Zoé

Ζωή

La aventura de la vida

Revista de Astrobiología. **N.2 - 2012**

ESPECIAL: REMS, UNA ESTACIÓN AMBIENTAL ESPAÑOLA EN MARTE

Presentación

Si hacemos una búsqueda en la web de REMS+Marte conseguimos cerca de 4 millones de coincidencias. Lo que quiere decir que nuestro proyecto ha tenido un razonable impacto en la sociedad. Aunque, por supuesto muy por debajo de REM, el grupo musical, del que el buscador nos da más de 155 millones de resultados.

REMS ha supuesto para el Centro de Astrobiología (CAB) situarse en la élite de la exploración planetaria. El poder participar en la más ambiciosa de las misiones enviadas hasta el día de hoy a Marte, ha sido realmente un reto para los investigadores del Centro.

Cuando en 2004, al poco de instalarse los laboratorios del CAB en su sede actual, comenzó el proyecto, desconocíamos los retos a los que íbamos a tener que enfrentarnos. Nos adentramos en un camino por el que no todo el equipo había caminado antes. Lo que sí sabíamos era que estábamos completamente decididos a hacerlo. Hoy en día, la perspectiva es totalmente distinta. Se ha conseguido formar un equipo de científicos e ingenieros que caminan juntos, con una relación muy estrecha con la industria y con una experiencia ganada que, seguro, nos permitirá afrontar los siguientes retos de una forma mucho más sólida.

El segundo número de Zoé se ha querido dedicar íntegramente a REMS, en respuesta al interés que ha despertado tanto fuera como dentro del Centro. En sus páginas se muestra el enorme trabajo realizado hasta el momento del lanzamiento: la ciencia que se quiere hacer, cómo es su diseño, y cómo nos estamos preparando para el momento del aterrizaje y el comienzo de los dos apasionantes años que nos esperan explorando Marte.

Tenemos que seguir haciendo un esfuerzo de divulgación de la ciencia y la tecnología, para conseguir que cada vez la distancia entre los proyectos de ciencia y los grupos musicales se vaya reduciendo. Esto, seguro, se traducirá en una sociedad más rica, en todos los aspectos. Este número de Zoé es un nuevo esfuerzo en esa dirección.

Javier Gómez-Elvira

Director del Centro de Astrobiología

Investigador Principal de REMS

staff

DIRECTOR
Luis Cuesta Crespo, Responsable de la UCC-CAB.

COORDINACIÓN EDITORIAL
Natalia Ruiz Zelmanovitch y Juan Ángel Vaquerizo Gallego, UCC-CAB.

COORDINACIÓN GRÁFICA
Rogelio Sánchez Verdasco, UCC-CAB.

CONSEJO EDITORIAL
Javier Gómez-Elvira Rodríguez, Director del CAB.
Jesús Martín Pintado, Vicedirector del CAB.
José Miguel Mas Hesse, Jefe del Departamento de Astrofísica.
Víctor Parro García, Jefe del Departamento de Evolución Molecular.
Ricardo Amils Pibernat, Jefe del Departamento de Planetología y Habitabilidad.
José Antonio Rodríguez Manfredi, Jefe del Departamento de Instrumentación.

DISEÑO
Vicente Aparisi, Proyecto Gráfico y Dirección de Arte.

CATALOGO GENERAL DE PUBLICACIONES OFICIALES
http//publicacionesoficiales.boe.es

NIPO en línea: 078-12-002-5

Centro de Astrobiología (INTA-CSIC)
Carretera de Ajalvir, km 4 - 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid)
http://cab.inta-csic.es
E-mail: divulgacion@cab.inta-csic.es

Zoé – Revista de Astrobiología es una publicación trimestral del Centro de Astrobiología (INTA-CSIC).
Zoé – Revista de Astrobiología no se hace responsable de las opiniones de los autores de los artículos.
Se autoriza la difusión de los contenidos de esta publicación previo permiso.

Los créditos de las imágenes de la portada, la contraportada y la portadilla son todos de NASA/JPL.

Especial REMS

Una estación ambiental española en Marte

Contenidos:

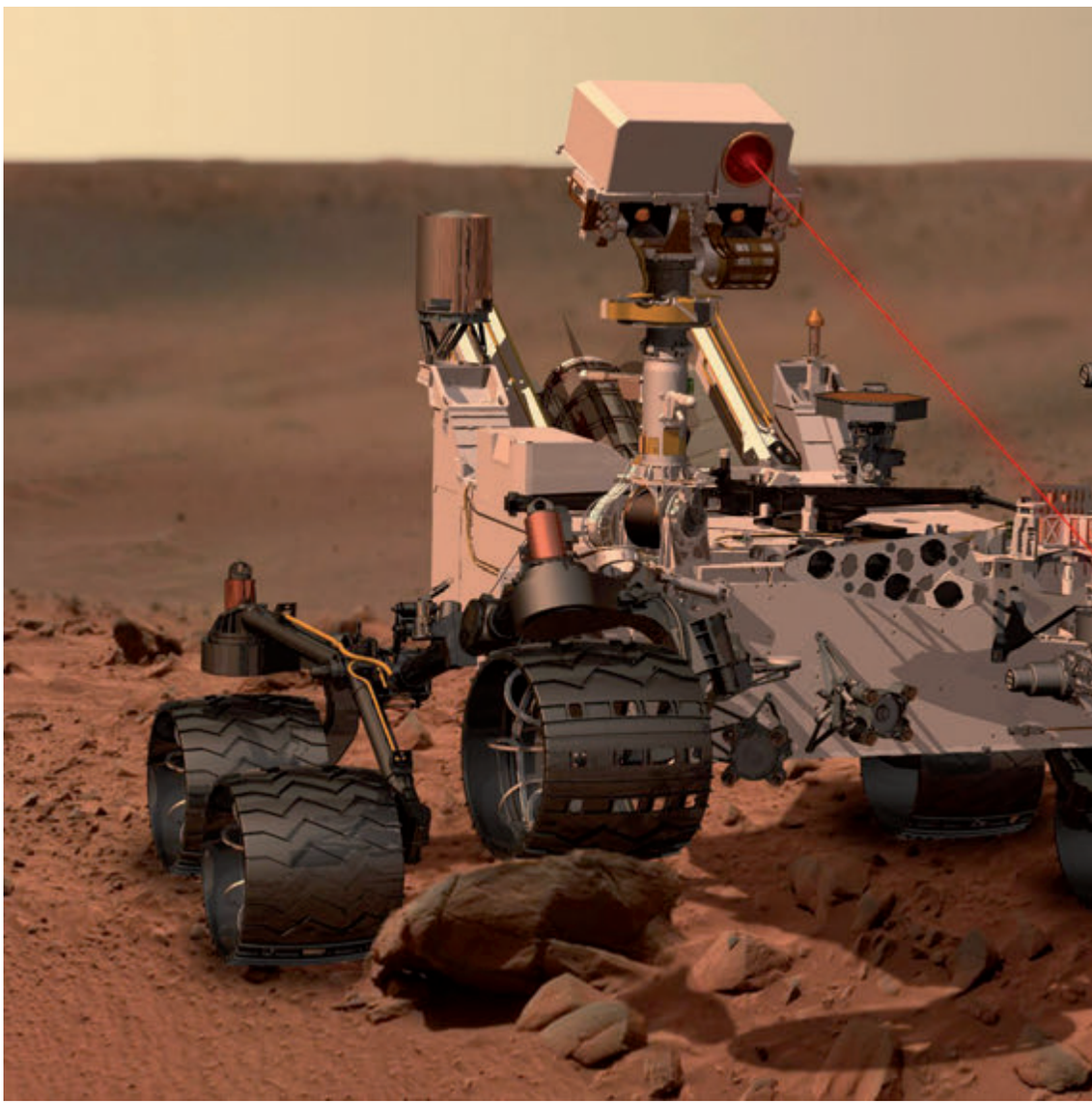
04 • La *Curiosidad* viaja a Marte
10 • El cráter Gale, lugar de destino del *Curiosity*
16 • ¿Qué secretos esconde el cráter Gale?
20 • REMS: una estación ambiental española en Marte
24 • La ciencia de REMS
28 • Un día en la sala de control de REMS
32 • Ensayos de REMS en cámaras de simulación
38 • Campañas de campo de REMS
42 • ¡Rumbo a Marte!

02 • Editorial

La *Curiosidad* viaja a Marte

Unidad de Cultura Científica (UCC-CAB)

Marte, también conocido como el Planeta Rojo, es el cuarto planeta del Sistema Solar. Pese a estar relativamente cerca aún hay muchas cosas que desconocemos de él. Este planeta rocoso tiene un enorme interés para la *astrobiología*, la ciencia que estudia el origen y evolución de la vida, ya que una de las preguntas que nos hacemos y que aún no ha obtenido respuesta es ¿alberga o albergó vida alguna vez nuestro vecino?



Reproducción artística de MSL sobre Marte.

• Crédito: NASA/JPL-Caltech

Marte: el vecino misterioso

Marte es el planeta más parecido a la Tierra en cuanto a sus características geológicas: oxígeno, silicio y hierro son sus componentes principales y su diámetro es, aproximadamente, la mitad del terrestre (unos 6.780 km). Su superficie es de una cuarta parte y su masa es de tan sólo un diez por ciento de la masa de la Tierra.

El punto más alto de Marte es el Monte Olimpo, un enorme volcán de unos 26 km de alto y 600 km de ancho. El complejo de cañones del *Valles Marineris* es el más grande y más profundo conocido del Sistema Solar; se extiende a lo largo de más de 4.000 km y tiene entre 5 y 10 km de relieve entre el suelo y las cimas de los platos circundantes.

Marte cuenta con dos lunas de superficie irregular, cada una de varios kilómetros de ancho. La mayor se llama *Phobos* (Miedo, en Latín); la más pequeña se llama *Deimos* (Terror, en Latín), denominadas así por la personificación de los atributos dados en la mitología griega a los hijos del dios de la guerra (Marte).

La densidad de Marte es 3,9 veces mayor que la del agua (comparada con la de la Tierra, que es 5,5 veces mayor que la del agua). Con sólo un 38% de la gravedad terrestre, la presión superficial de la atmósfera marciana es cientos de veces inferior a la nuestra. Comparada con la de la Tierra, su atmósfera es muy tenue: está compuesta fundamentalmente por dióxido de carbono (95,3%), nitrógeno (2,7%) y argón (1,6%), además de pequeñas cantidades de oxígeno, monóxido de carbono y vapor de agua.

No se ha detectado campo magnético en el planeta similar al de la Tierra; tan solo se han localizado antiguos remanentes de campos en varias regiones. Marte tiene una órbita elíptica cuya distancia media es de 227,7 millones de km. Gira alrededor del Sol una vez cada 687 días terrestres y su período de rotación (la duración de un día, también denominada como "sol") es de 24 horas, 39 minutos y 35 segundos (1,027 días terrestres).

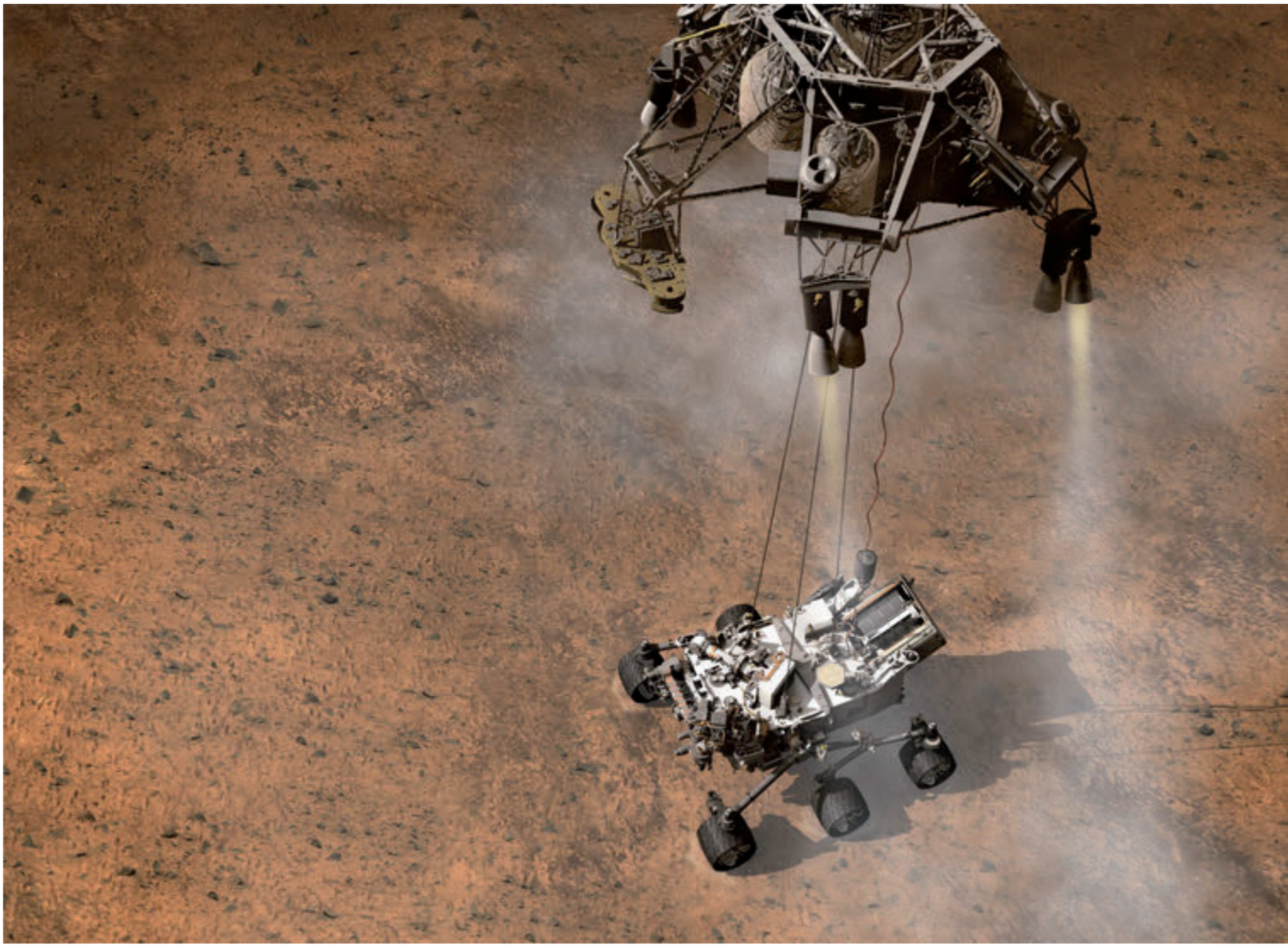
La casi total ausencia de ozono permite el paso de la radiación ultravioleta hasta su superficie. Hay vientos fuertes y tormentas de polvo: los vientos de superficie oscilan de cero a alrededor de 9 m/s, con ráfagas de alrededor de 40 m/s. Tiene tormentas de polvo locales, regionales y globales y sobre su superficie tienen lugar unos remolinos llamados *dust devils*.

La temperatura puede variar entre unos pocos grados por encima de cero y los 120 grados bajo cero. La temperatura media en la superficies de -53ºC (varía de -128ºC durante la noche polar a los 27ºC en el ecuador durante el mediodía en el punto más cercano en su órbita alrededor del Sol). Sin duda, condiciones extremas para cualquier instrumento.

MSL: *Mars Science Laboratory*

Según las teorías aceptadas, la habitabilidad o posibilidad del desarrollo de vida, tal y como la conocemos, viene determinada por la existencia de agua líquida. Si un planeta está demasiado cerca de su estrella anfitriona, el agua que pueda contener se evapora. Si está demasiado lejos, se congela. La Tierra tiene la suerte de hallarse en un lugar que le permite tener agua en todas sus formas. Pero la Tierra no está sola. Marte está dentro de esa franja de habitabilidad, justo al borde.

La temperatura puede variar entre unos pocos grados por encima de cero y los 120 grados bajo cero. La temperatura media en la superficies de -53ºC (varía de -128ºC durante la noche polar a los 27ºC en el ecuador durante el mediodía en el punto más cercano en su órbita alrededor del Sol). Sin duda, condiciones extremas para cualquier instrumento.



Para saber si hay vida en el planeta rojo, numerosas misiones lo han visitado desde que se iniciara la era marciana en los años sesenta. Satélites y vehículos se han acercado hasta allí para intentar desvelar sus secretos, pero Marte sigue estando cargado de incógnitas.

Con el fin de intentar responder a algunas de las preguntas que surgen en torno a este planeta la NASA ha puesto en marcha la misión *Mars Science Laboratory* (MSL), un laboratorio científico en Marte. Su intención es depositar sobre la superficie de Marte el vehículo *Curiosity*. Lanzado el 26 de noviembre de 2011 desde el Complejo de Lanzamiento 41, en Cabo Cañaveral (Florida, EE.UU.) con un cohete Atlas V, recorrerá una distancia de alrededor de 570 millones de kilómetros hasta llegar a su destino, y su aterrizaje está previsto para principios de agosto de 2012. El lanzamiento se produjo en el momento más adecuado para llegar a Marte en el menor tiempo posible, una oportunidad que se da cada dos años.

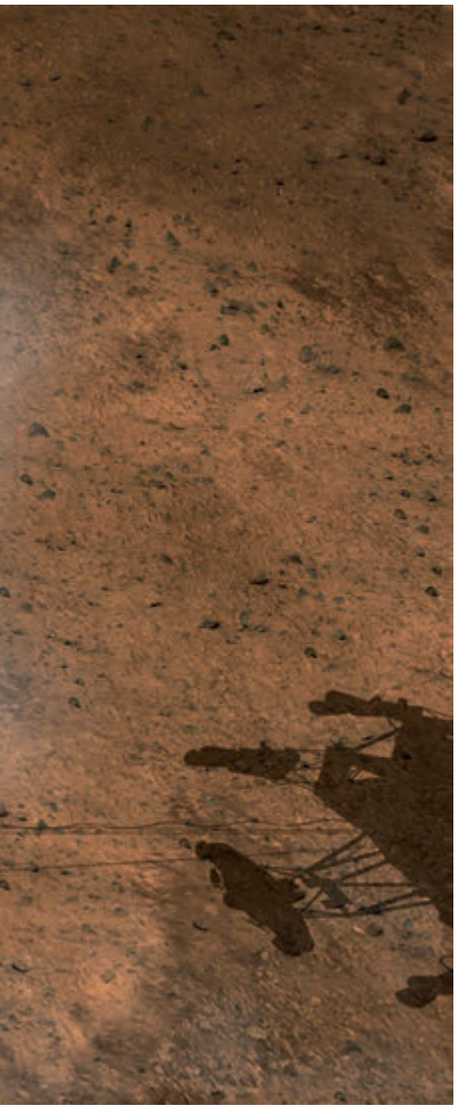
Cuando llegue la hora de aterrizar, se desplegará una tecnología totalmente novedosa. Hasta el momento, la mayor parte de las sondas que descendían sobre Marte lo hacían con sistemas de paracaídas y cámaras inflables tipo *airbag* para amortiguar el choque. Pero, debido a su tamaño, la NASA ha necesitado desarrollar un complejo procedimiento totalmente diferente.

El vehículo irá protegido con un escudo durante su entrada en la atmósfera marciana. Luego descenderá hasta la apertura de un paracaídas. Durante el descenso, el escudo se separará del vehículo, al igual que el paracaídas. Y, finalmente, un sistema de retrocohetes permitirá que el *rover* tome tierra suavemente sobre sus propias ruedas.

Una vez sobre la superficie, el *rover Curiosity* comenzará su actividad científica. Su intención es llevar a cabo análisis *in situ* de tipo físico, químico y meteorológico. Con ello se pretende, entre otras cosas, determinar e inventariar los elementos de la vida, identificar trazas biológicas e interpretar procesos geológicos y climáticos.

Curiosity

El 14 de abril de 2004, la NASA anunció una oportunidad para los científicos con el fin de que propusieran programas de investi-



• Crédito: NASA/JPL-Caltech

■ Reproducción artística del momento de aterrizaje del *Curiosity*.

gación para la misión MSL. La solicitud de propuestas decía: "El objetivo científico global de la misión MSL es explorar y evaluar cuantitativamente un potencial hábitat en Marte". Ocho meses después, la agencia anunció la selección de ocho propuestas competitivas. Además, España y Rusia proporcionaron una investigación a través de acuerdos internacionales. Los instrumentos para esas diez investigaciones componen la carga científica útil del *Curiosity*.

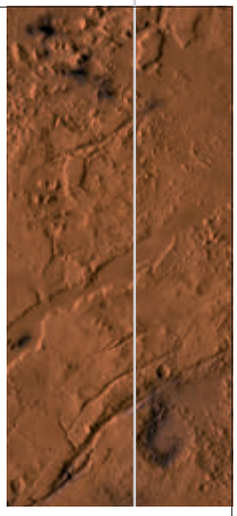
El *rover Curiosity* forma parte de la tercera generación de vehículos todo terreno que la NASA envía a Marte. Pesa cerca de 1.000 kg y tiene el tamaño de un automóvil pequeño: es el mayor vehículo enviado a Marte hasta el momento. Su velocidad máxima será de 90 metros por hora y está diseñado para ser operativo, al menos, durante un año marciano, es decir, durante 686 días terrestres.

Con una longitud de 3 m, sin contar el brazo, y un ancho de 2,8 m, mide 2,1 m de alto hasta el tope del mástil y sus seis ruedas tienen un ancho de 0,5 m cada una.

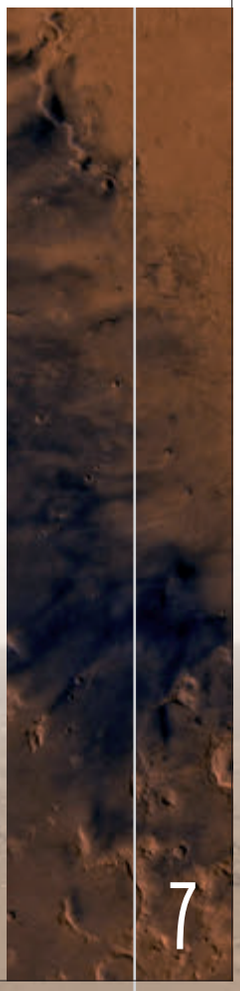
Curiosity cuenta con diez instrumentos científicos, tiene capacidad de movimiento, herramientas de adquisición de muestras y un sistema de comunicaciones. La instrumentación científica que lleva el *rover* es la más sofisticada de las enviadas hasta el momento a Marte: APXS (*Alpha-Particle-X-ray-Spectrometer*) determinará la composición de rocas y suelo; ChemCam (*Chemistry Camera*) es un espectrómetro que también analizará las rocas marcianas; CheMin (*Chemistry and Mineralogy*) cuantificará los minerales y la estructura mineral de las rocas con rayos X; DAN (*Dynamic of Albedo Neutrons*) es un detector de neutrones que, indirectamente, mide la cantidad de agua a través de la detección de la cantidad de átomos de hidrógeno que hay en el subsuelo; MAHLI (*MArs HandLens Imager*) es un microscopio para obtener imágenes de rocas, suelo, hielo y escarcha; MARDI (*MARs Descent Imager*) tomará imágenes de alta resolución en color durante el descenso y aterrizaje en Marte para proporcionar información sobre el contexto geológico del entorno; MastCam (*Mast Camera*) es un conjunto de cámaras que grabará vídeo de alta definición (10 imágenes por segundo) y tomará imágenes multiespectro y estereoscópicas en rangos de distancia que van de los pocos centímetros a varios kilómetros; RAD (*Radiation Assessment Detector*) caracterizará un amplio rango de radiaciones para la posible exploración humana del planeta; SAM (*Sample Analysis at Mars*) hará análisis químicos elementales y orgánicos; puede detectar un amplio rango de componentes biológicos y analizar isótopos orgánicos estables y gases nobles.

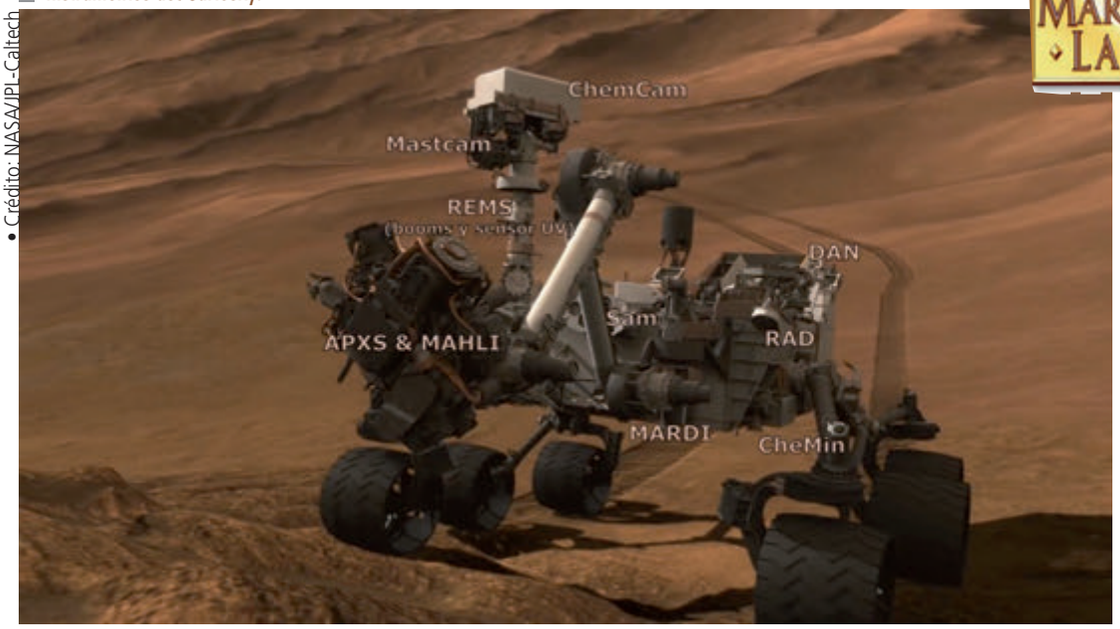
Y, finalmente, el *Curiosity* cuenta con la estación ambiental REMS (*Rover Environmental Monitoring Station*), que se encargará de la evaluación ambiental de esta zona de Marte y estudiará tanto las condiciones actuales como las existentes miles de millones de años atrás. Construido en España, REMS ha sido desarrollada por un grupo de cuarenta investigadores -formado por científicos e ingenieros- y liderado por el Centro de Astrobiología (CAB, un centro mixto del INTA, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, y el CSIC, Consejo Superior de Investigaciones Científicas); todo ello en colaboración con la empresa Crisa (que forma parte de EADS Astrium, la división espacial de la Compañía Europea de Defensa, Aeronáutica y Espacio), la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y la Universidad de Alcalá de Henares (UAH), además de diversas instituciones norteamericanas y el Instituto Meteorológico Finlandés (FMI). La industria española también ha contribuido por otras vías en el desarrollo de *Curiosity*, ya que la antena de alta ganancia que utilizará el *rover* para el envío de datos a la Tierra ha sido desarrollada por las empresas Astrium-CASA y SENER.

España es el único país europeo que participa en este proyecto con un investigador principal en el equipo: Javier Gómez-Elvira, del Centro de Astrobiología (CAB, INTA-CSIC) y es la primera vez que un equipo español envía un instrumento a la superficie de Marte.



Curiosity cuenta con diez instrumentos científicos, tiene capacidad de movimiento, herramientas de adquisición de muestras y un sistema de comunicaciones. La instrumentación científica que lleva el *rover* es la más sofisticada de las enviadas hasta el momento a Marte.





Instrumentos del *Curiosity*.

• Crédito: NASA/JPL-Caltech

Insignia de la misión MSL

• Crédito: NASA/JPL

Habitabilidad, pasado y presente (pero, sobre todo, pasado)

Incluso si la tecnología del *rover* funciona de manera impecable, algunas evidencias de entornos del pasado buscadas por la misión podrían no haber dejado huella en los registros de roca obtenidos. Pese a que la posibilidad de que haya podido existir vida en Marte genera gran interés, encontrar evidencias de que las condiciones no fueron favorables para la vida proporcionaría también importante información sobre las diferencias y similitudes entre el Marte y la Tierra primitivos.

La misión evaluará si el área que explora el *Curiosity* ha sido alguna vez un hábitat potencial para la vida marciana. Esta misión no ha sido diseñada para responder a la pregunta de si alguna vez existió vida en Marte. *Curiosity* no transporta experimentos para detectar procesos activos que den a entender que hay metabolismos biológicos actualmente sobre su superficie, ni tiene la capacidad de tomar imágenes de microorganismos o de sus equivalentes fósiles.

Aún así, si esta misión encuentra que el cráter Gale ha tenido condiciones favorables para la habitabilidad y para preservar evidencias de vida, estos descubrimientos pueden dar pie a futuras misiones que traerían muestras a la Tierra para pasar pruebas de detección de vida o para misiones que lleven a Marte experimentos avanzados con el fin de detectar vida *in situ*. En este sentido, MSL es la etapa de prospección en un programa de exploración a largo plazo, cuyo enfoque global es el de llevar a cabo un reconocimiento, prospección y extracción de evidencias para obtener una respuesta definitiva sobre si la vida ha existido en Marte.

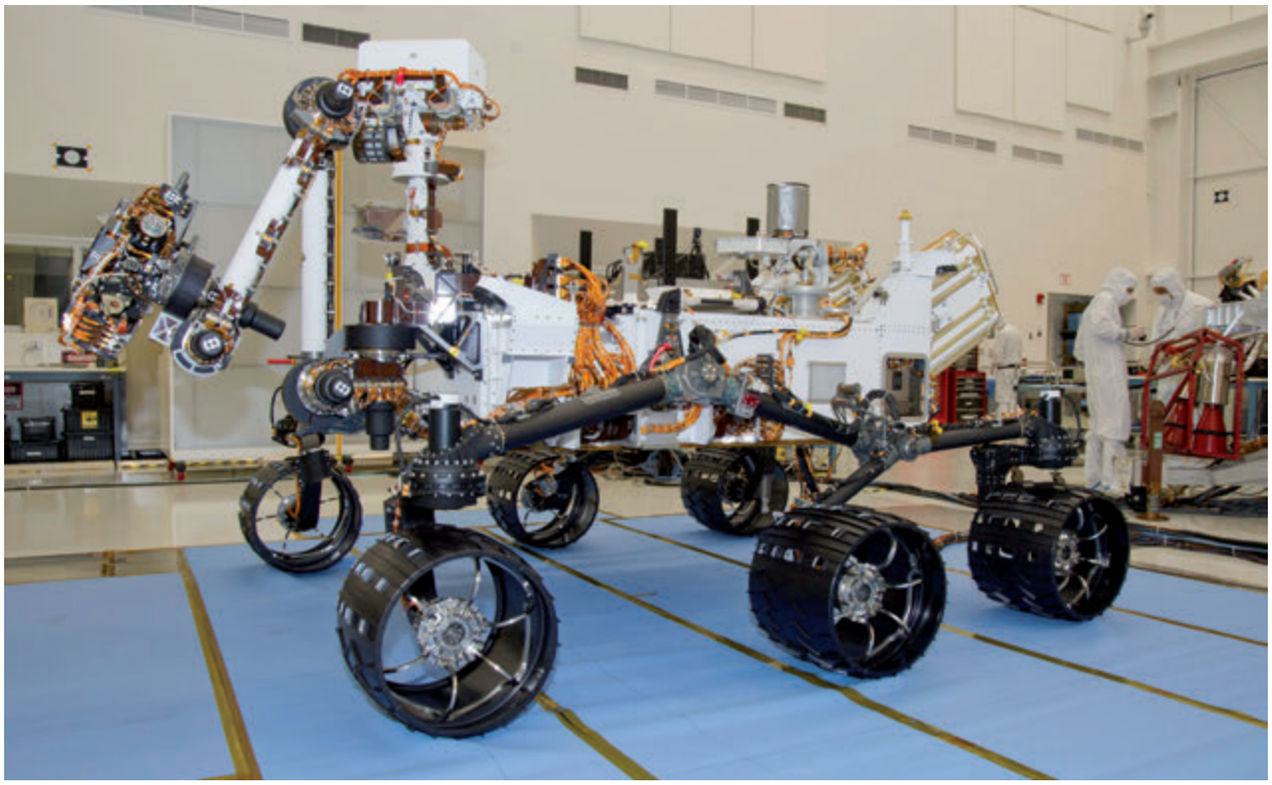
Tres condiciones consideradas cruciales para la habitabilidad son el agua líquida, otros componentes químicos utilizados por la vida y una fuente de energía. La misión MSL sigue la estrategia de "seguir al agua", una mítica búsqueda de la NASA en Marte llevada a cabo desde mediados de los años 90, pero la amplía con la estrategia de determinar los mejores escenarios para la búsqueda de una respuesta a la pregunta de si Marte albergó vida alguna vez.

En cada entorno de la Tierra donde existe agua líquida hay vida microbiana. De hecho, el programa de astrobiología de la NASA ha financiado el desarrollo previo de la ciencia de MSL apoyando estudios de hábitats extremos sobre la Tierra que pudieran ayudar en la comprensión de posibles hábitats en Marte.

Durante la mayor parte de la historia de la Tierra, la única forma de vida en el planeta fueron microorganismos o microbios. Los microbios aún suponen la mayor parte de la materia viva sobre la faz de la Tierra. Los científicos especializados en la búsqueda de vida en otros mundos creen que, si alguna vez existió algún tipo de vida en Marte, fue de tipo microbiano. Tras cinco años de observaciones desde la órbita marciana con el fin de obtener información sobre los lugares candidatos para el aterrizaje, el lugar elegido es el cráter Gale, un entorno de unos 150 km de diámetro con un impresionante montículo de 5 kilómetros de altura en el centro. Situado a 4,5 grados latitud sur, 137,4 grados longitud este, está formado por numerosas capas de arcillas y sulfatos en la parte superior, materiales que, en las condiciones adecuadas, son idóneos para preservar huellas de posible vida orgánica y que, además, tienden a formarse en presencia de aguas saladas.

Debido a la antigüedad del cráter -unos cuatro mil millones de años- las capas trazan la historia geológica de esta zona de Marte, un abanico de escombros perteneciente a un canal que baja por la pared del cráter. Estos canales, bastante comunes en este tipo de estructura, indicarían que Gale fue, probablemente, un lago.

Por tanto, *Curiosity* aterrizara en una región donde el requerimiento más importante para la vida ya se ha confirmado: fue una zona húmeda.



MSL montado en los talleres del *Jet Propulsion Laboratory* (JPL).

• Crédito: NASA/JPL-Caltech

La misión de la NASA tiene como objetivos científicos primarios de evaluación de habitabilidad:

- Evaluar el potencial biológico de, al menos, un objetivo ambiental determinando la naturaleza y el inventario de los componentes orgánicos de carbono, buscando los componentes químicos básicos de la vida e identificando rasgos que puedan registrar las acciones de los procesos biológicos más relevantes.
- Caracterizar la geología de la zona de trabajo del *rover* en todas las escalas espaciales apropiadas investigando la composición química, isotópica y mineralógica de los materiales de la superficie y cercanos a la superficie, interpretando los procesos que han formado el suelo y las rocas.
- Investigar procesos planetarios de relevancia para la habitabilidad en el pasado (incluyendo el papel del agua) evaluando la evolución atmosférica en una escala de tiempo amplia y determinando el estado actual, la distribución y el ciclo del agua y del dióxido de carbono.
- Caracterizar el gran espectro de la radiación superficial, incluyendo la radiación cósmica galáctica, eventos producidos por la emisión de protones por parte del Sol y neutrones secundarios.

El presente de Marte

La misión MSL estudiará el ambiente actual en su zona de aterrizaje así como los registros dejados por ambientes pasados. Tal y como se ha descrito, *Curiosity* lleva, entre otros instrumentos, una estación meteorológica, un instrumento para medir la radiación natural de altas energías y un instrumento que, en el suelo bajo el *rover*, puede detectar la humedad del suelo y los minerales que contienen agua.

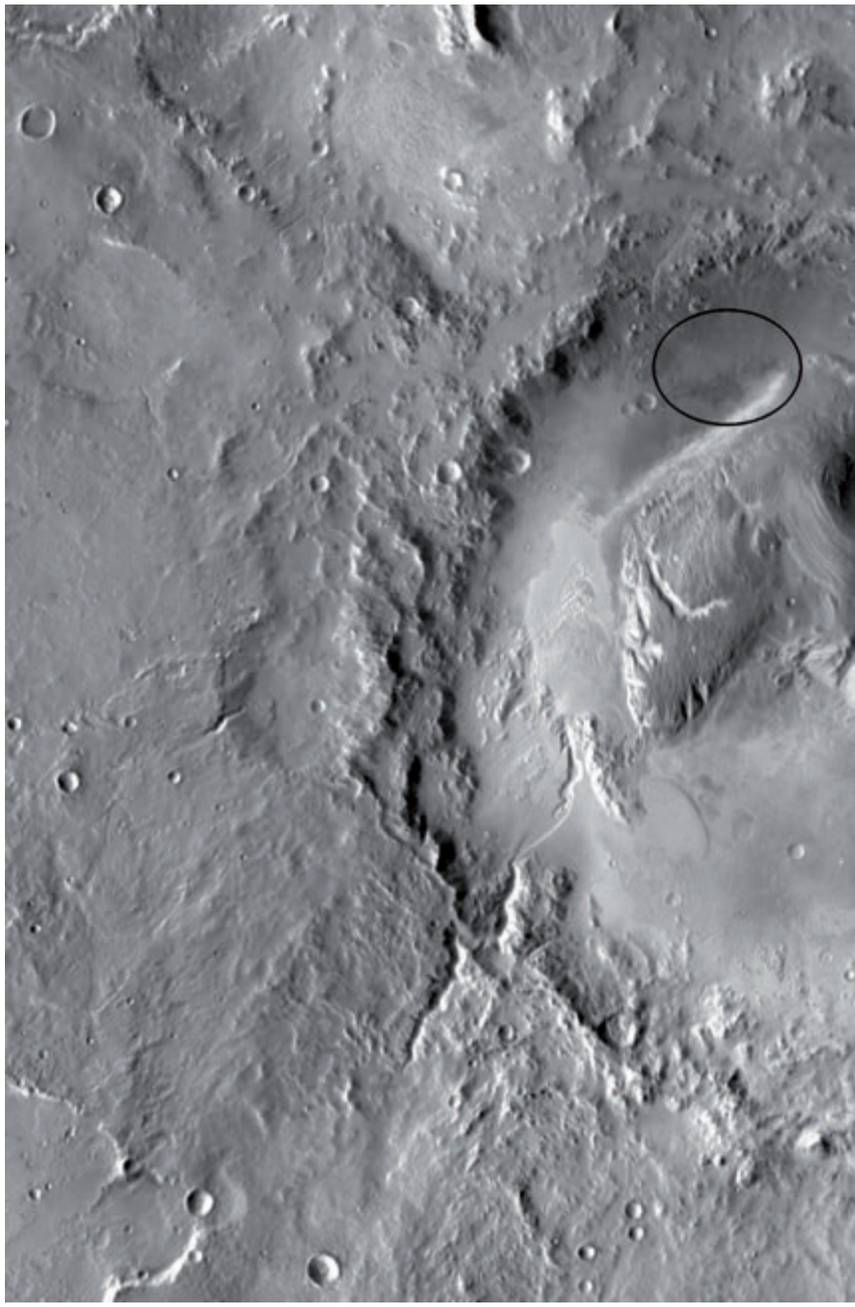
Las investigaciones de elementos orgánicos y otros ingredientes potenciales para la vida pueden analizar muestras de suelo en busca de los nutrientes que podrían estar disponibles para los microbios. Buscar metano en la atmósfera también es un estudio de los procesos actuales que tienen lugar en Marte. El metano puede desaparecer de la atmósfera en unos pocos cientos de años si no se repone por una fuente activa, por lo que su presencia sería sorprendente.

La selección de lugar de aterrizaje del *Curiosity* no se basó en las características que pudieran favorecer habitabilidad actualmente, sino en la vida que pudo albergar en el pasado. Aún así, mucha de la información de esta misión sobre el ambiente actual ampliará nuestro conocimiento general de Marte. Por ejemplo, ¿pueden los componentes orgánicos proporcionados por los meteoritos persistir en el suelo cerca de la superficie? ¿Cómo afecta la atmósfera actual a la radiación ultravioleta y a la radiación de altas energías que alcanza la superficie, plantea un riesgo para la vida y para la preservación de elementos orgánicos? ¿Cuál es la manera de estimar los niveles del pasado?

El seguimiento de los niveles de radiación de rayos cósmicos y rayos solares por parte del *rover* se utiliza para diseños de seguridad para los astronautas en eventuales misiones a Marte con presencia humana.

El objetivo global de la misión es, por tanto, estudiar y conocer más sobre las condiciones de habitabilidad del Planeta Rojo con una meta final que va más allá de determinar si alberga o albergó vida alguna vez. Con la información que se obtenga podría empezar a prepararse una futura exploración con presencia humana. Quizás, antes de lo que imaginamos, el hombre pise la superficie de Marte. Z

Para saber más:
Monte Olimpo - *Valles Marineris* - *Phobos* - *Deimos* - "Sol" marciano - *dust devils* - franja de habitabilidad - cohete Atlas V - espectrómetro - imágenes multiespectro - imágenes estereoscópicas - isótopos orgánicos estables - antena de alta ganancia



La determinación del potencial de habitabilidad del entorno marciano y la búsqueda de rastros que pudieran indicar una posible presencia de vida en el pasado han sido los objetivos científicos que se han tenido en cuenta a la hora de determinar el lugar donde se posará el *Curiosity*. El proceso de elección del lugar de destino de la misión ha sido largo y exhaustivo. Este proceso dio lugar a la elección de cinco lugares finalistas de entre los que finalmente se seleccionó el cráter Gale, que ya fue finalista en el proceso de elección del lugar de aterrizaje de los *rovers Spirit* y *Opportunity*. Estos cinco lugares presentaban una serie de rasgos que determinan un posible origen con presencia de agua. El agua es un elemento indispensable para la vida, por tanto, su presencia, al menos en el pasado, en este lugar, eleva enormemente ese potencial de habitabilidad. Pero finalmente ha sido el cráter Gale el lugar donde más indicadores de un pasado húmedo se han localizado, siendo elegido finalmente como el lugar de destino del *Curiosity*.

El cráter Gale, lugar de destino del *Curiosity*

Felipe Gómez Gómez
(CAB, Dpto. de Planetología
y Habitabilidad)
Co-Investigador de NASA-MSL-REMS

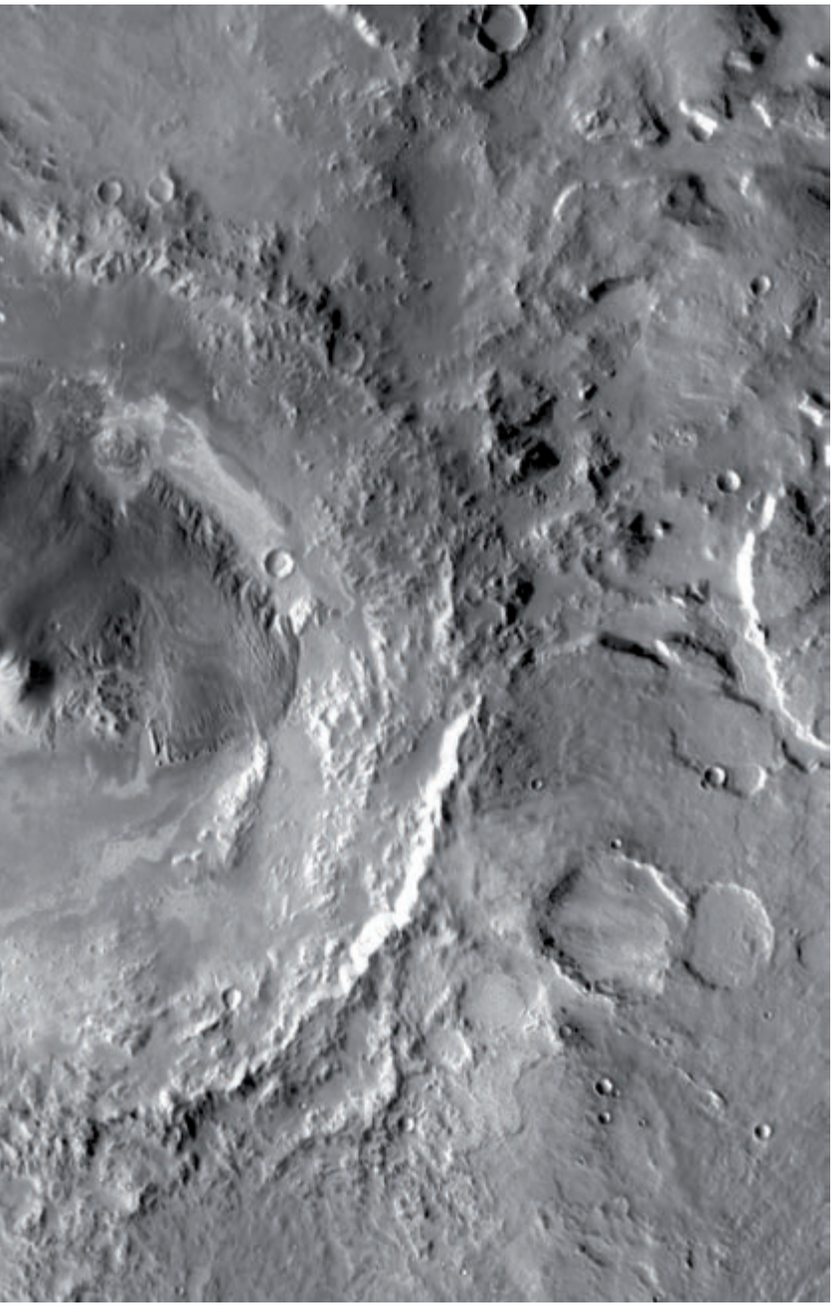


Imagen del cráter Gale, destino del *Curiosity* en Marte. Se trata de una imagen tomada por el instrumento THEMIS a bordo de la sonda *Mars Odyssey*. La zona donde descenderá *Curiosity* (señalada con una elipse) está situada en la cara septentrional de la montaña.

• Crédito: NASA/JPL

El laboratorio científico MSL (*Mars Science Laboratory*), ya de camino a Marte, transporta al robot explorador *Curiosity* que aterrizará y explorará la superficie marciana durante cerca de dos años, tras el aterrizaje, para determinar si la región donde aterrice ha ofrecido alguna vez condiciones favorables para la vida, incluyendo la posible preservación de ingredientes químicos para la vida. Esta búsqueda de rastros de vida se complementa con el estudio del potencial de habitabilidad del lugar donde aterrizará en el planeta vecino. Para ello se emplearán una serie de instrumentos destinados al estudio del entorno del lugar donde se posará *Curiosity*. Entre estos instrumentos se encuentra la estación ambiental REMS de fabricación española que va a evaluar el entorno del lugar donde se posará. Entre los parámetros a evaluar tenemos las dosis de radiación ultravioleta que llegan a la superficie marciana, la temperatura del aire y del suelo y la humedad del entorno. Parámetros de gran importancia a la hora de determinar el potencial de habitabilidad de ese entorno.

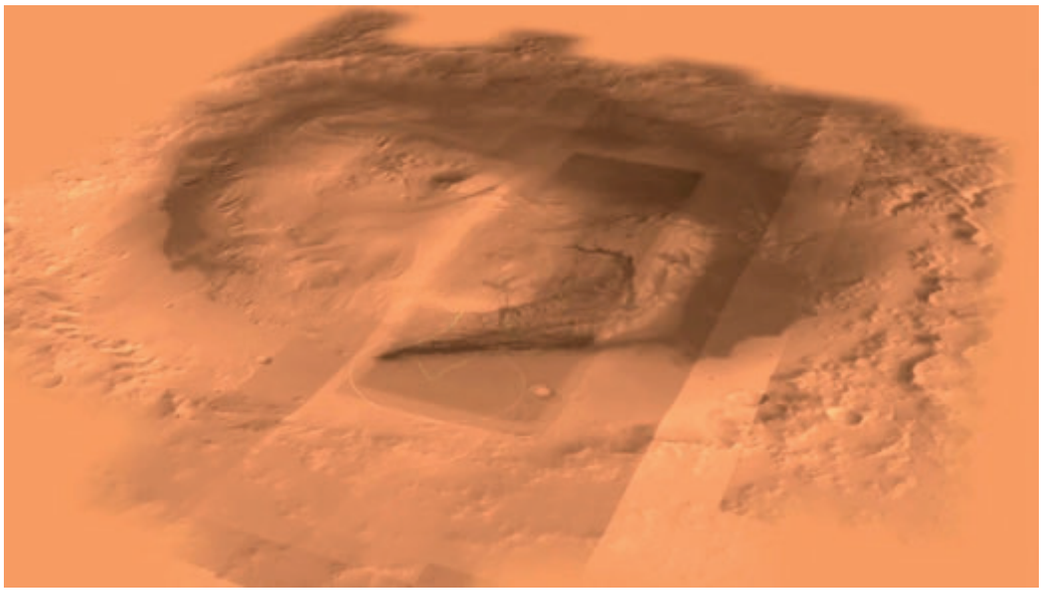
¿Porqué es interesante el cráter Gale?

El cráter Gale está situado próximo al borde de lo que se denomina "tierras bajas" de Marte. Uno de los rasgos geomorfológicos más destacables del planeta rojo es el gran escalón topográfico que divide al planeta en dos superficies claramente diferenciadas: las tierras altas del sur del planeta, constituidas por terrenos antiguos y muy craterizados, y las tierras bajas o terrenos jóvenes con menor cantidad de signos de impactos de meteoritos. Gale se localiza en las coordenadas 4,6º S y 137,2º E en la zona conocida como *Elysium Planitia*. Tiene un diámetro de 154 km y, según algunos científicos que han tenido en cuenta su tamaño y estado de preservación, podría haberse formado hace entre 3.800 y 3.500 millones de años. Pero lo que más atractivo lo hace para una misión de exploración son algunos rasgos morfológicos que parecen indicar que estuvo ocupado por agua en el pasado, incluso pudiendo haber sido un lago. Según algunos autores, después del impacto fue ocupado por sedimentos que posteriormente han sido exhumados, incluso, posiblemente en varias ocasiones. Otro de los rasgos más destacados de Gale es el monte situado aproximadamente en su centro y que ocupa un tercio de la superficie del cráter. Este monte tiene 5,5 km de alto tomando como referencia el suelo de la zona norte del cráter, donde se sitúa precisamente la elipse de aterrizaje del *Curiosity*. En las zonas escarpadas de este monte pueden observarse capas de sedimentos que parecen indicar que el cráter estuvo alguna vez cubierto de agua, permitiendo la sedimentación de las capas que se pueden ver, bajo una capa de hielo.

Algunos de estos indicadores de presencia de agua son minerales tipo arcilla y sales de sulfato. La sonda *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO) ha encontrado una intrigante marca de arcilla cerca de la parte inferior de la montaña y sulfatos minerales un poco más arriba. Ambos minerales se forman en presencia de agua, lo cual incrementa la posibilidad de existencia

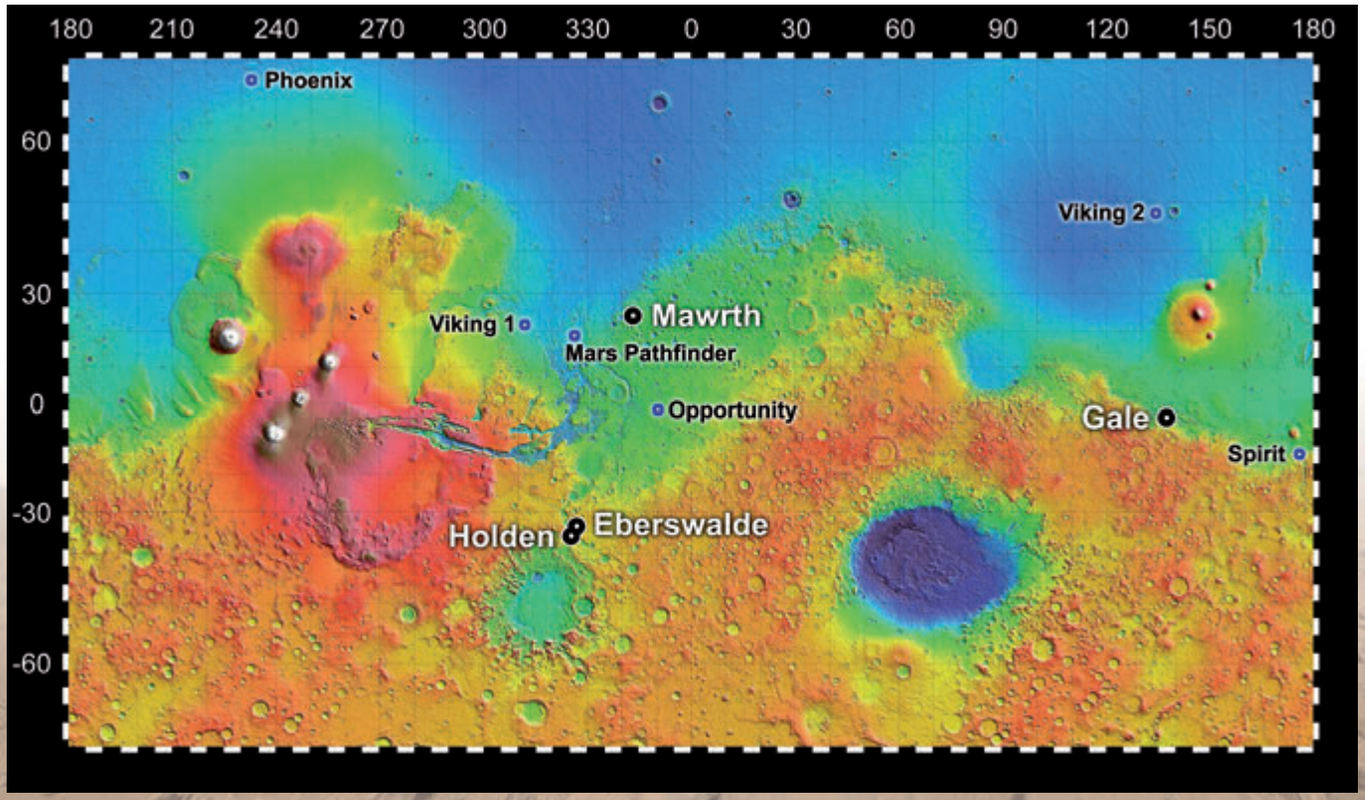
Composición de imágenes del Cráter Gale en perspectiva, donde se aprecia la zona de aterrizaje (marcada con una elipse).

• Crédito: NASA/JPL-Caltech



Lugares de aterrizaje de misiones anteriores a MSL y los cuatro lugares finalistas como zonas de aterrizaje del *Curiosity*.

• Crédito: NASA/JPL



Retrato de familia. En el centro vemos un modelo del *rover Sojourner* de la misión *Mars Pathfinder*, una de las primeras misiones robotizadas para la exploración marciana. A la izquierda un modelo de *Spirit* y *Opportunity*, comparados con un maqueta (a la derecha) del *Curiosity*, presentados en el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) el 12 de mayo de 2008. *Curiosity* es casi cinco veces más grande que los *rovers Spirit* y *Opportunity*. Además, tiene mayor posibilidad de desplazamiento pudiendo viajar hasta 150 metros al día lo que hace que sea la misión más ambiciosa enviada al planeta Marte hasta el momento.

• Crédito: NASA/JPL

de ambientes propicios para la vida. El Dr. M.P. Golombek lo resume muy claramente cuando afirma: "Todos los tipos de minerales acuosos que hemos detectado en Marte hasta la fecha se pueden encontrar en este lugar", refiriéndose al cráter Gale. La arcilla se deposita lentamente en el agua y forma pequeñas estructuras sedimentarias a modo de plaquetas que se colocan alrededor de las cosas, endureciéndose con el tiempo y envolviéndolas como un molde. De esta forma la arcilla podría sellar y preservar en el tiempo los componentes orgánicos.

Otros rasgos morfológicos que parecen indicar que hubo agua en Gale son algunos canales que cortan las paredes escarpadas y el suelo de algunos lugares del cráter. En la zona noroeste del cráter, cerca de la elipse de aterrizaje de la misión, se sitúa un canal que corta el anillo o borde del cráter. Este signo parece indicar que hubo un flujo de agua bien de entrada o de salida desde o hacia el cráter. Este lago permitió la sedimentación que se observa en las capas de las zonas escarpadas del monte o del suelo del cráter. Estas estructuras llevaron a Joy Crisp (Segundo científico jefe del proyecto) a afirmar que: "Esta podría ser una de las secciones de rocas sedimentarias expuestas en capas más gruesas en el sistema solar. El registro de roca preservado en estas capas contiene historias que datan de miles de millones de años; historias acerca de si Marte podría haber sido habitable, cuándo y por cuánto tiempo".

Otra de los atractivos del entorno del cráter Gale es su profundidad. El suelo del cráter se sitúa entre 4,5 y 5,5 km por debajo del suelo del resto del planeta. Esto hace que esa mayor columna atmosférica que se encaja entre las paredes del cráter y el monte del centro del mismo ejerza una mayor presión sobre la superficie que determina unas condiciones atractivas para la estabilidad del agua. Además, las altas paredes permiten zonas de sombreado de la superficie donde llegan menores dosis de radicación. Estos micro-nichos podrían determinar un aumento en el potencial de habitabilidad o mayor preservación de los ingredientes químicos de la vida.

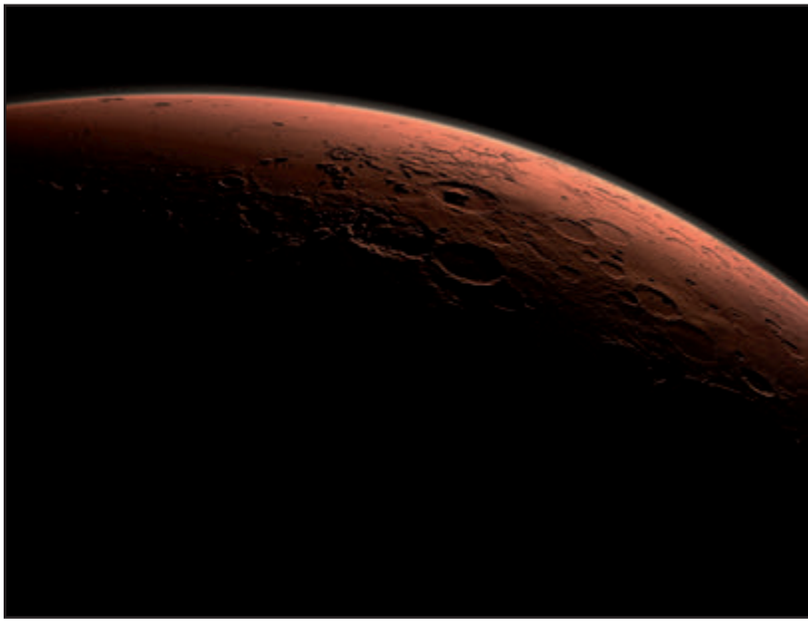
Diferentes estructuras que son visibles en la base del cráter como abanicos aluviales, así como los canales erosionados en los flancos del monte central, parecen haber sido formadas en tiempos pasados por sedimentos arrastrados por corrientes de agua. Expuestas a la vista del *Curiosity* quedan las secciones de numerosas capas de sedimentación que permiten estudiar la historia geológica de la región como algunos depósitos de "escombros" que se depositan en la zona de entrada de algunos canales o lugares donde se pudo estancar el agua. Algunas fotografías tomadas con la cámara a bordo de la sonda *Mars Global Surveyor* de la NASA permiten observar como algunos de estos depósitos han sido posteriormente horadados por canales de formación más reciente como los observados en los sedimentos más bajos del monte central descendiendo hacia el suelo de la planicie norte del cráter.

Proceso de selección del lugar de aterrizaje del rover *Curiosity*

Cuando hablamos de seleccionar un sitio donde dirigir una misión espacial astrobiológica los científicos identifican como principal característica a tener en cuenta la localización de un ambiente, o grupo de ambientes, donde pueda existir vida microbiana, es decir, se concede especial importancia al potencial de habitabilidad del sitio de destino del robot explorador. En el caso del *rover Curiosity* este hecho ha vuelto a

Imagen generada por ordenador a partir de los datos obtenidos por el instrumento *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA) situado a bordo de la sonda *Mars Global Surveyor*. En ella se puede ver el límite entre la oscuridad y la luz diurna en la zona del cráter Gale en la superficie de Marte. El cráter Gale, que aparece hacia el centro de la imagen con un montículo en su interior, es el lugar seleccionado por la NASA para que el *rover Curiosity* aterrice en la parte norte del cráter a principios de agosto de 2012. También puede apreciarse la tenue atmósfera del planeta rojo.

• Crédito: NASA/JPL-Caltech



ser de esencial importancia hasta el punto de identificar como principal objetivo de la misión la evaluación del potencial de habitabilidad del lugar de destino del *rover*. Por ello se eligió como lema del proceso de elección del lugar la presencia de rasgos de agua, bien sean morfológicos o mineralógicos, directos o indirectos. Un sitio con varias características indicativas de presencia de agua en el pasado es mucho mejor que uno con solo alguna de ellos. Así, la mineralogía nos indica lugares donde se puede elegir presencia en el pasado de agua líquida. Minerales hidratados, arcillas y filosilicatos y sulfatos son buenos indicadores de agua. Pero si además sumamos la presencia de óxidos de hierro, hematites y sales de cloro ese sitio se convierte en prioritario por ser estos minerales y sales considerados como posibles sustratos para una buena preservación de fósiles y me materia orgánica.

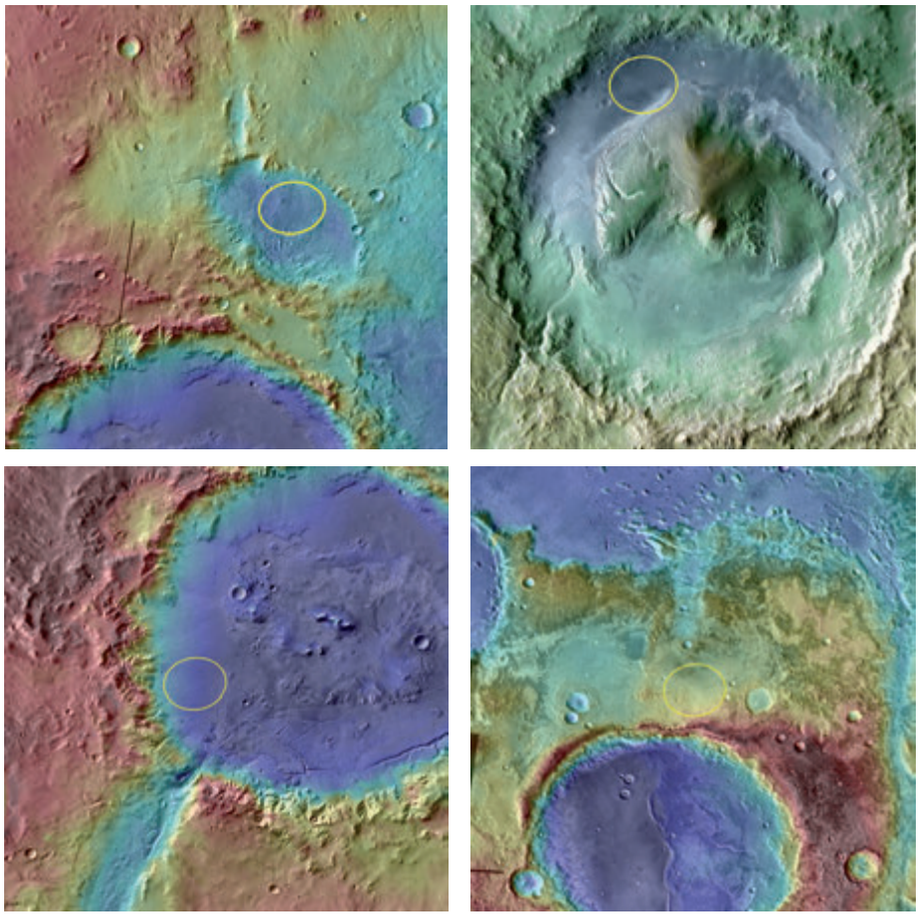
El diseño de la misión desde un punto de vista de ingeniería restringe las posibilidades de aterrizaje a lugares próximos al ecuador marciano, menos de 45º, una velocidad de entrada en la atmósfera marciana inferior a 5,4 km/s impuesto por el protector térmico de MSL y una elevación inferior a +1 km respecto al punto de referencia del Altímetro Laser del Orbitador Marciano (MOLA de sus siglas en inglés). Estos requerimientos imponen limitaciones a la ciencia desde el momento en que quedan restringidos los lugares marcianos que no cumplen estas características y que supondrían poner en peligro el momento de llegada de la misión a la superficie del planeta rojo.

El proceso de selección del lugar de la superficie de Marte donde se depositaría el *rover Curiosity,* comenzó cinco años antes del momento del lanzamiento de la misión. La NASA ha diseñado un proceso de selección muy distinto al que utilizan otras agencias espaciales. La agencia estadounidense convoca a la comunidad científica mundial en reuniones de discusión abierta y pública donde los expertos proponen lugares de destino y presentan las principales características científicas por las que consideran que la misión debe ir dirigida a ese lugar. Es un proceso iterativo en el que al comienzo se incorporan parajes marcianos candidatos y todos los datos científicos que se conozcan sobre los mismos aportados por misiones en curso. Caracterizado por ser absolutamente democrático, cada científico que quiera participar puede proponer sitios y presentar personalmente estos sitios. Al final de cada una de las reuniones anuales se hace una votación abierta de aquellos lugares que serán discutidos en años siguientes. Los lugares menos votados quedan excluidos para las reuniones de los años posteriores.

En el caso de MSL este proceso comenzó en el año 2006 y ha constado de cinco reuniones multitudinarias donde se ha votado democráticamente por cada uno de los sitios que esta misma comunidad científica fue proponiendo en los comienzos. Estas reuniones se celebraron en las proximidades del *Jet Propulsion Laboratory*, en Monrovia (California). En el año 2005 NASA nombró un comité de expertos que dirigirían este proceso de selección. Para esta misión, este comité estuvo dirigido por los Drs. Golombek y Grant. Este comité hizo una llamada internacional a través de una carta pública para que la comunidad de científicos que trabajan en temas relacionados con el planeta Marte propusieran lugares de destino de la misión.

En la primera reunión científica de discusión allá por el año 2006 se presentaron 33 lugares potenciales de aterrizaje. Por primera vez se produjo un hecho curioso, en la segunda reunión en el año 2007 la lista de lugares creció hasta 50 sitios. Al final de la reunión se produjo la votación a mano alzada que redujo esa lista hasta 6 candidatos a discutir en siguientes reuniones. En Noviembre del 2008, los líderes del proyecto se reunieron reduciendo la lista a los cuatro lugares finalistas que han trascendido a los medios de comunicación. Estos sitios sobre los que se centró la reunión del año siguiente para decidir el lugar de destino final fueron tres cráteres de impacto (Eberwalde, Gale y Holden) y un valle (Mawrth). La localización de las elipses de 25 x 20 km de dimensiones orientadas este-oeste para la oportunidad de la ventana de lanzamiento de noviembre del 2011 se muestran en la tabla. Estos sitios fueron elegidos fundamentalmente atendiendo a la potencial presencia de minerales indicadores de la presencia de agua y por tanto, un alto potencial de habitabilidad y preservación de signos de vida debido a las condiciones ambientales reinantes en estos sitios.

En agosto de 2009, una vez que se habían seleccionado este reducido grupo como potenciales candidatos y debido al



Imágenes de los cuatro lugares finalistas como posibles emplazamientos de aterrizaje del *Curiosity*. De izquierda a derecha y de arriba abajo: cráter Eberswalde, cráter Gale, cráter Holden y valle Mawrth.

• Crédito: NASA/JPL

Lugar de aterrizaje	Latitud	Longitud	Elevación	Principal característica
Delta del cráter Eberswalde	23,8953º S	326,7426º E	-1.435 m	Delta de río fósil
Cráter Gale	4,4868º S	137,4239º E	-4.444 m	Monte central de más de 5 km de altura de orígen sedimentario y estratificado
Abanico aluvial del cráter Holden	26,4007º S	325,1615º E	-2.177 m	Lago seco
Valle Mawrth	23,9883º N	341,0399º E	-224 m	Canal excavado por inundaciones catastróficas

retraso en el lanzamiento de MSL inicialmente previsto para ese año, se lanzó otra llamada abierta para incorporar a la discusión otros sitios que datos científicos portados por misiones recientes pudieran indicar de interés para esta misión.

El cuarto encuentro científico de discusión sobre el lugar de destino en Marte para el *Curiosity* se celebró en septiembre de 2010 en California y se llegó a la conclusión de que los nuevos sitios propuestos no superaban el interés que despertaban los cuatro ya discutidos en anteriores reuniones.

La decisión fue tomada finalmente en el año 2011 por el grupo de científicos de la misión MSL, incluyendo el equipo científico español que hemos desarrollado REMS, teniendo en cuenta los datos que se conocían sobre esos cuatro candidatos finalistas y que habían sido presentados a discusión pública durante la quinta reunión científica celebrada en California en mayo de 2011. El 22 de julio de 2011 fue anunciado a bombo y platillo que el lugar definitivo como destino de la misión MSL era el cráter Gale dado su potencial de habitabilidad, minerales y rasgos morfológicos de superficie indicadores de presencia de agua en el pasado.

Las misiones científicas que se utilizaron para aportar todos los datos científicos necesarios fueron fundamentalmente las misiones de la NASA *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO) con sus instrumentos *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars* (CRISM) y HiRISE (*High Resolution Camera*), cámara de alta resolución; y la *Mars Odyssey* con su instrumento THEMIS (*Thermal Emission Imaging System*), sistema de imágenes de emisión térmica.

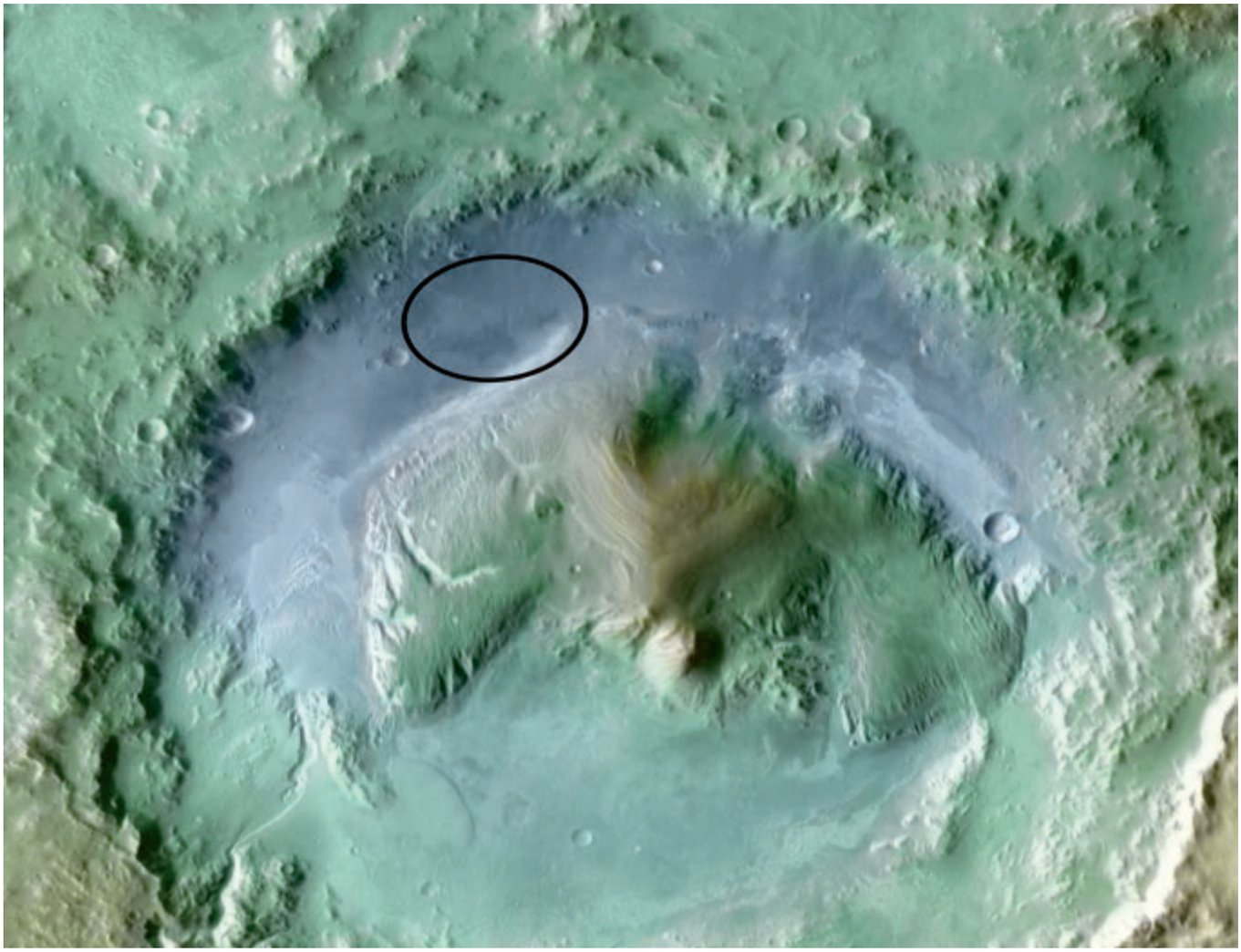
Ahora nos queda poder corroborar todas las expectativas levantadas sobre este lugar a partir de agosto de 2012 tras el aterrizaje de *Curiosity*. Z

Para saber más:

"Tierras altas" marcianas - "tierras bajas" marcianas - *Elysium Planitia* - *Mars Global Surveyor* - *Mars Reconnaissance Orbiter* - *Mars Odyssey* - *Mars Pathfinder* - *rover Sojourner* - *rover Spirit* - *rover Opportunity* - altímetro láser - cráter Gale - cráter Eberswalde - cráter Holden - valle Mawrth

La determinación del potencial de habitabilidad del entorno marciano y la búsqueda de rastros que pudieran indicar una posible presencia de vida en el pasado han sido los objetivos científicos que se han tenido en cuenta a la hora de determinar el lugar donde se posará el *Curiosity*. El proceso de elección del lugar de destino de la misión ha sido largo y exhaustivo.

Figura 1: Imagen del cráter Gale con tratamiento y realce de color, mostrando la elipse de aterrizaje.



• Crédito: NASA, http://mars.jpl.nasa.gov/msl/news/images/20081124a/Gale_ellipse.jpg

¿Qué secretos esconde el cráter Gale?

Jesús Martínez Frías (CAB, Dpto. de Planetología y Habitabilidad y Responsable de la Unidad asociada CSIC-UVA)
Co-Investigador de NASA-MSL-REMS

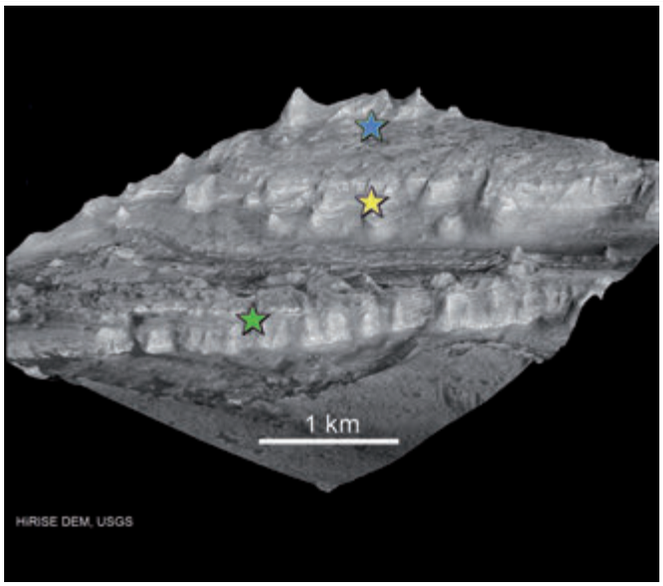


Figura 4: Zona inferior estratificada de la montaña central del cráter Gale. Verde: minerales de la arcilla. Amarillo: sulfatos. Azul: fracturas cementadas.

• Crédito: Modificada de NASA/JPL – Caltech

El cráter Gale es una espectacular estructura de impacto meteorítico de 154 km de diámetro. Lejos de ser un ambiente único, Gale presenta una gran geodiversidad y esconde en sus minerales, rocas y afloramientos muchos de los secretos acerca de los principales procesos desarrollados en Marte, una buena parte de ellos relacionados con el agua y, tal vez, con la vida.

La importancia geológica, climática y astrobiológica del cráter Gale (Figura1) radica principalmente en:

1) Su situación con respecto al ecuador del planeta, localizado a 4,6°S 137,2°E;

2) las condiciones generadas por el impacto o impactogénicas que han llevado a su formación;

3) sus especiales rasgos geomorfológicos y estratigráficos;

4) su diversidad sedimentológica y mineralógica con fases relacionadas con el agua y

5) en la relevancia bien conocida de los cráteres de impacto como zonas privilegiadas por sus potenciales características de habitabilidad.

No es de extrañar que de las más de sesenta zonas propuestas como posibles sitios de aterrizaje para la misión MSL, entre los cuatro candidatos finalistas uno fuera un valle (Mawrth) y los otros tres fueran cráteres de impacto (Holden, Eberswalde y Gale). Por ello, la exploración de Gale permite el estudio de numerosos geomarcadores, a todas las escalas, indicativos de la posible presencia de agua líquida en el pasado marciano, ya que se ha estimado que Gale tiene una antigüedad de entre 3.500 y 3.800 millones de años. Como indica John Grotzinger, Científico de Proyecto de la misión MSL "la cuestión fundamental reside en la identificación y exploración de un particular ambiente o conjunto de ambientes geológicos que podrían sustentar la vida microbiana".

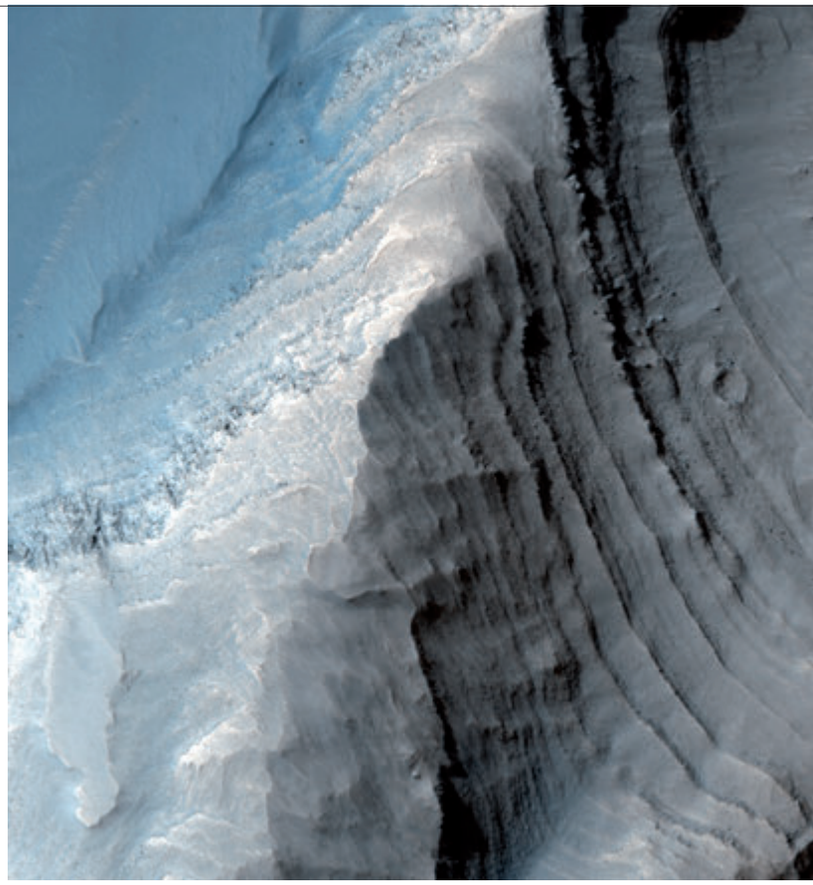
Si todo funciona como se ha previsto, el aterrizaje tendrá lugar exactamente en una elipse de 20 x 25 km dentro de una planicie existente en el interior del cráter (Figura1), frente a una gigantesca montaña que se eleva más de 5 km desde la base de la estructura, una zona que permitirá interpretar la historia y evolución geológicas del planeta.

Cráteres de impacto: zonas privilegiadas de exploración planetaria

Hoy sabemos que existen muchas áreas en Marte potencialmente interesantes, sobre todo si tenemos en cuenta la diversidad y complejidad cada vez mayor de ambientes geológicos que se vienen reconociendo (sistemas fluviales, lacustres, áreas de alteración volcánica, hidrotermalismo, zonas evaporíticas, etc.), en especial en sus primeros mil millones de años de evolución, cubriendo los denominados períodos Pre-Noaquiano (desde hace 4.500 hasta hace 4.100 millones de años), Noaquiano (desde hace 4.100 hasta hace 3.700 millones de años) e inicios del Hespérico (desde hace 3.700 hasta hace 3.000 millones de años), pero los cráteres de impacto se encuentran, sin duda, en la primera línea como principales candidatos de las misiones. Es bien conocido que la craterización planetaria debida a grandes impactos fue el proceso geológico dominante durante el período Noaquiano, tanto en Marte como en el resto de planetas terrestres (Mercurio, Venus, la Tierra y también la Luna). Los exitosos *rovers Spirit* y *Opportunity* de la misión MER (*Mars Exploration Rover*) también aterrizaron en 2004 en dos cráteres: Gusev y Eagle de 160 km y 22 m de diámetro, respectivamente. Las posibilidades de futuras exploraciones e investigaciones de los cráteres de impacto marcianos permanecen plenamente abiertas ya que sabemos que existen cientos de miles de este tipo de estructuras (aunque sólo está catalogada una pequeña fracción de todos ellos).

Pero, ¿qué hace de los cráteres de impacto zonas privilegiadas de exploración planetaria? Las razones fundamentales son: 1) el papel de los impactos como agentes externos de desmantelamiento del sustrato planetario y 2) las alteraciones mineralógicas, petrológicas y geoquímicas generadas como consecuencia de la colisión y la movilización de fluidos debidas al brusco incremento de las condiciones de presión y temperatura.

En el primer caso, el desmantelamiento de manera natural de una zona del planeta hasta alcanzar profundidades incluso kilométricas, como ocurre en Gale, permite ir más allá del simple estudio superficial del sustrato marciano, analizando materiales litosféricos de Marte que responden bien a épocas más antiguas y/o a procesos sub-superficiales previos al impacto. El ejemplo más claro lo tenemos en la Tierra. Cuando queremos saber lo que "se esconde" bajo la superficie realizamos una excavación somera (calicata) o efectuamos un sondeo. Pues bien, este es el proceso que, de manera natural, genera el impacto meteorítico, permitiendo el estudio de afloramientos que corresponden a la geosfera profunda (dentro de la litosfera superior) del planeta. En el segundo caso, las estimaciones y modelos para grandes impactos capaces de generar cráteres de aproximadamente 150 km de



diámetro (de tipo Gale o Gusev) indican que, además de la enorme presión generada, el incremento de temperatura (entre 600 a 800ºC) causado por el choque de un objeto asteroidal o cometario puede durar entre 10.000 y 20.000 años. Esto conlleva que uno de los efectos post-impacto de mayor relevancia sea la movilización de los fluidos existentes en el interior de las rocas afectadas (denominadas *target rocks*), incluyendo el hielo que pudiera existir bajo la superficie. Dicha movilización causaría, además de alteraciones mineralógicas y geoquímicas de los minerales y rocas preexistentes, la neoformación de ambientes acuosos, normalmente en forma de sistemas hidrotermales de mineralización, con sulfatos, carbonatos, sulfuros y otras fases minerales. Estos ambientes originados por el impacto (impactogénicos) podrían ser, de acuerdo con Horton Newsom, geoquímico de la Universidad de Arizona, lugares preferentes de actividad biogénica (microbiana). En la Tierra existen numerosos ejemplos de estos procesos y sistemas hidrotermales asociados con cráteres de impacto meteorítico, como los cráteres Sudbury y Haughton, situados ambos en Canadá y estudiados, entre otros, por Parnell y Ames en 2004 y 2006, respectivamente. La potencialidad de los cráteres de impacto como ambientes de exploración relacionados con la presencia de agua en Marte es de tal importancia que esta temática *Impact Craters and Water on Mars* se viene utilizando en EEUU como programa educativo en Geociencias por la *National Science Foundation* y la *National Science Digital Library*.

Es importante tener en cuenta que desde el CAB venimos estudiando, desde hace más de 11 años, muchos de estos aspectos que relacionan los meteoritos, los cráteres de impacto y la habitabilidad en la Tierra y Marte, tanto en campañas de campo como en investigaciones y simulaciones de laboratorio y propuesta de proyectos. En la actualidad, el CAB es el Centro de referencia nacional en este tema, reconocido por la Comisión de Seguimiento de Situaciones de Crisis de Presidencia de Gobierno.

Geología y mineralogía del cráter Gale

La elección de Gale no ha representado una gran sorpresa o el descubrimiento de una zona desconocida hasta el momento, puesto que este cráter ya había sido considerado en el pasado (2003) como uno de los sitios de aterrizaje para las misiones MER. Existen decenas de artículos que abordan de manera específica el estudio de esta impresionante estructura desde perspectivas diversas. Sintetizamos aquí algunos de los principales resultados e interpretaciones de mayor relevancia llevados a cabo gracias principalmente a los datos proporcionados por los instrumentos MOLA (*Mars Orbiter Laser Altimeter*), TES (*Thermal Emmission Spectrometer*) y MOC (*Mars Orbiter Camera*) a bordo de la misión *Mars Global Surveyor* (MGS), el instrumento THEMIS (*THermal EMmission Imaging System*) a bordo de la misión *Mars Odyssey*, el instrumento OMEGA (*Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité*) a bordo de la misión *Mars Express* y el instrumento CRISM (*Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars*) a bordo de la misión *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO). Aunque durante los últimos diez años puede decirse que Gale ha sido siempre un objetivo candente en las hojas de ruta de la exploración de Marte, ya desde finales de los 80 se vienen ofreciendo diversas interpretaciones para explicar los distintos materiales de Gale: a) flujos de lava y depósitos eólicos; b) sedimentación volcánica, eólica o fluvial; c) depósitos eólicos, piroclásticos, lávicos y fluviales y d) un ambiente episódicamente lacustre, sistemas hidrotermales y cobertera de hielo (Figuras 2 y 3).

Una de sus peculiaridades radica en la altitud de su pico central, que excede en algunas zonas la del borde del propio cráter, sugiriendo que toda la estructura estuvo colmatada de material que fue posteriormente erosionado en, al menos, dos ocasiones. Otra característica singular de Gale, que conecta el presente que ahora observamos con posibles procesos pasados de escorrentía superficial es, como indican los científicos de la Universidad de Cornell, Ryan Anderson y Jim Bell, la existencia de numerosos canales que horadan tanto los depósitos de materiales como el anillo del cráter. Para explicar el origen del material depositado y estratificado se evaluaron varias posibilidades, desde material piroclástico (poco probable al no existir en las cercanías eventos volcánicos ni presentar la típica selección de tamaños que sería esperable en materiales situados a una cierta distancia del foco emisor), eólico (habría que explicar la causa de los ingentes mecanismos de acumulación) o incluso lacustre (la más aceptada hasta el momento por su coherencia con los modelos terrestres conocidos, ya que su estratificación y ciclos de deposición siguen los patrones de las secuencias sedimentarias típicas de este ambiente). Otros trabajos también apoyan este último modelo, pero sugieren una mayor complejidad que la expuesta para un simple depósito lacustre en la que los procesos eólicos tienen que haber jugado un papel muy importante, especialmente en la remodelación de la superficie.

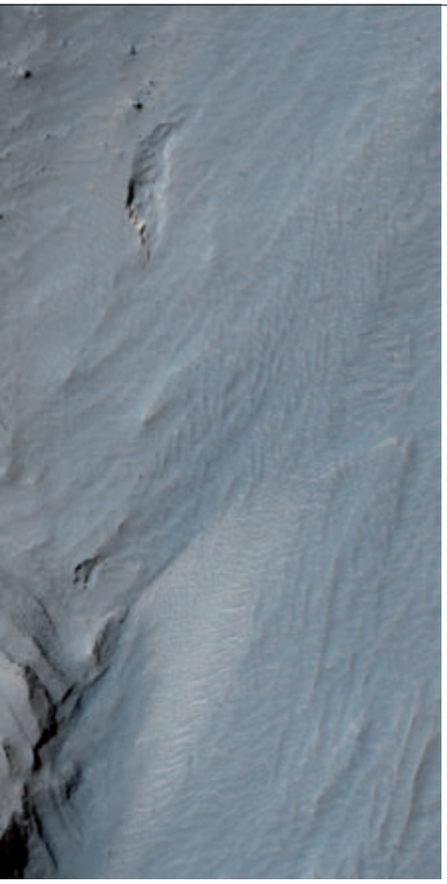
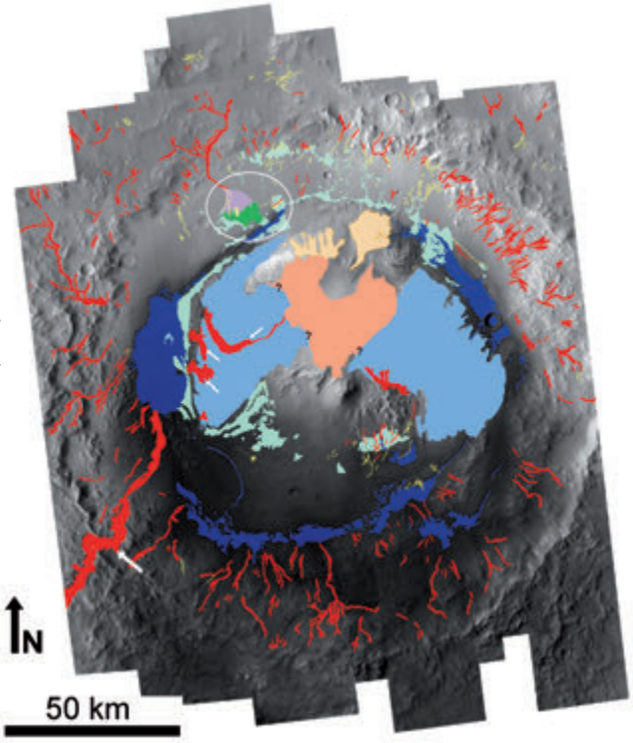


Figura 3: Afloramiento estratificado localizado en la zona NE del monte central de Gale.

• Crédito: NASA/JPL University of Arizona.



• Crédito: Modificado de Anderson & Bell III (2010)

Figura 2: Mapa del cráter Gale mostrando las unidades principales. Las flechas marcan los grandes canales en el anillo SO del cráter y los tres grandes cañones en el flanco occidental del monte central. Las marcas de interrogación indican las zonas donde el material eólico oscurece el contacto entre el monte superior y las capas de tonos oscuros de los *yardangs* (crestas alineadas normalmente por el efecto del viento). Las zonas no coloreadas corresponden a material sin identificar con precisión. Rojo: valles y cañones. Azul oscuro: zonas de dunas de tonalidad oscura. Azul claro: *yardangs* estratificados de tonalidad oscura. Naranja: monte superior. Verde oscuro y púrpura: morfologías en forma de abanico de materiales con distinta capacidad calorífica. Naranja claro: morfologías dentadas. Verde claro: unidad que bordea el monte. Amarillo: crestas sinuosas.

Dos de los estudios más interesantes, sugiriendo modelos geológicos diferentes, se conocieron hace apenas tres años. En uno de ellos, un equipo multidisciplinar coordinado por Bradley Thomson, del NASA/JPL, abordó la modelización geológica de las crestas y "mesas" con morfología de abanico situadas en el monte central y en el anillo del cráter, indicando que podría tratarse de una combinación de canales fluviales invertidos y abanicos aluviales. El otro estudio, dirigido por Angelo Pio Rossi de la Universidad de Bremen se centró en el análisis de las discontinuidades estratigráficas del monte central, indicando que existía poca evidencia de actividad fluvial y proponiendo que su origen era local, tratándose de enormes depósitos relacionados con emisiones de fluidos sub-superficiales.

Los análisis mineralógicos realizados en Gale, especialmente la detección de minerales hidratados (principalmente filosilicatos y sulfatos) (Figura 4) han aportado un valor adicional a las ya interesantes características geomorfológicas, sedimentológicas y estratigráficas observadas en esta zona. En Gale se han distinguido 13 grupos distintos (Figura 2) de materiales con diferentes propiedades que requerirán, sin duda, estudios de mayor detalle para determinar tanto su origen como sus relaciones espacio-temporales. La mineralogía del cráter Gale se ha determinado principalmente a partir de los datos obtenidos por el instrumento CRISM de la misión MRO y hasta el momento, de acuerdo con los estudios liderados por Ralph Milliken del NASA/JPL, se han detectado olivino, piroxenos, óxidos de hierro, sulfatos y filosilicatos. Las secuencias que se han podido interpretar, siguen el siguiente patrón mineralógico, de base a techo, de las formaciones estratificadas: 1) óxidos de hierro y filosilicatos (posiblemente esmectitas); 2) asociación de olivino con esmectitas; 3) una capa de esmectitas; 4) olivino y esmectitas; 5) sulfatos y esmectitas; 6) una capa de gran espesor de sulfato de magnesio, y 7) un nivel superior con una composición en la que se detecta poca presencia de sulfatos, una débil firma de sulfatos.

El conocimiento de todos estos datos es de gran importancia en el contexto de las actividades de REMS, no sólo por el hecho de que las mediciones de la estación ambiental se efectuarán en el interior de una depresión kilométrica con su elevación central, en la que la geomorfología del cráter puede influir (viento, radiación UV), sino también porque, por primera vez, dispondremos de información combinada de datos de humedad y temperatura del suelo. Dos variables que pueden estar relacionadas, al menos en parte, con las características mineralógicas, petrológicas y geoquímicas del sustrato marciano, considerando posibles procesos de hidratación-deshidratación con el subsecuente escape hacia la atmósfera de vapor de agua u otros volátiles.

Recordemos finalmente que el hielo también es un mineral, aceptado como tal por la IMA (*International Mineralogical Association*), por lo que, bien sea de manera individualizada por su existencia en determinadas zonas de la superficie de Marte o de manera sub-superficial al estar asociado con el fragmentado suelo marciano (regolito), su caracterización detallada y el establecimiento de sus variaciones son parámetros decisivos en el ámbito de los estudios de la interacción sustrato marciano-atmósfera y habitabilidad, pudiendo además complementarse con los datos obtenidos mediante otros instrumentos del *rover*, como CheMin, SAM o DAN.

Nunca se había enviado una misión tan ambiciosa y un *rover* tan grande y sofisticado a Marte, pero también es cierto que nunca habíamos dispuesto de tanta y tan detallada información sobre la zona de aterrizaje. Aunque con la cautela necesaria debida a la complejidad de la misión y al carácter único de algunos de sus aspectos y desarrollo, esto nos hace ser optimistas en cuanto al éxito de la misma y la consecución de los objetivos propuestos. Algo que, sin duda, nos permitirá entender mejor la historia planetaria de Marte y, quien sabe, tal vez también determinar sus condiciones de habitabilidad pasada y presente. Z

Para saber más:
Periodo Pre-Noaquiano - Periodo Noaquiano - Periodo Hespérico - crateización planetaria - calicata - *target rocks* - ambientes impactogénicos - canales fluviales invertidos - abanicos aluviales - discontinuidades estratigráficas - olivino - piroxenos - esmectitas - filosilicatos - *yardangs* - regolito

REMS son las siglas en ingles de *Rover Environmental Monitoring Station*, la estación ambiental a bordo del *rover Curiosity* de la misión *Mars Science Laboratory* (MSL) de la NASA. El Centro de Astrobiología (CSIC-INTA) ha liderado el desarrollo, fabricación y calibración de REMS, en estrecha colaboración con la empresa EADS-Crisa y un consorcio internacional. El equipo investigador ha estado formado por un grupo de unos cuarenta científicos e ingenieros, y su desarrollo ha durado más de siete años.

REMS, una estación ambiental española en Marte

Eduardo Sebastián Martínez
(CAB, Dpto. de Instrumentación)
Co-Investigador de NASA-MSL-REMS

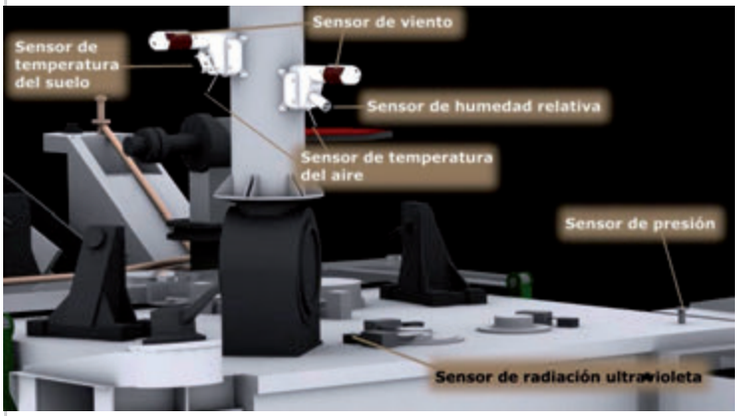


Figura 1: Conjunto de sensores de REMS.
• Crédito: CAB/D. Cabezas

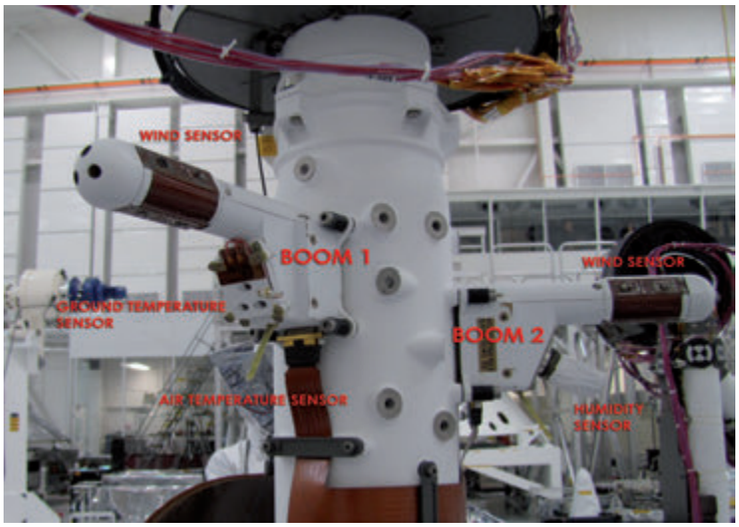
El objetivo principal de este instrumento es la caracterización de la atmósfera marciana mediante la monitorización ambiental de la zona de aterrizaje y el análisis de las condiciones de habitabilidad en su superficie.

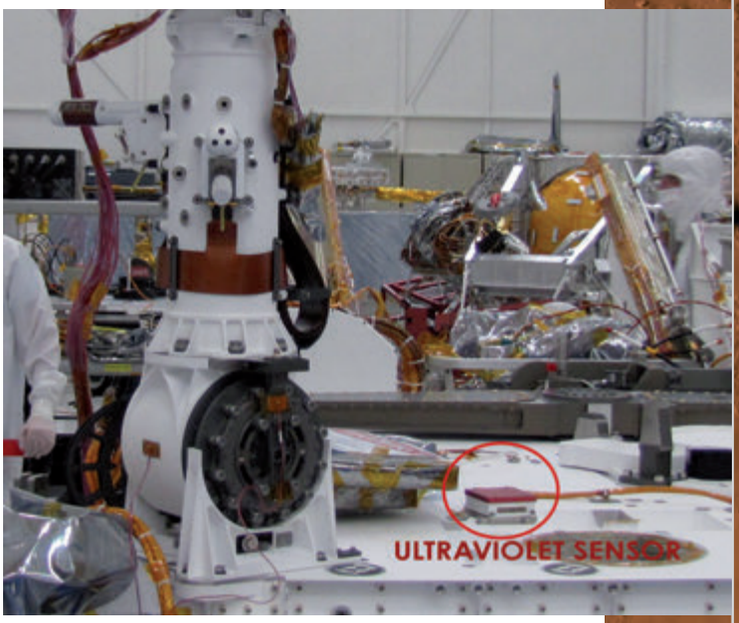
La estación ambiental REMS se compone de seis sensores: humedad, temperatura atmosférica, temperatura del suelo, dirección y velocidad del viento, presión atmosférica y radiación ultravioleta. Dichos sensores están distribuidos en distintos módulos: un módulo principal, situado en el interior del cuerpo del *rover* en la denominada *zona caliente*, un espacio dedicado a albergar instrumentación y sistemas electrónicos críticos y cuya temperatura estará siempre por encima de -50ºC; un pequeño módulo ultravioleta situado sobre el cuerpo principal del *rover* y que estará mirando al cielo de Marte; y dos estructuras alargadas, denominadas *booms*, que se encuentran desplegadas en el mástil del *rover* a una altura de 1,6 m, formando entre sí un ángulo de 120º. (Figura 1)

La localización en los distintos módulos de los sensores de REMS se ha realizado atendiendo a dos criterios: los requerimientos sensoriales para obtener señales con una menor incertidumbre, y el intento por minimizar la perturbación introducida por el *rover*. De este modo, los *booms* están mecánicamente diseñados con el objetivo de exponer los sensores al ambiente que pretenden monitorizar, sin olvidar las restricciones mecánicas impuestas por la misión. (Figuras 2 y 3)

El sensor de viento, *Wind Sensor* (WS), diseñado en colaboración con la Universidad Politécnica de Cataluña, mide la dirección y velocidad del viento en tres dimensiones (3D). Está compuesto por tres transductores alojados en tres placas dispuestas a 120º en la parte externa de los dos *booms*. Dichos transductores son detectores independientes que miden la dirección y velocidad local del viento en dos dimensiones (2D). Cada transductor a su vez está formado por cuatro anemómetros térmicos de dado caliente. Los dados calientes son pequeños circuitos integrados de silicio, que incluyen un conjunto de resistencias eléctricas realizadas mediante técnicas microelectrónicas, y que se encuentran montados sobre unos pedestales de vidrio aislante.

El WS obtiene la velocidad local del viento en cada uno de los transductores 2D utilizando los resultados de calibración del sensor y los datos de potencia inyectada a cada dado caliente medida por el sistema electrónico. Sin embargo, debido a las perturbaciones introducidas por el mástil y el cuerpo del *rover*, estos datos deberán ser post-procesados para proporcionar las velocidades





Figuras 2 y 3: Imagen de los módulos ultravioleta, *boom* 1 y *boom* 2, después de su integración en el rover *Curiosity*.
• Crédito: NASA/JPL-Caltech

reales del viento en 3D. Para ello, se utilizan complejas técnicas matemáticas que incluyen datos de ensayos y modelos aerodinámicos de todo el conjunto. (Figura 5)

El sensor de temperatura de suelo, *Ground Temperature Sensor* (GTS), está alojado en el *boom* 1, enfocando un área del suelo de Marte de 100 m². El GTS es capaz de medir temperaturas desde -140ºC hasta 50ºC, integrando la radiación infrarroja (IR) irradiada por el suelo de Marte en tres distintas longitudes de onda, utilizando para ello las *termopilas*, tres pequeños detectores ópticos IR empleados en aplicaciones comerciales. El sensor cuenta con un novedoso sistema de calibración en vuelo que le permite compensar la degradación causada por la deposición de polvo de la atmosfera marciana sobre la óptica de los detectores.

La medida de la temperatura atmosférica es realizada por el *Air Temperature Sensor* (ATS, sensor de temperatura del aire), el cual está formado por tres detectores de temperatura, de tipo termoresistencia, alojados a lo largo de una varilla de fibra de vidrio. Dicha varilla se encuentra situada en la parte inferior de los dos *booms*. La utilización de tres sensores permite compensar las perturbaciones causadas por la incidencia directa sobre los detectores de radiación proveniente del Sol, así como los efectos térmicos del *boom*. Por otra parte, la longitud de la varilla pretende alejar al detector del extremo de la influencia térmica del *boom*. (Figura 4)

En meteorología terrestre la temperatura atmosférica se mide en condiciones de sombra y a un metro del suelo.

Los sensores de presión y humedad atmosféricas han sido desarrollados en colaboración con el *Finnish Meteorological Institute* (FMI, Instituto Meteorológico Finlandés) basándose en la tecnología desarrollada por Vaisala, herencia de los sensores de las misiones *Phoenix* y *Beagle 2*. El de presión, *Pressure Sensor* (PS), se encuentra situado en el interior del módulo principal, dentro de la zona caliente. El sensor presenta un conducto que lo pone en contacto con la atmosfera marciana y que incluye un filtro para evitar tanto la entrada de polvo al interior como la contaminación de Marte por restos biológicos como consecuencia de su montaje y manipulación. Su transductor es de tipo capacitivo, esto es, está formado por un MEMS (*Micro Electro*

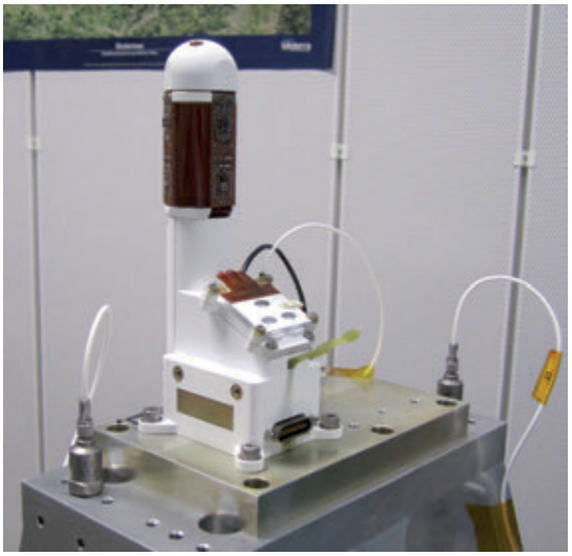


Figura 4: Imagen del *boom* 1 y de los sensores WS, ATS y GTS.
• Crédito: Crisa

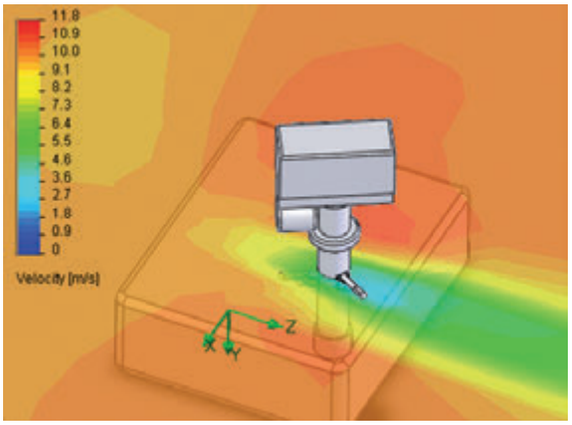


Figura 5: Simulación del sensor WS.
• Crédito: CAB

El fenómeno físico de anemometría térmica ha sido utilizado por muchos de nosotros sin conocerlo de forma explícita, cuando humedecemos el dedo índice y lo exponemos al viento para conocer su dirección e intensidad.

Figura 6: Sensor RHS antes de su integración en el *boom* 2.
• Crédito: Crisa

El envío de una sonda a la superficie de Marte está sujeto a estrictas normas para evitar la contaminación biológica del planeta, es lo que se conoce como "protección planetaria". Durante el montaje y ensayo de REMS se han seguido complejos procedimientos de limpieza y, antes de su lanzamiento, REMS ha sido sometido a un proceso de esterilización por calor.

Mechanical System o microsistema electromecánico) cuya capacidad eléctrica varía con la presión atmosférica. Este transductor es capaz de resolver cambios de presión un millón de veces más pequeños que la presión terrestre. (Figura 7)

Por otra parte, el sensor de humedad relativa, *Relative Humidity Sensor* (RHS), tiene forma cilíndrica y está alojado en el *boom* 2 para mitigar la contaminación térmica del *rover* y mejorar el contacto con la atmósfera marciana. El detector mide la concentración de agua en la atmósfera con niveles diez mil veces inferiores a los terrestres, para lo cual utiliza un transductor cuya capacidad eléctrica varía con la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera. (Figura 6)

Por último, el sensor ultravioleta, *Ultraviolet Sensor* (UVS), se encuentra alojado en un módulo en forma de caja situada sobre la parte superior del *rover*. Está formado por 6 fotodiodos ultravioleta que miden dicha radiación en seis bandas distintas, cubriendo todo el espectro ultravioleta. Su electrónica de amplificación se encuentra en el modulo principal, con el cual está conectado mediante cableado. El sensor incluye unos imanes de forma toroidal que mitigan la deposición de polvo marciano sobre la óptica de los fotodiodos. Además, una de las cámaras del *rover* será utilizada para calibrar el posible efecto remanente de la deposición de polvo sobre los diodos y compensar su efecto. (Figuras 8 y 9)

El sistema electrónico de REMS está distribuido entre los *booms* y el módulo principal. Cada *boom* alberga un Circuito Integrado de Aplicación Específica (ASIC) con la electrónica de acondicionamiento y captura de los sensores de viento, temperatura de suelo y atmósfera, y de humedad. La utilización de un ASIC tiene como objetivo disminuir el consumo, tamaño y peso de los *booms*. (Figura 10)

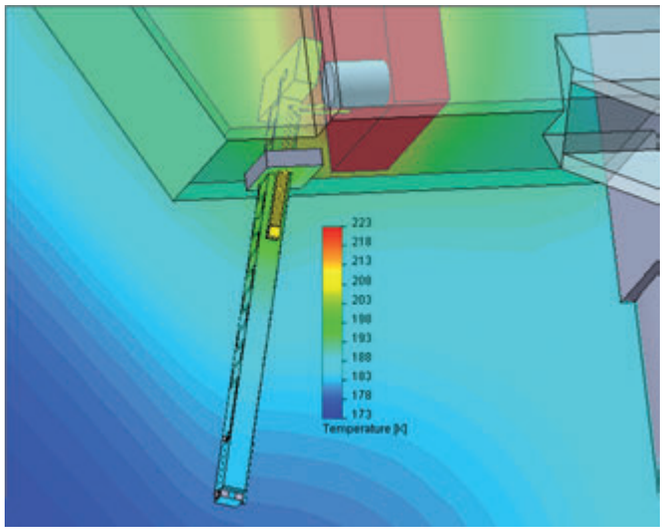
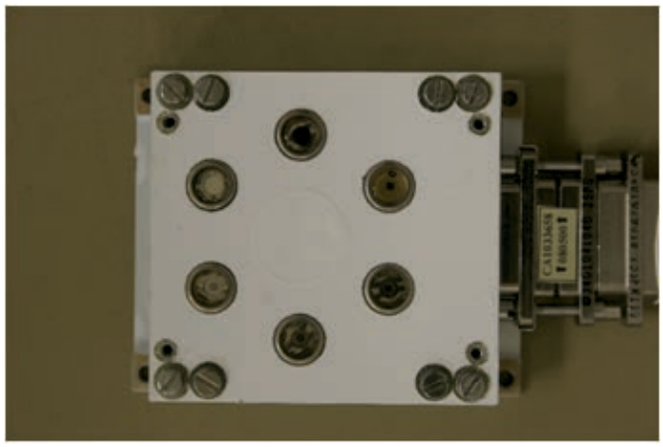
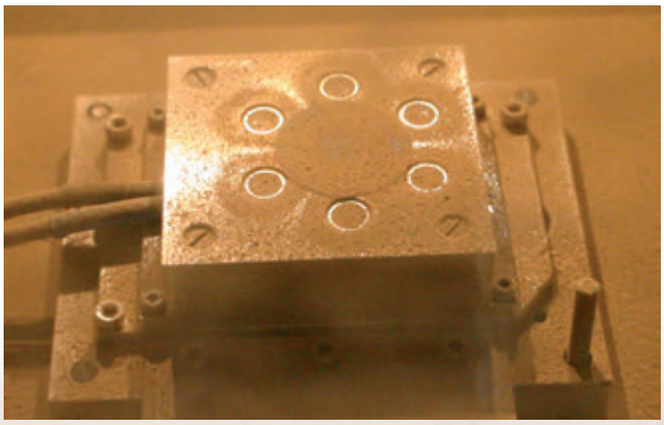


Figura 7: Simulación del sensor ATS y la influencia térmica del *boom*.
• Crédito: CAB





Figuras 8 y 9: Sensor UV antes y después de un ensayo de deposición de polvo (efecto de los imanes).
• Crédito: CAB

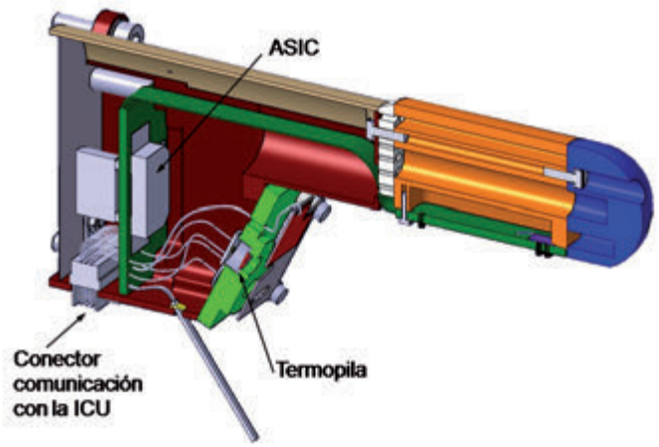


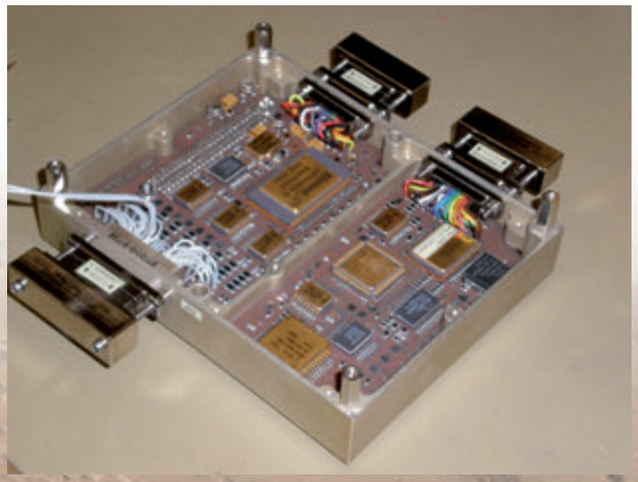
Figura 10: Esquema interno de la electrónica en el interior del *boom* 1.
• Crédito: CAB

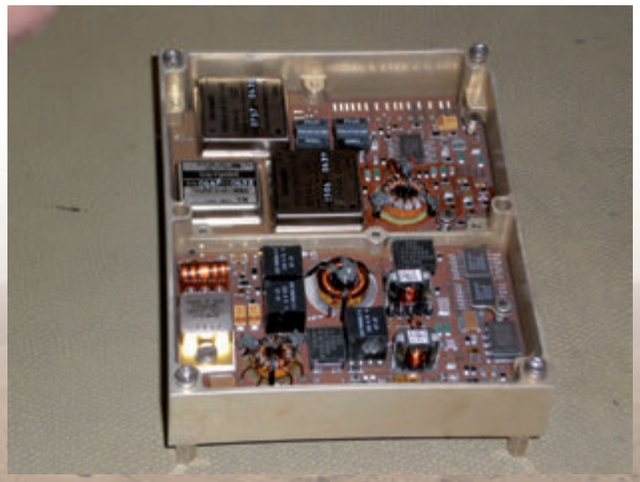
Por otra parte, en el módulo principal se encuentra el cerebro de REMS, denominado *Instrument Control Unit* (ICU, Unidad de Control del Instrumento). Se trata de un pequeño ordenador donde se recibe la información de los sensores de los *booms* y del sensor de presión, a través de comunicaciones digitales, y se digitalizan las señales de los sensores ultravioleta. Este ordenador principal incluye una especie de *despertador* electrónico, programado de manera genérica para activarse cada hora. Su objetivo es iniciar el ordenador y el programa de captura de datos, el cual tomará medidas de todos los sensores cada segundo durante los cinco primeros minutos de cada hora. El ordenador también tiene la posibilidad de registrar una hora adicional de datos durante el periodo del día de más relevancia científica. (Figuras 11 y 12)

La ICU cuenta con suficiente memoria interna para almacenar los datos capturados por los sensores durante varios días. Antes de que dicha memoria se desborde, el ordenador del *rover Curiosity* descargará los datos de la ICU de REMS para su envío a la Tierra. Con carácter general, la descarga y comunicación se realizará de manera diaria, manejando un volumen medio de datos de 2 MB. Los datos se procesarán en la estación de tierra que se encuentra en el Centro de Astrobiología, donde se aplicarán los algoritmos y compensaciones obtenidos durante los procesos de calibración del instrumento. El objetivo es inferir los valores de las variables físicas, velocidades, temperaturas, presiones, etc., a partir de las variables eléctricas proporcionadas por los distintos sensores.

Además, en el módulo principal, se incluye el sistema de potencia de REMS, que obtiene los niveles de voltaje necesarios para alimentar a la electrónica y a los sensores. La potencia demandada por REMS alcanza picos de 9 W, mientras que la energía total consumida por sol está en torno a 4 o 5 veces la que requiere un *smartphone* de última generación, 25 Wh/sol. Esta energía es generada por la fuente de potencia del *rover*, el *Radioisotope Thermal Generator* (RTG, Generador Térmico de Radioisótopos).

Entre las principales restricciones de diseño que el equipo de REMS ha tenido que salvar está la necesidad de operar y medir en un rango de temperaturas muy bajo. La electrónica y los sensores de los *booms* están expuestos al ambiente marciano con temperaturas de hasta -135ºC. Para poder trabajar a estas temperaturas es necesario un proceso de caldeo previo de dicha electrónica, hasta alcanzar una temperatura de -70ºC a la que es plenamente operativa. Dicho proceso de caldeo es ejecutado y controlado por la ICU de REMS. Por otra parte está la limitación de 1,3 kg impuesta por la NASA para la masa total del conjunto del instrumento. Este requerimiento ha exigido un importante ejercicio de miniaturización de los sistemas electrónicos y sensoriales. Z





Figuras 11 y 12: Electrónica de control (izquierda) y de potencia (derecha) de la ICU.
• Crédito: Crisa

Una partícula con carga eléctrica y en movimiento que atraviesa un campo magnético ve desviada su trayectoria. El polvo marciano se encuentra cargado electrostáticamente debido a procesos de fricción en su desplazamiento por la atmósfera.

Para saber más:
Termopila - termoresistencia - transductor - anamómetro térmico de dado caliente - contaminación biológica - protección planetaria - fotodiodo

La ciencia de REMS

María-Paz Zorzano Mier
(CAB, Dpto. de Instrumentación)
Co-Investigadora de NASA-MSL-REMS

Fco. Javier Martín-Torres
(CAB, Dpto. de Planetología y Habitabilidad)
Investigador Principal del Proyecto del Plan Nacional del Espacio para MSL-REMS

Las medidas de REMS proporcionarán información esencial para los objetivos científicos del *Mars Science Laboratory* (MSL): verificar el potencial biológico de la zona explorada por la misión investigando los procesos planetarios que ocurren en su superficie y que influyen en su habitabilidad como, por ejemplo, el ciclo del agua, los niveles de radiación UV, y los ciclos térmicos del suelo y el aire.

La variable atmósfera de Marte

La atmósfera marciana es tenue, cien veces más delgada que la atmósfera de la Tierra. De hecho, la presión media en la superficie de Marte es unas 160 veces menor que la presión en la superficie de la Tierra. La atmósfera de Marte está compuesta principalmente por CO_2 (dióxido de carbono), que se extiende desde la superficie de Marte hasta prácticamente el final de la atmósfera. Dentro de ella se producen fenómenos químicos, termodinámicos y dinámicos muy complejos. Sus propiedades están en constante cambio con el tiempo y lugar, produciendo en Marte fenómenos climatológicos como los que se suceden en la Tierra. Por ejemplo, existen casquetes polares, eras glaciares, cambios estacionales y patrones meteorológicos.

Además, las variaciones de la atmósfera de Marte son muy grandes. Esto es debido a que, por su baja densidad, la atmósfera reacciona mucho más rápido a los cambios en el flujo energético que, por ejemplo, nuestra atmósfera. Como consecuencia, la atmósfera de Marte muestra fuertes mareas térmicas producidas por el calentamiento solar. Dichas mareas pueden ser significativas e inducir variaciones de hasta un 10% de la presión atmosférica total (típicamente unos 50 Pa o 0,5 mb). La atmósfera de la Tierra experimenta mareas diurnas y semi-diurnas similares, pero su efecto es más difícil de discernir debido a la alta densidad de la atmósfera terrestre.

También debido a la baja densidad atmosférica, la temperatura de la superficie de Marte está controlada principalmente por el calentamiento solar y por el posterior enfriamiento infrarrojo a la atmósfera y al espacio, más que por intercambio de calor entre la superficie y la atmósfera. Además, en Marte no hay océanos que amortigüen las diferencias de temperatura entre día y noche que alcanzan valores del orden de 70ºC. Este intercambio de calor se produce, durante el día, en los kilómetros más bajos de la atmósfera y, durante la noche, en las últimas decenas o centenares de metros. La atmósfera de la Tierra intercambia más calor con la superficie que la tenue atmósfera marciana. Es decir, la atmósfera de la Tierra tiene más influencia en la temperatura de la superficie del planeta que la de Marte.

La superficie de Marte es un entorno hostil, y no lo es solo para posibles formas de vida en el planeta (debido, entre otros factores, a las grandes diferencias de temperatura) sino que incluso MSL y su instrumentación a bordo están expuestos a fenómenos como la deposición de aerosoles atmosféricos (polvo mineral) que

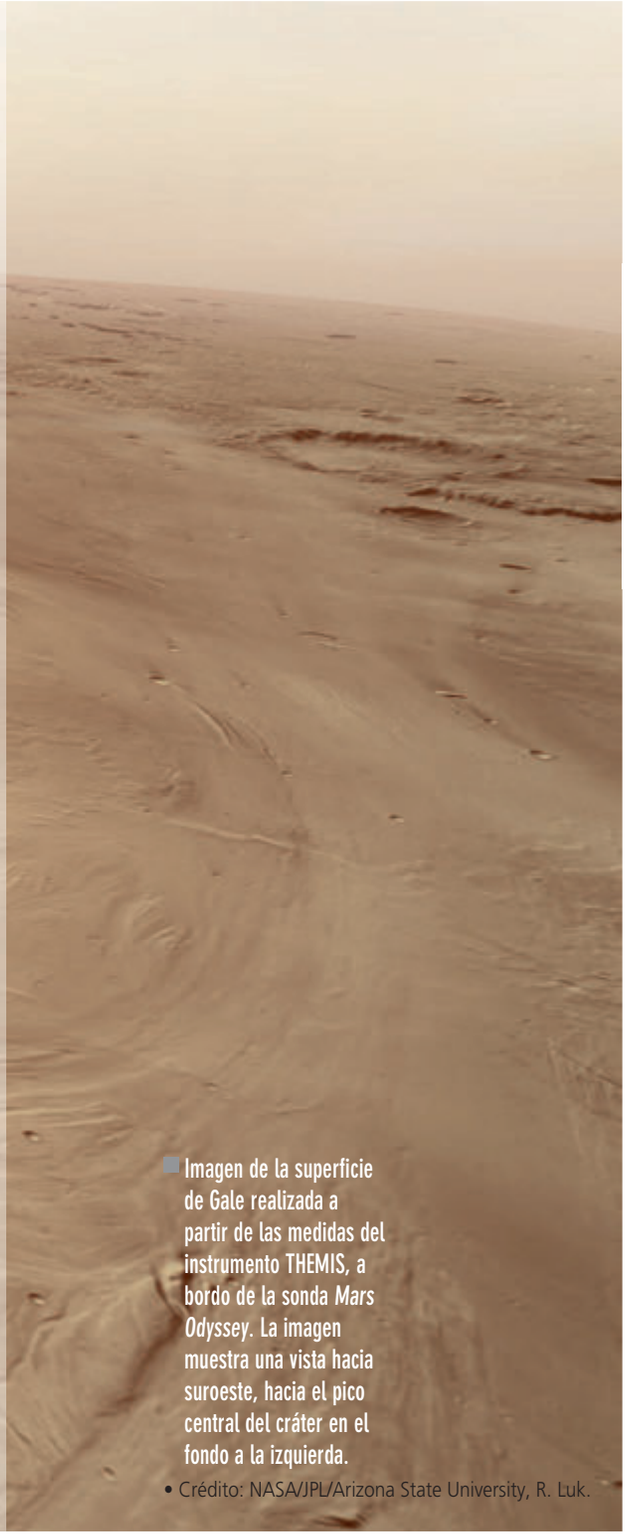
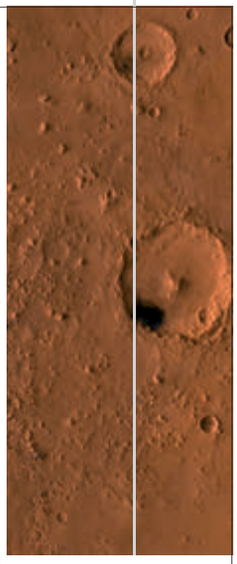


Imagen de la superficie de Gale realizada a partir de las medidas del instrumento THEMIS, a bordo de la sonda *Mars Odyssey*. La imagen muestra una vista hacia suroeste, hacia el pico central del cráter en el fondo a la izquierda.

• Crédito: NASA/JPL/Arizona State University, R. Luk.



La presión media en la superficie de Marte es de 600 Pascales (Pa), lo que equivale a 6 milibares (mb), mientras que la presión en la superficie de la Tierra es de 100.000 Pa o 1.000 mb.

degradan su operatividad e incluso su vida útil. Hasta la fecha, las únicas misiones de exploración in situ de la superficie de Marte realizadas con éxito han sido los dos *landers Viking* (1975) y el *lander Pathfinder* con el pequeño *rover Sojourner* (1996), seguidos por los *rovers* de exploración marciana *Spirit* y *Opportunity* (2004) y finalmente el *lander* polar *Phoenix* (2008), todas ellas de la NASA, con sondas relativamente pequeñas que incluían poca carga de instrumentación científica.

REMS: Ciencia española en Marte

Además de ser el primer instrumento español en Marte, REMS será también la primera estación ambiental operativa durante un período tan prolongado, un año marciano (equivalente a 2 años terrestres). Durante este tiempo adquirirá cada hora, durante 5 minutos, cada segundo, medidas de la velocidad del viento, la temperatura del aire y del suelo, la humedad, la presión y la radiación ultravioleta (UV). Estas medidas posibilitarán un análisis de las variaciones meteorológicas diurnas y estacionales, y proporcionará las primeras mediciones jamás tomadas por algún instrumento en Marte de la radiación UV incidente sobre la superficie, de las componentes direccionales del viento, y de la temperatura del suelo. Además, el registro sistemático de estas variables ambientales permitirá afrontar estudios más ambiciosos, como la investigación de: la dinámica de la capa límite de la atmósfera de Marte; los ciclos del agua y del polvo a nivel local (variaciones espaciales y temporales); el efecto de la radiación UV en la fotoquímica atmosférica y los fenómenos de producción de radicales en superficie y oxidación; el efecto de la actividad solar en la radiación UV en la superficie de Marte y la inercia térmica del entorno del aterrizaje del MSL.

De particular importancia es el estudio de la capa límite (PBL, *Planetary Boundary Layer*) de Marte. Esta es la capa de aire cercana al suelo que se ve afectada por la convección debida al intercambio diurno de calor, humedad y cantidad de movimiento con el suelo. En la Tierra, esta capa puede cambiar de espesor a lo largo del día y de las estaciones, y puede medir entre unos cientos de metros y dos km. La capa límite de Marte está todavía muy poco estudiada y su comportamiento puede variar mucho de una región a otra. Cabe señalar que el clima y la estabilidad térmica son factores críticos que condicionan la habitabilidad del planeta.

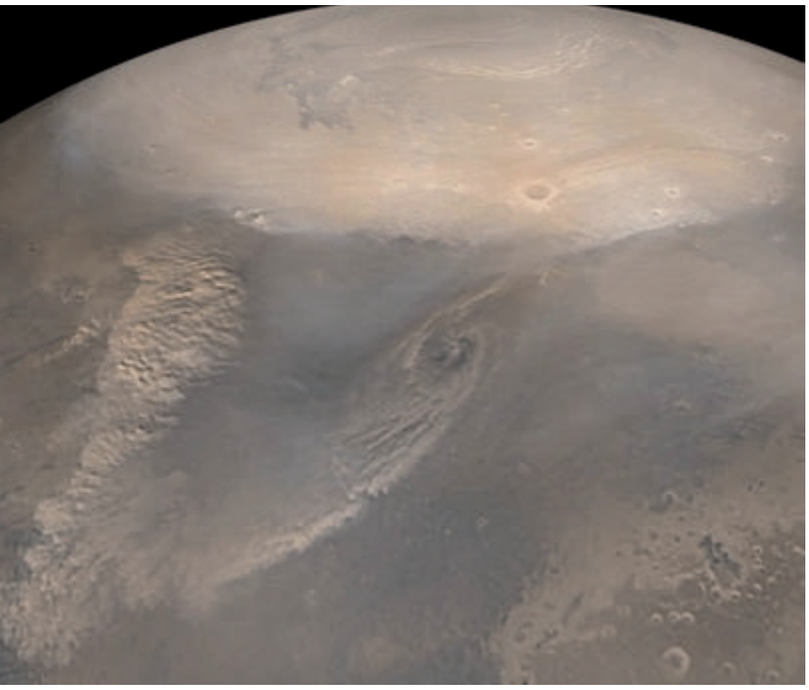
Las temperaturas de la capa límite a nivel de superficie han sido medidas por sensores en los dos *landers* de *Viking*, en el *Pathfinder*, y en los *rovers Spirit* y *Opportunity*. Un objetivo de REMS es mejorar nuestra comprensión de la dinámica y los procesos que afectan a esta capa y adaptar los modelos actuales de simulación del clima para incorporar estos fenómenos. Esto permitirá facilitar la seguridad de futuras misiones, tanto para su entrada y aterrizaje como para las operaciones en el caso de misiones tripuladas.

Además, el equipo científico de REMS tendrá como objetivo proporcionar la predicción meteorológica en la zona de operaciones de MSL, así como cualquier anomalía esperada en los niveles de radiación UV. Esta predicción, además de la peculiaridad de proporcionar pronósticos meteorológicos en Marte similares a los que ofrecen los informativos de nuestra región o localidad en la Tierra, constituirá una fuente de información muy valiosa que puede condicionar la operación del vehículo y sus instrumentos. Z

IMPORTANCIA DE LAS MEDIDAS DE REMS EN LAS OPERACIONES DE MSL

Las medidas de REMS se recibirán junto con el resto de datos de ingeniería (que nos hablan de la salud y operación del instrumento), las medidas de otros instrumentos de MSL, así como el resto de información de la plataforma MSL. Una vez en tierra, estos datos serán procesados rápidamente e integrados con el resto de información científica del entorno para detectar posibles fenómenos locales de interés que puedan condicionar la programación de actividades del día siguiente. Por ejemplo, las oscilaciones térmicas diarias pueden condicionar el período óptimo de operación de otro instrumento, o bien la dirección e intensidad del viento pueden condicionar la operación del vehículo y sus instrumentos. Igualmente, la detección de una anomalía local en el flujo de humedad puede sugerir un estudio detallado del contenido hídrico del subsuelo que pudiera ser medida conjuntamente por el instrumento DAN y una anomalía en el nivel de radiación UV debida a un aumento de actividad solar podría sugerir una medida simultanea de otro tipo de radiación con el instrumento RAD. La evaluación de la opacidad del cielo en el UV puede sugerir medidas simultáneas de la opacidad en el visible con las cámaras del vehículo. Por otro lado, las fuertes restricciones de consumo y de comunicación con el satélite hacen que todo este flujo de decisiones sobre la operación de los instrumentos y el vehículo se tengan que consensuar dentro de un grupo internacional de científicos e ingenieros, en tiempo real, a lo largo del día, para cargar la secuencia de operaciones del día siguiente. Este es uno de los mayores retos de las operaciones in situ: la rápida toma de decisiones y redefinición de estrategias de medidas a corto, medio y largo plazo.

Otra de las áreas en las que REMS tendrá un papel significativo es la del estudio del potencial astrobiológico (esto es, la posibilidad de que haya existido o exista vida) del entorno de la zona de aterrizaje y maniobra de MSL. Para estudiar este potencial es necesario caracterizar al detalle las condiciones ambientales a las que está expuesta la superficie, la textura de los materiales (su porosidad e inercia térmica), la composición química de los minerales, los rasgos morfológicos o minerales que pudieran sugerir la existencia de agua líquida en el pasado o presente, inventariar el contenido de carbono y otros elementos esenciales para la vida así como su ratio isotópica, la disponibilidad de moléculas útiles para un posible metabolismo de microorganismos, e incluso detectar, si existieran, moléculas orgánicas que se hubieran podido preservar. Las medidas de radiación UV en la superficie, temperatura y flujos de humedad de REMS, aportarán datos relevantes para investigar la habitabilidad del entorno del cráter Gale.



Tormentas de polvo en el polo norte de Marte a principios de primavera de 2002. A medida que el casquete polar empieza a desvanecerse, la diferencia de temperatura entre las regiones heladas y la región recientemente descongelada origina remolinos de vientos en la superficie. El casquete polar blanco es dióxido de carbono congelado.
Fotografía tomada por la sonda *Mars Global Surveyor*.
• Crédito: NASA/JPL/Malin Space Science Systems

¿QUÉ HACE DE REMS UN INSTRUMENTO ESPECIAL?

- REMS será el primer instrumento español que llegue a Marte.
- La primera estación ambiental que operará durante un período de 2 años terrestres (1 año marciano).
- Obtendrá datos de Marte diariamente y, por tanto, permitirá un análisis de las variaciones diurnas y estacionales de la meteorología marciana.
- Proporcionará las primeras medidas en Marte de: radiación UV, las tres componentes de la dirección del viento y la temperatura del suelo.
- Proporcionará datos en un período extendido de tiempo de otras variables atmosféricas (humedad, presión y temperatura del aire).

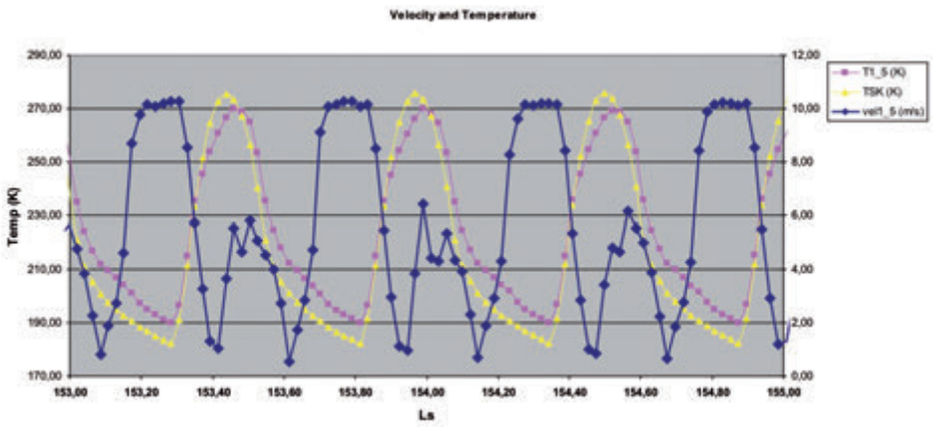


Figura realizada a partir de los módelos teóricos del CAB y que muestran los valores de temperatura del suelo (en rosa), del aire (en amarillo) a 1,5 m de altura (altura a la que están colocados los *booms* de REMS) y la velocidad del viento a la misma altura (en azul) previstos para la fecha del aterrizaje de MSL en Marte. En el eje *vertica* se muestran valores de temperatura, en grados Kelvin, y en el horizontal se muestran valores de la longitud solar (Ls). Ls es el ángulo subtendido por las líneas que unen Marte-Sol con la línea Marte-Sol en el equinoccio de invierno en el hemisferio norte (así, en los equinoccios Ls es 0º, en el solsticio de verano 90º, y en el de invierno 270º). MSL llegará a Marte durante el invierno en el hemisferio sur. • Crédito: CAB

Equipo de REMS en el CAB durante las jórnadas de entrenamiento FFMT (*Fast Field Motion Test*) en junio de 2011 y SNNT (*Surface Nominal Thread Test*) en octubre de 2011. Estas jornadas, organizadas por el *Jet Propulsion Laboratory*, se realizaron de manera remota en comunicación simultánea con todos los equipos de los instrumentos a bordo de MSL y tuvieron como objetivo preparar a los equipos de cara a la fase de operaciones, procesado y análisis de datos cuando MSL esté en Marte. Fueron por tanto unas jornadas de simulación de la fase de operaciones, asimilación de datos y toma de decisiones conjunta de todos los equipos de MSL.
• Crédito: CAB

Para saber más:
Ciclo del agua - mareas térmicas - deposición de aerosoles atmosféricos - dinámica de la capa límite - porosidad de un mineral - inercia térmica - ratio isotópica

Un día en la sala de control de REMS

José Antonio Rodríguez-Manfredi (CAB, Jefe del Dpto. de Instrumentación)
Co-Investigador de NASA-MSL-REMS, responsable del Segmento de Tierra
y Mission Manager del instrumento para la misión

Cuando el número de científicos e ingenieros que han de participar diariamente en la operación de *Curiosity* supera los 300, es preciso definir con precisión los procedimientos y cuidar los más mínimos detalles para que aquello no se convierta en una verdadera batalla campal. Afortunadamente, contamos con un buen maestro. El *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) acumula una gran experiencia a lo largo de las últimas 8 décadas, con más de 90 misiones a su espalda También es cierto que cada misión es diferente de la anterior, pero aquí, la veteranía es un grado... y eso se nota. Las herramientas informáticas desarrolladas para la ocasión, la organización y planificación de las más de 20 reuniones de trabajo diarias, y los entrenamientos periódicos a los que nos venimos sometiendo desde hace más de dos años son solo algunos ejemplos. Y es que no puede ser de otra forma. Es la única manera de que todo el personal esté listo para desempeñar su labor en el mismo momento en el que *Curiosity* llegue a Marte. A pesar de la vorágine, todos saben cuáles son sus responsabilidades, qué se espera de ellos, cuándo y dónde.

Comienza la jornada laboral

El trabajo comienza con el análisis de los datos enviados desde Marte. *Curiosity*, en dos oportunidades por sol (denominación que reciben los días marcianos), envía los datos que ha recogido a lo largo del sol anterior. Estas dos oportunidades son los pases de los satélites *Mars Reconnaissance Orbiter* y *Mars Odyssey* por la vertical donde se encuentra el vehículo; uno a lo largo de la mañana, y otro por la tarde-noche. Con un esquema de prioridades organizado desde tierra, el sistema de control empieza a enviar datos al satélite en cuanto éste entra en la ventana de transferencia. La información que no pueda ser transmitida en esa oportunidad es enviada en la siguiente, y así sucesivamente.

Lógicamente, la prioridad más alta siempre la tienen los datos del estado de los sistemas críticos: RTG (el generador de radioisótopos que proporciona la energía al vehículo y a todos los instrumentos), las baterías, temperaturas, imágenes de las cámaras de navegación, etc. Tras estos, todos los datos de los instrumentos científicos.

Los satélites, elementos de la *Red de Espacio Profundo* de NASA, enviarán los datos a Tierra, donde serán recibidos por cualquiera de las estaciones terrenas de la red (una de estas estaciones está situada en Robledo de Chavela, cerca de Madrid).

Independientemente de dónde sean recibidos, todos los paquetes de datos son enviados a JPL donde se hace un primer procesamiento de estos. A los pocos minutos de llegar, ya son formateados y puestos a disposición de los científicos e ingenieros en forma de lo que se denominan EDR (*Experiment Data Records*).

Estos EDRs son el material de partida con el que los equipos de trabajo de cada subsistema hacen un primer análisis rápido de la "salud" de cada uno de los instrumentos o elementos del *rover*. Y es que, en rigor, el análisis de la cantidad ingente de datos que llegan cada día se tiene que hacer en menos de 30 minutos.

Tras esta primera evaluación de la salud de los instrumentos, los operadores a cargo del análisis de los datos empiezan a "digerir" los paquetes de datos recibidos. En un tiempo tan breve como el anterior tienen que procesar los datos y generar informes, gráficos, imágenes o

Complejo de Comunicaciones con el Espacio Profundo de Canberra (Australia). • Crédito: NASA

Complejo de Comunicaciones con el Espacio Profundo de Madrid (España). • Crédito: NASA

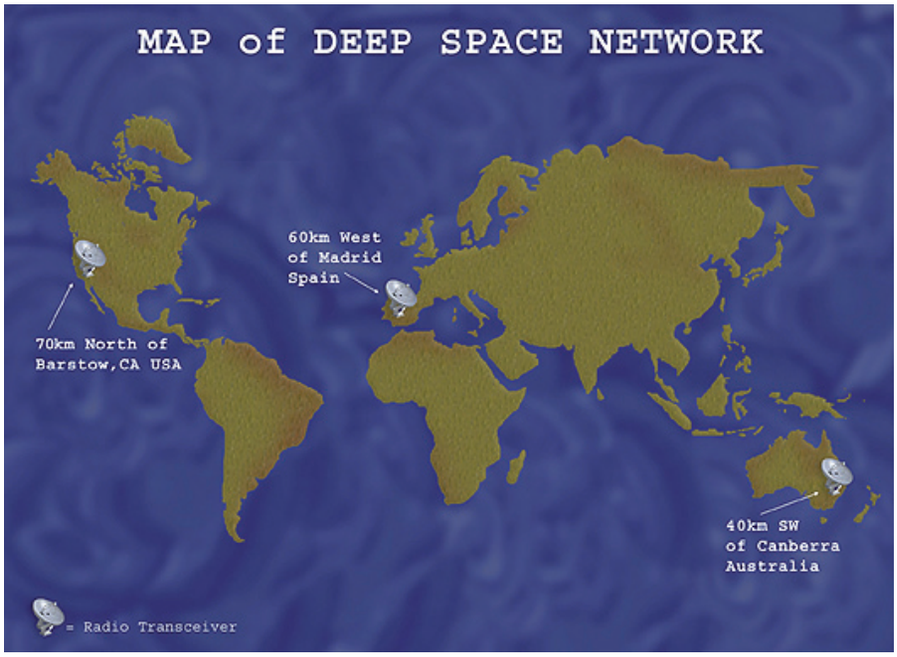
Complejo de Comunicaciones con el Espacio Profundo de Goldstone (EE.UU.). • Crédito: NASA

En la imagen aparecen los complejos de comunicaciones espaciales que NASA tiene en el mundo. Forman parte de una red mundial que cuenta con tres centros situados en España, Australia y EE.UU. La situación geográfica de los mismos, separados aproximadamente 120 grados en longitud, ha sido elegida para que las misiones espaciales puedan mantener contacto con alguna estación terrena, independientemente del movimiento diario de rotación de la Tierra.
La red es conocida internacionalmente como DSN, siglas que corresponden a su nombre en inglés: *Deep Space Network* (en castellano Red de Espacio Profundo), y está dirigida y gestionada por el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL). En la actualidad constituye el sistema de telecomunicaciones para aplicaciones científicas mayor y más sensible del mundo.

espectros para que, en las reuniones científicas que empiezan a sucederse una tras otra a partir de ese momento, sean analizados y se empiecen a plantear las actividades científicas para el sol siguiente. Estos datos procesados son los denominados RDR (*Reduced Data Records*).

Todas las decisiones comienzan a tomarse en reuniones estructuradas de manera jerárquica. En un primer nivel, todos los científicos se reúnen en grupos de discusión temáticos en donde todos tienen voz y voto. Estos grupos temáticos permiten organizar al gran número de participantes en torno a 4 áreas fundamentales: atmósfera y entorno; geología; mineralogía y geoquímica inorgánica; y biofirmas y geoquí-

Esquema de la Red de Espacio Profundo de NASA



mica orgánica. Decisiones como dónde ir, qué instrumentos utilizar, qué muestras tomar, qué imágenes registrar, etc. son planteadas en estas reuniones. En este contexto, los científicos podrán decidir usar cualquier recurso o instrumento a bordo de *Curiosity* para llevara cabo su ciencia. En ese sentido, el vehículo y sus instrumentos son "herramientas" que quedan a disposición de *todos* los científicos del proyecto, o sea, no solo para los científicos directamente vinculados al instrumento que sea. Los científicos pertenecientes a los equipos de los instrumentos no tienen más derecho sobre ese instrumento que los que no lo son.

En un segundo nivel, los representantes de cada uno de los grupos temáticos defienden en otra reunión conjunta las decisiones adoptadas y los planes de trabajo desarrollados preliminarmente en cada grupo, de donde se concluye y consensúa el plan de trabajo definitivo para el sol siguiente. En esta reunión también toman parte los ingenieros conocedores de qué se puede y qué no se puede hacer con cada instrumento o sistema, así como otras figuras que garantizan que la ciencia que se lleva a cabo día a día no se aleja de los planes estratégicos y a largo plazo de la misión.

Tras estas reuniones, fundamentalmente de cariz científico, comienzan a sucederse otras tantas de carácter más técnico. En ellas se modelan las actividades y decisiones científicas anteriormente adoptadas en forma de secuencias de comandos para cada uno de los instrumentos y sistemas. Estos comandos representan el lenguaje con el que programamos cada una de las acciones que pretendemos que los sistemas hagan, así como cuándo queremos que se hagan. No hay que olvidar que esta programación para todos y cada uno cada uno de los distintos instrumentos y sistemas del vehículo se envía una vez al día.

Estas últimas reuniones técnicas permiten garantizar la compatibilidad entre todos los instrumentos, así como verificar y reconfirmar las secuencias globales antes de ser finalmente enviadas a Marte.

La generación de los comandos de bajo nivel específicos de cada sistema solo es llevada a cabo por el equipo de operaciones propio de cada instrumento, como verdaderos conocedores de todos los pormenores técnicos de estos.

Con esta última acción concluye la jornada de exploración marciana por ese día.

Un duro plan de trabajo por delante

A pesar de que un día de operaciones implica más de 16 horas de duro trabajo, son tantas las cosas que hay que hacer que no hay tiempo de sobra.

Pero quizás lo peor no es el ritmo tan intenso al que los operadores están sometidos. Probablemente lo que más cuesta es acostumbrarse al "horario marciano". Dependiendo de las posiciones orbitales de los dos planetas, el decalaje de los días terrestres con los soles marcianos va cambiando cada día de operación, siendo más tarde cada vez. Así, por ejemplo, aunque el satélite pase sobre el vehículo a "medio-sol" marciano (a las 12 de la mañana) cada sol, los datos se recibirían en la Tierra a la hora que fuera, hoy, 40 minutos más tarde mañana, 40 minutos más tarde aún pasado mañana, y así sucesivamente.

Otra prueba de la experiencia de JPL en este campo se ve en los esfuerzos por tratar de conciliar la vida familiar con estos turnos de trabajo tan rocambolescos. Tras unas cuantas misiones de exploración planetaria realizadas, han establecido que, como muy temprano, el primer turno de trabajo comenzará a las seis de la mañana (hora de California) y, como muy tarde, ese primer turno de trabajo comenzará a la una de la tarde. Si los datos hubiesen llegado antes de esas seis de la mañana, estarían esperándonos para ser analizados. Si por contra llegaran de Marte pasados esa una de la tarde (siempre, hora de California), los análisis científicos quedarían para el día siguiente. Si llegaran entre ambas horas, la jornada comenzaría en el momento de la recepción.

Además de estas consideraciones sobre cuándo empieza la jornada laboral, también está establecido que los fines de semana no se trabajará; los viernes se enviarán a *Curiosity* y a los instrumentos las actividades y comandos que deberán ser ejecutados durante el fin de semana.

No obstante, este esquema de trabajo no empezará a funcionar hasta pasados 3 meses de operación en Marte. Durante esos primeros 90 días, JPL asume que, a pesar de las calibraciones, intensos entrenamientos y pruebas que habremos llevado a cabo para esa fecha, habrá muchas cosas nuevas que hacer en ese nuevo entorno: caracterizaciones del entorno marciano, reconfiguraciones de los instrumentos, ve-

rificaciones de la salud de los instrumentos tras el largo viaje camino a Marte, etc. Serán tantas las tareas que hacer, que JPL quiere que todo el personal involucrado en las operaciones, tanto ingenieros como científicos, estén presentes en California. Además, la secuencia de operaciones tácticas se llevará a cabo tan pronto como los datos sean recibidos en Tierra; fines de semanas incluidos.

Una vez transcurridos estos 90 días, todos nos volveremos a nuestras instituciones, desde donde se continuarán las operaciones a través de reuniones telefónicas y/o internet.

Todo este esfuerzo en pro de la conciliación trabajo-familia es ciertamente de agradecer, máxime cuando pensamos que la duración prevista de la misión es de 2 años... como mínimo.

Sin embargo, es preciso destacar algo que ya se ha mencionado anteriormente: todas las horas de comienzo y fin de los turnos de trabajo son PST (*Pacific Standard Time*), es decir, hora de California; por la diferencia horaria, en España siempre serán 9 horas más. El esfuerzo y la dedicación del equipo de operaciones (científicos e ingenieros) que se encargará del control y análisis de datos del instrumento español REMS es más que notorio. Sin la cohesión y el compromiso de sus miembros, esto no se podría llevar a cabo.

¿Y qué se hace con los datos?

Como hemos comentado, los datos que se reciben de Marte en un cierto sol son usados, quizás junto con los de algunos otros soles anteriores, para ayudarnos a decidir qué hacemos al sol siguiente. Para ello, los paquetes de datos son procesados a toda prisa para que puedan ser usados en las reuniones científicas diarias. En la mayoría de los casos, ese primer procesamiento conlleva unos ciertos errores que, siempre que no sean muy grandes, pueden ser asumidos. Lo importante es poder tener "una idea más o menos precisa" de lo que estamos midiendo, y poder ver una cierta tendencia. A partir de ahí, cuanto más preciso, mejor.

Pasada esa primera necesidad urgente, los científicos e ingenieros de cada instrumento disponen de toda la tranquilidad del mundo para poder afinar ese procesamiento y generar nuevas versiones de RDR mejorados, con menores errores de estimación. Estos valores o imágenes mejorados pueden resultar útiles en los ciclos de decisiones de los días siguientes.

Sin embargo, no es hasta 6 meses después del aterrizaje y tras haber profundizado en el análisis de los datos (y en sucesivos intervalos de 3 meses), cuando el proyecto (en particular, cada instrumento concreto) los hará públicos al resto de la comunidad científica no participante en la misión.

Esas son las reglas: los equipos científicos participantes en la misión disponen de esos meses de *gratificación* para validarlos, elaborar su ciencia y generar publicaciones científicas, en pago por el esfuerzo y la dedicación al proyecto. Pasado ese tiempo, todos los datos científicos, desde los menos procesados a los más elaborados, deben ser hechos públicos al resto de la comunidad a través del sistema web distribuido denominado PDS (*Planetary Data System*), en el caso de NASA. En el PDS están todos los datos de todos los instrumentos registrados por todas las misiones de NASA. MSL no será menos. Z

ELEGIDOS PARA LA... OPERACIÓN

Durante estos últimos meses, han sido muchos los entrenamientos conjuntos a los que los ingenieros y científicos de todos los instrumentos hemos estado sometidos. En un par de ocasiones, incluso se ha llevado a cabo la exploración de algún lugar recóndito (ni siquiera se informaba de su ubicación), simulando que era Marte.

La idea era que los científicos no pudiesen estar precondicionados por la información que pudieran tener de antemano, y así únicamente pudieran guiarse por los datos enviados por el pseudo-*Curiosity* que desplegábamos. Y es que no resulta tan trivial acostumbrarse a captar la realidad remota solo a través de los "ojos" y "sentidos" del robot.

Además de esos dos entrenamientos particulares (denominados *Slow Motion Field Test* y *Fast Motion Field Test*), otros entrenamientos han servido para habituarnos a los procedimientos, a las secuencias de reuniones, a las herramientas informáticas de planificación, soporte, generación de informes, generación de secuencias de comandos, etc. Son los que denominamos *Thread Tests*. Para estos otros entrenamientos se utilizó una "copia" de *Curiosity* que se encuentra en JPL (lo que se denomina un modelo de ingeniería), y que es casi igual que el que explorará el planeta rojo en unos meses.

Todos estos entrenamientos están planteados para que, como decíamos, todo el personal involucrado en las operaciones esté más que preparado desde el instante cero; el objetivo es poder sacar el máximo partido de la misión desde el mismo momento en el que *Curiosity* aterrice sobre la superficie de Marte.

Pero ahí no acaba la cosa. No basta con participar en estos entrenamientos. Durante los meses próximos, de enero a julio, se irán sucediendo distintas oportunidades para que todo aquel que tenga intención de participar en las operaciones se "certifique".

Así es. No importa la experiencia de que disponga o el grado de conocimiento que se tenga del instrumento que sea. Todo el mundo tendrá que pasar por unos "exámenes" que finalmente determinarán si se está o no cualificado para la operación. Estos ensayos-exámenes de entre 7 y 10 días son los que denominamos ORT (*Operational Readiness Test*, o pruebas de madurez de la operación). Todos ellos serán en el JPL.

En ellos se nos pondrá a prueba ante distintas situaciones (algunas, incluso reproduciendo fallos de los sistemas), tanto a científicos como a ingenieros, para verificar la preparación de los operadores y así obtener la certificación correspondiente: el "carné de operador".

Para saber más:
Red de Espacio Profundo de NASA - *Experiment Data Records* - *Reduced Data Records* - geoquímica inorgánica - biofirmas - geoquímica orgánica - decalaje - *Planetary Data System* - modelo de ingeniería

Para garantizar que los parámetros físicos provenientes de Marte sean veraces, se hace necesario realizar una serie de ensayos encaminados a certificar que nuestro instrumento medirá correctamente en las condiciones de operación. A este proceso se le denomina calibración. Básicamente calibrar es comparar, bajo condiciones controladas y determinadas, la medida de una magnitud con la medida de dicha magnitud realizada por un patrón que es conocido y que se toma como referencia consensuada.
En el caso de REMS se han diseñado y fabricado dos cámaras para la realización de calibraciones y ensayos de funcionamiento de los sensores que lo componen. Estas cámaras son la Cámara de Simulación de Marte y el Túnel Lineal de Viento.

Ensayos de REMS en cámaras de simulación

Javier Martín Soler (CAB, Dpto. de Instrumentación)
Colaborador de NASA-MSL-REMS

Certificar que el instrumento REMS trabajará correctamente en condiciones tan extremas como las de Marte resulta complicado y por ello es necesario desarrollar tecnología específica.

Para este fin se diseñan y fabrican lo que se denominan cámaras de simulación. Estas cámaras están diseñadas para poder reproducir en el laboratorio las condiciones de presión, humedad, temperatura, radiación, contaminación y absorción por deposición de polvo, viento local y composición de las atmósferas de otros planetas o satélites de interés científico. Por tanto, son fundamentales a la hora de calificar un instrumento, tanto para las calibraciones como para la realización de ensayos funcionales encaminados a conocer con más detalle cómo trabajarán nuestros sensores en cualquier entorno imaginable. La experiencia demuestra que es necesario realizar pruebas reales de medidas de estos sensores en entornos que se asemejen al máximo a los que se van a encontrar en un futuro en la superficie de estos planetas. La necesidad de desarrollar cámaras tan ambiciosas, y de cubrir un espectro tan amplio de aplicaciones, nos obliga a desarrollar la imaginación y combinarla con la ingeniería.

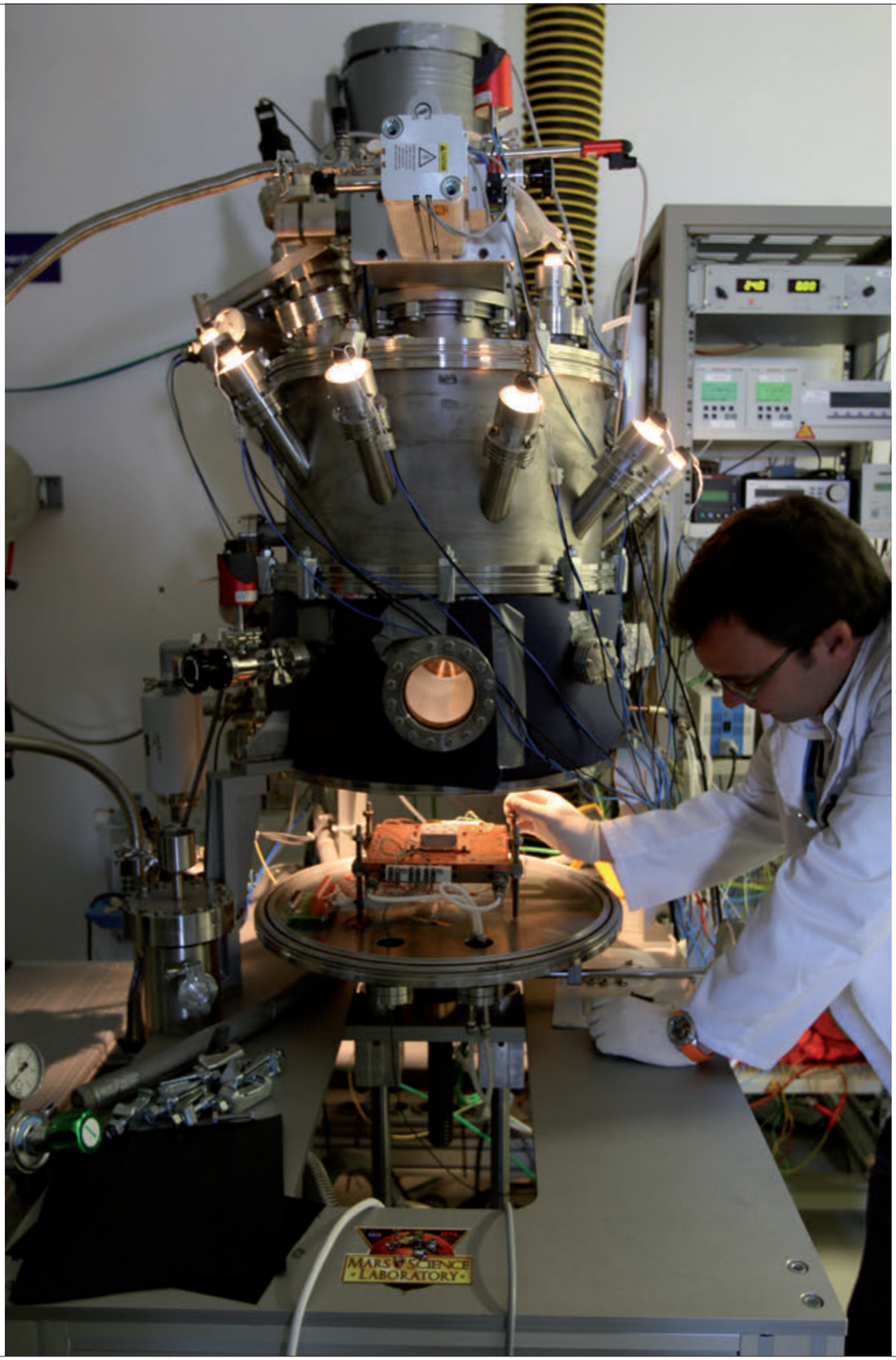
En el caso de REMS las cámaras desarrolladas son la Cámara de Simulación de Marte y el Túnel Lineal de Viento.

Cámara de Simulación de Marte

Desarrollada íntegramente en el CAB, consta de dos subcámaras, interconectadas a través de una válvula neumática de acción remota, una principal de gran volumen (200 litros), donde se introducen los instrumentos a testar, y otra accesoria más reducida (2 litros) utilizada para la generación de polvo en los ensayos en los que así se requiera.

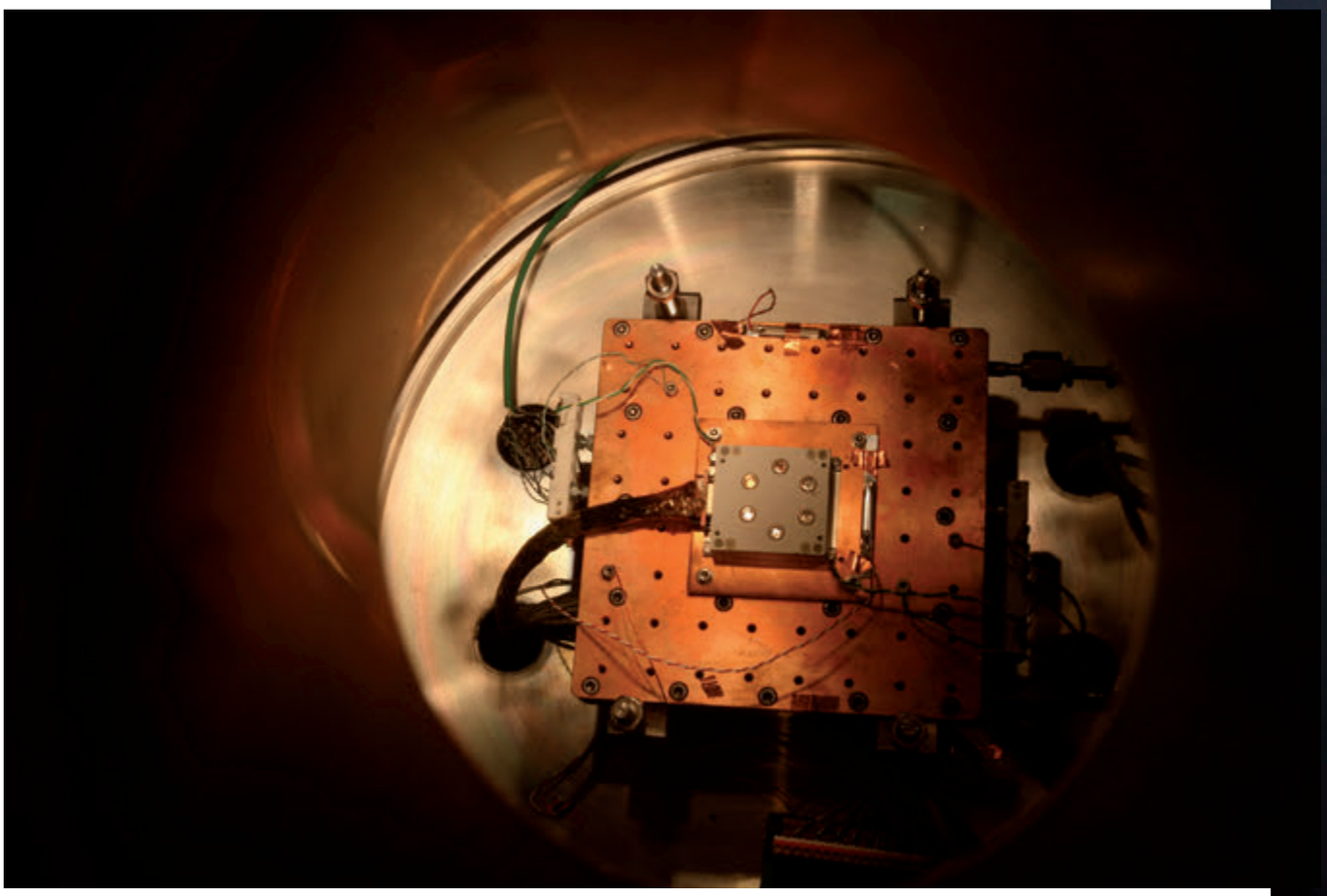
En la cámara se pueden controlar parámetros marcianos, es decir, se puede reproducir: una temperatura ambiental de entre -120°C y 20°C, una composición de gases similar a la atmosfera marciana (95% de dióxido de carbono), y una presión con rangos de operación de 0 a 12 milibares (mb). Además, es posible la simulación de tormentas y deposición de polvo con composiciones y tamaños de material análogos a los encontrados en Marte. Se simula la radiación incidente mediante lámparas ultravioleta apuntando sobre los sensores y también se simula la posición solar para toma de imágenes bajo condiciones diferentes de luminosidad, que dependen de su ángulo de incidencia sobre el sensor.

El modelo de ingeniería del sensor de temperatura de REMS (ATS) se ha ensayado con rangos de presiones de 2 a 10 mb, a temperatura ambiente de laboratorio y a temperaturas bajas. El obje-



Colocación del sensor UV de REMS para la prueba

• Crédito: CAB



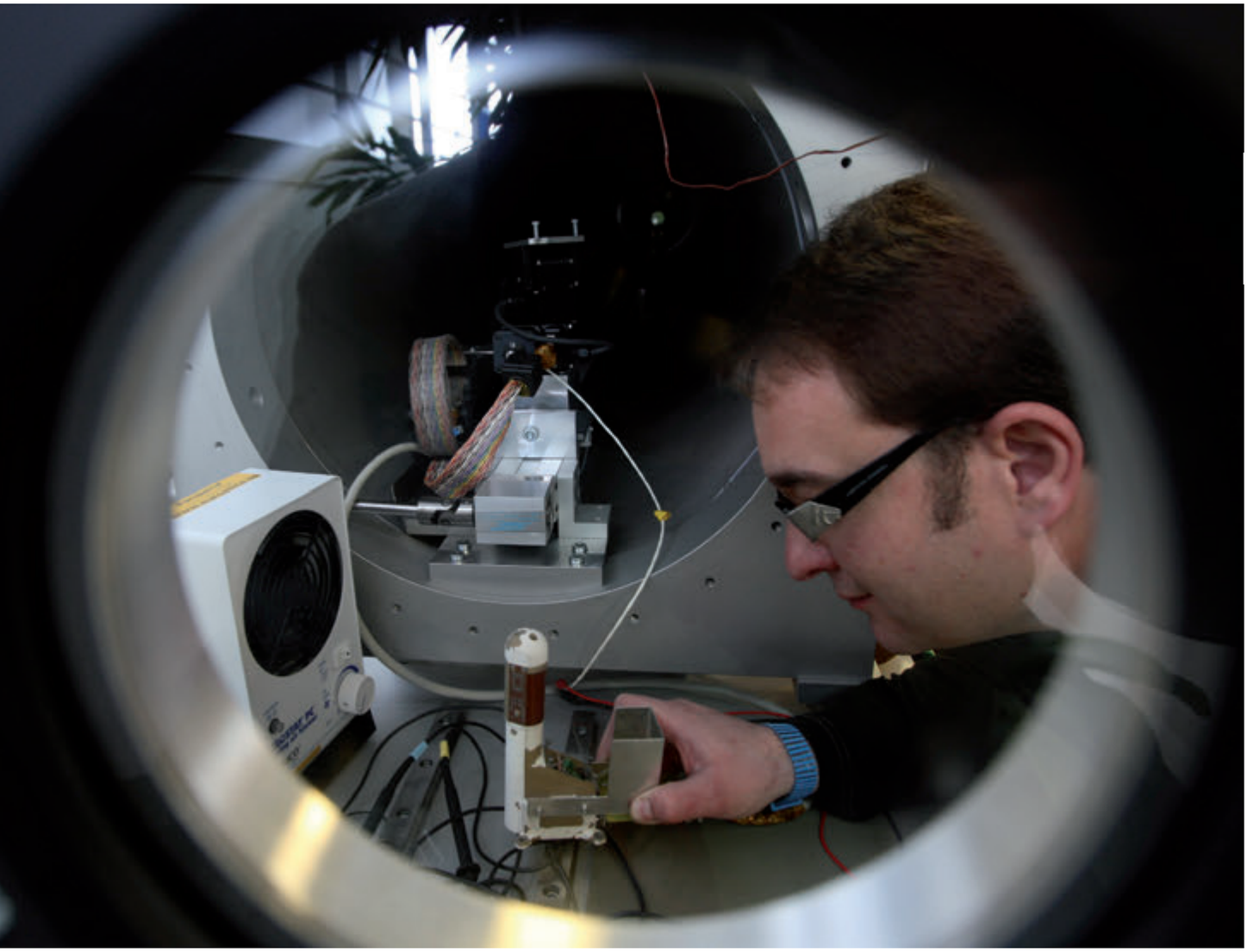
Interior de la Cámara de Simulación de Marte con el sensor UV de REMS

• Crédito: CAB

tivo es investigar cómo evoluciona el gradiente térmico a lo largo de una pequeña barra de material FR4 (una especie de fibra de vidrio), donde se integran los tres diminutos sensores de temperatura que forman el ATS, con el fin de ajustar los parámetros del modelo físico que permite determinar la temperatura del aire a partir de la temperatura dada por los sensores colocados en dicha barra. Se han realizado ensayos sobre los modelos de ingeniería del sensor de presión atmosférica (PS), de tiempo de respuesta bajo gradientes de presión altos y rápidos que podrían ser provocados en Marte por el paso, por ejemplo, de los denominados *dust devils*, pequeños torbellinos de polvo que afectan al ciclo de polvo marciano y, por consiguiente, al modelo atmosférico del planeta rojo. El objetivo es determinar el tiempo de respuesta del sensor, es decir, cómo de rápido mide para saber si sería capaz de ver los cambios de presión rápidos provocados por eventos locales.

Uno de los principales problemas de operación que se encontrará el sensor de radiación ultravioleta de REMS (UVS) sobre Marte es la degradación de su señal debida a la continua deposición de polvo marciano sobre ellos. En esta cámara se simula dicha deposición utilizando análogos marcianos en composición

El interés astrobiológico por otros planetas o satélites candidatos a albergar o a haber albergado vida, hace necesario el desarrollo de instalaciones que nos permitan entender cómo funcionarían los instrumentos diseñados para su estudio *in situ* y saber cómo interpretar sus datos sin la necesidad de viajar hasta ellos. Este tipo de instalaciones permiten a los científicos tener en el laboratorio un pedazo de un planeta, por ejemplo como Marte, y por tanto desarrollar instrumentación específica para este entorno de trabajo tan particular.



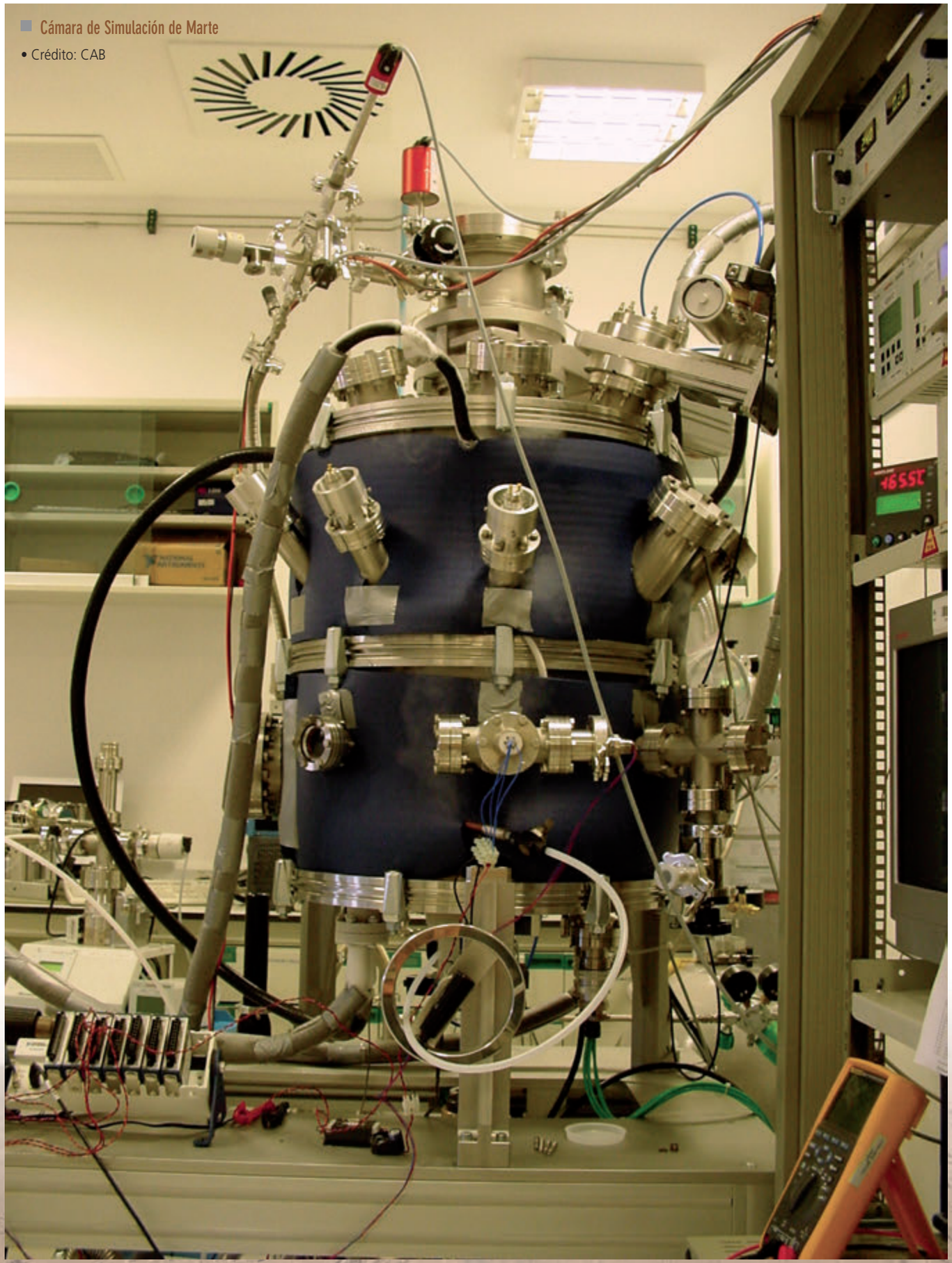
Interior del Túnel Lineal de Viento con el *boom* de REMS
• Crédito: CAB

y tamaño. El principal objetivo de los ensayos es demostrar que la integración alrededor de cada fotodiodo de un pequeño, pero potente imán, sirve para aumentar el tiempo de vida del sensor sobre la superficie de Marte. Lo que hace el imán es desviar el polvo marciano (7% magnético) y mantener limpio por más tiempo su campo visual. Además, se desarrollan ensayos con toma de imágenes (a través de cámaras de video integradas en la cámara de simulación) de la superficie de los sensores para distintos escenarios de luminosidad y deposición de polvo. El objetivo es cuantificar cuál es la cantidad de polvo que existe sobre el fotodiodo, lo cual provoca un descenso en la señal. Con esta simulación y posterior procesado de imágenes, correlacionadas con la señal, se podrá deducir cuál es la cantidad de radiación UV real que llega a la superficie.

Túnel Lineal de Viento

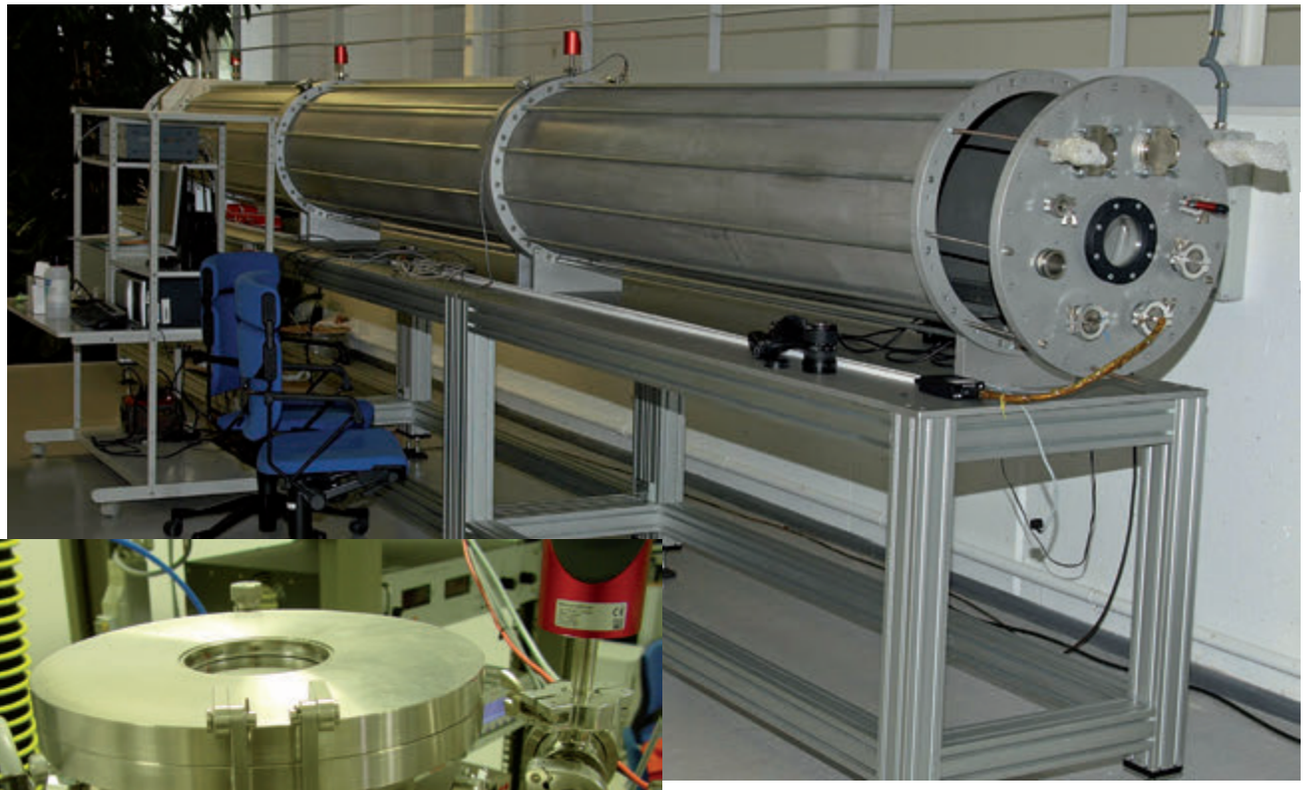
Diseñado íntegramente en el CAB, posee una longitud de seis metros y un diámetro interior de 500 mm. En su interior se controlan

El Laboratorio de Simulación de Ambientes Planetarios perteneciente al CAB cuenta entre sus instalaciones con varias cámaras diseñadas y fabricadas a medida donde se llevan a cabo experimentos que van desde la física de la materia condensada o de partículas, hasta estudios en el campo de la microbiología o la geología utilizando tecnología de vacío y cámaras de simulación de ambientes planetarios.



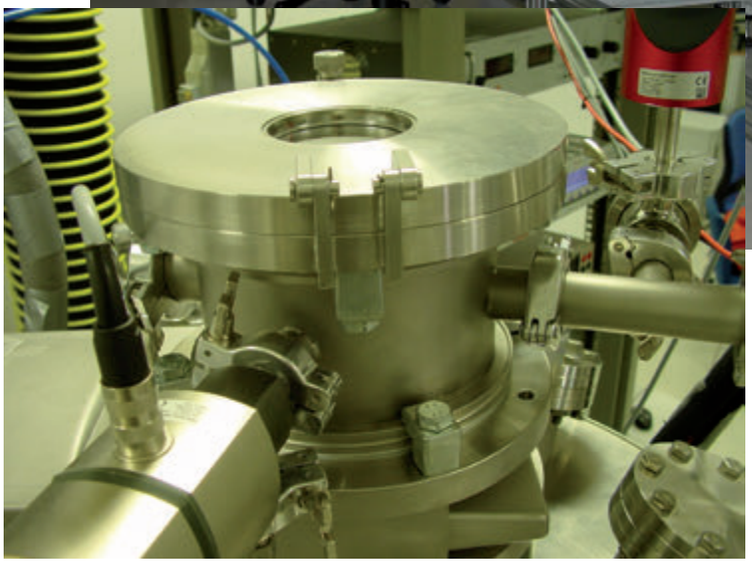
Cámara de Simulación de Marte

• Crédito: CAB



Túnel Lineal de Viento

• Crédito: CAB



Subcámara de polvo

• Crédito: CAB

parámetros como la presión, la temperatura y la composición de la atmósfera. Está dotado de un sistema externo de motor lineal que mueve una plataforma a distintas velocidades que van de 0 a 1 m/s, a lo largo y en el interior del túnel, simulando de esta manera la acción del viento sobre los sensores ensayados.

Sobre la plataforma motorizada se monta un *dummy* (modelo de pruebas) del *boom* de REMS con el sensor de viento (WS) y de temperatura del aire (ATS) integrados en él. Con estos ensayos se verifica que los sensores de viento y temperatura del aire son sensibles a la velocidad y dirección del viento en Marte.

El propósito fundamental de la fabricación de esta cámara ha sido realizar ensayos sobre el sensor de viento de REMS. La velocidad típica del viento sobre la superficie marciana está entre 0 y 10 m/s y, eventualmente, puede llegar a rachas de hasta los 70 m/s. Por tanto, debemos cerciorarnos de que estas velocidades pueden ser medidas por el WS.

El objetivo de los ensayos del sensor de viento en el túnel lineal es la calibración aerodinámica de dicho sensor. Para ello, los ensayos se realizan con un modelo de calibración, idéntico geométricamente al modelo de vuelo. La atmósfera interior del túnel es una mezcla de gases que reproduce la atmósfera marciana, ya que el fluido donde se testee el sensor debe poseer las mismas características (viscosidad, conductividad térmica, etc.) que las que existan donde opere.

Por otro lado, las velocidades y presiones de ensayo serán distintas de las marcianas. Lo que será idéntico entre los ensayos en el túnel lineal y la realidad marciana será el número de Reynolds del ensayo. Este número adimensional caracteriza el movimiento de un fluido relacionando variables como la viscosidad, densidad y velocidad de dicho fluido. En el túnel lineal la velocidad máxima está restringida por diseño a 1 m/s, pero se debe calibrar en condiciones marcianas, es decir, el WS debe funcionar con vientos de hasta 70 m/s y a una presión de aproximadamente 6 mb. Para compensar estas diferencias, se realizan los ensayos a presiones más altas y velocidades proporcionalmente más bajas, realizándose así las pruebas con idénticos números de Reynolds a los esperados en Marte. Z

Para saber más:
Modelo de ingeniería - *dust devils* - fotodiodo - tecnología de vacío - número de Reynolds

Boom 1 de REMS midiendo en Chott el-Jérid
• Crédito: CAB

Un elemento muy importante en el desarrollo de cualquier instrumento científico es la realización de campañas de campo, las cuales permiten comprobar el funcionamiento del mismo en condiciones no tan ideales como las encontradas en un laboratorio. Uno de los objetivos de estas campañas de campo es la validación de los procedimientos de calibración y los modelos de medida con respecto a instrumentación comercial. Otro de los objetivos es el aprendizaje de cómo se comporta el instrumento en desarrollo en condiciones hostiles y similares al entorno final de funcionamiento, incluyendo aquellas que no puedan ser reproducidas en un laboratorio o una cámara de simulación. En el caso de REMS, las campañas de campo permiten investigar el funcionamiento del instrumento en situaciones de viento, con alta radiación solar incidente y ambientes polvorientos, similares a las esperadas en Marte.

Campañas de campo de REMS

Carlos Armiens Aparicio (CAB, Dpto. de Instrumentación)
Colaborador de NASA-MSL-REMS

■ Superficie de Chott el-Jérid (Túnez)
• Crédito: CAB

En los últimos años de desarrollo de REMS, y una vez que se han tenido disponibles modelos de ingeniería del instrumento, se han realizado una serie de campañas de campo en distintos entornos, teniendo todos ellos como denominador común el ser considerados análogos marcianos. Las primeras campañas se realizaron en las islas Livingston y Decepción, pertenecientes a la Antártida marítima, en los inviernos de 2008 y 2009. Estas campañas se llevaron a cabo en colaboración con el grupo de la Universidad de Alcalá de Henares liderado por Miguel Ramos. A estas islas se enviaron sendos modelos de ingeniería del sensor de temperatura del suelo y del sensor ultravioleta. Estos modelos eran muy sencillos, estando integrados en cajas de aluminio. Adicionalmente, se enviaron también varios instrumentos comerciales con el fin de comparar las medidas tomadas por los modelos de REMS con instrumentación ampliamente aceptada por la comunidad científica. Estas campañas sirvieron para mejorar los algoritmos de medida de ambos sensores, incluyendo efectos atmosféricos en los mismos. Además, se recogieron muestras del suelo, las cuales fueron traídas a los laboratorios del CAB para su análisis posterior. Una de las propiedades analizadas de estas muestras fue la emisividad que presentan en las longitudes de onda de medida del GTS. Esto ayudó a comprender el efecto que dicha emisividad tiene en las medidas de temperatura del suelo. Las campañas antárticas también establecieron una primera toma de contacto con este tipo de entornos y toda su problemática asociada, a partir de la cual se han ido refinando y mejorando tanto la instrumentación enviada como los objetivos y resultados de las mismas.

En la primavera de 2010 se realizó otra campaña de campo en Túnez, concretamente en una zona denominada Chott el-Jérid. Esta zona, que se extiende a lo largo de 5.000 km^2, es una laguna endorreica cuya superficie es una costra de sal de unos pocos centímetros de grosor. Esta campaña se realizó en colaboración con la Universidad Rey Juan Carlos I y gracias a la ayuda de Jamel Touir, investigador tunecino de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Sfax. A esta campaña de campo se llevó una estación meteorológica más completa que a las campañas antárticas. Esta estación incluía modelos de ingeniería del sensor de temperatura del suelo, del sensor de temperatura del aire y del sensor de radiación ultravioleta. También estaban integrados modelos comerciales de los sensores de velocidad y dirección de viento, presión y humedad. En resumen, esta estación podía medir todos y cada uno de los parámetros que medirá REMS cuando llegue a la superficie de Marte. Una mejora adicional de esta estación consistía en que los modelos de ingeniería del GTS y del ATS eran copias idénticas de los del modelo de vuelo, estando ambos integrados en un *boom*. Los sensores del GTS, además, estaban calibrados siguiendo los mismos procedimientos empleados para el modelo de vuelo, lo que permitió validar los modelos teóricos empleados en el desarrollo

■ Laguna salada de Bujaraloz (Zaragoza)

• Crédito: CAB

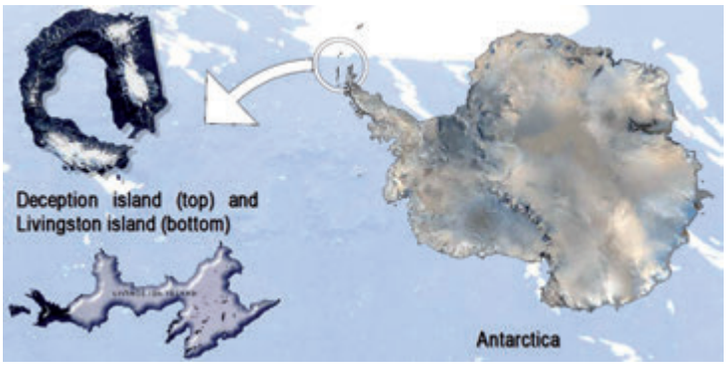
LA EMISIVIDAD

A principios del siglo XX el físico alemán Max Planck formuló matemáticamente la ley que lleva su nombre. La Ley de Planck describe la cantidad de energía que emiten los cuerpos por el hecho de estar a una temperatura determinada. Esta ley, que constituye la base teórica sobre la que se fundamenta el funcionamiento del GTS, fue elaborada para los denominados "cuerpos negros". Un "cuerpo negro" es un elemento ideal que absorbe toda la energía que incide sobre él, es decir, $\alpha = 1$, donde α representa la absortividad del material. La Ley de Kirchoff, por su parte, establece que, en situaciones de equilibrio termodinámico, la absortividad es igual a la emisividad, es decir, para un "cuerpo negro" $\alpha = \varepsilon = 1$, donde ε representa la emisividad del material. Por otra parte, la reflectividad, r, de un material se puede definir como $r = 1 - \varepsilon$. Por lo tanto, para un "cuerpo negro" $r = 0$, es decir, un "cuerpo negro" no refleja ninguna energía de la incidente sobre él, sino que la absorbe en su totalidad. El nombre de "cuerpo negro" viene precisamente de esta propiedad: al no reflejar ninguna energía, este cuerpo no sería visto por el ojo humano o, lo que es lo mismo, sería visto como una superficie de color negro. Como hemos comentado anteriormente, un "cuerpo negro" es un cuerpo ideal, los cuerpos reales presentan todos una emisividad inferior a 1. La emisividad define la cantidad de energía que emite un material en relación a la que emitiría un "cuerpo negro" que estuviera a la misma temperatura. El hecho de que todos los materiales, incluyendo la superficie de Marte, presenten una emisividad inferior a 1 tiene dos efectos sobre la medida de la temperatura superficial. En primer lugar, la radiación emitida por la superficie es proporcional, no sólo a la temperatura, sino también a la emisividad, por lo que el conocimiento de ésta última es necesario para realizar una buena estimación de la temperatura a la que se encuentra. El segundo efecto viene del hecho de que, al ser la emisividad inferior a 1, la reflectividad es superior a 0. Es decir, parte de la radiación proveniente del entorno se refleja en la superficie y llega a los detectores. En el caso de REMS, las principales fuentes de radiación ambientales son el Sol, la atmósfera marciana y el propio rover. El conocimiento de la emisividad, y, por lo tanto, de la reflectividad, es necesario para estimar la influencia de este entorno y realizar las correcciones adecuadas para una correcta estimación de la temperatura.

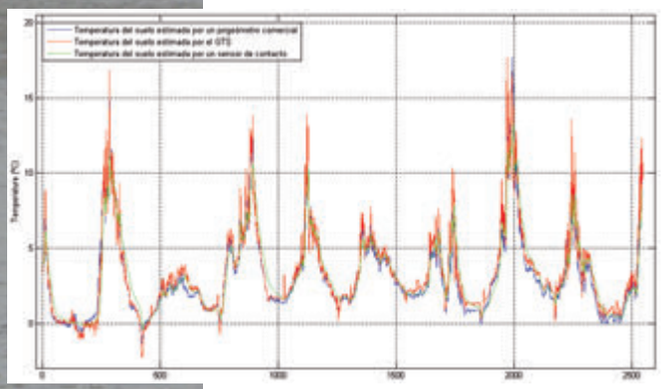
del sensor, el procedimiento de calibración y los algoritmos de estimación de temperatura superficial.

También en el año 2010, y a continuación de la campaña de Túnez, se realizó otra campaña en el entorno desértico de Boulder City, en el estado de Nevada. Esta campaña surgió de una colaboración con el investigador de la Universidad de Michigan Nilton Renno, y estuvo orientada al estudio del fenómeno conocido como *dust devil*. Este tipo de fenómenos, que visualmente podríamos describir como un torbellino de polvo, se da de manera más o menos frecuente en el planeta Marte, siendo uno de los objetivos científicos del instrumento REMS. De forma genérica, un *dust devil* puede caracterizarse por un aumento de la velocidad del viento, una disminución de la radiación ultravioleta, una disminución de la temperatura del suelo y una disminución de la presión. A esta campaña se desplazó el mismo conjunto de sensores que a la campaña de Túnez.

Una cuarta campaña fue llevada a cabo en las inmediaciones de Flagstaff, en el estado de Arizona, en la primavera de 2011. Esta campaña, denominada *Fast Motion Field Test* (FMFT), se realizó en colaboración con equipos de todos los instrumentos del *rover Curiosity*. La idea era simular una semana de operaciones en Marte, para lo que todos los equipos desplazaron a Flagstaff modelos de sus instrumentos. Además, los datos recogidos seguían la misma cadena de procesamiento y diseminación que existirá en el entorno operacional real. La idea era que estos datos fueran analizados por cada uno de los equipos de desarrollo desde sus puntos de origen, separados entre sí por miles de kilómetros, siguiendo el procedimiento formal que se seguirá en las operaciones marcianas. Este procedimiento operacional tiene como finalidad el establecimiento del plan de actividades que llevará a cabo el conjunto del rover en los días inmediatamente posteriores. Desde el equipo de REMS se desplazó a Flagstaff un pequeño grupo de dos personas junto con una estación meteorológica representativa de cada uno de los sensores del instrumento de vuelo. Por otra parte, el resto de integrantes del equipo REMS participó desde el Centro de Astrobiología en este procedimiento de simulación de operaciones, empleando para ello las herramientas informáticas desarrolladas al efecto tanto por la NASA como por el propio CAB.



Localización de las islas Livingston y Decepción
• Crédito: CAB



Comparativa entre la temperatura del suelo estimada por el GTS, un pirgeómetro comercial y un sensor de contacto durante la campaña antártica de 2009
• Crédito: CAB

Dust devil
• Crédito: CAB

La última campaña de campo se realizó en el otoño de 2011 en la localidad aragonesa de Bujaraloz, perteneciente a la comarca de los Monegros. El emplazamiento elegido fue una laguna salada, similar a la de Chott el-Jérid, pero de unas dimensiones mucho más reducidas. Esta campaña continuó la filosofía iniciada en el FMFT de simulación de operaciones y puesta a punto de las diversas herramientas desarrolladas para tal fin. Esta campaña tuvo la ventaja adicional de su bajo coste, por ser el emplazamiento elegido relativamente cercano a las instalaciones del CAB, unos 300 kilómetros, lo que permitió que fuera llevada a cabo en tan sólo tres días.

Como conclusión podemos decir que, en el marco del proyecto REMS, se ha realizado un gran esfuerzo, tanto a nivel personal como económico, en la realización de campañas de campo. Estas campañas son fundamentales en todo proceso de desarrollo de instrumentación, ya que permiten probar el funcionamiento de los sistemas en situaciones no reproducibles en laboratorios, así como en entornos no controlables y hostiles, es decir, más cercanos a la realidad. La filosofía seguida a lo largo de estos años ha sido la de ir aumentando la complejidad de las campañas, de forma que éstas se desarrollaban sobre la base del conocimiento adquirido en las campañas anteriores. De esta manera, se ha pasado de realizar campañas en las que se probaban modelos muy sencillos de algunos de los sensores de REMS, a campañas en las que se probaban, no sólo todas las capacidades de medida del instrumento final, sino también los procedimientos operacionales de la misión y las herramientas de software desarrolladas para tal fin.

Por último, agradecer toda la colaboración recibida por las numerosas personas que han ayudado, en mayor o menor medida, en toda la complejidad que presenta desarrollar una campaña de campo, y sin cuya colaboración no habría sido posible realizar las mismas. Técnicos de laboratorio, personal de gestión y administración, empleados de líneas aéreas, personal de aduanas, guías locales y un largo etcétera, que han ayudado a superar todas y cada una de las dificultades encontradas por los investigadores en la realización de sus tareas más cotidianas. Gracias a todos ellos. Z

Para saber más:
Modelos de medida - modelos de ingeniería - laguna endorreica - Ley de Planck - Ley de Kirchoff - cuerpo negro - emisividad - absortividad - reflectividad - pirgeómetro - sensor de contacto

¡Rumbo a Marte!

V. Peinado, J. Gómez, A. Peña, F. Torrero
J.A. Rodríguez-Manfredi
(CAB, Dpto. de Instrumentación y EADS-Crisa)

Las medidas de REMS proporcionarán información esencial para los objetivos científicos del *Mars Science Laboratory* (MSL): verificar el potencial biológico de la zona explorada por la misión investigando los procesos planetarios que ocurren en su superficie y que influyen en su habitabilidad como, por ejemplo, el ciclo del agua, los niveles de radiación UV, y los ciclos térmicos del suelo y el aire.

Lanzamiento de MSL desde Cabo Cañaveral (EE.UU.)

• Crédito: NASA/JPL

A las 4:30 de la mañana, hora de Florida, del día 26 de noviembre ya estábamos preparados. Aunque el autobús no nos recogería hasta pasadas las seis, no queríamos arriesgarnos a perdernos o a tener algún problema que nos impidiera llegar al lugar de recogida. Estábamos nerviosos e impacientes.

Tras tantos años de esfuerzo y dedicación, el estar ahí, a pocas horas del lanzamiento y a pocos kilómetros del Atlas V, era poco menos que hacer realidad un sueño.

El día anterior, durante una visita al Kennedy Space Center, tuvimos la suerte de acercarnos al lanzador que, en unas horas, pondría al *Curiosity* de camino a Marte... cruzábamos los dedos. Lo habían sacado del hangar unas horas antes, y ya se erguía majestuoso en la plataforma de despegue del Complejo 41, a falta de que se cargara el combustible, propergol, durante la noche siguiente. Impresionó verlo desde tan cerca.

Puntual, el autobús acudió a su cita con nosotros y, tras identificarnos, subimos a él. En pocos minutos ya estábamos rumbo a Banana Creek, lugar desde donde seríamos testigos del comienzo del viaje. Quedaban algo más de 3 horas y media, pero el ambiente que se vivía allí ya impactaba. Dos relojes marcaban la cuenta atrás.

El que *Curiosity* emplee energía nuclear para alimentar sus baterías hizo que se tomaran medidas de precaución especiales en cuanto a la distancia desde la que los invitados podían presenciar el despegue. Estábamos como a unos 9 kilómetros. Entre nosotros y el Atlas V, un lago enorme.

En España, la emoción, el nerviosismo y la expectación no eran menores. Otros miembros del equipo de REMS que no pudieron viajar (del CAB y de Crisa), compañeros del CAB y del INTA, familiares y amigos también se dieron cita en el CAB, en Madrid, para vivir este evento singular. El auditorio mostraba un lleno absoluto. Nadie quería perderse el lanzamiento que era retransmitido en directo a través del canal de televisión de NASA.

Para la mayoría de nosotros, ésta ha sido la primera vez que participábamos en el desarrollo de un instrumento espacial y, también para muchos, la primera vez que éramos testigos directos de un lanzamiento. El sentimiento de satisfacción por el trabajo desarrollado y el orgullo por haber participado en algo así ya empezó a sobrecogeremos desde unos días antes, cuando muchos medios de comunicación comenzaron a hacerse eco del inminente lanzamiento.

En el CAB, dos charlas introductorias impartidas por compañeros del equipo de REMS precedieron al lanzamiento. Los más ajenos a este mundo fueron entrando en situación, sintiéndose partícipes de la emoción y pudiendo asimilar así todo el trabajo que hay tras este momento.

En Cabo Cañaveral, minutos antes del lanzamiento, se hizo el silencio absoluto y alguien comenzó a entonar el himno de los Estados Unidos. Tras estos momentos, se empezó a oír por megafonía la secuencia de comprobaciones técnicas que se estaban llevando a cabo. Uno tras otro, el Control de Lanzamiento iba preguntando por el estado de cada subsistema del Atlas V. De nuevo se hizo un silencio absoluto en espera de las respuestas positivas de cada uno de los responsables. Cuando llegó el turno a la "carga útil" del cohete (*Curiosity*, en este caso) todos irrumpimos en aplausos y gritos de alegría cuando oímos el "*ready*". Todo estaba listo y sólo restaban unos pocos segundos para la ignición de los motores.

Unos instantes antes de que pudiéramos oírlo, empezamos a ver el humo de la ignición y cómo el Atlas V, con *Curiosity* a bordo, comenzaba a ascender lentamente. Todavía absortos y con el corazón encogido por la emoción de ver cómo una parte de nosotros mismos se elevaba y ponía rumbo a Marte, todo el mundo irrumpió en aplausos y vítores. En el CAB la reacción fue idéntica.

Aunque todavía quedan escollos importantes por salvar antes de que *Curiosity* comience a mandar datos desde la superficie de Marte allá por agosto del 2012, el primer escalón ha sido superado con éxito. Por el momento, este sigue rumbo al planeta rojo tal y como se espera, enviando periódicamente datos que confirman que todo se encuentra en perfecto estado. En unas pocas semanas tendremos la oportunidad de arrancar nuestro instrumento REMS para verificar su estado. Z

Para saber más:
Cohete Atlas V - Kennedy Space Center - Complejo de Lanzamiento 41 - propergol - Control de Lanzamiento - carga útil

EQUIPO DE REMS

Gómez-Elvira, Javier – CAB (CSIC-INTA) – Investigador Principal
Serrano, Jaime – EADS-Crisa – Project Manager

INSTRUMENTO

Requisitos, diseño, ensayos, calibración y estación de operación

Armiens, Carlos – CAB (CSIC-INTA)
Castañer, Luis – Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
de la Torre, Manuel - Jet Propulsion Laboratory
Díaz, Fernando – EADS-Crisa
Domínguez, Manuel – Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
Ferrándiz, Ricardo – INSA
Genzer, Maria – Finnish Meteorological Institute (FMI)
Gómez, Felipe – CAB (CSIC-INTA)
Kahanpää, Henrik – Finnish Meteorological Institute (FMI)
Kowaski, Lukas – Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
Harri, Ari-Mati – Finnish Meteorological Institute (FMI)
Haberle, Robert – NASA Ames Research Center
Jiménez, Vicente – Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
Lepinette, Alain – CAB (CSIC-INTA)
Martín-Soler, Javier – CAB (CSIC-INTA)
Martín-Torres, Javier – CAB (CSIC-INTA)
Martínez-Frías, Jesús – CAB (CSIC-INTA)
McEwan, Ian – Caltech
Mora, Luis – CAB (CSIC-INTA)
Moreno, José – EADS-Crisa
Navarro, Sara – CAB (CSIC-INTA)
Peinado, Verónica – CAB (CSIC-INTA)
Peña, Antonio – EADS-Crisa
Polkko, Jouni – Finnish Meteorological Institute (FMI)
Rodríguez-Manfredi, José Antonio – CAB (CSIC-INTA)
Reno, Nilton – University of Michigan
Ricard, Jordi – Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
Richardson, Mark – Caltech
Romeral, Julio – CAB (CSIC-INTA)
Scodary, Anthony - Jet Propulsion Laboratory
Sebastián, Eduardo – CAB (CSIC-INTA)
Sobrado Vallecillo, Jesús Manuel – CAB (CSIC-INTA)
Torrero, Francisco - EADS-Crisa
Torres, Josefina – CAB (CSIC-INTA)
Urquí, Roser – INSA
Velasco, Tirso – EADS-Crisa
Verdasca, José – CAB (CSIC-INTA)
Zorzano, M. Paz – CAB (CSIC-INTA)

CIENCIA

Análisis de datos

Blanco, Juan J. – Universidad de Alcalá de Henares (UAH)
Gómez, Felipe – CAB (CSIC-INTA)
Harri, Ari-Mati – Finnish Meteorological Institute (FMI)
Haberle, Robert – NASA Ames Research Center
Martínez-Frías, Jesús – CAB (CSIC-INTA)
Muñoz, Guillermo – CAB (CSIC-INTA)
Pablo de, Miguel Ángel – Universidad de Alcalá de Henares (UAH)
Ramos, Miguel – Universidad de Alcalá de Henares (UAH)
Richardson, Mark – Caltech
Reno, Nilton – University of Michigan
Verdasca, José – CAB (CSIC-INTA)
Zorzano, M. Paz – CAB (CSIC-INTA)

Agradecimientos

Merrison, Jon – Aarhus University – Colaboración en los ensayos del sensor de viento

Antiguos miembros del equipo

Vázquez, Luis – Universidad Complutense de Madrid (UCM) – Anterior IP
Valero, Francisco – Universidad Complutense de Madrid (UCM)