.

A los doce colegas y amigos con los que, para cerrar cada capítulo, he compartido charlas de café, inquietudes y confidencias en distintos países: Muriel Gargaud, Emmanuelle Javaux, Ricardo Amils, Víctor Parro, Michel Viso, José Antonio Rodríguez Manfredi, Olga Prieto Ballesteros, Jonathan I. Lunine, Joseph A. Nuth, Luisa Lara, Aki Roberge y David Dunér.

A quienes han leído alguna sección del libro y me han dado consejos para mejorararlo: los propios José Antonio y Olga, y también María Rosa Zapatero e Izaskun Jiménez, otras dos amigas del Centro de Astrobiología con las que siempre intento aprender sobre astrofísica y astroquímica. Y a Dani Torregrosa, que se enfrentó a la titánica labor de revisar el texto completo cuando estaba casi terminado: gracias por sus siempre certeros comentarios, por toda la química y complicidad que compartimos.

A Carmen Esteban, por mantener su apoyo decidido a este proyecto en una época tan complicada como la actual, y por hacerlo florecer en el año que nos dejó sin primavera. A Raquel Reguera y todo el equipo de la Editorial Crítica, por su profesionalidad y cuidado en la edición de esta obra.

A mi hijo Diego, por nuestra búsqueda constante de planetas —reales o imaginarios— y de los seres que los habitan. A Miriam, por su sonido y su luz. A mis padres y hermanos, y al resto de la familia, por estar siempre ahí. A Elo Bielsa, que me puso tras la pista de una de las citas que encabezan los capítulos.

A mis compañeros del Centro de Astrobiología, y a otros colegas de distintos campos de la ciencia y la tecnología, con los que cada día comparto la pasión por los grandes interrogantes que se abren ante nosotros. A los divulgadores científicos —dentro y fuera de la galaxia Naukas— que ya son parte de mi vida. A los poetas, novelistas, cineastas, pintores o músicos en los que siempre busco refugio.

A tantas personas, de todas las edades, que han hecho comentarios o me han planteado preguntas en mis charlas de divulgación y en mis clases para institutos, universidades o cursos de verano: su curiosidad y perseverancia me han obligado a seguir dudando, leyendo, investigando, preparando figuras, construyendo metáforas.

A todos mis amigos, por el tiempo que he dejado de dedicarles mientras recorría el Cosmos en busca de otras vidas.

Y a ti, lectora, lector, por acompañarme también en este viaje.

Lecturas recomendadas

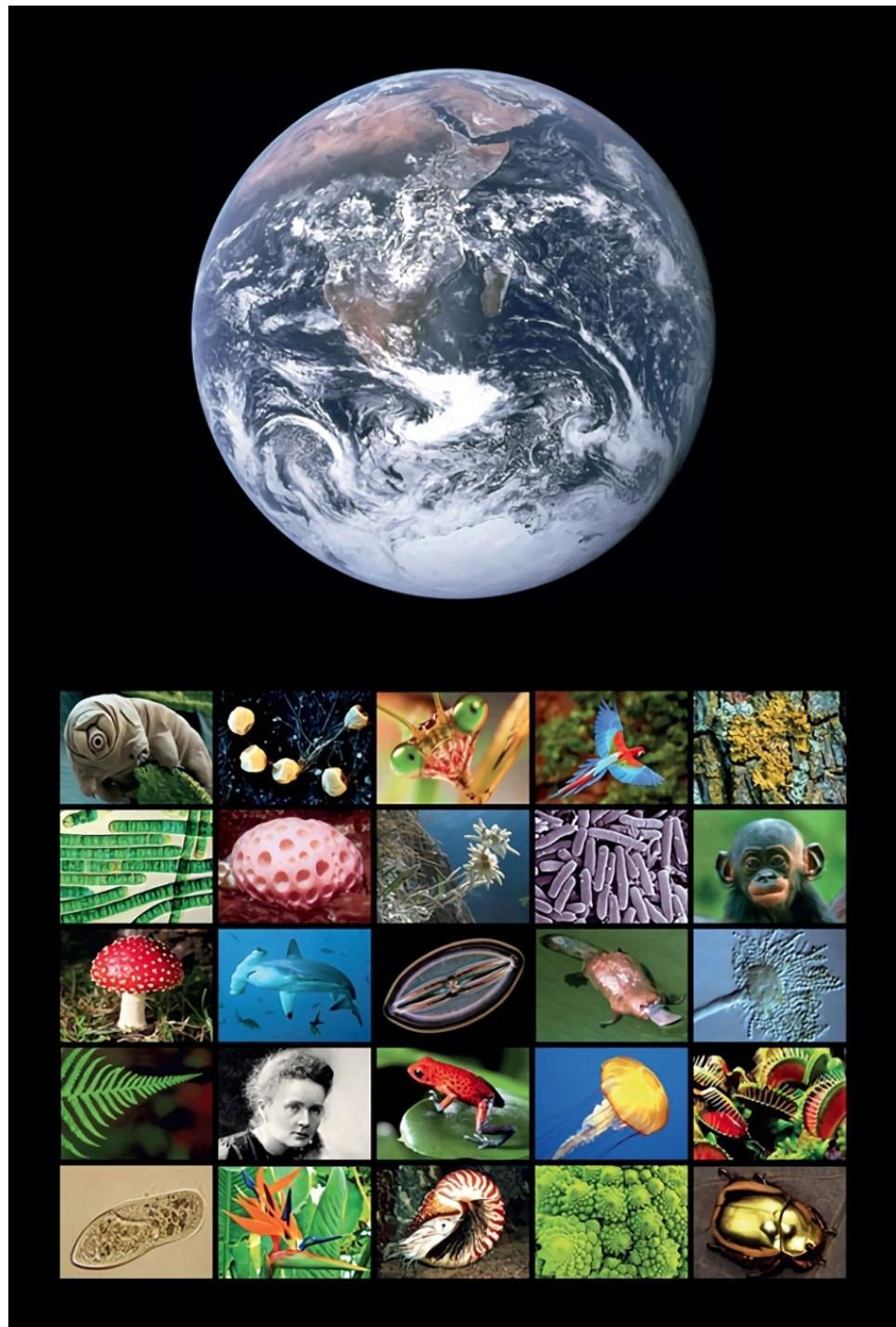
- Aguilera Mochón, Juan Antonio (2016). *La vida no terrestre ¿Estamos solos en el Universo?* Ed. RBA, Barcelona.
- Anguita, Francisco (1998). *Historia de Marte. Mito, exploración, futuro.* Ed. Planeta, Barcelona.
- Ballesteros, Fernando J. (2008). *Gramáticas extraterrestres.* Ed. Universitat de València, Valencia.
- Briones, Carlos, Fernández Soto, Alberto, y Bermúdez de Castro, José María (2015). *Orígenes. El universo, la vida, los humanos.* Ed. Crítica, Barcelona.
- Brock, Thomas D. (1978). *Thermophilic microorganisms and life at high temperatures.* Ed. Springer-Verlag, Nueva York.
- Carter, Spencer (2012). *La vida en otros planetas. ¿Hay vida inteligente en el Universo?* Ed. Robinbook, Barcelona.
- Cockell, Charles S. (2015). *Astrobiology: Understanding Life in the Universe.* Ed. John Wiley & Sons, Hoboken, Nueva York.
- Davies, Paul (1995). *Are we alone? Implications of the discovery of extraterrestrial life.* Ed. Penguin, Londres.
- de Duve, Christian (1995). *Vital dust: Life as a cosmic imperative.* Ed. Basic Books, Nueva York.
- Fernández Castro, Telmo (2019). *100 historias curiosas del Universo.* Ed. Kinnaman, Santa Cruz de Tenerife.
- Galadí-Enríquez, David (1998). *A ras de cielo.* Ediciones B, Barcelona.
- Giménez Cañete, Álvaro (2012). *¿Qué sabemos de? Exoplanetas.* Ed. CSIC-Catarata, Madrid.
- Giménez Cañete, Álvaro, Gómez-Elvira, Javier, y Martín Mayorga, Daniel (2011). *Astrobiología. Sobre el origen y evolución de la vida en el Universo.* Ed. CSIC-Catarata, Madrid.
- Gómez, Ángeles (2018). *¡Poyejali! 50 películas esenciales sobre la exploración del espacio.* Ed. UOC, Barcelona.
- Gómez-Elvira, Javier, y Martín Mayorga, Daniel (2013). *¿Qué sabemos de? Extraterrestres.* Ed. CSIC-Catarata, Madrid.
- Gross, Michael (1998). *Life on the edge.* Ed. Plenum Press, Nueva York.
- Haggerty, James J. (1969). *Apollo: Lunar landing.* Ed. Rand McNally & Co, Chicago.

- Hand, Kevin P. (2020). *Alien Oceans*. Ed. Princeton University Press, Princeton.
- Hartmann, William K. (2011). *Guía turística de Marte*. Ed. Akal, Madrid.
- Hathaway, Nancy (1994). *El Universo para curiosos*. Ed. Crítica, Barcelona.
- Jakosky, Bruce (1998). *La búsqueda de vida en otros planetas*. Ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kargel, Jeffrey S. (2004). *Mars. A warmer, wetter planet*. Ed. Springer–Praxis Publishing, Chichester.
- Lara, Luisa María (2010). *¿Qué sabemos de? Titán*. Ed. CSIC-Catarata, Madrid.
- Lázaro, Ester (2019). *La vida. Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Ed. Fundación Sicomoro, Madrid.
- Lunine, Jonathan I. (2004). *Astrobiology: A multi-disciplinary approach*. Ed. Pearson, Nueva York.
- Luque, Bartolo, y Márquez, Álvaro (2004). *Marte y vida: ciencia y ficción*. Ed. Equipo Sirius, Madrid.
- Martínez Ron, Antonio (2016). *El ojo desnudo*. Ed. Crítica, Barcelona.
- McEwen, Alfred S., Hansen-Koharchek, Candice, y Espinoza, Ari (2017). *Mars: The pristine beauty of the red planet*. Ed. The University of Arizona Press, Tucson.
- Mesler, Bill, y Cleaves II, H. James (2016). *A brief history of creation*. Ed. Norton & Co. Nueva York.
- Mix, Lucas John (2010). *La vida en el espacio. La nueva ciencia de la astrobiología*. Ed. Crítica, Barcelona.
- Navarro Yáñez, Alejandro (2016). *Los vikingos de Marte y otras historias científicas sobre la búsqueda de vida extraterrestre*. Ed. Guadalmazán, Córdoba.
- Nováková, Julie (Ed.) (2020). *Strangest of All. Anthology of astrobiological science fiction*. Ed. European Astrobiology Institute.
- Pérez Mercader, Juan (1996). *¿Qué sabemos del Universo? De antes del Big Bang al origen de la vida*. Ed. Debate, Madrid.
- Postgate, John (1995). *Las fronteras de la vida*. Ed. Crítica, Barcelona.
- Riveiro, Álex (2019). *Hacia las estrellas: una breve guía del universo*. Ed. Alfaguara, Madrid.
- Sagan, Carl (1980). *Cosmos*. Ed. Random House, Nueva York. [Edición en español: Ed. Planeta (1982)].
- (1994). *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space*. Ed. Random House, Nueva York. [Edición en español: Ed. Planeta (2006)].
- Seara Valero, Manuel (2015). *Hasta el infinito y más allá*. Ed. Destino, Barcelona.
- Toomey, David (2015). *Vida Extraña. La búsqueda de vida que es muy muy diferente de la nuestra*. Ed. El Viejo Topo, Barcelona.

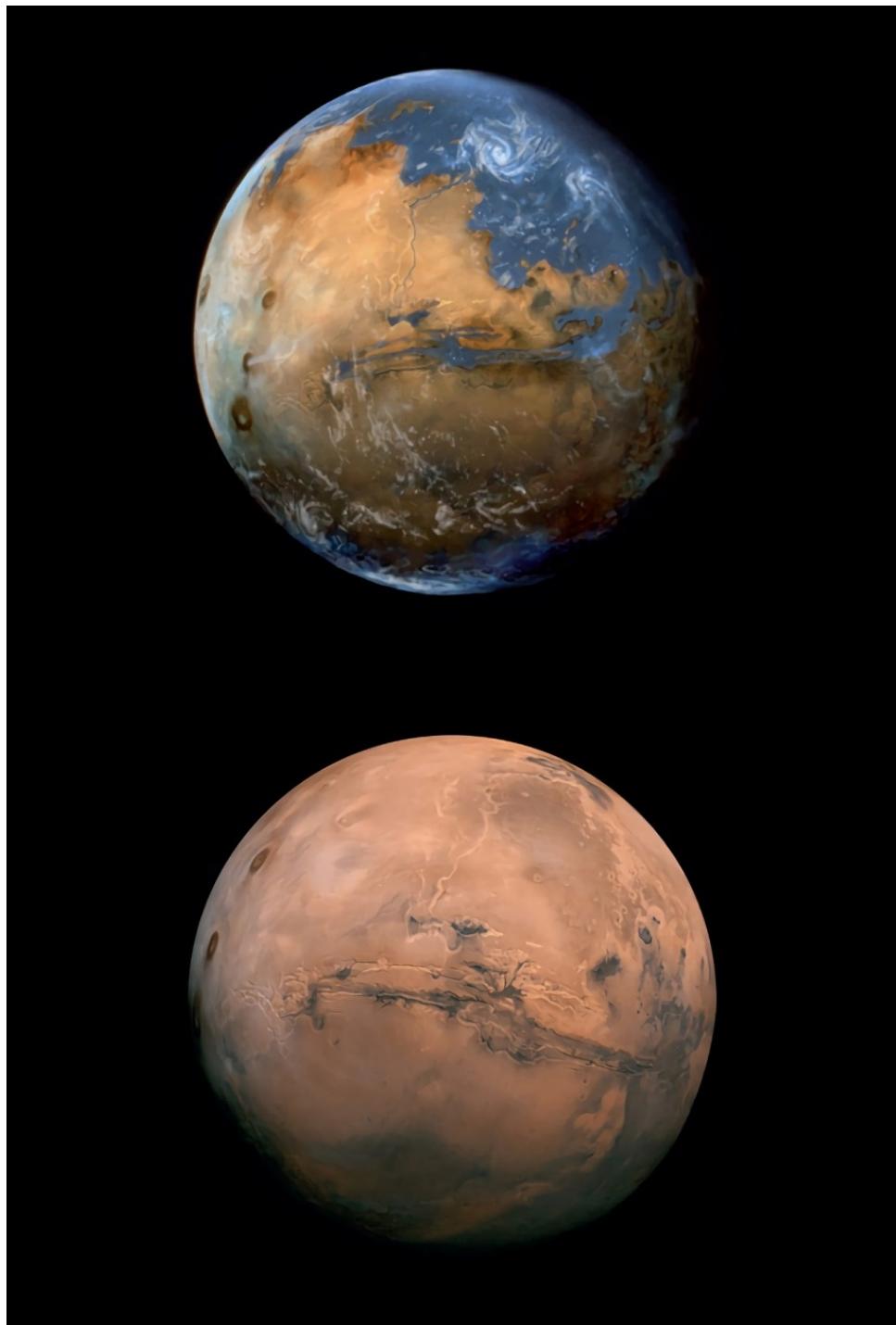
- Torregrosa, Daniel (2018). *Del mito al laboratorio. La inspiración de la mitología en la ciencia*. Ed. Cáalamo, Palencia.
- Trigo Rodríguez, Josep M. (2012). *Las raíces cósmicas de la vida*. Ed. UAB, Barcelona.
- Villaver, Eva (2019). *Las mil caras de la Luna*. Ed. HarperCollins Ibérica, Madrid.
- Wall, Michael (2018). *Out There: A Scientific Guide to Alien Life, Antimatter, and Human Space Travel (For the Cosmically Curious)*. Grand Central Publishing, Nueva York.
- Ward, Peter D., y Brownlee, Donald (2000). *Rare Earth. Why complex life is uncommon in the Universe*. Ed. Copernicus, Göttingen, Alemania.
- Webb, Stephen (2018). *Si el universo está lleno de extraterrestres... ¿dónde está todo el mundo?* Ed. Akal, Madrid.



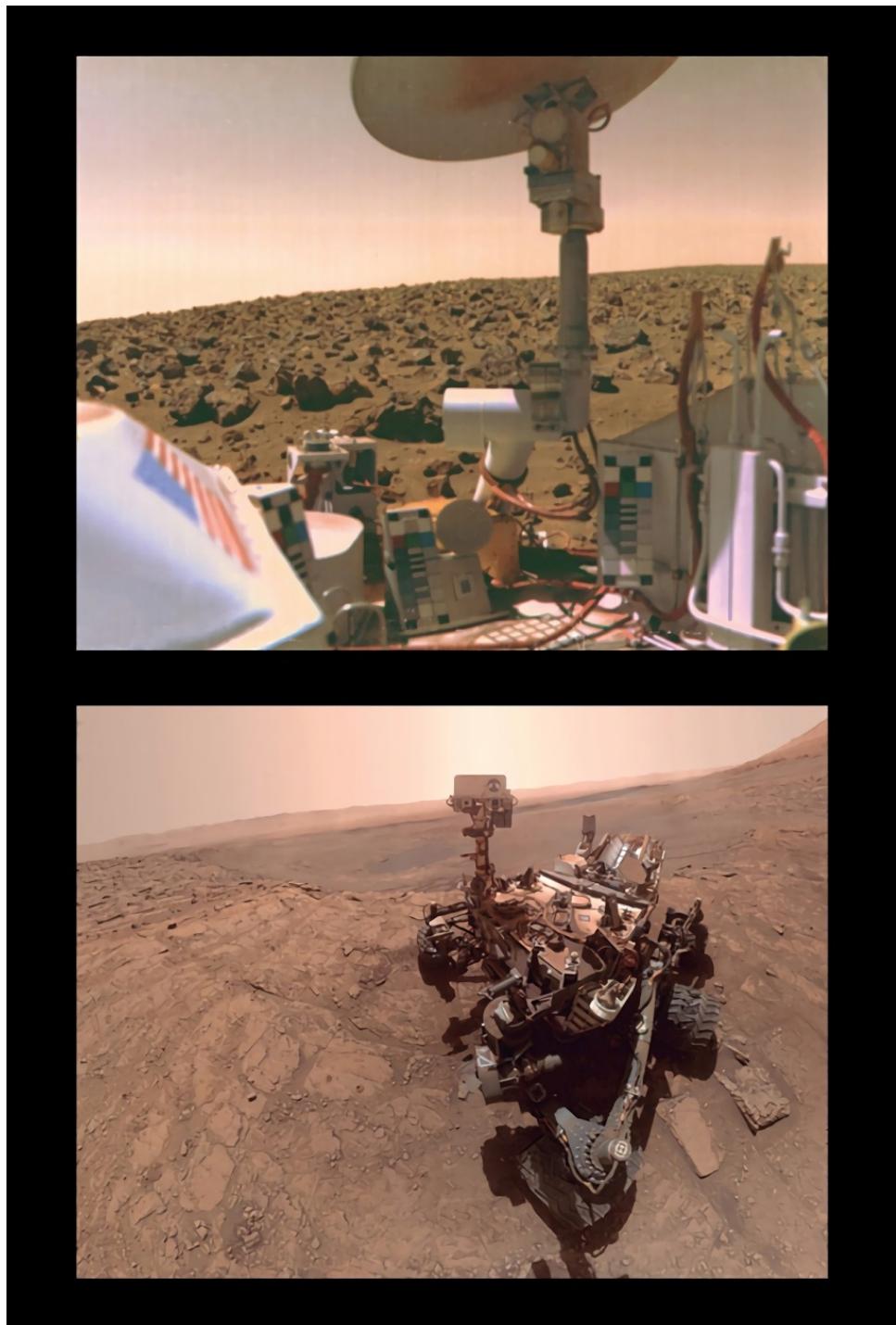
Mystic Mountain, pináculo de gas y polvo situado en la Nebulosa de Carina o de la Quilla (NGC 3372), que se encuentra a unos 7500 años luz del Sol y es una de las regiones de formación de estrellas más grandes y activas de nuestra galaxia. Imagen tomada por el telescopio espacial *Hubble* en 2010 como una composición de las señales de oxígeno (azul), hidrógeno y nitrógeno (verde), y azufre (rojo). Crédito: NASA, ESA, M. Livio y *Hubble 20th Anniversary Team (STScI)*.



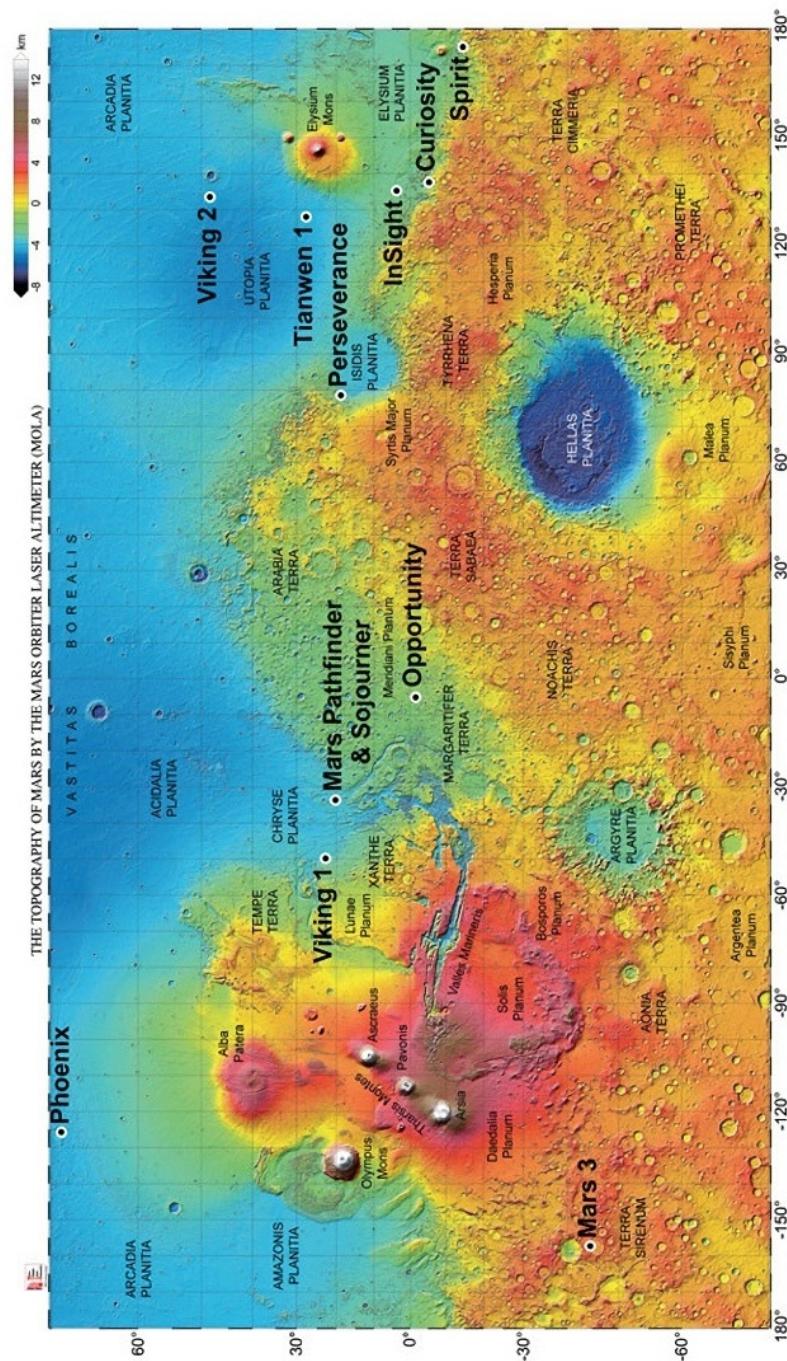
«La canica azul»: primera fotografía de un hemisferio de la Tierra completamente iluminado por el Sol. Se tomó el 7 de diciembre de 1972 desde el Apolo 17, a unos 29 000 km de la superficie terrestre. Crédito: NASA. Una muestra de la biodiversidad en nuestro planeta. Composición realizada por el autor, con fotografías propias y otras disponibles en Wikimedia Commons.



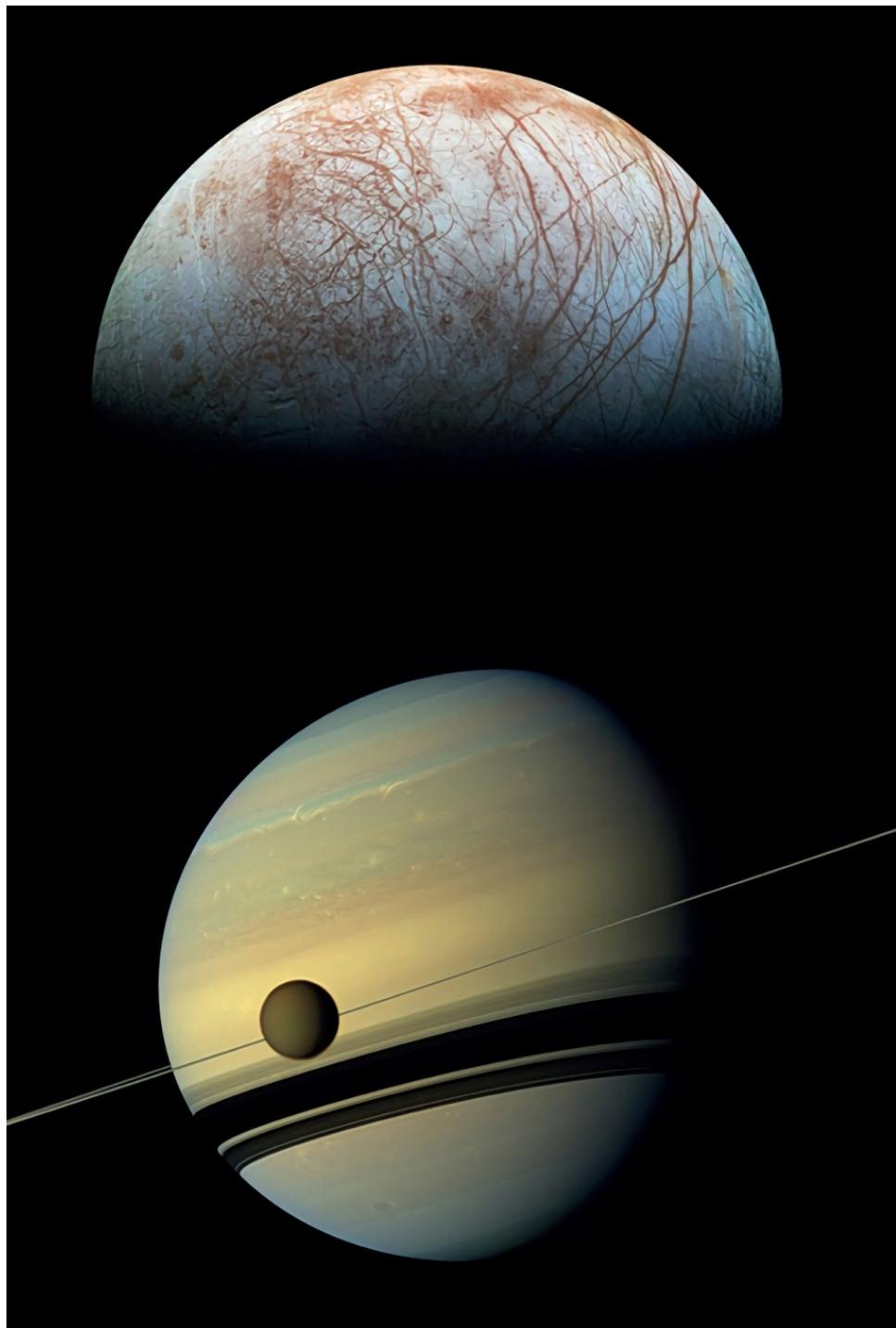
Recreación artística de cómo pudo ser Marte hace unos 4000 millones de años, mostrando Valles Marineris en la parte central. Copyrigth: Michael Carroll. El planeta Marte en la actualidad. Fotocomposición realizada a partir de 102 imágenes tomadas por el orbitador de la misión *Viking 1*. Crédito: NASA/JPL-Caltech.



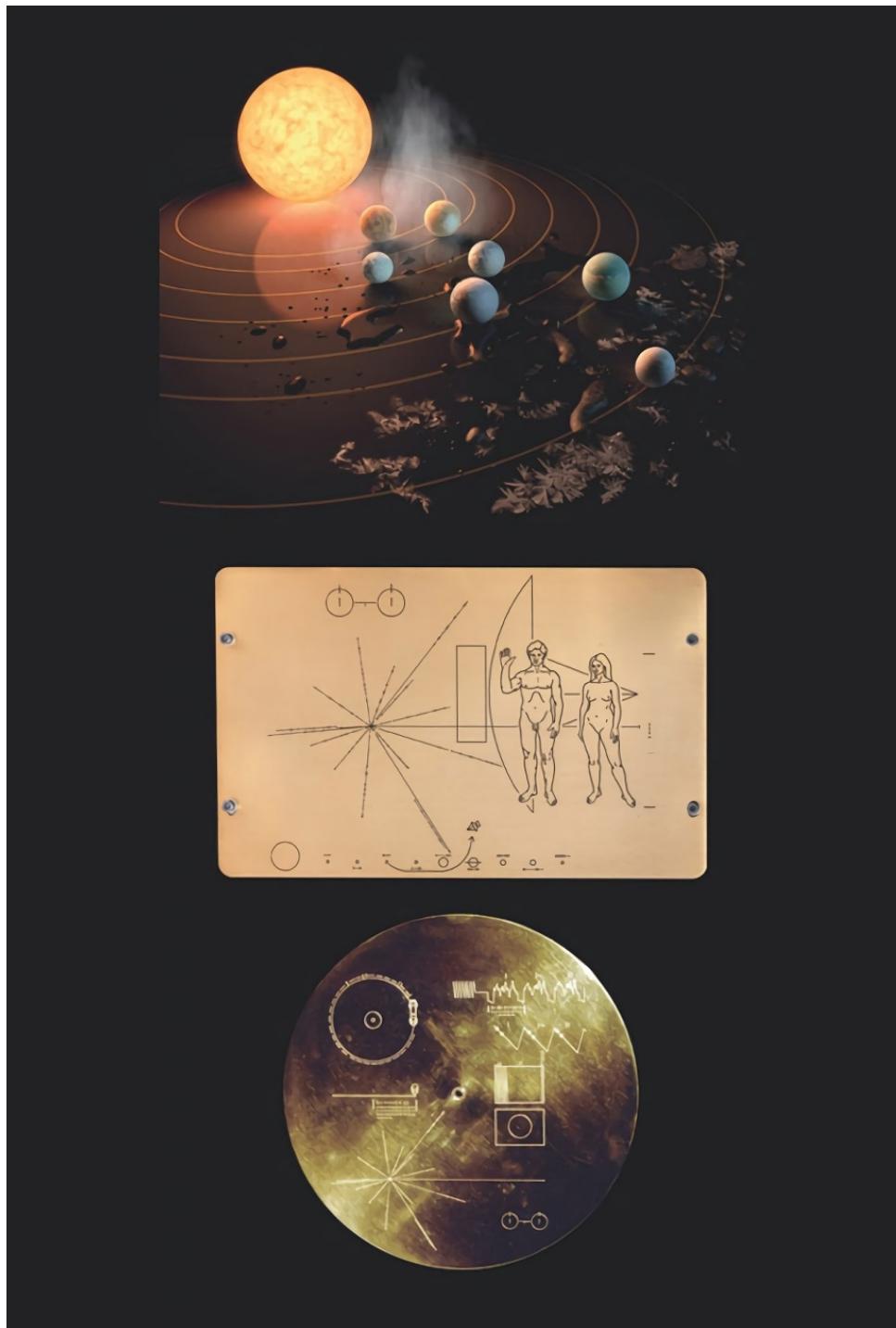
Fotografía de la superficie de Marte tomada por sonda *Viking Lander 2* en la región Utopia Planitia, el 3 de septiembre de 1976. Crédito: NASA/JPL-Caltech. Autorretrato del *rover Curiosity* en la zona Glen Etive del cráter Gale, el 11 de octubre de 2019 (sol 2553 de su misión). Es una composición de 57 imágenes tomadas con la cámara *Mars Hand Lens Imager (MAHLI)*, situada en el extremo del brazo robótico, que después se superpuso digitalmente en su posición original. Crédito: NASA/JPL-Caltech/MSSS.



Topografía de Marte obtenida a partir de las fotografías de los orbitadores *Viking* y los datos de altimetría del instrumento *MOLA* del *Mars Global Surveyor*. Se muestra la escala de colores correspondiente a las altitudes relativas del terreno, los nombres de sus principales regiones y accidentes geográficos, y los lugares de amartizaje de los *landers* y *rovers* que han llegado con éxito a su superficie o lo harán en 2021. Imagen de NASA/JPL-Caltech, modificada por José Antonio Rodríguez Manfredi y por el autor.



Superficie del satélite Europa a alta resolución (1,6 km/píxel), mostrando fracturas lineales y otras estructuras geológicas. Fotocomposición realizada a partir de las imágenes tomadas por la sonda *Galileo* en su primera y decimocuarta órbita de Júpiter (en 1995 y 1998, respectivamente), con el polo norte situado a la derecha. Crédito: NASA/ JPL-Caltech/SETI Institute. Tránsito de Titán frente a Saturno, en una composición de imágenes captadas por el orbitador *Cassini* el 6 de mayo de 2012. Crédito: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute.



Representación artística del sistema planetario TRAPPIST-1, a unos 39 años luz de nosotros, en una imagen que fue portada de la revista *Nature* el 22 de febrero de 2017. La temperatura superficial de los exoplanetas se sugiere mediante vapor de agua, agua líquida (en la zona de habitabilidad en torno a la estrella) y cristales de hielo. Crédito: NASA/JPL-Caltech. Réplica de la placa que llevaban las sondas *Pioneer 10* y *11* (lanzadas en 1972 y 1973, respectivamente) como mensaje a los extraterrestres que pudieran encontrarlas. © Eric Long / Smithsonian Institution. Fotografía de la «cara A» del disco *Los sonidos de la Tierra*, en el que las sondas *Voyager 1* y *2* (lanzadas en 1977) llevaban grabados saludos, música e imágenes de nuestro planeta. Crédito: NASA/JPL.



Colección de pósteres sobre el Sistema Solar (y más allá) elaborados por la NASA.



Carlos Briones Llorente, Licenciado en Ciencias Químicas y Doctor en Ciencias, con una tesis realizada en el Centro de Biología Molecular Severo Ochoa, es investigador en plantilla del CSIC y Coordinador del Grupo de Evolución Molecular, Mundo RNA y Biosensores del Centro de Astrobiología. Imparte charlas y conferencias sobre la carrera espacial y sus colegas del Centro de Astrobiología participaron en dos de los siete instrumentos que lleva el robot Perseverance de la Nasa, MEDA y SuperCam.

Dirige su propio grupo de investigación en el CAB desde 2000, centrado en el origen y la evolución temprana de la vida, la genética de los virus del ARN, la evolución in vitro de los ácidos nucleicos, y el desarrollo de biosensores. También colabora en proyectos de investigación interdisciplinar dedicados al análisis de la biodiversidad microbiana de los entornos extremos.

Miembro del Consejo Ejecutivo del Instituto Europeo de Astrobiología y de la Sociedad Española de Virología. También ha acumulado una amplia experiencia en comunicación y difusión de la ciencia.

Índice de contenido

Prólogo. No somos los únicos en el abrazo del aire

1. Preparativos del viaje

2. ¿Estamos solos en el Universo?

Nuestro lugar en el Cosmos

¿Qué es la vida?

La astrobiología: en busca de otras vidas

La dimensión social de la astrobiología

Un café con... Muriel Gargaud

3. La vida en la Tierra

De dónde venimos

La Tierra primitiva

En busca del origen de la vida

La química prebiótica

De la química a la biología

Mi apellido es LUCA

Azar, necesidad... ¿y panspermia?

A la luz de la evolución

Quiénes somos

Un café con... Emmanuelle Javaux

4. Los límites de la vida

Una visita al Parque Yellowstone

Vivir en los extremos

Dos apuntes sobre el agua y la vida

El río Tinto: Marte en la Tierra

La vida en el lado oscuro

Un café con... Ricardo Amils

5. Habilidad y biomarcadores

Habitabilidad

El agua

¿Disolventes alternativos?

La tabla periódica de los seres vivos

El carbono y la vida
¿Vida basada en el silicio?
¿Bioquímicas alternativas?
En busca de biomarcadores
Un café con... Víctor Parro

6. Protección planetaria

Miedo a lo desconocido
El regreso desde la Luna
¿Patógenos extraterrestres?
El mandamiento de la protección planetaria: «No contaminarás»
Los microorganismos de nuestro cuerpo
Condiciones de trabajo en protección planetaria
Contando microorganismos en un instrumento
Limpieza y esterilización
Requerimientos de protección planetaria
¿Hemos llevado ya vida terrestre a otros lugares?
Últimas noticias desde la Luna
Los humanos que volverán a la Luna... y llegarán a Marte
Un café con... Michel Viso

7. Marte

El planeta rojo
Los canales de Marte
Marcianos de ficción
¿Vida en Marte?
Las sondas Viking y sus controvertidos resultados
El regreso a Marte
La conquista del polo norte
La nueva era de las misiones robóticas
El meteorito ALH84001
Agua líquida en el Marte actual
El misterio del metano y el oxígeno en la atmósfera marciana
2020: volvemos a Marte
El esperado regreso de Europa al planeta rojo
El reto de traer muestras de Marte

El futuro: las misiones tripuladas
Exploración o explotación
¿Terraformación del planeta rojo?
Un café con... José Antonio Rodríguez Manfredi

8. Las lunas de Júpiter

Júpiter
Los satélites de Júpiter
Ío
Europa
¿Vida en europa?
Ganimedes
Calisto
La misión Juice
Europa Clipper
Europa Lander: ¿Tocaremos la superficie de esta luna?
Un café con... Olga Prieto Ballesteros

9. Los satélites de Saturno

Mitos, lienzos, notas y lentes
Saturno
Encélado
Opciones para la vida en encélado
Titán
Química orgánica en Titán
Una libélula en la atmósfera de Titán
Un café con... Jonathan I. Lunine

10. De Mercurio a los asteroides

Mercurio
Venus
El pasado habitable de Venus
¿Vida actual en las nubes de Venus?
En busca del planeta perdido
Los asteroides
Misiones a Ceres y a los asteroides
Los meteoritos

El meteorito Murchison
Las condritas carbonáceas y el origen de la vida
Un café con... Joseph A. Nuth

11. Entre Urano y los confines del Sistema Solar

Urano
Neptuno
Tritón
Plutón
Otros cuerpos del cinturón de Kuiper
La nube de Oort
Los cometas
Misiones a los cometas
Rosetta y el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko
La materia orgánica de «Chury»
El último cometa visitado
Un café con... Luisa Lara

12. Planetas extrasolares

El poder de los números
Los primeros exoplanetas detectados
Planetas y enanas marrones
Técnicas de detección indirectas
La observación directa de exoplanetas
El censo creciente de planetas extrasolares
Instrumentos en busca de exoplanetas
El futuro ya está aquí: la caracterización de exoplanetas
¿Qué hace habitable un planeta extrasolar?
Los exoplanetas más prometedores para la vida
¿Señales de actividad biológica en algún exoplaneta?
Un café con... Aki Roberge

13. ¿Otras vidas inteligentes?

En busca de otras inteligencias
¿Dónde están todos?
El prejuicio de buscar vidas inteligentes
La ecuación de Drake

El programa Seti
La señal Wow!
Las últimas señales analizadas
Mensajes a los extraterrestres
De los discos de las Voyager a los últimos mensajes enviados
Los visitantes interestelares ya han llegado
Visitantes de ficción
¿Podremos comunicarnos?
Un café con... David Dunér

Agradecimientos
Lecturas recomendadas
Láminas
Sobre el autor