

# Perseverance-Ingenuity

**-Nuestras manos y nuestros ojos en Marte-**

**Julio Solís García**



***Revista Digital de ACTA***  
**2024**

Publicación patrocinada por



ACTA representa en CEDRO los intereses de los autores científico-técnicos y académicos. Ser socio de ACTA es gratuito.

Solicite su adhesión en [acta@acta.es](mailto:acta@acta.es)

## **Perseverance-Ingenuity -nuestras manos y nuestros ojos en Marte-**

© 2024, **Julio Solís García**

© 2024,  **ACTA**

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

Se autorizan los enlaces a este artículo.

*ACTA no se hace responsable de las opiniones personales reflejadas en este artículo.*

## EXPLORACIÓN DE MARTE POR TIERRA Y POR AIRE

*"Una persona recientemente desesperada... estalló y dijo: ¿No crees nada? Sí, dije. Creo en la evidencia. Creo en la observación, la medición y el razonamiento, confirmado por observadores independientes."*  
**Isaac Asimov** (1920-1992), profesor de bioquímica, divulgador científico y escritor de ciencia ficción



*Figura 01: Fotografía de la colina "Santa Cruz" en el cráter Jezero de Marte, tomada por el rover "Perseverance" el día 29 de abril del año 2021, sol 68° de la misión "mars 2020".  
Crédito: NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.*

La historia de la exploración espacial de Marte (Figura 01), podemos contextualizarla dentro de la carrera espacial que las dos grandes potencias mundiales iniciaron tras la segunda guerra mundial. Concluido el programa "Apolo" a finales del año 1972, después de 12 años y 17 misiones lunares, se pudo constatar que la exploración tripulada contó con un éxito mediático y político muy notable, y supuso un avance importante en el estudio de las condiciones necesarias de seguridad, médicas, psicológicas, fisiológicas, supervivencia, etc... para hacer posibles los vuelos espaciales tripulados. Sin embargo, también suponía un coste económico muy superior al de las expediciones robotizadas automáticas, que eliminaban totalmente las servidumbres y los riesgos asociados al envío de astronautas, y por consiguiente mostraban una eficiencia muy superior desde el punto de vista científico-técnico.

Los vuelos espaciales tripulados más allá de la Luna quedaron pospuestos, dada la complejidad y el costo de los mismos, y tanto Estados Unidos como la Unión Soviética orientaron sus programas espaciales, de exploración y estudio, hacia el diseño de sondas robotizadas que pudieran desarrollar sus tareas de forma automática y con la mayor independencia posible del Control desde la Tierra.

En ese ambiente competitivo, los inicios por ambas partes estuvieron marcados por muchos fracasos e intentos fallidos, de los que fueron aprendiendo para conseguir en pocos años alcanzar con éxito al planeta Marte, explorarlo desde naves en órbita y desde vehículos en superficie, tan-

to estáticos como móviles, e incluso enviando ingenios voladores que están ofreciendo un resultado excepcionalmente bueno, como el helicóptero marciano "*Ingenuity*" (Figura 02).



*Figura 02: Imagen del "Ingenuity Mars Helicopter" en el "aeródromo Mu", tomada por el rover "Perseverance" el día 14 de abril del año 2023, sol 764º de la misión "mars 2020". El helicóptero se encuentra a 220 m del rover. La roca partida de ~1,2 m de ancho se halla a 115 m. Crédito: NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.*

En la década de los años 60 del pasado siglo, la U.R.S.S. envió a Marte hasta nueve sondas dentro de su programa "*Mars*", aunque ninguna de ellas consiguió culminar su misión con éxito.

Por su parte entre los años 1962 y 1973, el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA diseñó y construyó 10 naves espaciales llamadas "*Mariner*" para explorar el sistema solar interior, visitando los planetas Venus, Marte y Mercurio por primera vez, y regresando a Venus y Marte para realizar observaciones adicionales de cerca. Los "*Mariner*" eran exploradores robóticos relativamente pequeños, cada uno de ellos lanzado en un cohete Atlas con un propulsor de etapa superior "*Agena*" o "*Centaur*", y con un peso inferior a media tonelada (sin el propulsor del cohete a bordo).

\* **Mariner 3 y 4** eran naves idénticas diseñadas para realizar los primeros sobrevuelos de Marte. La "*Mariner 3*" fue lanzada el 5 de noviembre de 1964, pero la cubierta que cubría la nave sobre su cohete no se abrió correctamente y la "*Mariner 3*" no llegó a Marte. Tres semanas más tarde, el 28 de noviembre de 1964, "*Mariner 4*" fue lanzado con éxito en un viaje de ocho meses al planeta rojo. La nave pasó por Marte el 14 de julio de 1965, recogiendo las primeras fotografías en primer plano de otro planeta. Las imágenes, reproducidas desde una pequeña grabadora durante un largo periodo de tiempo, mostraban cráteres de impacto de tipo lunar (que acababan de empezar a fotografiarse de cerca desde la Luna), algunos de ellos cubiertos de escarcha en el frío atardecer marciano. No se esperaba que la nave "*Mariner 4*" sobreviviera mucho más de los ocho meses que transcurrieron hasta su encuentro con Marte, pero en realidad duró unos tres años en órbita solar, continuando los estudios a largo plazo sobre el viento solar y realizando mediciones coordinadas con la "*Mariner 5*", una nave gemela lanzada a Venus en 1967.

\* **Mariner 6 y 7** fueron el segundo par de misiones con destino a Marte de la serie de exploración del Sistema Solar "*Mariner*" de la NASA, lanzadas al espacio a principios del año 1969. Al igual que los otros "*Mariner*", cada uno de ellos fue lanzado en un cohete Atlas con un propulsor de etapa superior "*Agena*" o "*Centaur*". Completaron la primera misión doble a Marte, sobrevolando el ecuador y las regiones polares sur, y analizando la atmósfera y la superficie marcianas con sensores remotos, además de grabar y retransmitir cientos de imágenes. Por casualidad, ambos sobrevolaron regiones con cráteres y no vieron ni los gigantescos volcanes del norte ni el gran cañón ecuatorial que se descubrió más tarde. Sin embargo, sus imágenes de aproximación mostraron que los rasgos oscuros de la superficie vistos desde la Tierra no eran canales, como se había interpretado en el siglo XIX.

\* **Mariner 8 y 9**, tercera pareja de misiones a Marte de la serie "*Mariner*" de la NASA, lanzadas durante el mes de mayo de 1971 y poniendo fin a la serie con unos resultados globalmente positivos. Ambas fueron diseñadas para ser los primeros orbitadores de Marte, marcando una transición en nuestra exploración del planeta rojo, pasando de volar junto al planeta a pasar tiempo en órbita a su alrededor. Desgraciadamente, el "*Mariner 8*" falló durante su lanzamiento el 8 de mayo de 1971, dando paso al "*Mariner 9*" que fue lanzado con éxito el 30 de mayo de 1971, convirtiéndose en el primer satélite artificial de Marte cuando llegó y se puso en órbita, funcionando durante casi un año en órbita marciana. "*Mariner 9*" completó su transmisión final el 27 de octubre de 1972.

A su llegada, la "*Mariner 9*" observó que una gran tormenta de polvo oscurecía todo el globo del planeta. Los controladores desde la Tierra enviaron órdenes a la nave espacial para que esperara hasta que la tormenta hubiera amainado, el polvo se hubiera asentado y la superficie fuera claramente visible, antes de compilar su mosaico global de imágenes de alta calidad de la superficie marciana. La tormenta persistió durante un mes, pero una vez que el polvo se disipó, la "*Mariner 9*" reveló un planeta muy diferente del esperado, con gigantescos volcanes y un gran cañón de 4800 kilómetros de extensión, y lo que es más sorprendente, en el paisaje de este planeta aparentemente seco y polvoriento se esculpían los vestigios de antiguos cauces fluviales. La "*Mariner 9*" superó todas las expectativas al conseguir un mapa fotográfico global de Marte, cartografiando el 100% de la superficie del planeta. La nave también proporcionó las primeras imágenes de cerca de las dos pequeñas e irregulares lunas marcianas: "Fobos" y "Deimos".

Aunque algunas de las "*Mariner*" no tuvieron éxito, quizá el mayor logro de este programa fue confirmar de forma taxativa la inexistencia de los canales de Schiaparelli y Lowell, que no aparecían por ningún lado en las fotografías enviadas por las sondas, sobre todo en las de la "*Mariner 9*", que una vez situada en órbita marciana fotografió toda la superficie del planeta identificando accidentes geográficos, como lechos fluviales secos, volcanes inactivos, cañones, montañas, valles y cráteres de impacto.

A pesar de los fracasos iniciales, los soviéticos fueron los primeros en mandar una sonda a la superficie marciana ("**Mars 3**", en el año 1971), aunque dejó de emitir a los pocos segundos de funcionamiento. Unos años después, en 1976, la NASA puso en marcha su programa "*Viking*", enviando a Marte dos vehículos espaciales, cada uno de los cuales dejaría en órbita un módulo orbital, mientras desacoplaría otro módulo de descenso que se posaría en la superficie para iniciar sus medidas y registros.

\* El proyecto "**Viking**" de la NASA, entró en la historia al convertirse en la primera misión estadounidense en posar con seguridad una nave espacial en la superficie de Marte y devolver imágenes de la superficie. Se construyeron dos naves idénticas, cada una formada por un módulo de aterrizaje y un módulo orbital. Cada par "orbitador-aterrizador" volaron juntos y entraron en la órbita de Marte, para posteriormente desacoplarse los módulos de aterrizaje y descender hasta la

superficie del planeta. El módulo de aterrizaje "*Viking 1*" aterrizó en la vertiente occidental de "*Chryse Planitia*", mientras que el módulo de aterrizaje "*Viking 2*" lo hizo en "*Utopia Planitia*".

Además de tomar fotografías y recoger otros datos científicos sobre la superficie marciana, los dos módulos de aterrizaje llevaron a cabo tres experimentos biológicos diseñados para buscar posibles signos de vida. Estos experimentos descubrieron una actividad química inesperada y enigmática en el suelo marciano, pero no aportaron pruebas claras de la presencia de microorganismos vivos en el suelo cercano a los lugares de aterrizaje. Según los científicos, Marte se autoesteriliza. Creen que la combinación de la radiación ultravioleta solar que llega a la superficie sin filtro alguno, la extrema sequedad del suelo y la naturaleza oxidante de la química del suelo, impiden la formación de organismos vivos en la superficie marciana.

Se estimaba una duración de 90 días para la misión "*Viking*" una vez tomara tierra, sin embargo, cada orbitador y módulo de aterrizaje funcionaron mucho más allá de su vida útil prevista. El "*Viking Orbiter 1*" continuó durante cuatro años y 1489 órbitas alrededor de Marte, concluyendo su misión el 7 de agosto de 1980, mientras que el "*Viking Orbiter 2*" funcionó hasta el 25 de julio de 1978.

Debido a las variaciones en la luz solar disponible, ambos módulos de aterrizaje fueron alimentados por generadores termoeléctricos de radioisótopos, dispositivos que crean electricidad a partir del calor desprendido por la desintegración natural del plutonio. Esta fuente de energía permitió realizar investigaciones científicas a largo plazo que, de otro modo, no habrían sido posibles. "*Viking Lander 1*" realizó su última transmisión a la Tierra el 11 de noviembre de 1982, mientras que los últimos datos del "*Viking Lander 2*" llegaron a la Tierra el 11 de abril de 1980. De la misión "*Viking*" cabe destacar, con carácter general, la transmisión de información de gran valor científico, medidas meteorológicas y fotografías en color de gran calidad.

\* **Mars Observer.** Hubo que esperar hasta el 25 de septiembre de 1992 para el lanzamiento de esta nueva misión norteamericana con destino al planeta rojo. Se basaba en un satélite comercial de comunicaciones en órbita terrestre, reconvertido en orbitador para Marte. La carga útil de instrumentos científicos estaba diseñada para estudiar la geología, la geofísica y el clima de Marte. La misión resultó fallida al perderse el contacto con la nave poco antes de que entrara en órbita alrededor de Marte, el 22 de agosto de 1993. Los instrumentos científicos de "*Mars Observer*" volaron de nuevo en otros dos orbitadores, "*Mars Global Surveyor*" y "*2001 Mars Odyssey*", que serían lanzados años más tarde.

\* **Mars Global Surveyor,** Lanzada el 7 de noviembre de 1996, se convirtió en la primera misión con éxito al planeta rojo en dos décadas. Tras un año y medio de ajuste de su órbita, que pasó de ser una elipse a tener una trayectoria circular alrededor del planeta, la nave inició su misión principal de cartografía en marzo de 1999. Desde entonces, ha seguido observando el planeta desde una órbita casi polar a baja altitud.

La misión ha estudiado toda la superficie, la atmósfera y el interior de Marte. Una de las observaciones más interesantes del sistema de cámaras gran angular de la nave, conocido como "*Cámara Orbital de Marte*", es que el planeta rojo presenta patrones meteorológicos muy repetitivos. Cada día, la cámara recoge imágenes que se utilizan para construir un mapa global diario, que proporciona un registro de las cambiantes condiciones meteorológicas en Marte. Los patrones meteorológicos observados por la nave incluyen algunas tormentas de polvo que se repiten en el mismo lugar, en el plazo de una o dos semanas desde que se produjeron el año anterior. Además, las perturbaciones locales y los remolinos de polvo pueden comenzar en cualquier momento después del primer día de primavera y continuar hasta el otoño marciano.

El conjunto de imágenes de alta resolución tomadas por la sonda "*Mars Global Surveyor*", documentó barrancos y flujos de escombros que sugieren que fuentes ocasionales de agua líquida, similares a un acuífero, estuvieron presentes alguna vez en la superficie del planeta o cerca de ella. Las lecturas de los magnetómetros han demostrado que el planeta no tiene un campo magnético global, sino campos magnéticos localizados en zonas concretas de la corteza. Los datos de temperatura y las imágenes cercanas de la mayor de las dos lunas marcianas (*Fobos*), han determinado que la luna está cubierta por una capa de material pulverulento de al menos un metro de espesor, resultado de millones de años de impactos de meteoroides sobre su superficie.

Al estudiar Marte durante varios años marcianos (un año marciano dura aproximadamente el doble que un año terrestre), "*Mars Global Surveyor*" ha observado la formación de barrancos, nuevas huellas de rocas, cráteres de impacto formados recientemente y cantidades decrecientes de hielo de dióxido de carbono en el casquete polar sur, y también las primeras imágenes tridimensionales del casquete polar norte mediante su altímetro láser. La refracción de las transmisiones de radio al atravesar la atmósfera marciana, han permitido a los científicos crear perfiles verticales de presión y temperatura atmosféricas, de igual forma que las aceleraciones durante el recorrido de su órbita, debidas a variaciones en la atracción gravitatoria, han facilitado una mejor comprensión del interior de Marte. Estos descubrimientos han demostrado que Marte es un planeta dinámico con una historia de cambios estacionales, y a largo plazo, que han quedado registrados en su superficie.

Las observaciones meteorológicas de la "*Cámara Orbital de Marte*" se utilizaron para orientar las maniobras de aerofrenado del "*Mars Reconnaissance Orbiter*", así como en las evaluaciones diarias del funcionamiento de los dos "*Mars Exploration Rovers*". Las imágenes detalladas monitorizaron las tormentas de polvo y el cambio de la densidad atmosférica provocado por el polvo levantado, sobre todo en las zonas de tránsito del orbitador, ya que la nave utiliza la fricción atmosférica para ralentizar y ajustar su órbita. Las imágenes de alta resolución también se utilizaron para seleccionar y confirmar los lugares de aterrizaje de las misiones "*Phoenix*" y "*Mars Science Laboratory*".

\* **Mars Climate Orbiter**, diseñado para funcionar como satélite meteorológico interplanetario y repetidor de comunicaciones para el "*Mars Polar Lander*", fue lanzado al espacio el 11 de diciembre de 1998. El orbitador transportaba dos instrumentos científicos: una copia de una sonda atmosférica de la nave "*Mars Observer*", perdida en 1993, y un nuevo y ligero generador de imágenes en color que combinaba cámaras gran angular y de focal intermedia. "*Mars Climate Orbiter*" se perdió a su llegada el 23 de septiembre de 1999, concluyendo los ingenieros de control de la misión que la nave entró en la atmósfera del planeta con un ángulo de entrada incorrecto y probablemente se quemó.

\* **Mars Polar Lander** era una ambiciosa misión que pretendía posar una nave espacial en el gélido terreno cercano al borde del casquete polar sur de Marte, y excavar en busca de hielo mediante un brazo robótico. El módulo de aterrizaje iba acompañado de dos pequeñas sondas llamadas "*Deep Space 2*", diseñadas para impactar en la superficie marciana y probar nuevas tecnologías. "*Mars Polar Lander*" y "*Deep Space 2*" se perdieron a su llegada el 3 de diciembre de 1999.

\* **Mars Odyssey 2001**, misión de la NASA lanzada el 7 de abril de 2001 y que llegó a Marte el 24 de octubre de 2001, es la que más tiempo ha permanecido en Marte. Incluyó la realización del primer mapa global de la cantidad y distribución de muchos elementos químicos y minerales que componen la superficie marciana, permitiendo a los científicos identificar regiones con hielo de agua enterrado (permafrost). Las imágenes suministradas por la sonda espacial midiendo la temperatura superficial, proporcionaron vistas espectaculares de la topografía marciana.

Al principio de la misión, "Odyssey" determinó que la radiación en la órbita baja de Marte es el doble que en la órbita baja de la Tierra, un dato esencial para una eventual exploración humana debido a sus posibles efectos sobre la salud.

Otra de las funciones del orbitador *Odyssey* es ejercer como repetidor de comunicaciones para los vehículos de exploración y aterrizaje en Marte, como los Rovers de exploración marciana "*Spirit*" y "*Opportunity*", el módulo de aterrizaje "*Mars Phoenix*" y el rover "*Curiosity*" del "*Mars Science Laboratory*". Las imágenes y otras mediciones de "*Mars Odyssey*" ayudaron a identificar los posibles lugares de aterrizaje de los exploradores y módulos de aterrizaje. Completó con éxito su misión científica principal desde febrero de 2002 hasta agosto de 2004, continuando las operaciones ampliadas del orbitador en la actualidad.

\* **Mars Express**, misión de la Agencia Espacial Europea y de la Agencia Espacial Italiana, en la que también participó la NASA con el desarrollo (junto con la Agencia Espacial Italiana) de un instrumento de radar denominado "MARSIS" (*Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding*). "MARSIS" proporcionó información sobre las características del subsuelo marciano, como cráteres de impacto enterrados, depósitos estratificados e indicios de hielo subterráneo. Igualmente, la agencia norteamericana coordinó los sistemas de retransmisión de radio, para garantizar que las distintas naves espaciales funcionaran juntas, contribuyó aportando novedoso hardware al instrumento analizador de átomos neutros energéticos, y apoyó el seguimiento mediante la "Red de Espacio Profundo" durante las fases críticas de la misión.

Ha estado explorando la atmósfera y la superficie de Marte desde su órbita polar una vez alcanzado el planeta rojo en el año 2003. La nave llevaba una carga útil científica dotada con siete instrumentos y derivada parcialmente de los que se perdieron en la malograda misión rusa "*Mars '96*", así como un relé de comunicaciones para apoyar las misiones del módulo de aterrizaje. El principal objetivo de la misión era buscar agua subterránea, realizándose rigurosas investigaciones para responder a preguntas fundamentales sobre la geología, la atmósfera, el medio ambiente de la superficie, la historia del agua y la posibilidad de vida en Marte. Algunos ejemplos de los descubrimientos de "*Mars Express*", aún objeto de debate entre los científicos, son las pruebas de actividad glacial reciente, vulcanismo explosivo y gas metano.

Inicialmente, "*Mars Express*" también transportaba un pequeño módulo de aterrizaje llamado "*Beagle 2*", nombre del barco en el que Charles Darwin zarpó para estudiar zonas inexploradas de la Tierra en el año 1831. El módulo de aterrizaje se perdió a su llegada en diciembre del año 2003.

\* **Mars Reconnaissance Orbiter**, sonda de la NASA lanzada en el mes de agosto del año 2005, dotada con la cámara más potente jamás utilizada en una misión de exploración planetaria hasta ese momento, capaz de captar detalles del terreno marciano con extraordinaria claridad. Mientras que las anteriores cámaras de otros orbitadores de Marte eran capaces de identificar objetos no más pequeños que una mesa, esta cámara detectaba algo tan pequeño como un plato de comida. Esta cámara contaba con la asistencia de una segunda cámara, con menor resolución pero mayor campo, que proporcionaba un contexto geológico y meteorológico más amplio para las observaciones más detalladas de los instrumentos de mayor resolución. Esta capacidad resultó fundamental no sólo para proporcionar una visión asombrosamente detallada de la geología y la estructura de Marte, sino que era capaz de identificar obstáculos que podrían poner en peligro la seguridad de futuros módulos de aterrizaje y vehículos exploradores.

El "*Mars Reconnaissance Orbiter*" también incorporaba una sonda para encontrar agua en el subsuelo, una consideración importante a la hora de seleccionar lugares de aterrizaje científicamente valiosos para futuras exploraciones. Otros instrumentos científicos de esta nave, multitarea y po-



livalente, identificaron los minerales de la superficie y estudiaron cómo se transportan el polvo y el agua en la atmósfera marciana.

El "*Mars Reconnaissance Orbiter*" fue también el primer componente de una "Internet interplanetaria", un servicio crucial para futuras naves espaciales, habilitándose como un primer eslabón de una cadena de elementos de comunicaciones con la Tierra, siendo utilizado por varias naves espaciales.

\* **MAVEN** (*Mars Atmospheric and Volatile Evolution*) es la segunda misión seleccionada para el programa "*Mars Scout*" de la NASA, una iniciativa para misiones competitivas más pequeñas y de bajo costo dirigidas por un investigador principal. *MAVEN* está obteniendo mediciones críticas de la atmósfera marciana para ayudar a comprender el dramático cambio climático en el planeta rojo a lo largo de su historia. Hace mucho tiempo, Marte tuvo una atmósfera más densa que sostenía agua líquida en la superficie. En ese momento, Marte podría haber tenido condiciones ambientales para sustentar la vida microbiana, ya que la presencia a largo plazo de agua es necesaria para la vida tal como la conocemos. Sin embargo, como parte del dramático cambio climático, la mayor parte de la atmósfera marciana se perdió en el espacio hace mucho tiempo. Características como canales secos y minerales que normalmente se forman en el agua, siguen proporcionando un registro del pasado acuoso de Marte, pero la delgada atmósfera marciana ya no permite que el agua sea estable en la superficie.

"*MAVEN*" proporciona información sobre cómo y con qué rapidez se están perdiendo gases atmosféricos en el espacio hoy en día, e infiere de esos estudios detallados lo que sucedió en el pasado. Estudiar cómo la atmósfera marciana se perdió en el espacio puede revelar pistas sobre el impacto que el cambio tuvo en las condiciones climáticas, geológicas y geoquímicas marcianas a lo largo del tiempo, todas las cuales son importantes para comprender si Marte tenía un entorno capaz de sustentar vida.

"*MAVEN*", la primera nave espacial en realizar mediciones directas de la atmósfera marciana, lleva ocho instrumentos científicos que están tomando medidas de la atmósfera superior marciana, pudiendo descender hasta una altitud de ~130 km sobre el planeta, para tomar muestras de toda la atmósfera superior de Marte. La nave espacial es capaz de proporcionar soporte de retransmisión de comunicaciones para módulos de aterrizaje y vehículos exploradores en la superficie marciana.

\* **ExoMars** (Exobiología en Marte), de la Agencia Espacial Europea (ESA), es una serie de misiones diseñadas para comprender si alguna vez existió vida en Marte. La primera misión del programa "*ExoMars*" se llama "*Trace Gas Orbiter*" (TGO), realizada en colaboración entre la ESA y la Agencia Espacial Federal de Rusia "Roscosmos". El "*Trace Gas Orbiter*" de la ESA estudia la atmósfera marciana en busca de metano y otros gases que pueden estar presentes en pequeñas concentraciones. El módulo de aterrizaje "*Schiaparelli EDL*" entró en la atmósfera marciana el 19 de octubre de 2016 a las 14:42 UTC, pero el equipo de la misión de la ESA perdió el contacto poco antes del aterrizaje previsto.

Así como otros países suelen participar en las misiones de la NASA a Marte, la NASA contribuye con experiencia científica, de ingeniería y técnica a otros esfuerzos mundiales para explorar el Planeta Rojo. La participación de la NASA en el "*ExoMars Trace Gas Orbiter*" aportó el sistema de telecomunicaciones "Electra", utilizado anteriormente con éxito en el "*Mars Reconnaissance Orbiter*", que actúa como retransmisor de comunicaciones y ayuda a la navegación para las naves espaciales de Marte.

La información de posición facilitada por el "*Trace Gas Orbiter*", combinada con los datos doppler de "Electra", determinan con gran precisión la ubicación de los módulos de aterrizaje o rovers

que operan en la superficie de Marte. "Electra" también utiliza su antena con punta nadir (apuntada verticalmente hacia la superficie), para proporcionar cobertura UHF a módulos de aterrizaje y vehículos exploradores de Marte en la superficie que pueden no tener suficiente potencia de radio para comunicarse directamente con la Tierra por sí mismos.

La segunda misión del Programa "ExoMars", denominada "ExoMars Rover and Surface Platform", fue cancelada por la ESA poco antes de su lanzamiento debido al inicio de la guerra en Ucrania, cancelando definitivamente la participación de la agencia rusa "Roscosmos" el día 13 de julio de 2022, y suscribiendo a finales de ese año un acuerdo de colaboración con la NASA, replanificando la misión para su lanzamiento en el año 2028.

La participación de la NASA en la misión "ExoMars Rover" incluye actualmente el suministro de elementos críticos al principal instrumento de astrobiología del rover, el "Mars Organic Molecule Analyzer" (MOMA). Al estudiar las moléculas orgánicas, los componentes químicos de la vida, el MOMA está diseñado para ayudar a responder preguntas sobre si alguna vez existió vida en Marte, junto con su posible origen, evolución y distribución en el Planeta Rojo.

La NASA también proporciona un espectrómetro de masas y componentes electrónicos clave para el MOMA. Un espectrómetro de masas es un instrumento que identifica la cantidad y el tipo de sustancias químicas presentes en una muestra. El espectrómetro de masas MOMA proporcionado por la NASA está diseñado para analizar los tipos y cantidades de sustancias químicas que forman los compuestos orgánicos e inorgánicos que se encuentran en muestras de rocas y suelo en Marte.

\* **InSight** (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport - Exploración interior mediante investigaciones sísmicas, geodesia y transporte de calor-) fue una misión del Programa "Discovery" de la NASA que colocó un único módulo de aterrizaje geofísico en Marte para estudiar su interior profundo. Se lanzó al espacio el día 5 de mayo de 2018 utilizando un cohete Atlas V401, operando desde el día 26 de noviembre de ese mismo año hasta el 20 de diciembre de 2022 en la zona marciana denominada "Elysium Planitia". Pero "InSight" era más que una misión a Marte, fue un explorador de planetas terrestres que abordó una de las cuestiones más fundamentales de la ciencia planetaria: comprender los procesos que dieron forma a los planetas rocosos del sistema solar interior (incluida la Tierra) hace más de cuatro mil millones de años.

Con este repaso rápido a la exploración del planeta rojo basada en vehículos en órbita y sondas colocadas en superficie, damos paso ahora a las misiones robóticas capaces de desplazarse por tierra mediante la utilización de vehículos tipo "rover", e incluso por aire.

\* **Mars Pathfinder** es sin duda la misión que marcó el comienzo de la exploración de la superficie marciana mediante vehículos móviles, que incluía al pequeño rover "Sojourner". Fue lanzado el 4 de diciembre de 1996 y tomó tierra en el "Ares Vallis" marciano el día 4 de julio de 1997. Se diseñó como demostración tecnológica de una nueva forma de llevar a la superficie del planeta rojo un módulo de aterrizaje, que contaba con un espectrómetro de rayos X, tres cámaras y un paquete de instrumentos meteorológicos, al que se le puso el nombre formal de "Carl Sagan Memorial Station" tras su exitoso aterrizaje, y al primer robot explorador de la historia, cuyo nombre "Sojourner" hace honor a la defensora de los derechos civiles Sojourner Truth.

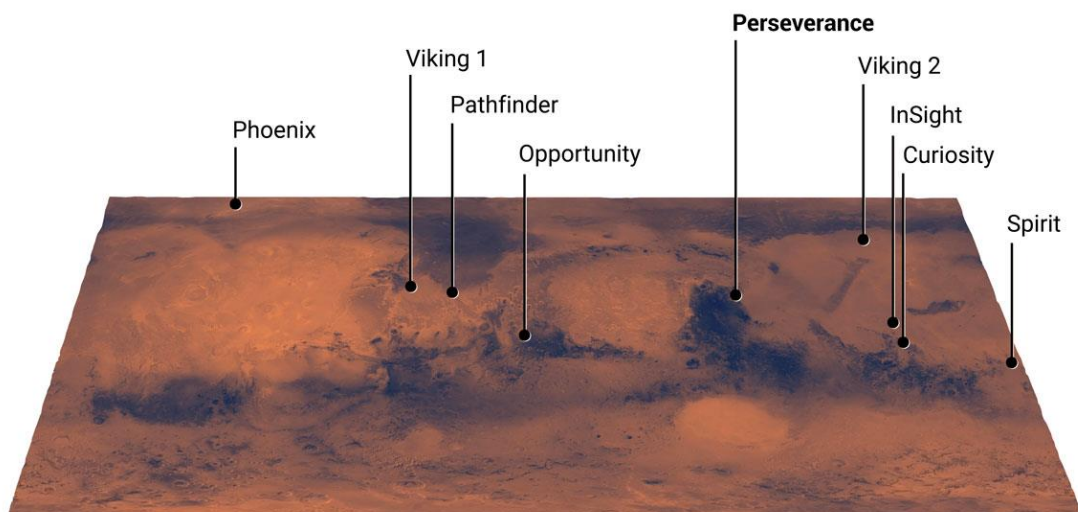
"Pathfinder" no sólo cumplió este objetivo, sino que además proporcionó una cantidad de datos sin precedentes y superó la vida útil prevista en su diseño inicial, en casi tres veces para el módulo de aterrizaje y en doce veces en el caso del rover.

Tanto el módulo de aterrizaje como el rover (de 10,6 kg), llevaban instrumentos para observaciones científicas y para proporcionar datos de ingeniería sobre las nuevas tecnologías que se estaban desarrollando. Incluían instrumentos científicos para analizar la atmósfera, el clima, la geología y la composición de las rocas y suelo marcianos. Para la toma de tierra del "*Mars Pathfinder*", se utilizó un método innovador para entrar directamente en la atmósfera marciana, ayudado por un paracaídas que ralentizaba su descenso a través de la fina atmósfera, y un gigantesco sistema de airbags para amortiguar el impacto.

Desde el aterrizaje hasta la transmisión final de datos el 27 de septiembre de 1997, el "*Mars Pathfinder*" devolvió 2300 millones de bits de información, incluyendo más de 16 500 imágenes obtenidas del módulo de aterrizaje y 550 imágenes tomadas por el rover, así como más de 15 análisis químicos de rocas y suelo, y extensos datos sobre vientos y otros factores meteorológicos. Los resultados de las investigaciones llevadas a cabo por los instrumentos científicos del módulo de aterrizaje y del rover, indicaban un pasado cálido y húmedo en Marte.

Entre sus principales hallazgos científicos, están los guijarros y piedras redondeadas que normalmente se forman al paso de agua corriente que pudo existir de manera estable en un pasado más cálido. También se pudo estimar la ubicación precisa de polos geográficos del planeta y las dimensiones aproximadas del núcleo central del mismo, con un radio de entre 1300 y 2000 km.

Respecto a la atmósfera, se pudo determinar que el polvo suspendido en el aire es magnético, debido posiblemente a la presencia de "maghemita", que es una variante muy magnética del óxido de hierro, y que pudo pasar de los materiales de la corteza al polvo mediante procesos químicos propios de un ciclo hidrológico activo existente en el pasado. Los sensores de temperatura, viento y presión de la sonda observaron y midieron las rachas de viento que resultaron ser un eficiente mecanismo de mezcla de polvo en la atmósfera marciana. Igualmente se detectaron notables fluctuaciones de temperatura al amanecer, evidenciando la transferencia de calor entre el suelo y la atmósfera por convección, con presencia de pequeños remolinos superficiales y la aparición de algunas nubes de hielo de agua cerca del suelo.



*Figura 03: Puntos de aterrizaje en Marte de los vehículos "Spirit" y "Opportunity" en relación con los de otras misiones al planeta rojo. Crédito: NASA.*

\* **Spirit** y **Opportunity** tomarían el relevo algunos años después, vehículos gemelos, más grandes que el anterior y mejor equipados. Durante el mes de enero del año 2004, tomaron tierra en lados opuestos del planeta rojo (Figura 03), el primero en el cráter "Gusev", un posible antiguo

lago formado en un cráter de impacto gigante, y el segundo en "Meridiani Planum", un lugar donde los depósitos minerales sugerían que Marte tuvo una historia húmeda. Con una movilidad muy superior a la del "Mars Pathfinder" estos exploradores robóticos han recorrido kilómetros y kilómetros de la superficie marciana realizando observaciones geológicas y atmosféricas. Ambos exploradores, equipados con sofisticados instrumentos científicos idénticos, han hallado indicios de antiguos entornos marcianos en los que existían condiciones de humedad (agua superficial en forma de ríos y lagos) y habitabilidades intermitentes.

Cada rover rebotó en la superficie dentro de una nave de aterrizaje protegida por grandes bolsas de aire (airbags), que se desinflaban al dejar de rodar toda la estructura, permitiendo la apertura del vehículo una vez en reposo. Los rovers se desplegaron para tomar imágenes panorámicas que proporcionaron a los científicos la información necesaria para seleccionar los objetivos geológicos óptimos y poder dirigir a los vehículos hasta esos lugares y más allá, para realizar las investigaciones científicas planificadas.

Hasta la finalización de sus tareas científicas (año 2011 para el "Spirit" y 2018 para el "Opportunity"), los dos vehículos han enviado a la Tierra cientos de miles de espectaculares imágenes de alta resolución a todo color de la orografía marciana, así como detalladas imágenes microscópicas de las rocas y de la superficie del suelo. Cuatro espectrómetros diferentes han acumulado información sin precedentes sobre la composición química y mineralógica de las rocas y del suelo marcianos. Herramientas especiales de abrasión de rocas, nunca antes enviadas a otro planeta, permitieron a los científicos escudriñar bajo las superficies polvorientas y erosionadas de las rocas para examinar su interior (Figura 04).



Figura 04: Colina "Kodiak" en el cráter Jezero. Se aprecian antiguas rocas estratificadas que indican la deposición gradual de sedimentos en un delta fluvial, seguida de inundaciones. Crédito: NASA.

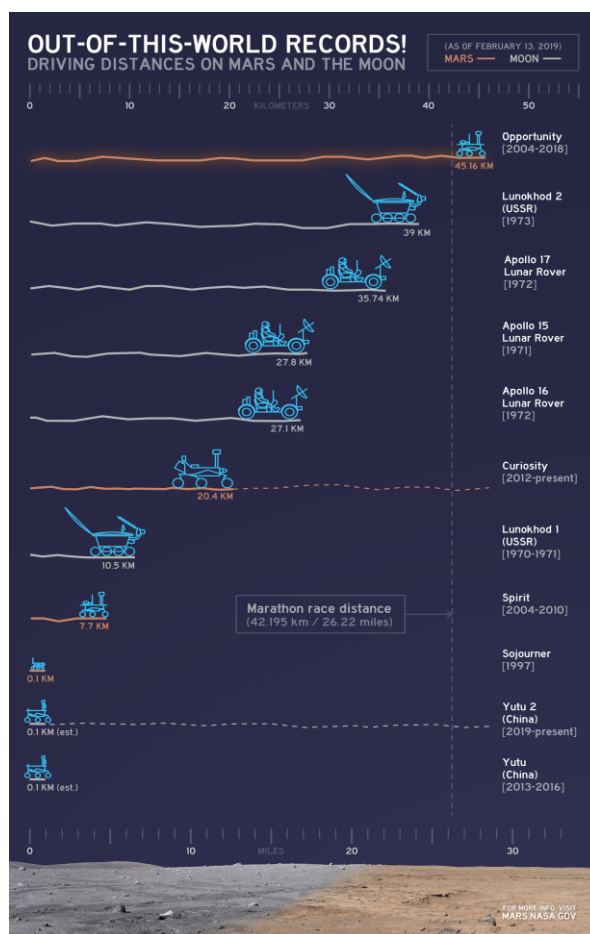


Figura 05: Distancias recorridas por distintos "rover" en la Luna y Marte. Crédito: NASA/JPL-Caltech.

Con los datos de los robots, los científicos de la misión pudieron reconstruir un pasado antiguo en el que Marte estaba inundado de agua, condiciones que podrían haber favorecido la vida microbiana.

El estudio de los cráteres "Eagle" y "Endurance" realizado por "*Opportunity*" reveló la existencia de lagos entre las dunas, que se evaporaron y formaron arenas ricas en sulfatos que fueron moldeadas por el agua y el viento, solidificándose en roca y absorbidas finalmente por las aguas subterráneas.

Por su parte "*Spirit*", al inicio de su exploración por el cráter "Gusev", encontró un entorno más basáltico que cambió al llegar a las colinas "Columbia", donde halló una variedad de rocas que indican que el Marte primitivo se caracterizó por impactos, vulcanismo explosivo y agua subterránea. Los inusuales parches brillantes de suelo resultaron ser extremadamente salinos y afectados por el agua del pasado. En "Home Plate", una zona circular de la cuenca interior de las colinas "Columbia", "*Spirit*" descubrió rocas finamente estratificadas tan interesantes desde el punto de vista geológico como las encontradas por "*Opportunity*". Ambos vehículos superaron en mucho la duración inicialmente prevista, lo que permitió a "*Opportunity*" batir el récord de desplazamiento extraterrestre, rodando una distancia superior a la de una maratón de 42 km (Figura 05).

\* **Phoenix**, misión bautizada con el nombre del pájaro mitológico que renace de sus cenizas, se lanzó desde Cabo Cañaveral (Florida - USA) el día 4 de agosto de 2007 con un cohete Delta II, alcanzando la llanura ártica marciana "Vastitas Borealis" el día 25 de mayo de 2008. Utilizó un módulo de aterrizaje que estaba destinado a ser utilizado en la misión "*Mars Surveyor 2001*" antes de su cancelación, y también llevaba un complejo conjunto de instrumentos que eran variaciones mejoradas de los que volaron en el malogrado "*Mars Polar Lander*".

"*Phoenix*" aterrizó más al norte que ninguna otra misión anterior, a una latitud equivalente a la del norte de Alaska, excavando el húmedo terreno de la zona con su brazo robótico y analizando las muestras en el laboratorio portátil del vehículo. Desde el control de la misión en la Tierra se pudieron contemplar espectaculares imágenes tomadas con sus cámaras estereoscópicas de alta resolución colocadas en el extremo de su mástil de 2 m de longitud, facilitando la selección del lugar preciso para la extracción de material. En cuanto al estudio de la atmósfera, "*Phoenix*" obtuvo datos sobre la formación, duración y movimiento de las nubes, niebla y penachos de polvo hasta una altitud de 20 km, y registros de temperatura y presión en superficie. La misión se dio por finalizada el día 10 de noviembre de 2008.

\* **Curiosity**, que forma parte de la misión "*Mars Science Laboratory*" (MSL) de la NASA, es el vehículo explorador más grande y capaz jamás enviado a Marte. Se lanzó el 26 de noviembre de 2011 desde Cabo Cañaveral (Florida-USA) con un cohete "Atlas V 541", y tomó tierra en el cráter "Gale" de Marte el 6 de agosto de 2012, llegando al planeta rojo con unas innovaciones tecnológicas que pusieron a prueba un revolucionario método de aterrizaje. La nave descendió en paracaídas y, durante los últimos segundos antes del aterrizaje, el sistema de aterrizaje disparó sus cohetes que le permitieron mantenerse estático en el aire mientras un cable de sujeción bajaba al "*Curiosity*" hasta la superficie (Figura 06). El rover aterrizó sobre sus ruedas, se cortó el cable y el sistema de aterrizaje voló para estrellarse más lejos, a una distancia segura.

El vehículo es capaz de superar obstáculos de hasta medio metro de altos, y se desplaza a unos 30 metros por hora, dependiendo de la actividad de los instrumentos, el terreno y la visibilidad de sus cámaras. El rover lleva un sistema de energía de radioisótopos que genera electricidad a partir del calor de la desintegración radiactiva del plutonio, y ya ha superado sobradamente su vida útil prevista de aproximadamente un año marciano completo (687 días terrestres). Este generador proporciona una mayor movilidad y flexibilidad en el funcionamiento del rover, independientemente de la estación del año o de la luz solar, su flujo constante de energía eléctrica mejo-

ró la capacidad de carga científica, y permitió considerar lugares de aterrizaje en un mayor rango de latitudes de lo que era posible en los rovers de anteriores misiones.



*Figura 06: Imagen artística de la maniobra "grúa celeste" del "Curiosity". La escena muestra el módulo de descenso de la nave, que controla su propio ritmo de descenso con cuatro de sus ocho cohetes. El rover está enganchado al módulo de descenso por tres correas de nylon y por un umbilical que le proporciona alimentación eléctrica y comunicaciones. La brida se extenderá casi ocho metros hasta que el rover toque tierra, momento en el que se corta por el extremo más próximo al rover, permitiendo al módulo de descenso alejarse del lugar y caer al suelo. Crédito: NASA/JPL-Caltech.*

El gran tamaño del rover "*Curiosity*", como un coche grande de 900 kg de peso (en la Tierra) y dotado con un brazo robótico de 2 metros de largo, le permite alcanzar las rocas seleccionadas para su estudio poniéndolas al alcance de su avanzado kit de 10 instrumentos científicos. Cargado con el más sofisticado y complejo laboratorio autónomo, y capaz de desplazarse automáticamente de forma segura por la superficie marciana, dispone de 17 cámaras, un láser para vaporizar y estudiar pequeños puntos de rocas a distancia, y un taladro para recoger muestras de rocas pulverizadas.

La misión "*MSL*" pretendía resolver la cuestión de si se dieron alguna vez en Marte las condiciones ambientales adecuadas para albergar pequeñas formas de vida (microbios). Con los instrumentos más grandes y avanzados para estudios científicos jamás enviados a la superficie marciana, "*Curiosity*" encontró pronto indicios químicos y minerales de entornos habitables en el pasado, y actualmente sigue explorando el registro rocoso de una época en la que el planeta podría haber albergado vida microbiana, buscando rocas especiales que se hayan formado en el agua y/o que presenten indicios de materia orgánica. La historia del clima y la geología marcianos está escrita en la química y estructura de las rocas y del suelo (Figura 07).



Figura 07: Diversas texturas geológicas en el monte "Sharp" tomadas por el rover "Curiosity". En la foto, tomada mirando al sur, pueden apreciarse ondulaciones de grava y arena, y en un primer plano el lecho rocoso liso cubierto de polvo que forma la base de la montaña, con crestas de arenisca que arrojan cantos rodados a medida que se erosionan. Al fondo de la imagen, a lo lejos, destacan los patrones de estratificación en los niveles superiores del Monte Sharp. La imagen fue tomada el 11 de abril de 2015 (sol 953° de la misión). Crédito: NASA/JPL-Caltech.

## MISIÓN 'MARS 2020'

*"La naturaleza es implacable e inmutable, y es indiferente si sus razones y acciones ocultas son comprensibles para el hombre o no."*

**Galileo Galilei** (1564-1642), padre de la física y de la astronomía modernas

**"Mars 2020"** es la última misión robótica enviada al planeta Marte por la NASA, dentro de su programa de exploración del planeta rojo, compuesta por el rover **"Perseverance"**, que es incluso algo mayor que el **"Curiosity"**, y el helicóptero **"Ingenuity"**. Esta misión despegó desde Cabo Cañaveral el 30 de julio del año 2020, llegando al cráter marciano **"Jezero"** (zona de **"Syrtis Major"**) el día 18 de febrero del año siguiente (Figuras 08, 09 y 10).

La misión aborda objetivos científicos de alta prioridad para la exploración de Marte, incluidas preguntas clave sobre el potencial de vida en Marte. **"Perseverance"** da el siguiente paso al buscar no solo signos de condiciones habitables en Marte en el pasado antiguo, sino también signos de vida microbiana pasada. El rover cuenta con un taladro para recolectar muestras de las rocas y suelos más prometedores y guardarlas en un lugar seguro en la superficie de Marte, de tal manera que una misión futura podría potencialmente devolver estas muestras a la Tierra, donde los científicos podrán estudiar las muestras en laboratorios con equipos especiales de tamaño demasiado grandes como para llevarlos a Marte.



Figura 08: Lanzamiento de la misión "Mars 2020" desde el Complejo de Lanzamiento Espacial 41 (Cabo Cañaveral-USA) con un cohete Atlas V, el día 30 de julio de 2020. Crédito: United Launch Alliance (ULA).



Figura 09: Imagen tomada por la cámara de alta resolución del orbitador "Mars Express" de la Agencia Espacial Europea (ESA) de los restos de un antiguo delta en el cráter marciano "Jezero", destino del "Perseverance". Crédito: ESA/DLR/FU-Berlín.

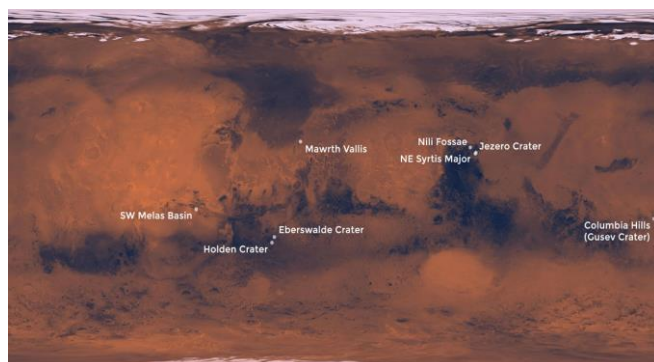


Figura 10: Lugares en Marte considerados como posibles destinos para la misión "Mars 2020", antes de tomar la decisión definitiva a favor del cráter "Jezero". Crédito: NASA/JPL/Caltech.

La misión también brinda oportunidades para recopilar conocimientos y demostrar tecnologías que aborden los desafíos de futuras expediciones humanas a Marte, como probar un método para producir oxígeno a partir de la atmósfera marciana, identificar otros recursos (como el agua subterránea), mejorar las técnicas de aterrizaje y caracterizar el clima, el polvo y otras posibles condiciones ambientales que podrían afectar a los futuros astronautas que vivan y trabajen en Marte.

"Perseverance" se programó para una ventana de lanzamiento entre el 30 de julio y el 15 de agosto de 2020, cuando la Tierra y Marte estaban en una posición orbital óptima para intentar el viaje interplanetario, es decir, se necesitaba menos energía para viajar a Marte en ese momento, en comparación con otras épocas en las que la Tierra y Marte se encuentran en diferentes posi-



ciones en sus órbitas. Para mantener los costos y riesgos de la misión lo más bajos posible, el diseño de "Mars 2020" se basaba en la exitosa arquitectura de la anterior misión "Mars Science Laboratory" de la NASA, incluido su rover "Curiosity" y su probado sistema de aterrizaje.

El rover "Mars 2020 Perseverance" se lanzó el 30 de julio de 2020 a las 4:50 a.m. PDT y alcanzó Marte el día 18 de febrero de 2021. Las operaciones en superficie previstas durarían al menos un año marciano (aproximadamente 687 días terrestres).

"Perseverance" se lanzó en un cohete Atlas V-541, uno de los cohetes más grandes disponibles para vuelos interplanetarios, desde el Complejo de Lanzamiento 41 en la Estación de la Fuerza Aérea norteamericana de Cabo Cañaveral, Florida. Este es el mismo tipo de cohete que lanzó "InSight" y "Curiosity" al espacio.

El cohete, de dos etapas, impulsó su carga útil, situada en el extremo superior, fuera de la atmósfera terrestre y de su campo gravitatorio. En dicha parte superior, encapsulada y protegida con un carenado aerodinámico, se encuentra la parte principal de la nave espacial, basada en la exitosa misión "Mars Science Laboratory" que llevó al rover "Curiosity" a Marte en agosto de 2012. Recorrió durante siete meses el espacio interplanetario que nos separa de nuestro vecino próximo, ~480 millones de km (Figura 11).

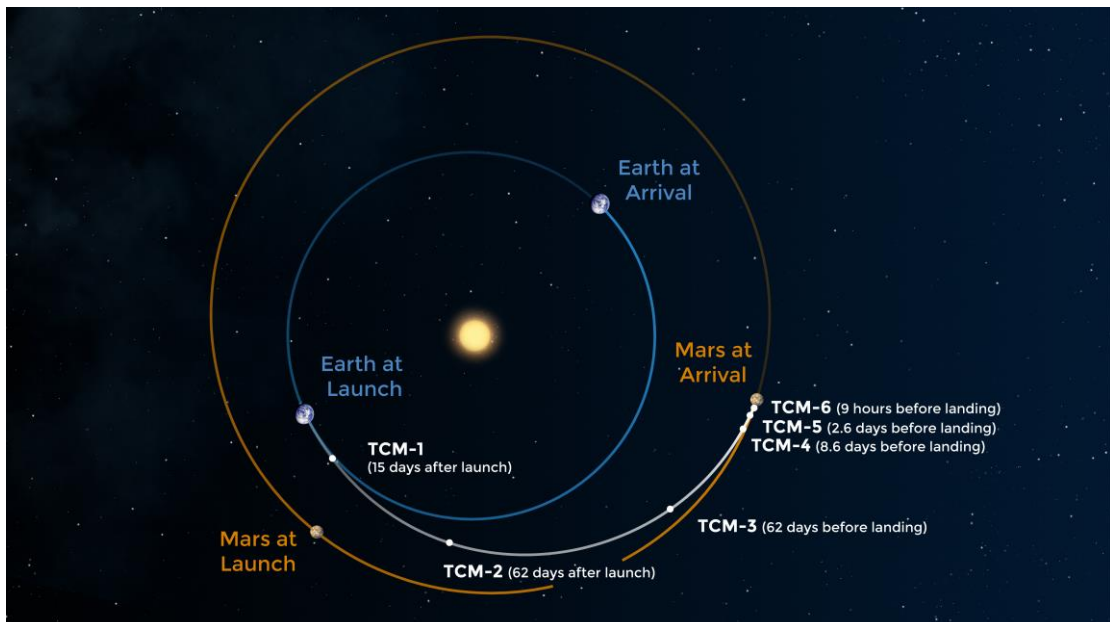


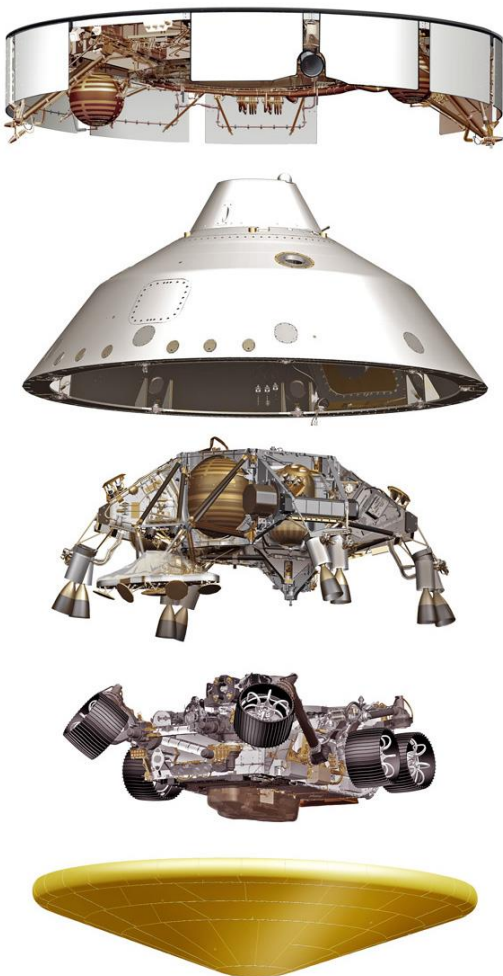
Figura 11: Ilustración de la ruta seguida por la misión "Mars 2020" en su camino a Marte, en la que se muestran las posiciones iniciales y finales de la Tierra y Marte, y las maniobras de corrección de trayectoria (TCM). Crédito: NASA/JPL/Caltech.

El vehículo espacial, que la segunda etapa del cohete Atlas, denominada "Centaur", impulsó hasta el planeta rojo, está compuesto por cinco módulos (Figura 12):

- **Módulo de crucero.** Soporta toda la nave espacial completa durante el viaje de siete meses a Marte, manteniéndola alimentada, en comunicación y navegando correctamente. Cuenta con un gran panel solar que suministra energía al vehículo durante todo el viaje. Las antenas de radio mantienen al vehículo en contacto con la Tierra, y los pequeños propulsores, junto a sus depósitos de combustible, permiten ajustar el rumbo del vehículo según sea necesario durante la navegación.
- **Cubierta posterior.** La cubierta posterior (trasera) y el escudo térmico forman el "aero shell", que protege al rover durante su turbulento descenso a Marte. Además, alberga

propulsores adicionales que se activan durante la fase de entrada guiada, descenso y aterrizaje. En la parte superior de la cubierta trasera se encuentra el contenedor desde el que se libera el paracaídas durante el descenso.

- **Módulo de descenso.** Es la "mochila" propulsora del rover ("jetpack" de vuelo libre del rover), que se separa de la cubierta trasera y utiliza ocho motores para ralentizar el descenso final. También contiene el sistema de radar de aterrizaje utilizado para tomar decisiones de último momento sobre el aterrizaje. Justo antes del aterrizaje, el módulo de descenso baja el rover mediante cables antes de depositarlo suavemente sobre la superficie, y una vez que el rover está en el suelo. Este módulo, que acaba de ejercer de "grúa espacial", vuelve a volar impulsado por sus cohetes para realizar su propio aterrizaje incontrolado en la superficie a una distancia segura del rover.
- **Rover.** El rover "*Perseverance*" es el cuarto módulo del vehículo espacial, cuenta con seis ruedas y está cargado con cámaras e instrumentos científicos y con el helicóptero marciano "*Ingenuity*". Está diseñado para explorar la superficie marciana, hacer descubrimientos y recoger muestras.
- **Escudo térmico.** El escudo térmico ayuda a reducir la velocidad del vehículo durante su aproximación final, al tiempo que protege el interior del rover del intenso calor experimentado durante la entrada en la atmósfera marciana. El escudo térmico podría estar expuesto a temperaturas de hasta 1300 °C mientras desciende a través de la atmósfera marciana.



*Figura 12: Ilustración que muestra los cinco componentes principales del vehículo espacial "Mars 2020": en la parte superior de la imagen el módulo de crucero, seguido por la cubierta posterior, módulo de descenso, rover "Perseverance" junto con el helicóptero "Ingenuity", y por último el escudo térmico en la parte inferior. Estos componentes desempeñan funciones críticas para la misión, especialmente durante la espectacular fase de entrada, descenso y aterrizaje (EDL). Crédito: NASA/JPL/Caltech.*

Los ingenieros del Control de la Misión siguen de manera precisa y minuciosa el viaje hasta Marte, comprobando el estado y mantenimiento del vehículo espacial, monitorizando y calibrando subsistemas e instrumentos a bordo, realizando los giros de corrección necesarios para mantener la antena de comunicaciones apuntando a la Tierra, y a los paneles solares mirando al Sol para el adecuado suministro de energía. Igualmente mantienen la trayectoria de vuelo correcta y preparan la entrada, descenso y aterrizaje (EDL), y operaciones de superficie.

La fase de crucero comienza después de que la nave espacial se separa del cohete, pocos minutos después del lanzamiento, una vez que la segunda fase del mismo, "Centaur", la impulsa fuera de su órbita terrestre baja para enviarla a Marte a casi 40000 km/h. Durante ese viaje, los ingenieros tienen cinco oportunidades (más una maniobra de respaldo y una maniobra de contingencia) para ajustar la trayectoria de vuelo de la nave espacial, y asegurarse de que su velocidad y dirección sean las mejores para llegar al cráter Jezero en Marte. Durante estas maniobras de corrección de trayectoria, los ingenieros calculan la ubicación de la nave espacial y ordenan el encendido de los ocho propulsores del módulo de crucero durante un período de tiempo específico necesario para ajustar la trayectoria. Es muy importante realizar un ajuste fino de la trayectoria de vuelo que garantice el ingreso del vehículo espacial en la atmósfera de Marte en el lugar justo para aterrizar dentro del cráter Jezero. El primer ajuste en la trayectoria de vuelo de la nave espacial se produce unos 15 días después del lanzamiento.

Los últimos 45 días previos a la toma de tierra en Marte constituyen la fase de aproximación. Esta fase implica principalmente actividades de navegación y preparación de la nave espacial para la entrada, descenso y aterrizaje (EDL -**E**ntry, **D**escent, and **L**anding-). Aquí es cuando se pueden realizar las tres últimas maniobras de corrección de trayectoria, si fuera necesario. Esta fase es la más corta e intensa de toda la misión. Comienza cuando la nave alcanza la parte superior de la atmósfera marciana, viajando a casi 20000 km/h, y termina unos siete minutos después, con "Perseverance" inmóvil sobre la superficie marciana. Pasar de forma segura de esas velocidades a cero, en ese corto periodo de tiempo, mientras se alcanza un diminuto objetivo en la superficie, requiere "pisar el freno" de una forma muy cuidadosa, creativa y desafiante.

Aterrizar en Marte es difícil, sólo un 40% de las misiones enviadas a Marte lo han conseguido con éxito. Cientos de cosas tienen que salir a la perfección durante este descenso, y lo que es más importante, "Perseverance" tiene que encargarse de todo ella sola, ya que durante el aterrizaje se tarda más de 11 minutos en recibir una señal de radio desde Marte a la Tierra y viceversa, por lo que cuando el equipo de la misión se entera de que la nave ha entrado en la atmósfera, en realidad, el rover ya está en el suelo. Así pues, "Perseverance" está diseñado para completar todo el proceso EDL por sí mismo, de forma autónoma.

Diez minutos antes de entrar en la atmósfera marciana, la nave se desprende de su módulo de crucero, que alberga los paneles solares, radios y depósitos de combustible utilizados durante su vuelo a Marte. Sólo la cubierta protectora, con el rover y el módulo de descenso en su interior, realiza el viaje a la superficie. Antes de entrar en la atmósfera, el vehículo dispara pequeños propulsores en el caparazón, o cubierta posterior, para reorientarse y asegurarse de que el escudo térmico está orientado hacia delante para lo que viene a continuación. Al descender por la atmósfera, la nave encuentra bolsas de aire, más o menos denso, que pueden desviarla de su trayectoria. Para compensar, la cubierta posterior dispara sus propulsores que ajustan su ángulo y dirección de sustentación. Esta técnica de "entrada guiada" ayuda a la nave espacial a mantenerse en la trayectoria hacia su objetivo.

La resistencia producida por la atmósfera marciana ralentiza drásticamente la velocidad del vehículo espacial (frenado aerodinámico). El escudo térmico reduce la velocidad de la nave a menos de 1600 km/h, que ya es una velocidad segura para desplegar el paracaídas supersónico. Pa-

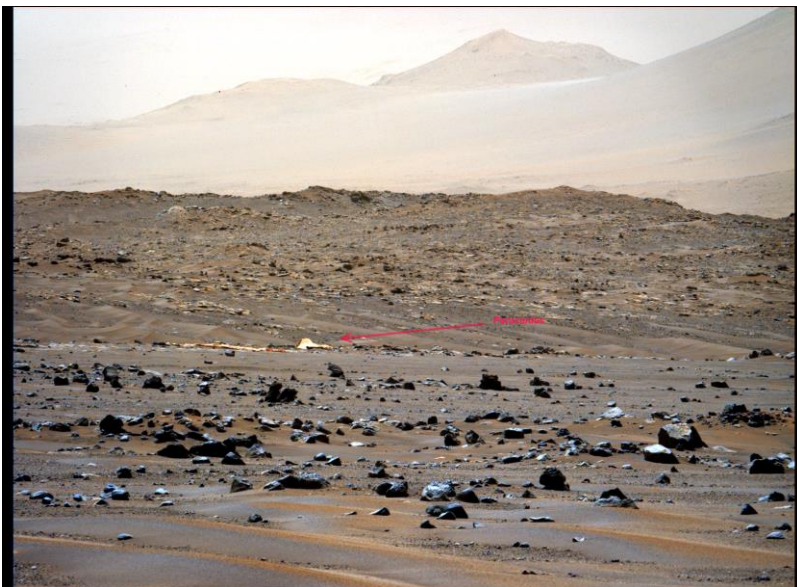
ra sincronizar este momento crítico, "Perseverance" utiliza una nueva tecnología denominada "Range Trigger", que calcula la distancia al objetivo de aterrizaje y abre el paracaídas en el momento ideal para alcanzarlo. El paracaídas, que tiene 21,5 m de diámetro, se despliega unos 240 segundos después de la entrada, a una altitud de aproximadamente 11 km, cuando el vehículo desciende a una velocidad de  $\sim 1512$  km/h. El rozamiento con los gases de la atmósfera, someten a la nave a un fuerte calentamiento, la temperatura máxima se produce unos 80 segundos después de la entrada a la atmósfera cuando en la superficie externa del escudo térmico se alcanzan  $\sim 1300$  °C, sin embargo, a salvo en el "aeroshell", el rover se mantiene a una temperatura tolerable para todos los componentes y dispositivos.

Veinte segundos después del despliegue del paracaídas, el escudo térmico se separa y cae. El rover queda expuesto a la atmósfera de Marte por primera vez y las cámaras e instrumentos clave pueden comenzar a fijarse en la superficie que se acerca rápidamente. Su radar de aterrizaje hace rebotar señales en la superficie para determinar su altitud, mientras que entra en funcionamiento otra nueva tecnología: "EDL", la navegación relativa al terreno.

Los miembros del equipo de la misión han mapeado de antemano los lugares más seguros de la zona de aterrizaje, que el rover los coteja con imágenes en tiempo real utilizando una cámara especial que identifica rápidamente las características de la superficie. Si "Perseverance" detecta que se dirige a un terreno más peligroso, elige el lugar más seguro al que puede llegar y se prepara para el siguiente paso.

En la fina atmósfera marciana, el paracaídas sólo puede reducir la velocidad del vehículo a  $\sim 320$  km/h. Para alcanzar su velocidad de aterrizaje segura, "Perseverance" debe liberarse del paracaídas y descender el resto del camino usando cohetes. Justo encima del vehículo, en el interior de la cubierta posterior, se encuentra el módulo de descenso propulsado por cohetes, que viene a ser una especie de "mochila propulsora" con ocho motores apuntando al suelo. A unos 2100 m de la superficie, el rover se separa de la cubierta posterior y enciende los motores de la etapa de descenso.

El módulo de descenso se mueve rápidamente hacia un lado y hacia el otro, para evitar ser impactado por el paracaídas y la cubierta posterior que bajan detrás. La dirección de su maniobra de desvío está determinada por el objetivo seguro seleccionado por la computadora que ejecuta la navegación relativa al terreno (Figura 13).



*Figura 13: "Perseverance" fotografió al paracaídas (ya en el suelo) que le ayudó a frenar durante su toma de tierra en el cráter "Jezero" de Marte el día 18 de febrero de 2021. La imagen se tomó el día 6 de abril de 2022, 401º día marciano, o sol, de la misión. Crédito: NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.*

A medida que el módulo de descenso se nivela y disminuye su velocidad de descenso final hasta  $\sim 2,7$  km/h, se inicia la maniobra de "grúa aérea", a unos 20 m del suelo y unos 12 s antes de la toma de tierra, que baja el rover mediante un conjunto de cables de  $\sim 6,4$  m de largo. Mientras tanto, el rover despliega su sistema de movilidad, bloqueando sus patas y ruedas en posición de aterrizaje. Tan pronto como el rover detecta que sus ruedas han tocado el suelo, corta rápidamente los cables que lo conectan al módulo de descenso, que reanuda su vuelo para precipitarse en la superficie a una distancia segura del "Perseverance" (Figuras 14 y 15).

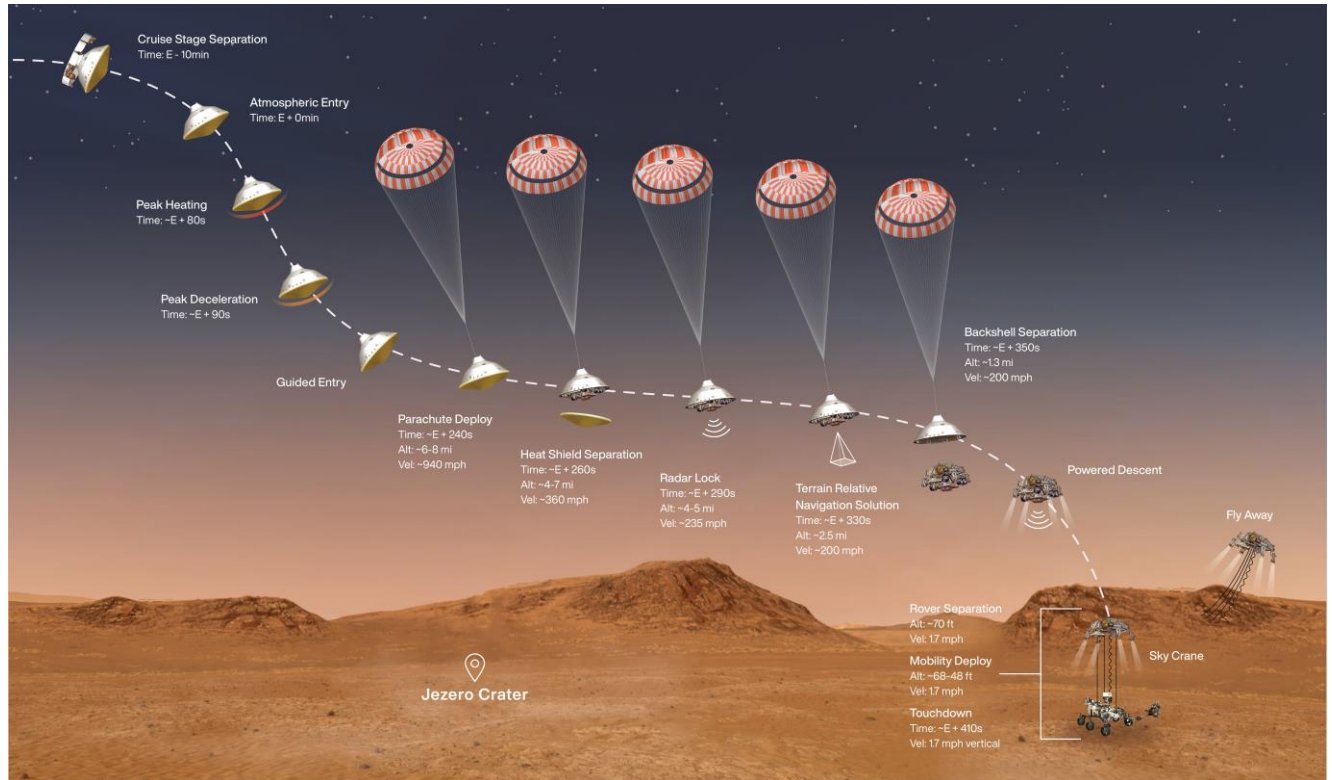


Figura 14: Ilustración que muestra los acontecimientos que tienen lugar durante los últimos minutos del viaje de casi siete meses por el espacio de la misión "Mars 2020". Crédito: NASA/JPL-Caltech.



Figura 15: Maniobra "Sky Crane" (Grúa celeste) mediante la que el rover "Perseverance" y el helicóptero "Ingenuity" descienden hasta el suelo suavemente sujetos por una grúa. Crédito: NASA/JPL-Caltech.

## PERSEVERANCE

*"Parte de la inhumanidad de la computadora es que, una vez que está programada de forma correcta y funciona sin problemas, es completamente honesta."*

**Isaac Asimov** (1920-1992), profesor de bioquímica, divulgador científico y escritor de ciencia ficción

Misiones anteriores habían constatado la existencia de agua líquida en Marte en un pasado lejano. El rover "Curiosity", primo mayor de "Perseverance", exploró la habitabilidad de Marte en las cercanías del cráter "Gale", encontrando nutrientes y fuentes de energía que los microbios podrían haber utilizado, y determinó que Marte tenía regiones que podrían haber sido propicias para la vida en un pasado remoto. Pero ¿hubo vida en el Planeta Rojo?, "Perseverance" da un paso más y busca indicios de vida en tiempos pasados, explorando el cráter "Jezero", un lugar de Marte que muestra signos prometedores, y estudiando detalladamente el lugar para conocer sus condiciones hace miles de millones de años, y buscar signos de vida en esos tiempos pretéritos, si es que la hubo (Figura 16).



*Figura 16: Esta es la primera panorámica de 360° tomada por el par de cámaras Mastcam-Z del "Perseverance". Se compuso a partir de 142 imágenes individuales tomadas en el sol 3° (21 de febrero del año 2021), tercer día marciano de la misión. Crédito: NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.*

El rover tiene como propósito principal buscar indicios preservados de biofirmas en muestras de rocas que se formaron en antiguos entornos marcianos con condiciones climáticas que podrían haber sido favorables para la vida microbiana, lo que nos mostraría un Marte habitable en el seno de un Sistema Solar joven. Otro de los objetivos prioritarios de la misión es estudiar el registro de rocas, con el fin de revelar más sobre los procesos geológicos que crearon y modificaron la corteza y la superficie marcianas a lo largo del tiempo. Cada capa de roca de la superficie marciana contiene un registro del entorno en el que se formó.

El rover busca evidencias de rocas que se formaron en el agua y que conservan pruebas de compuestos orgánicos, los componentes químicos de la vida. "Perseverance" también está probando nuevas tecnologías clave para utilizar los recursos naturales del entorno marciano como soporte vital y combustible, que ayudarán a allanar el camino para una futura exploración humana, como por ejemplo la producción de oxígeno a partir de los gases de la atmósfera, la obtención de agua subterránea, o la mejora de las técnicas de aterrizaje. El estudio y caracterización del clima, el polvo y otras posibles condiciones ambientales, que podrían afectar a los futuros astronautas que vivan y trabajen en Marte, también forma parte importante de esta misión.

Los objetivos fundamentales de la misión "Mars 2020", descritos anteriormente, se pueden clasificar en cuatro apartados:

\* **GEOLOGÍA:** Estudiar las rocas y el paisaje en el lugar de aterrizaje, seleccionado por la evidencia de un entorno antiguo astrobiológicamente relevante y diverso geológicamente, y para revelar la historia de la región. Desde la órbita se observa que el cráter albergaba un antiguo delta inundado de agua, y también minerales de arcilla y carbonatos, que sólo se forman en presencia de agua. En la Tierra, los carbonatos son producidos habitualmente por seres vivos, y se sabe que conservan pruebas de ello. Esto es importante porque los carbonatos y ciertos tipos de arcillas pueden ser excelentes minerales en los que buscar signos de vida pasada, mientras que las rocas volcánicas son buenas candidatas para determinar la edad del lugar del que se obtuvieron las rocas. Esta información nos dirá cómo era el clima, si el delta y los lagos eran propicios para la vida, y durante cuánto tiempo.

\* **ASTROBIOLOGÍA:** Determinar si una zona de interés fue apta para la vida, con agua líquida y los componentes químicos básicos necesarios, y buscar indicios de vida antigua en materiales con alto potencial de preservación de biofirmas.

\* **ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS:** Encontrar y recoger muestras de rocas y suelo de Marte que puedan traerse a la Tierra en el futuro. Estas muestras representarán la diversidad geológica del lugar, documentándose exhaustivamente el contexto de las mismas. Para garantizar que las muestras recogidas puedan recuperarse y traerse a los laboratorios terrestres, "Perseverance" dispone de 38 tubos vacíos para su almacenaje, una vez recogidas las muestras, en uno o varios lugares adecuados de la superficie marciana debidamente marcados.

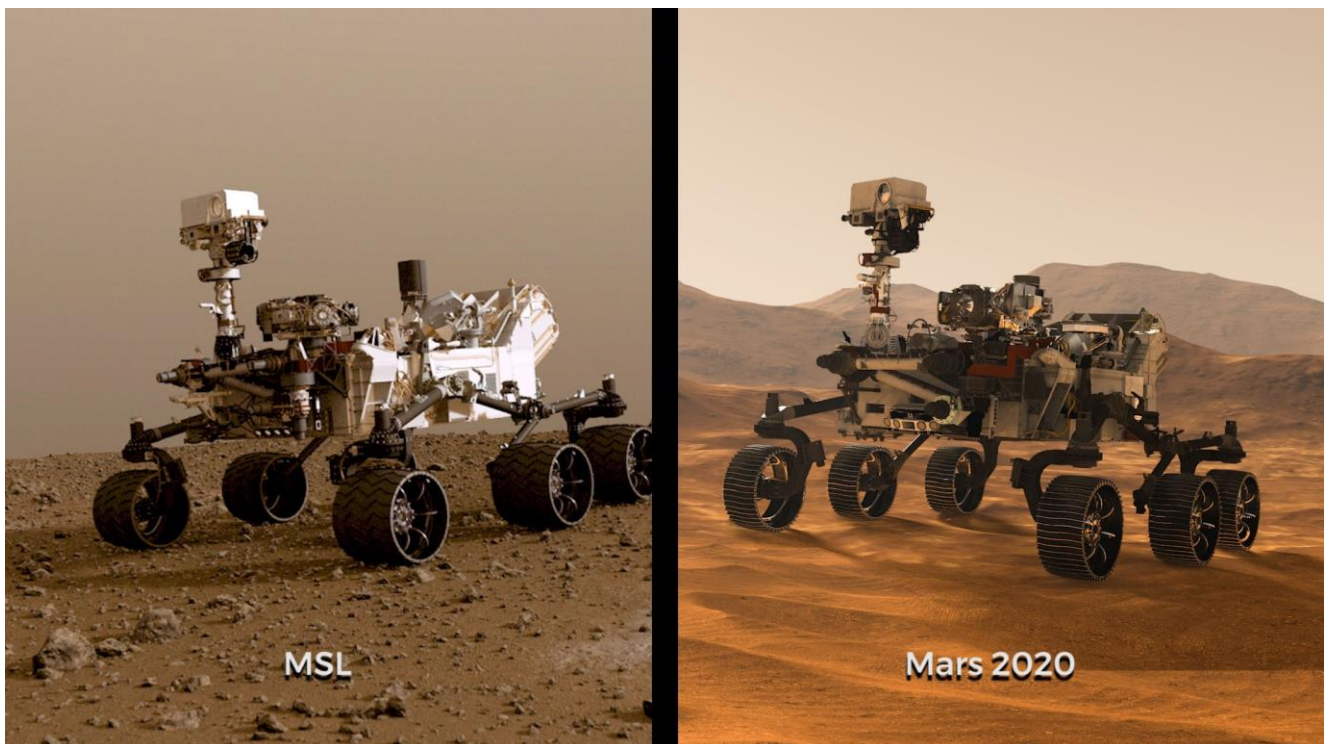
Dada la importancia de documentar detalladamente el ambiente y el entorno (contexto) que rodea a las muestras, dónde se recogieron y por qué, qué tipos de roca se encontraron encima o debajo de ella, el equipo del Control de la Misión en la Tierra es el encargado de añadir toda esa información a cada muestra recogida. Los tubos con las muestras se han diseñado para que algún día puedan traerse de vuelta a la Tierra de forma segura, de tal forma que cuando se traigan, los equipos de la Tierra dispondrán de toda la información necesaria para comprender dónde, cómo y cuándo se recogieron, lo que contribuirá a nuestra comprensión de la historia de Marte como planeta.

\* **PREPARACIÓN DE LA PRESENCIA HUMANA:** Contribuir a la preparación para la exploración humana de Marte mediante el uso de tecnología de utilización de recursos que se encuentran en el propio planeta, como la producción de propelente y oxígeno respirable a partir de la atmósfera con el instrumento "MOXIE" (**Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment**), o la caracterización del tamaño, cantidad y morfología del polvo atmosférico para comprender sus efectos sobre el funcionamiento de los sistemas de superficie y la salud humana con el "Analizador de la Dinámica Ambiental de Marte" (MEDA), que también mide la velocidad y dirección del viento, su temperatura, su humedad relativa y la presión atmosférica, entre otros parámetros. También se tienen en cuenta, en relación con este cuarto objetivo, los datos obtenidos durante la entrada en la atmósfera marciana y el descenso, como las condiciones aerotérmicas, el sistema de protección térmica y el rendimiento aerodinámico del vehículo de entrada durante la fase "EDL", que aportan información fundamental sobre la atmósfera de Marte. Por último, otro de sus instrumentos, denominado "SHERLOC" (**Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals**), lleva pequeños trozos de material de los trajes espaciales, con el objetivo es comprobar su precisión y su resistencia en el duro entorno marciano.

La misión "Mars 2020" ha utilizado innovaciones tecnológicas que han demostrado gran efectividad y fiabilidad, especialmente el sistema "EDL" para la entrada, descenso y aterrizaje, ya probado en la anterior misión "Mars Science Laboratory" (MSL), con su rover "Curiosity", con el mismo éxito, pero con mejoras añadidas, como el "TRN" (**Navegación Relativa al Terreno**), que es un sofisticado sistema de navegación que permite al rover detectar y evitar terrenos peligrosos, des-

viándose lo necesario durante su descenso, a través de la atmósfera marciana, para conseguir un mejor lugar de aterrizaje.

"Perseverance" es un verdadero prodigio de la tecnología, un laboratorio móvil y autónomo enormemente sofisticado, con capacidad para recoger muestras y realizar análisis químicos, biológicos, físicos, geológicos y atmosféricos. Tiene las dimensiones de un coche grande (tipo SUV), con  $\sim 3$  m de largo,  $\sim 2,7$  m de ancho y  $\sim 2,2$  m de alto, pero con 1025 kg de peso (en la Tierra), y está asistido por el primer helicóptero que opera fuera de nuestro planeta, llamado "Ingenuity", o "Ginny", como lo denominan coloquialmente los ingenieros de la misión. De pequeño tamaño y con un peso de 2 kg, dos rotores coaxiales de 1,2 m de diámetro, cuatro patas y multitud de sensores, es un pequeño ingenio volador capaz de volar de forma segura y autónoma, que resulta fundamental para las tareas de su hermano mayor "Perseverance" (Figura 17).



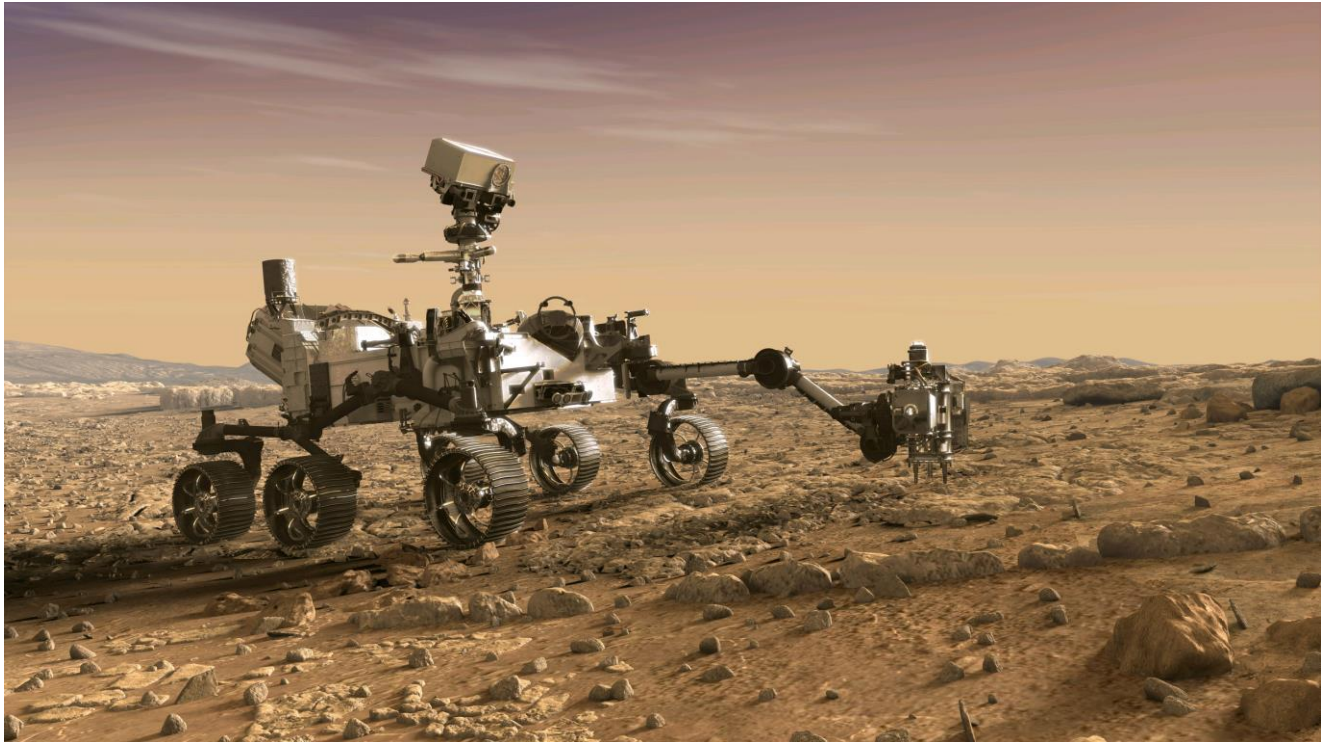
*Figura 17: Ilustraciones de los rover "Curiosity" y "Perseverance". Mientras que el rover "Perseverance" de la misión "Mars 2020" se basa en el diseño del "Curiosity" de la misión "MSL", cada uno tiene su propio papel en la exploración en curso de Marte y la búsqueda de vida antigua. Crédito: NASA/JPL-Caltech.*

Su diseño se basó en gran medida en el exitoso rover "Curiosity" de la anterior misión "MSL", sin embargo, "Perseverance" dispone de un nuevo conjunto de herramientas científicas y tecnológicas. Una diferencia importante es que este rover puede tomar muestras y almacenar minerales, para lo que cuenta con un nuevo taladro de extracción de muestras que se sellan en tubos y se depositan en la superficie, a la espera de que una futura misión espacial las recoja y las traiga a la Tierra para su análisis detallado. La otra gran diferencia radica en sus brazos robóticos situados en la parte delantera, el del "Curiosity" obtenía muestras recogidas *in situ* para analizarlas en el laboratorio de a bordo del rover, y el del "Perseverance", que es más grande, alberga un nuevo y mayor taladro de perforación y dos instrumentos científicos, además de una cámara en color para inspeccionar de cerca la superficie y también realizar "selfies" para comprobar el estado de los instrumentos y elementos del rover. Entre sus elementos más característicos hay que destacar los siguientes:

\* **CUERPO:** Es la estructura que protege sus órganos vitales, denominada "Caja Electrónica Caliente", o "WEB" por sus siglas en inglés (**W**arm **E**lectronics **B**ox). Al igual que la carrocería de un



coche, la carrocería del rover es una capa exterior resistente que protege el ordenador y los componentes electrónicos del rover, que son básicamente el equivalente a su cerebro y corazón (Figura 18).



*Figura 18: Imagen artística del rover "Perseverance" de la misión "Mars 2020".  
Crédito: NASA/JPL-Caltech.*

De este modo, la carrocería mantiene protegidos y a temperatura controlada los órganos vitales del vehículo, con su parte superior descapotable (Rover Equipment Deck), permitiendo que el mástil y las cámaras se asienten en el aire marciano, tomando fotografías con una visión clara del terreno mientras el rover se desplaza. En el interior del cuerpo del vehículo hay un espacio de trabajo dedicado a recoger, mover y colocar las brocas y los tubos de muestras.

Además de gestionar las nuevas operaciones de muestreo, el rover del "Mars 2020" gestiona todas sus actividades diarias de forma más eficiente, para equilibrar sus mediciones científicas *in situ* al tiempo que recoge muestras para posibles análisis futuros. Para ello, el nuevo software de conducción del rover -el "cerebro" para desplazarse- se modificó (y se sigue actualizando) para dotarlo de una mayor independencia de la que nunca tuvo "Curiosity", permitiéndole cubrir más terreno sin tener que consultar con tanta frecuencia a los controladores en la Tierra.

Otras mejoras en el software han permitido un uso más eficaz y autónomo de la energía eléctrica y otros recursos del rover, y también que el propio "Perseverance" pueda cambiar la hora de algunas actividades para aprovechar los huecos en el programa de operaciones diarias.

\* **CEREBRO:** El módulo informático se denomina "Rover Compute Element" (RCE), aunque en realidad hay dos "RCE" idénticos, por lo que siempre hay un "cerebro" de reserva para tomar el control en caso de problemas. Está compuesto por un computador RAD750 fabricado por "BAE Systems Electronics, Intelligence & Support" (BAE), dotado de un procesador central reforzado contra la radiación con arquitectura "PowerPC 750" y 200 MHz de velocidad (10 veces superior a los del "Spirit" y "Opportunity"). Cuenta con memorias especiales para funcionar en los entornos de radiación extrema que existen en el espacio y en la superficie marciana, con un total de 2 Gbytes de memoria flash (~8 veces más que el "Spirit" y "Opportunity"), 256 Mbytes de memoria DRAM, y 256 Kbytes de memoria EEPROM.

El "Perseverance" lleva una "Unidad de Medición Inercial" (IMU) que proporciona información de 3 ejes sobre su posición, lo que le permite realizar movimientos verticales, horizontales y de lado a lado (guiñada) precisos, y navegar de forma segura, estimando el grado de inclinación que experimenta el rover a lo largo de sus travesías. Otra tarea importante del "cerebro" del "Perseverance" consiste en monitorizar lo que podría denominarse su "estado de salud", como la temperatura y los niveles de energía, junto con otras características que lo mantienen "vivo", comprobando constantemente los sistemas para garantizar que el vehículo pueda comunicarse y mantenerse térmicamente estable en todo momento (ni demasiado caliente ni demasiado frío). También registra los datos de generación y almacenamiento de energía a lo largo del sol de Marte (un día marciano) para decidir qué nuevas actividades pueden iniciarse o completarse; y, por último, programa y prepara las sesiones de comunicación con la Tierra o con los orbitadores locales de Marte.

El computador del rover intercambia información con el Equipo de Control terrestre para la realización de fotografías, conducción, y manejo de instrumentos, ejecutando las órdenes transmitidas en una secuencia de comandos desde el equipo de vuelo en la Tierra. "Perseverance" genera constantemente telemetría de ingeniería, mantenimiento y análisis, así como informes periódicos de eventos, que se almacenan para su eventual transmisión una vez que el equipo de vuelo solicite la información al rover.

**\* CÁMARAS DE INGENIERÍA:** "Perseverance" cuenta con 23 cámaras centradas en tareas de ingeniería y ciencia. Unas ayudan en el aterrizaje, otras sirven de "ojos" durante el desplazamiento del rover en tierra, y otras realizan observaciones científicas ayudando en la recogida de muestras.

Durante la fase "EDL" varias cámaras documentaron con gran detalle, mediante fotografías y vídeos, cada una de las operaciones y acontecimientos hasta la toma de tierra, como el despliegue y funcionamiento del paracaídas, los movimientos del sistema de aterrizaje, la cantidad de arena y rocas lanzadas al aire por los retrocohetes, la toma de tierra y su entorno, etc... Otro sistema de cámaras instalado en el módulo de descenso tomó las imágenes necesarias, antes de la toma de tierra, para la navegación en función del terreno. Mientras el vehículo espacial colgaba bajo el paracaídas, la cámara gran angular del sistema de visión del módulo de descenso miraba hacia abajo, tomando imágenes de la superficie a la que se aproximaba rápidamente. Un ordenador especial del rover analizó rápidamente las imágenes y las comparó con un mapa de a bordo para determinar la posición del rover con respecto al suelo, ayudando al "Perseverance" a elegir de forma autónoma el lugar de aterrizaje más seguro.

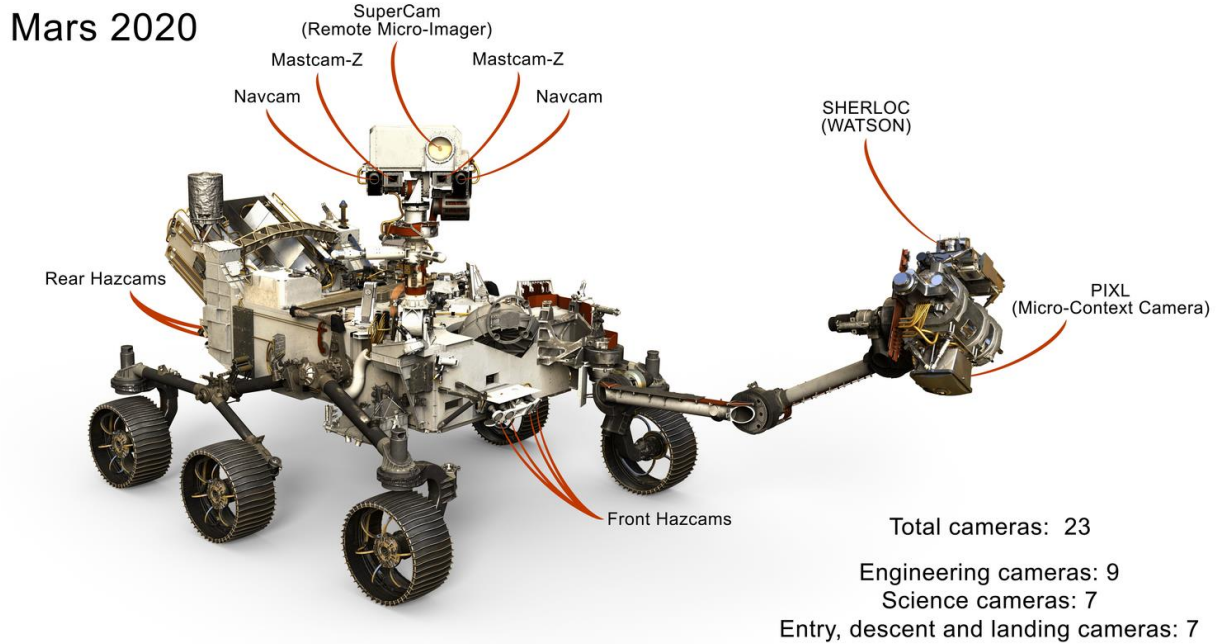
Las cámaras denominadas "de ingeniería", con un campo de visión mucho más amplio, proporcionan una visión mucho mejor del rover que permite comprobar el estado de las diversas piezas del vehículo y medir los cambios en la cantidad de polvo y arena que pueden acumularse en su superficie.

Las nuevas cámaras también pueden tomar imágenes con el vehículo en movimiento y comparten el mismo cuerpo de cámara utilizando objetivos diferentes para cada tarea específica. Tienen tres funciones principales: En primer lugar, evitar peligros (**Hazcams**), en segundo lugar, asistir a la navegación (**Navcams**) y en tercer lugar monitorizar la recogida de muestras (**Cachecam**).

Las "Hazcams" son un conjunto de 6 cámaras, 4 en la parte delantera y 2 en la trasera, capaces de detectar peligros como grandes rocas, zanjas o dunas de arena. Los ingenieros también utilizan las "HazCams" delanteras para mover el brazo robótico en tareas de mediciones, fotografías y recogida de muestras de rocas y suelo. Las vistas en 3D dan a "Perseverance" la capacidad de tomar sus propias decisiones sobre dónde conducir sin consultar cada movimiento con el equipo de control terrestre.

Las "Navcams" son dos cámaras estéreo en color (los "ojos" izquierdo y derecho están separados 42 cm), situadas en lo alto del mástil del vehículo, que ayudan a conducir el rover, pudiendo ver un objeto tan pequeño como una pelota de golf a 25 m de distancia.

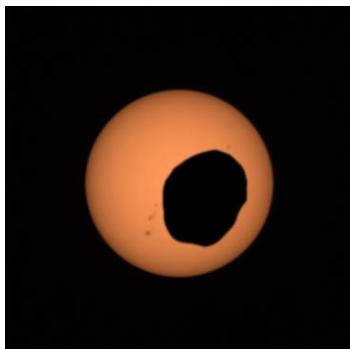
Por último, la "Cachecam" es una cámara única que mira hacia abajo, a la parte superior del depósito de muestras, tomando imágenes de los materiales muestreados y de los tubos de muestras mientras se preparan para su sellado y almacenamiento (Figura 19).



*Figura 19: Cámaras del rover "Perseverance". Crédito: NASA/JPL-Caltech.*

\* **CÁMARAS CIENTÍFICAS:** Las denominadas "cámaras científicas" se centran específicamente en la observación y estudio del entorno, y de los objetivos marcados en la misión.

"**Mastcam-Z**": consiste en un avanzado sistema de un par de cámaras que toman vídeo en color, e imágenes panorámicas estereoscópicas tridimensionales, y disponen de un potente zoom. Las cámaras están una al lado de la otra y apuntan en la misma dirección, proporcionando una vista tridimensional similar a la que verían los ojos humanos, pero mejor. También disponen de una función de zoom para ver detalles de objetivos lejanos (Figura 20).



*Figura 20: La sonda "Perseverance" grabó con su cámara Mastcam-Z un eclipse de Sol (casi mejor un tránsito de Fobos), con mayor zoom y velocidad de fotogramas jamás tomada desde la superficie de Marte. Fotografía publicada por la NASA el día 20 de abril del año 2022. Crédito: NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/SSI.*

**"Supercam"**: esta cámara dispara un láser a áreas de menos de 1 mm desde más de 7 m de distancia, a objetivos minerales que están fuera del alcance del brazo robótico del rover y, a continuación, se analiza la roca vaporizada (en estado de plasma) con los espectrógrafos del rover, que revelan su composición.

**"PIXL"**: utiliza un espectrómetro de fluorescencia de rayos X para identificar elementos químicos en puntos objetivo tan pequeños como un grano de sal de mesa. Dispone de una cámara de microcontexto que proporciona imágenes para correlacionar sus mapas de composición elemental con las características visibles de la zona objetivo.

**"SHERLOC"**: sus principales herramientas son espectrómetros y un láser UV, pero también utiliza una cámara macro integrada para tomar primeros planos extremos de las zonas estudiadas. De este modo, se contextualiza el objetivo del láser y se ayuda a los científicos a ver las texturas que pueden explicar el entorno en el que se formó la roca.

**"WATSON"**: cámara gran angular situada en el extremo del brazo robótico, que proporciona vistas de las texturas y estructuras a escala fina de las rocas marcianas y de los restos rocosos y el polvo que cubren gran parte de la superficie marciana. Al poder ser desplazada por el brazo robótico, también proporciona imágenes de instrumentos y partes del rover. Por ejemplo, puede apuntarse al experimento de producción de oxígeno "MOXIE", para ayudar a controlar la cantidad de polvo que se acumula alrededor de la entrada de aire marciano para la extracción de oxígeno. "WATSON" no sólo es compatible con "SHERLOC", sino que también ayuda a identificar objetivos de interés para los demás instrumentos del rover.

Acompañando a las cámaras científicas, "Perseverance" lleva otros instrumentos científicos como el "Analizador de la Dinámica Ambiental de Marte" (MEDA), que consiste en un conjunto de sensores que miden la temperatura, la velocidad y dirección del viento, la presión atmosférica, la humedad relativa, y la forma y tamaño del polvo en suspensión; "Experimento ISRU de Oxígeno en Marte" (MOXIE), con un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de alta resolución, destinado a la producción de oxígeno a partir del dióxido de carbono atmosférico marciano; "Instrumento Planetario de Litoquímica de Rayos X" (PIXL), para determinar la composición elemental a escala fina de los materiales de la superficie marciana, ofreciendo capacidades que permiten una detección y un análisis más detallados que nunca de los elementos químicos; "Radar Imager for Mars' Subsurface Experiment" (RIMFAX), un radar de penetración terrestre que proporciona una resolución a escala centimétrica de la estructura geológica del subsuelo (Figura 21).

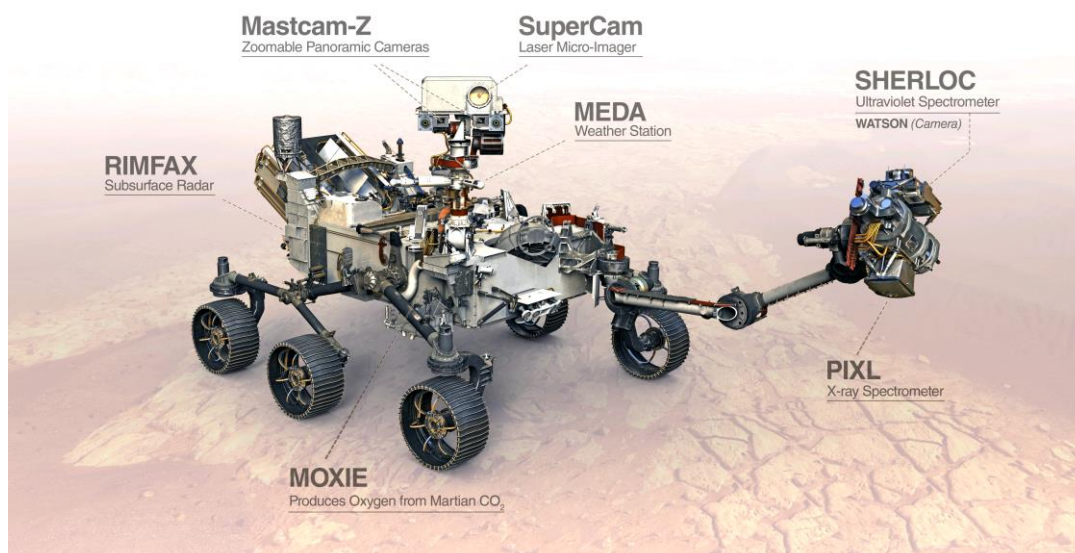


Figura 21: Instrumentos científicos del "Perseverance". Crédito: NASA/JPL-Caltech.

\* **MICRÓFONOS:** En el "Perseverance" se ha tratado de emular la experiencia sensorial humana. Las cámaras nos han proporcionado la vista; las manos, los brazos y los pies robóticos el tacto; y los sensores químicos y minerales el gusto y el olfato. En misiones anteriores, como la "Mars Polar Lander" y el "Phoenix Lander", se intentó obtener sonidos de Marte, pero en ambos casos el propósito fracasó. Por el contrario, en esta última misión "Mars 2020" hemos podido escuchar diferentes sonidos, que han permitido a los ingenieros analizar la entrada, el descenso y el aterrizaje (EDL), siendo testigos de los sonidos producidos por la fricción de la atmósfera y los vientos, y los sonidos del polvo desplazado mientras el rover tomaba tierra. El rover también puede oír los demás instrumentos, los mecanismos internos y escuchar cuando se dejan caer los tubos de muestras. En algunos casos, este sonido puede ayudar al equipo a diagnosticar la "salud" de los mecanismos internos o de los instrumentos del rover, como hemos comentado anteriormente.

El kit de herramientas de "Supercam" también consta de un micrófono, que ayuda a estudiar las rocas y el suelo de Marte, complementando con audio el resultado de sus análisis. Cuando dispara su láser contra una roca, el calor y la vibración crean una onda de choque que produce un sonido de estallido. La cámara y el espectrómetro registran el evento revelando la composición química de la roca vaporizada, al mismo tiempo que el micrófono escucha el "chasquido" entrecortado que se produce cuando el láser golpea la roca a varios metros de "Perseverance". El tipo de chasquido que produce informa a los científicos sobre la masa y la composición de la roca, y la intensidad del sonido revela la dureza relativa de las rocas, lo que puede darnos más información sobre su contexto geológico. Por ejemplo, la dureza de la roca puede ayudarnos a saber si se formó en un lago o a partir de material arrastrado por el viento, o cuánta presión intervino en su formación, todo ello sin necesidad de acercarse a ella.

El micrófono de la "Supercam" puede escuchar durante unos 3,5 minutos seguidos, permitiendo registrar los sonidos agudos de los granos de arena sobre la superficie, el silbido del viento alrededor del mástil y los aullidos graves de los remolinos de polvo al pasar. El micrófono también graba sonidos del "Perseverance" utilizando su brazo, extrayendo núcleos de rocas y las ruedas crujiendo contra la superficie.

\* **RUEDAS:** La experiencia del desgaste sufrido por las ruedas de la anterior misión "Curiosity" al pasar sobre rocas afiladas y puntiagudas, obligaron a los ingenieros de "Mars 2020" a rediseñarlas, reduciendo su anchura, aumentando el diámetro y utilizando un aluminio de mayor grosor. El rover "Perseverance" tiene seis ruedas, cada una con su propio motor, las dos ruedas delanteras y las dos traseras también tienen motores de dirección individuales, lo que permite al vehículo girar sobre sí mismo 360° y que se desvíe y se curve para realizar giros en arco. Están fabricadas en aluminio, con tacos para la tracción y radios curvados de titanio para un soporte elástico. Con su nuevo diámetro de 52,5 cm de diámetro, recorren 1,65 m con cada vuelta completa sin deslizamiento.

Los soportes de las ruedas están fabricados con tubos de titanio similares a los utilizados en las bicicletas de montaña de alta gama, y permiten al rover pasar por encima de rocas de hasta 40 cm de altura. Utilizan un sistema de suspensión muy fiable y ya probado en anteriores rover, como el "Curiosity", "Spirit", "Opportunity" y "Pathfinder". Al circular por el accidentado terreno marciano, el sistema de suspensión mantiene un peso relativamente constante en cada una de las ruedas del rover, y minimiza la inclinación del vehículo durante la marcha, manteniéndolo más estable.

"Perseverance" puede superar obstáculos y atravesar depresiones tan grandes como el tamaño de sus ruedas, que tienen una agresiva banda de rodadura compuesta por 48 tacos, y proporcionan al vehículo una excelente tracción tanto en arena blanda como en rocas duras. Otra impor-

tante característica es que está diseñado para alcanzar 45° de inclinación en cualquier dirección sin volcar, aunque por para darle mayor protección y seguridad se evita en lo posible transitar por terrenos inclinados más de 30°.

La velocidad no es la cualidad más brillante del rover, aunque tampoco hace falta en un vehículo explorador en Marte. Sin embargo, destaca por su rendimiento a este respecto en comparación con los rover de anteriores misiones, en terrenos llanos y duros puede alcanzar los 152 m/h, sobre todo teniendo en cuenta su potencia, que es inferior a 200 W (un coche de 100 CV tiene casi 75000 W).

**\* BRAZO ROBÓTICO:** Con una longitud de 2,1 m tiene una gran movilidad, dispone de articulaciones equivalentes al hombro, codo y muñeca de los brazos humanos para ofrecer la máxima flexibilidad. Puede sujetar y utilizar herramientas científicas con su "mano" para extraer núcleos de rocas, tomar imágenes microscópicas y analizar la composición elemental y mineral de las rocas y suelo marcianos.

El brazo tiene cinco grados de libertad, que le proporcionan sus cinco articulaciones movidas por pequeños motores denominados "actuadores rotativos", la articulación acimutal del hombro, la de elevación del hombro, la del codo, la de la muñeca y la de la "mano". En el extremo del brazo está la "mano", aunque no se parece en nada a una mano humana, y lleva cámaras científicas y analizadores minerales y químicos para estudiar la habitabilidad pasada de Marte, y elegir la muestra de mayor valor científico para almacenarla convenientemente. La "mano" (o "torreta") es como una caja que lleva cámaras científicas, analizadores minerales y químicos, herramientas y sensores, entre ellos "SHERLOC" y "WATSON", "PIXL", "GDRT" (Gaseous Dust Removal Tool), "Ground Contact Sensor" y un taladro.

"SHERLOC" está diseñado para estudiar los minerales de cerca, por lo que está montado en la "mano" del brazo robótico donde utiliza espectrómetros, un láser y una cámara para buscar compuestos orgánicos y minerales que hayan sido alterados por ambientes acuosos y puedan presentar indicios de vida microbiana antigua. "WATSON", el ayudante de "SHERLOC", también está montada en la "mano", y es como la lente de mano de un geólogo, que amplía y registra las texturas de las rocas y suelo que estudia el analizador de minerales "SHERLOC". También es un "asistente" integral de cámara para "PIXL", y proporciona valiosas vistas de los sistemas del rover, como las ruedas y los instrumentos montados en la parte baja del rover, fuera de la vista de la "Mastcam-Z". "PIXL" se monta en el extremo del brazo porque necesita poder acercarse mucho a sus objetivos minerales, para buscar en las rocas y el suelo marcianos los cambios en las texturas y las sustancias químicas dejados por cualquier forma de vida microbiana antigua. Las otras tres herramientas son respectivamente un eliminador de polvo, un sensor especial para evitar daños si el brazo entra en contacto inadvertidamente con la superficie, deteniéndolo inmediatamente, y un taladro.

El taladro del rover no difiere mucho de los que conocemos para uso doméstico, utiliza un movimiento rotatorio, con o sin percusión, para penetrar en la superficie marciana y recoger las muestras. Usa tres tipos diferentes de accesorios (brocas): las de extracción de núcleos, de regolito y las abrasivas, que se utilizan para raspar o abrasionar las capas superiores de las rocas.

El taladro cilíndrico extrae muestras del interior de las rocas, rompiéndolas en su base. Cada muestra se recoge directamente en un tubo limpio de recogida de muestras, que tiene más o menos el tamaño de un bolígrafo. Cada núcleo recogido tiene 13 mm de diámetro y 60 mm de longitud, lo que supone una media de 10-15 gramos de material marciano por tubo. El procedimiento para el regolito es similar, pero utilizando la broca correspondiente, siendo el diámetro de los oficios perforados de 27 mm en ambos casos.

\* **ENERGÍA ELÉCTRICA:** "Perseverance" es un vehículo completamente eléctrico. No podría moverse, utilizar sus instrumentos científicos o comunicarse sin corriente eléctrica. Utiliza un sistema de energía de radioisótopos que produce un flujo fiable de electricidad, utilizando como "combustible" el calor de la desintegración radiactiva del plutonio.

La fuente de energía se denomina "Generador Termoeléctrico de Radioisótopos Multimisión" (MMRTG, por sus siglas en inglés), y tiene una vida operativa prevista de 14 años. El "MMRTG" convierte el calor de la desintegración radiactiva natural del plutonio en electricidad, que carga las dos baterías primarias recargables de iones de litio del vehículo, y mantiene las herramientas y los sistemas del vehículo a su temperatura de funcionamiento correcta.

El dispositivo se ubica en la parte posterior del rover, con un peso de 45 kg y forma cilíndrica (64 cm de diámetro y 66 cm de largo). Utiliza 4,8 kg de dióxido de plutonio que produce ~110 W en el momento del lanzamiento, perdiendo un pequeño porcentaje cada año.

Las baterías satisfacen los picos de demanda de las actividades del rover cuando la demanda supera temporalmente los niveles de producción eléctrica constante del MMRTG, lo que aporta mucha fiabilidad al sistema de alimentación, que es idéntico al de la misión anterior "MSL". La NASA ha utilizado sistemas de energía similares de forma fiable durante décadas, incluidas las misiones "Apolo" a la Luna, las misiones "Viking" a Marte y en naves espaciales que volaron a los planetas exteriores y a Plutón, incluidas las misiones "Pioneer", "Voyager", "Ulysses", "Galileo", "Cassini" y "New Horizons".

Además de fiable, el sistema de energía MMRTG es muy seguro. El combustible del interior de cada módulo de fuente de calor está rodeado por varias capas de materiales protectores, incluido el tipo de material resistente utilizado en los conos de ojiva de los misiles, diseñados para sobrevivir a condiciones de extremo calor durante la reentrada en la atmósfera. Además, el combustible radioisotópico se fabrica en una forma cerámica (similar al material de una taza de café) que evita la rotura en pedazos finos, reduciendo la posibilidad de que el material peligroso pueda ser transportado por el aire o ingerido. En caso de accidente, la dosis máxima estimada que podría recibir una persona expuesta es de 210 mrem, cuando la radiación recibida de fuentes naturales como el radón y los rayos cósmicos procedentes del espacio, es por término medio de 310 mrem al año por persona.

\* **COMUNICACIONES:** "Perseverance" tiene tres antenas (ultra alta frecuencia, banda X de alta ganancia y banda X de baja ganancia) que le sirven de "voz" y de "oídos". Están situadas en la cubierta de equipos del vehículo, en la parte trasera. Disponer de varias antenas proporciona flexibilidad operativa y opciones de reserva en caso de que sean necesarias.

La mayoría de las veces, "Mars 2020" utiliza su antena de frecuencia ultra alta (UHF) (~400 MHz) para comunicarse con la Tierra a través de los orbitadores de la NASA alrededor de Marte. Dado que las antenas del rover y de los orbitadores están muy próximas entre sí, actúan un poco como walkie-talkies en comparación con las telecomunicaciones de largo alcance con la Tierra que proporcionan las antenas de baja y alta ganancia. El uso de orbitadores para retransmitir mensajes es muy práctico porque están mucho más cerca de "Perseverance" que las antenas de la Red de Espacio Profundo (DSN) en la Tierra. El rover puede alcanzar velocidades de transmisión de hasta 2 Mbits/s en el enlace de retransmisión con los orbitadores situados sobre él, para retransmitir posteriormente esos datos a la Tierra con sus antenas y transmisores mucho más grandes. Por lo general, una señal de radio tarda entre 5 y 20 minutos en recorrer la distancia entre Marte y la Tierra, dependiendo de la posición de los planetas

La antena de alta ganancia es orientable, por lo que puede dirigir su haz de radio en una dirección concreta, sin que todo el vehículo tenga que cambiar de posición para establecer una comu-

nificación con la Tierra, que siempre está en movimiento en el cielo marciano. Al igual que girar el cuello para hablar con alguien que está a tu lado en lugar de girar todo el cuerpo, el rover puede ahorrar energía y simplificar las cosas moviendo sólo la antena. Su alta ganancia le permite concentrar su haz, lo que permite mayores velocidades de transmisión de datos en el largo enlace de vuelta a la Tierra. Esta antena de radiofrecuencia banda X opera de 7 a 8 GHz y está montada en la parte central del rover, tiene una forma hexagonal de 0,3 m de diámetro. Su velocidad de transmisión/recepción es de 160/500 bits/s o más rápido hacia/desde las antenas de 34 m de diámetro de la Red de Espacio Profundo, o a 800/3000 bits/s o más rápido hacia/desde las antenas de 70 metros de diámetro de la Red de Espacio Profundo. Este dispositivo se ha desarrollado en España.

Por último, "Mars 2020" utiliza su antena omnidireccional (puede enviar y recibir información en todas las direcciones) de baja ganancia principalmente para recibir señales. La antena recibe a baja velocidad los datos de las antenas de la Red de Espacio Profundo en la Tierra, lo que proporciona una forma robusta de comunicarse siempre con el rover al no necesitar ser apuntada. Funciona en la misma banda que la antena de alta ganancia, y tiene una velocidad de recepción de  $\sim 10$  bits/s desde las antenas de la Red del Espacio Profundo de 34 m de diámetro, o  $\sim 30$  bits/s desde las antenas de 70 m de diámetro de la Red del Espacio Profundo.

**\* TOMA DE MUESTRAS:** El robot "Perseverance" recoge muestras de rocas y suelo marcianos con su taladro, para posteriormente almacenarlas en tubos en la superficie marciana, proceso denominado "almacenamiento de muestras".

Una de las grandes tareas del rover es recoger muestras cuidadosamente seleccionadas de rocas y suelo de Marte, que se sellarán en tubos y se dejarán en un lugar bien identificado, o en más de un lugar, de la superficie de Marte. Se proporcionarán mapas detallados para cualquier misión futura que pueda ir a Marte y recoger estas muestras para su estudio por parte de los científicos.

La panza del rover alberga todo el equipo y los suministros necesarios para recoger las muestras, contiene un carrusel giratorio de brocas, que es una rueda que contiene diferentes tipos de brocas, junto a los 43 tubos de muestras esperando a ser llenados (38 vacíos y 5 tubos testigo). Mientras el brazo grande taladra la roca, en la panza del vehículo hay un pequeño brazo robótico que actúa como "ayudante de laboratorio" del brazo grande. El pequeño brazo recoge y traslada nuevos tubos de muestras al taladro, y transfiere los recipientes de muestras llenos a un espacio donde se sellan y almacenan. Una vez que el tubo está sellado herméticamente, nada puede entrar ni salir de él, y los tubos se almacenan en la "panza" del rover hasta que el equipo decide el momento y el lugar para depositar las muestras en la superficie marciana.

Para evitar la contaminación de las muestras marcianas con contaminantes terrestres que puedan llevarse inadvertidamente de la Tierra, la misión se ha dotado de unas normas estrictas que limitan la cantidad de materiales inorgánicos, orgánicos y biológicos procedentes de la Tierra en el rover y en su sistema de manipulación de muestras. "Perseverance" transporta cinco "tubos testigo" junto con los tubos de recogida de muestras, que son similares a los tubos de muestras, salvo que están precargados con diversos materiales testigos que pueden capturar contaminantes tales como, gases que pueden ser liberados por el rover, restos químicos del disparo del sistema de propulsión de aterrizaje, o cualquier otro material terrestre orgánico o inorgánico que pueda haber llegado a Marte con el rover.

Los tubos testigo se abren de uno en uno en la superficie marciana, quedando expuestos al entorno local donde se realiza todo el proceso de recogida de muestras. Los tubos testigo no recogen muestras de suelo o roca, pero también se sellan y almacenan como las muestras reales. En el futuro, si las muestras del "Perseverance" se devuelven a la Tierra para su análisis, los tubos testigo mostrarán si había contaminantes terrestres durante la recogida de las muestras.



En el momento y lugar elegidos por el equipo de la misión, las muestras se depositan en la superficie de Marte en un lugar que el equipo designa como "depósito de muestras". La ubicación o ubicaciones del depósito están bien documentadas, tanto por puntos de referencia locales como por coordenadas precisas procedentes de mediciones orbitales, donde quedan disponibles para su recogida y retorno a la Tierra. Las imágenes tomadas por los orbitadores pueden identificar la ubicación de las muestras con una precisión de aproximadamente un metro, que las cámaras del rover aumentan hasta valores inferiores a un centímetro.

El rover 'Perseverance' continua con su actividad programada, de manera exitosa y correcta, a fecha de la publicación de este trabajo (Figura 22).

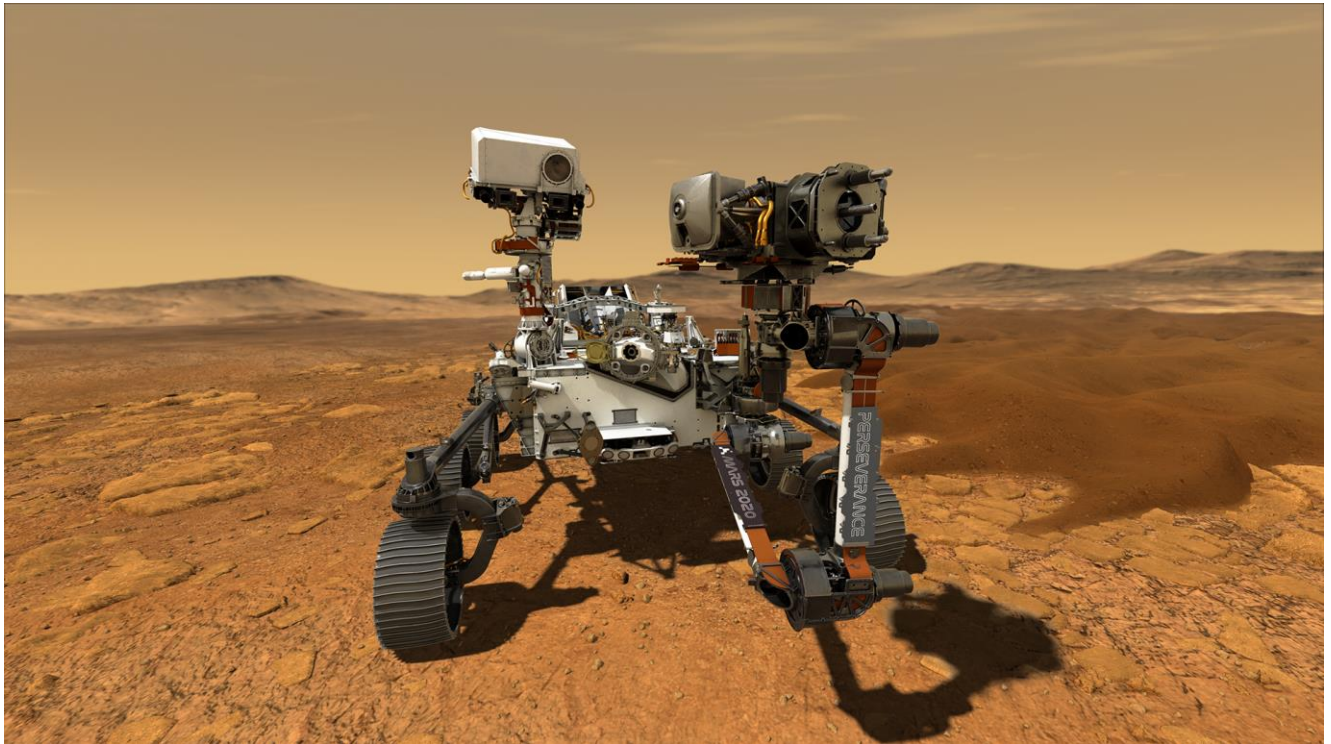


Figura 22: Imagen artística del rover "Perseverance" de la misión "Mars 2020". Crédito: NASA/JPL-Caltech.

## INGENUITY

*"Vivimos en una sociedad extremadamente dependiente de la ciencia y la tecnología, en que casi nadie tiene unas mínimas nociones sobre ciencia y tecnología."*

**Carl Sagan** (1934-1966), astrónomo, astrofísico, cosmólogo, astrobiólogo y divulgador científico

El Helicóptero de Marte, "Ingenuity", es una demostración tecnológica para probar por primera vez el vuelo motorizado y controlado en otro mundo, viajó a Marte a bordo del robot "Perseverance". Una vez que el vehículo llegó a un "aeródromo" adecuado, soltó a "Ingenuity" en la superficie para que pudiera realizar una serie de vuelos de prueba durante un periodo experimental de 30 días marcianos. Realizó tres vuelos con éxito, en el primero, el 19 de abril de 2021, "Ingenuity" despegó, ascendió hasta unos 3 m sobre el suelo, se mantuvo en el aire brevemente, realizó un giro y aterrizó. Fue un hito importante, al ser el primer vuelo motorizado y controlado en la finísima atmósfera de Marte y, de hecho, el primer vuelo de este tipo en cualquier otro mundo fuera de la Tierra, una hazaña que ha sido calificada como "el momento de los hermanos

Wright". Posteriormente, el helicóptero realizó con éxito otros vuelos experimentales a mayor distancia y altitud (Figura 23). Superados los vuelos de prueba, "Ingenuity" pasó a una nueva fase operativa para explorar cómo pueden trabajar juntos los futuros vehículos exploradores y los exploradores aéreos.



*Figura 23: Foto del helicóptero "Ingenuity" realizada por la cámara Mastcam-Z del rover "Perseverance" a una distancia de ~55 metros. Era el 54º vuelo del helicóptero, efectuado el 3 de agosto de 2023. Tras realizar una comprobación previa del funcionamiento de sus rotores, despegó hasta alcanzar 5 metros de altitud y gira hacia la izquierda antes de volver a tomar tierra. Crédito: NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.*

Técnicamente fue construido para ser lo suficientemente ligero (peso <math><1,8\text{ kg}</math> en la Tierra, unos 680 gramos en Marte), pequeño (~1/2 m de alto), y resistente, como para guardarse bajo el vehículo explorador de camino a Marte, y sobrevivir al duro entorno marciano una vez en la superficie. Tiene la potencia suficiente para despegar en la fina atmósfera de Marte (<math><1\%</math> de la densidad de la atmósfera terrestre), y volar durante ~90 segundos a distancias de ~300 m y a una altura de hasta 25 m. Evidentemente, el helicóptero tiene capacidad para operar solo, sin control humano, pudiendo despegar, volar y aterrizar con unas mínimas órdenes enviadas con antelación desde el control de la misión en la Tierra (Figura 24).

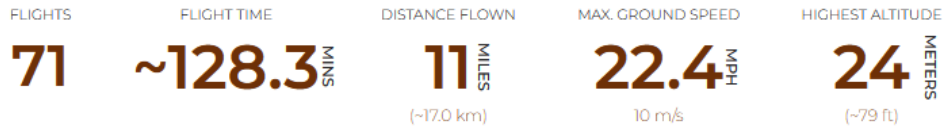


*Figura 24: Foto del helicóptero "Ingenuity" tomada por la cámara Mastcam-Z del "Perseverance" un día antes de la foto de la figura 23, el 2 de agosto de 2023 (sol 871º). Crédito: NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.*

El helicóptero "Ingenuity Mars Helicopter" de la NASA ha completado más de 70 vuelos desde que surcó por primera vez los cielos del Planeta Rojo, superando con creces el número previsto originalmente de cinco vuelos. Los aspectos más destacados de las actividades históricas y exitosas de "Ingenuity" en Marte incluyen:

## Flight Log

By the Numbers



Flight	Sol	Date	Horizontal Distance		Max. Altitude		Max. Groundspeed		Duration	Route of Flight	
			m	ft	m	ft	m/s	mph		seconds	From
71	1023	Jan. 6, 2024	71	~233	12	~39	7	~15.7	35.0	Airfield Chi	
70	1009	Dec. 22, 2023	260	~853	12	~39	3	~6.7	132.9	Airfield Chi	
69	1007	Dec. 20, 2023	705	~2,315	16	~52	10	~22.4	135.4	Airfield Chi	
68	1002	Dec. 15, 2023	702	~2,304	16	~52	10	~22.4	131.1	Airfield Chi	
67	990	Dec. 2, 2023	393	~1,289	12	~39	5.30	~11.9	135.9	Airfield Phi	Airfield Chi

Entre sus funciones más importantes cabe destacar la previsualización de zonas de Marte de posible interés para la exploración por parte de "Perseverance", y allanar el camino para futuros exploradores aéreos en Marte y, potencialmente, en otros destinos espaciales. Proporcionará imágenes aéreas con diez veces mayor resolución que las imágenes orbitales, mostrando características que pueden estar ocultas o excluidas por cámaras móviles. No obstante, su principal objetivo, que se ha cumplido sobradamente, es demostrar la capacidad operativa de un "dron", robot volador o helicóptero autónomo, que pueda asistir a los rover exploradores, e incluso a los futuros astronautas, en sus misiones, facilitando vistas detalladas del entorno y alcanzando lugares peligrosos o de difícil acceso desde el aire (Figuras 25 y 26).



Figura 25: Helicóptero "Ingenuity" posado en el "aeródromo J" con unos 6° de inclinación, que está al norte de la cresta sur de la unidad geológica "Séítah". Foto tomada por la cámara Mastcam-Z del "Perseverance" el día 1 de diciembre de 2021 (sol 279°) desde casi 300 metros de distancia. Crédito: NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.

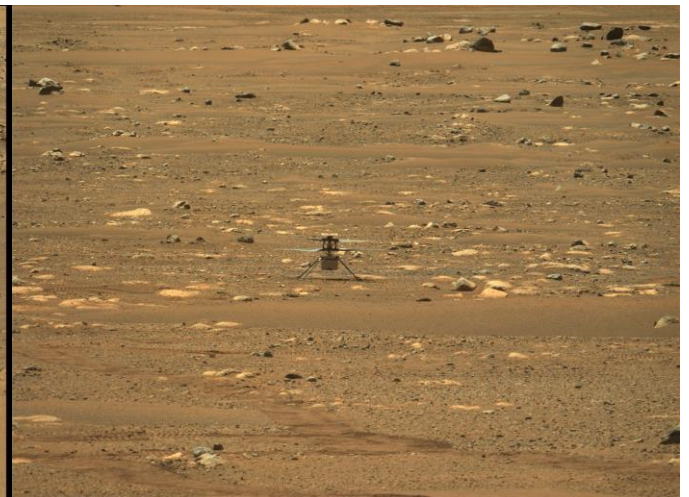


Figura 26: Primer vuelo del helicóptero "Ingenuity" captado por la cámara Mastcam-Z del rover "Perseverance" el día 19 de abril de 2021. Crédito: NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.

El helicóptero utiliza dos rotores coaxiales contrarrotatorios de ~1,2 m de anchura (de punta a punta) que giran a ~2400 r.p.m., con palas fabricadas en fibra de carbono, un panel solar que carga las baterías de seis celdas de iones de litio (Sony), que permiten un vuelo de 90 segundos por día marciano (~350 W de potencia media durante el vuelo), unas antenas de radio (UHF) para comunicaciones con la Tierra a través del "Perseverance" y los orbitadores, y dos cámaras de alta resolución (color y monócroma) con el objetivo apuntando hacia abajo para inspeccionar el suelo y así detectar por dónde se desplaza y facilitar la toma de tierra de forma segura con las cuatro patas ultraligeras fabricadas con tubos de fibra de carbono. La carrocería tiene aislamiento y calefactores para mantener calientes los componentes electrónicos sensibles y sobrevivir a las frías noches marcianas, y su aviónica -o "cerebro"- ayuda al helicóptero a funcionar y navegar con sensores que recogen datos sobre su velocidad y dirección (Figura 27).

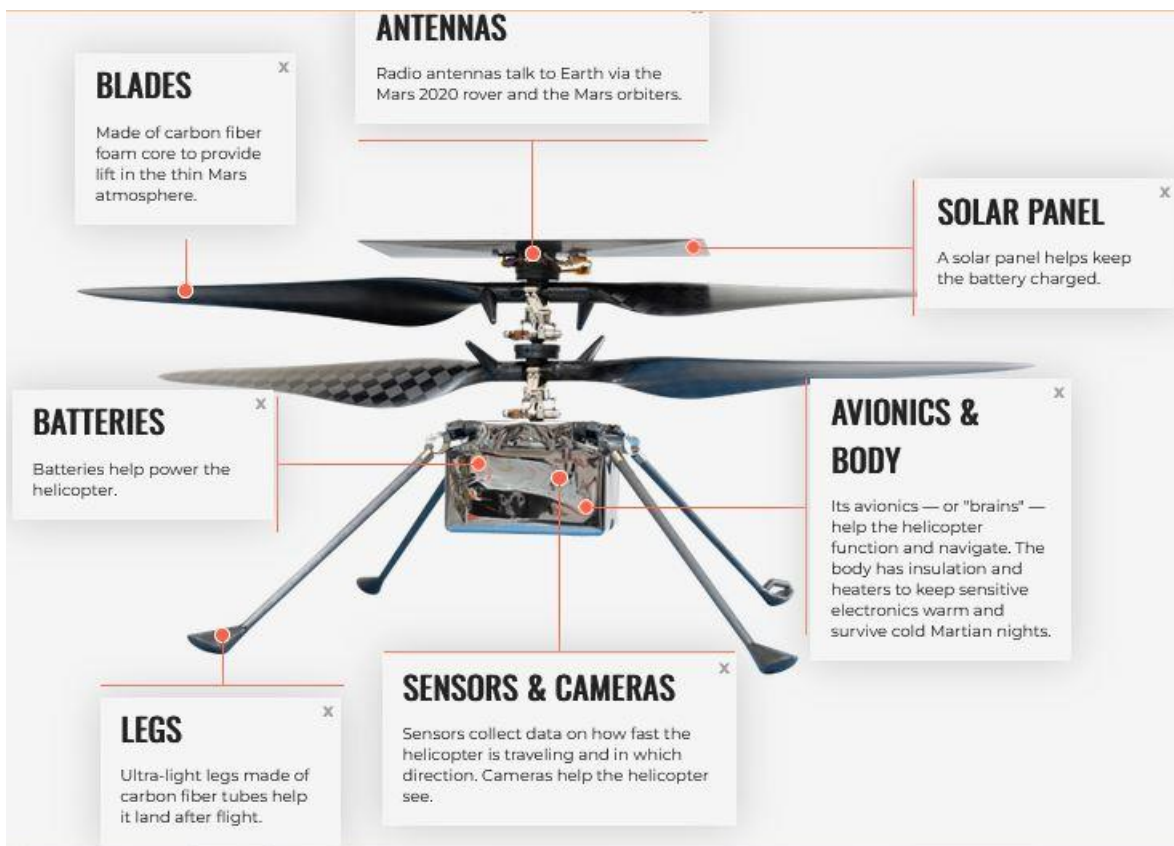
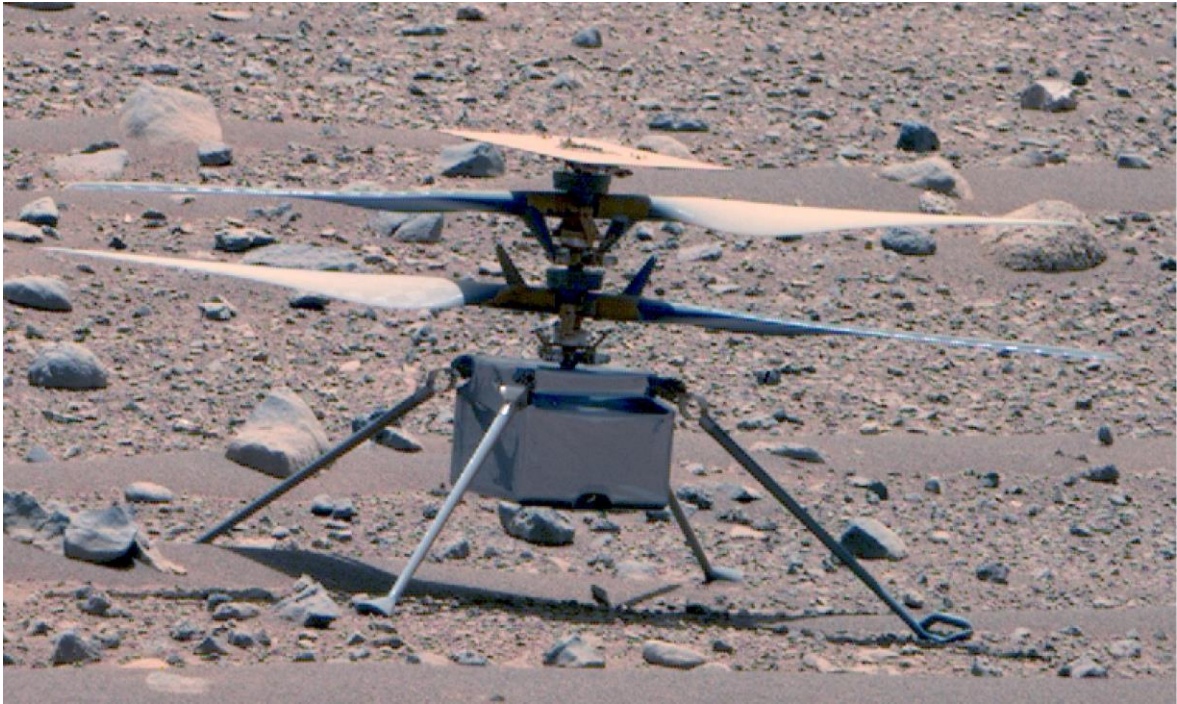


Figura 27: Componentes del helicóptero "Ingenuity". Crédito: NASA/JPL-Caltech.

Aunque "Ingenuity" se desplaza volando, se construyó bajo las especificaciones de una nave espacial para poder soportar las grandes aceleraciones y vibraciones durante el lanzamiento. Sus sistemas están fabricados para resistir la radiación y son capaces de operar en un ambiente helado como suele ser el marciano.

Dado el inconsistente campo magnético marciano, "Ingenuity" no puede utilizar brújulas para la navegación, por lo que usa una cámara de seguimiento solar integrada en el "sistema de navegación inercial" (utiliza un computador, sensores de movimiento -acelerómetros- y sensores de rotación giroscópicos, para estimar la posición, orientación, y velocidad), junto a elementos adicionales como odometría visual, sensores de inclinación, altímetro y detectores de peligro.

"Ingenuity" es el primer helicóptero que opera en otros planetas con atmósfera, y desde luego abre el camino para el desarrollo para nuevas generaciones de helicópteros con mayores capacidades y tamaños, que podrán desarrollar tareas mucho más complejas en Marte y sobre todo en el resto de planetas y satélites con atmósferas (Figura 28).



*Figura 28: Imagen en color de "Ingenuity" tomada desde 23 metros por la cámara Mastcam-Z del rover "Perseverance" el 16 de abril de 2023 (sol 766º). Los pequeños diodos aparecen como pequeñas protuberancias en la parte superior del panel solar, en el que se aprecia una fina capa de polvo, lo mismo que sobre las palas de los rotores. También se aprecia la cámara en color de 13 megapíxeles del helicóptero orientada hacia el horizonte, en la parte inferior del fuselaje. Crédito: NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.*

## CONCLUSIONES

*"Tus suposiciones son ventanas en el mundo. Límpialas de vez en cuando, o la luz no entrará."  
Isaac Asimov (1920-1992), profesor de bioquímica, divulgador científico y escritor de ciencia ficción*

El éxito obtenido por la misión de la NASA "Mars 2020", a pesar de no haber concluido aún, abre la posibilidad de proyectar futuras misiones tripuladas a Marte a corto y medio plazo. Con la puesta en marcha del proyecto espacial internacional "Artemis", la Luna se convertirá en una fuente de recursos minerales, en un objetivo comercial y también turístico al más alto nivel, pero sobre todo se utilizará como plataforma intermedia para la exploración del resto del Sistema Solar con bases permanentes que faciliten las expediciones a Marte y a otros lugares aún más lejanos (Figura 29).



*Figura 29: Puesta de Sol en Marte captada por el rover "Perseverance" con su cámara Mastcam-Z el 9 de noviembre de 2021 (sol 257º). Los atardeceres marcianos suelen destacar por su característico color azul. El polvo fino de la atmósfera permite que la luz azul penetre en la atmósfera de manera más eficiente, pero esta puesta de sol tiene menos polvo y por tanto el tono azulado es más apagado de lo normal. Crédito: NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.*

También se proyecta construir estaciones orbitales alrededor de la Luna que sirvan para ensamblar naves espaciales interplanetarias, y como plataformas de lanzamiento de vehículos espaciales, incluso tripulados, hacia el planeta rojo y resto de misiones a otros cuerpos de nuestro sistema planetario.

Mientras tanto, la misión "Mars 2020" necesita que las muestras recogidas lleguen a los laboratorios terrestres para ser analizadas exhaustivamente, y poder culminar definitivamente el gran éxito del proyecto. A tal fin, está programada la denominada "Campaña de Retorno de Muestras de Marte", que es un esfuerzo conjunto NASA/ESA para traer muestras de rocas y suelo marcianos de manera segura a la Tierra, donde podrán investigarse con un detalle sin precedentes, utilizando todas las capacidades de los laboratorios terrestres.

La arquitectura de la misión de retorno de muestras está diseñada para continuar el trabajo del rover "Perseverance", que está recogiendo muestras y almacenándolas adecuadamente para su futuro regreso a la Tierra. La NASA y la ESA están colaborando en una campaña de seguimiento que incluiría un módulo de aterrizaje de recuperación de muestras liderado por la NASA, que lanzaría las muestras recuperadas a bordo del "Mars Ascent Vehicle". Una vez que el contenedor de muestras se sitúe en órbita, el vehículo "Earth Return Orbiter", liderado por la ESA, se reunirá con él y traerá la preciosa carga de regreso a la Tierra de manera segura.

Está previsto que el rover "Perseverance" entregue sus muestras directamente al módulo de aterrizaje de recuperación de muestras, y que dicho módulo también transporte hasta la superficie marciana dos helicópteros de la NASA para que sirvan como una forma alternativa de entregar un conjunto de muestras escondidas en la superficie por "Perseverance".

Una vez que las muestras estén en la Tierra, los científicos planean realizar análisis químicos y físicos detallados en laboratorios de todo el mundo, para buscar signos de vida pasada en Marte y realizar otros muchos estudios más allá de las capacidades de los instrumentos enviados a Marte (Figura 30).



Figura 30: Nubes fotografiadas por el rover "Perseverance" justo antes del amanecer del día 18 de marzo de 2023 (sol 7380). Crédito: NASA/JPL-Caltech.

El calendario estimado para el lanzamiento de esta misión de retorno de muestras prevé que el orbitador de retorno a la Tierra salga para Marte en el año 2027, y al año siguiente lo haga el módulo de aterrizaje de recuperación de muestras. El "Earth Return Orbiter" entraría en órbita marciana en el año 2029 y el módulo de aterrizaje de recuperación de muestras alcanzaría Marte en el año 2030. Las muestras llegarían a los laboratorios terrestres en el año 2033.

Por último, se adjunta informe del tiempo atmosférico en Marte facilitado por el rover:

NASA Science

**MARS**

2020 MISSION  
PERSEVERANCE ROVER

[Mission](#) [Timeline](#) [Spacecraft](#) [News](#) [Multimedia](#) [Participate](#) [All Mars](#)

Mission • Mars Weather

### Perseverance Rover Daily Weather Report

The Mars Environmental Dynamics Analyzer (MEDA) measures and provides daily and seasonal reports on atmospheric pressure, humidity, ultraviolet radiation at the Martian surface, air temperature, and ground temperature around the rover. Read more about the [MEDA](#) weather station.

Credit: NASA/JPL-Caltech/CAB(CSIC-INTA)

Date	Sol	Air Temperature (°F   °C)		Pressure (Pa)	Sunrise	Sunset
		Max.	Min.			
Jan. 26, 2024	1044	-8°C	-75°C	657	05:24:44	17:15:01
Jan. 25, 2024	1043	-8°C	-75°C	655.9	05:24:24	17:15:21
Jan. 24, 2024	1042	-7°C	-75°C	656.4	05:24:04	17:15:41
Jan. 23, 2024	1041	-7°C	-74°C	656.4	05:23:44	17:16:02
Jan. 22, 2024	1040	-12°C	-73°C	655.7	05:23:25	17:16:23
Jan. 21, 2024	1039	-10°C	-73°C	653.1	05:23:06	17:16:45
Jan. 20, 2024	1038	-9°C	-73°C	652.1	05:22:47	17:17:06

## REFERENCIAS Y CONSULTAS

- *Anuario del Real Observatorio Astronómico 2023 - Instituto Geográfico Nacional - 2023*
- *Los cielos de los planetas y satélites del Sistema Solar - Revista Digital ACTA nº 32*
- [https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/032001.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/032001.pdf)
- [https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/?page=0&per\\_page=99&order=date+desc&search=](https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/?page=0&per_page=99&order=date+desc&search=)
- <https://mars.nasa.gov/mars2020/>
- <https://mars.nasa.gov/technology/helicopter/#Quick-Facts>
- <https://www.nasa.gov/perseverance>
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Perseverance>
- <https://spaceplace.nasa.gov/mars-rovers/sp/>
- <https://spaceplace.nasa.gov/mars-2020/sp/>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Mars\\_Helicopter\\_Ingenuity](https://es.wikipedia.org/wiki/Mars_Helicopter_Ingenuity)
- <http://cab.inta-csic.es/remes/es/atmosfera-de-marte/>
- <https://mars.nasa.gov/mer/gallery/press/spirit/20050420a.html>
- <https://solarsystem.nasa.gov/news/943/como-se-ven-los-amaneceres-y-los-atardeceres-en-marte/>
- <https://spaceplace.nasa.gov/mars-sojourner/sp/>
- <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/rover/summary/>
- [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/msl/images/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/images/index.html)
- [https://www.ign.es/resources/acercaDe/libDigPub/CuestionesAstronomia\\_baja.pdf](https://www.ign.es/resources/acercaDe/libDigPub/CuestionesAstronomia_baja.pdf)
- <https://www.mdsc.nasa.gov/>

(Para comentarios y observaciones al autor: [caronte@acta.es](mailto:caronte@acta.es))