

REMS, una estación meteorológica hecha en España, en ruta hacia Marte

María Paz Zorzano Mier, Javier Gómez Elvira y el Equipo REMS

1. Introducción

El *Rover Environmental Monitoring Station* (REMS) es un instrumento desarrollado por el Centro de Astrobiología (INTA-CSIC) para explorar el medio ambiente en la superficie de Marte a bordo del *Mars Science Laboratory* (MSL) de la agencia espacial de los Estados Unidos (NASA). El MSL, bautizado para el gran público como *Curiosity*, es un vehículo que estudiará la habitabilidad del planeta y valorará si Marte fue o es todavía un entorno adecuado para sostener la vida microbiana. En su operación nominal, a lo largo de un período mínimo de dos años terrestres (un año marciano, aproximadamente), REMS registrará, durante un intervalo de cinco minutos cada hora, la temperatura del aire, la presión, la humedad relativa, la temperatura del suelo, la velocidad y dirección del viento y la radiación ultravioleta (UV). El registro sistemático de dichas variables medioambientales permitirá caracterizar, entre otros fenómenos, la dinámica de la capa límite de la atmósfera marciana, los ciclos del agua y del polvo, y los niveles de radiación UV, contribuyendo de este modo a los objetivos fundamentales de la misión MSL.

La construcción, calibrado y prueba del instrumento REMS ha sido dirigida por el Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA), en colaboración con la empresa EADS/Crisa, la Universidad Politécnica de Cataluña, el Instituto Meteorológico Finlandés (FMI), la Universidad de Alcalá de Henares y diversas instituciones norteamericanas.

Curiosity, con REMS a bordo, fue lanzado con éxito por un cohete Atlas V el pasado 26 de noviembre de 2011 desde el *Kennedy Space Center*, en Cabo Cañaveral (cerca de Orlando, Florida, USA). En la actualidad viaja sin mayor novedad hacia Marte, donde se espera que llegue en agosto de este año. Las pruebas hechas después del lanzamiento confirman que todos los sistemas (incluyendo REMS) funcionan según lo esperado.

2. Retos tecnológicos de la exploración de Marte

A lo largo de la historia de la exploración espacial, las agencias de la Unión Soviética, Estados Unidos, Europa y Japón, han enviado a Marte varias decenas de plataformas espaciales. El motor de esta búsqueda es el afán por alcanzar nuevas fronteras del conocimiento, explorar entornos desconocidos y superar desafíos tecnológicos. Aproximadamente

dos terceras partes de estas misiones han fallado de una u otra manera antes del comienzo de su misión.

La mayor parte de las misiones científicas de exploración de Marte se han desarrollado en satélites que orbitan alrededor del planeta y utilizan técnicas de detección remota (teledetección) para caracterizar la superficie y el subsuelo del planeta, la atmósfera, el clima, el campo magnético remanente, la geología y la mineralogía. Actualmente continúan en operación, investigando la superficie y la atmósfera de Marte, los orbitadores *Mars Reconnaissance Orbiter* (desde 2006), *Mars Express* (de la ESA, desde 2003), y *Mars Odyssey* (desde 2001), y como vehículo de superficie, de los *Mars Exploration Rovers* (MER), el *Opportunity rover* (desde 2004). Recientemente han llegado a su fin con éxito dos misiones muy fructíferas, un orbitador, el *Mars Global Surveyor* (1997-2006) y el otro vehículo de los MER, el *Spirit rover* (2004-2010).

Las técnicas de detección remota han sido explotadas hasta la fecha con gran éxito. Se han utilizado: espectrómetros (tanto en el rango visible, como en el infrarrojo o en el ultravioleta), cámaras con capacidad para tomar imágenes de alta resolución, radares para el estudio del subsuelo (*ground penetrating radar*), detectores de campo magnético, detectores de neutrones, etc. No obstante la detección remota tiene ciertas limitaciones a la hora de caracterizar los fenómenos de superficie. Por un lado cada punto del planeta es observado a distintas horas del día y en distintas estaciones por lo que no es posible adquirir una secuencia sistemática de procesos locales que varíen en escalas de tiempos pequeñas. Por otra parte la señal atraviesa la atmósfera antes de llegar al detector y en algunos casos para interpretarla, es decir para inferir qué parte de la señal recibida se debe a la interacción con la superficie y qué parte con la atmósfera, es necesario aplicar modelos de transferencia radiativa que incorporan ciertas hipótesis sobre fenómenos o parámetros que, en el caso de Marte, no están debidamente caracterizados. Igualmente la resolución espacial de las observaciones puede variar desde cientos de kilómetros a como mínimo, cientos de metros, y no permite detectar estructuras espaciales de menor escala. Finalmente la observación desde orbitadores no permite extraer información detallada de los fenómenos que ocurren en las capas bajas de la atmósfera en contacto con la superficie del planeta, lo que se conoce como capa límite.

Una de las áreas de la exploración planetaria que despiertan mayor interés es el estudio del potencial astrobio-

lógico de otros entornos, esto es, tratar de determinar si ha existido o existe vida en otros ambientes distintos al de la Tierra. Para ello es necesario caracterizar con detalle las condiciones ambientales a las que está expuesta la superficie (tanto en términos de radiación, como temperatura, flujos de humedad, etc), 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, 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. En definitiva, valorar la habitabilidad de un entorno no-terrestre y compararlo con el concepto de habitabilidad actual. Este concepto de habitabilidad se amplía considerando las condiciones que se dan en los ambientes extremos de la Tierra. La investigación sobre la habitabilidad de un planeta sólo puede realizarse de forma efectiva desde la superficie del planeta.

La exploración *in-situ* de un planeta, esto es desde su superficie, es tecnológicamente más compleja que la exploración desde un orbitador pues requiere superar ciertas condiciones estresantes adicionales. Tanto la plataforma como los instrumentos han de superar además de las fases críticas de lanzamiento y trayecto en el espacio (fases que son propias también de los orbitadores), las fases de aproximación a la órbita, entrada y amortizaje y finalmente la operación propiamente dicha en superficie. Las misiones de exploración planetaria *in-situ* están sujetas además a los estrictos controles de protección planetaria, destinados a evitar la contaminación *forward*, o hacia adelante, del planeta explorado con moléculas orgánicas o micro-organismos de origen terrestre.

Por otra parte hay que tener en cuenta que las condiciones ambientales de operación de instrumentos en el espacio son, hasta cierto punto, independientes del cuerpo alrededor del que orbite la plataforma y relativamente constantes a lo largo de su vida útil en términos de presión, temperatura y niveles de radiación. Esto hace que las tecnologías desarrolladas para detección remota estén muy consolidadas y sean adaptables, con ciertas modificaciones, de una misión a otra. En contraste con esta larga tradición de instrumentación espacial remota, los instrumentos y las misiones de operación *in-situ* han de ser diseñadas específicamente para operar en una atmósfera con una presión y composición determinada, en un planeta con una gravedad e insolación diferente, y adaptadas a oscilaciones térmicas fuertes asociadas con los ciclos diurnos y estacionales. Concretamente, la superficie de Marte, el entorno de operación de REMS, es bastante hostil, ya que existen fuertes ciclos térmicos diarios (del orden de 70°C) y la instrumentación y el vehículo están expuestos a la deposición de aerosoles atmosféricos (polvo mineral) lo que degrada su operatividad e incluso su vida útil, en particular en el caso de los paneles solares. 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), el pequeño rover *Pathfinder* (1996), los dos rovers MER *Spirit* y *Opportunity* (2004) y, finalmente, el lander polar *Phoenix*

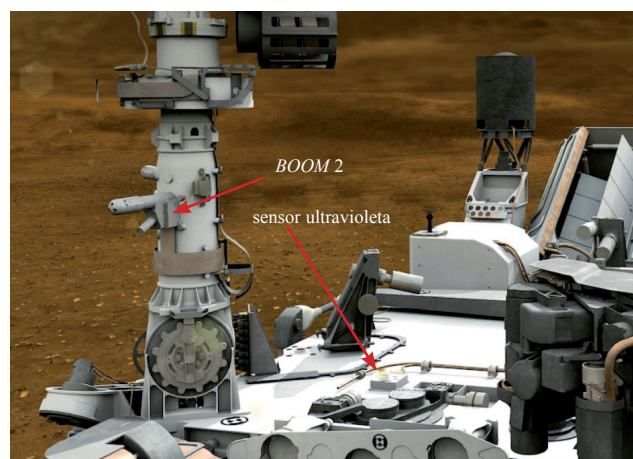


Fig.1. Vista artística de Curiosity en la que se observa la parte media del mástil sobre el que están montados los instrumentos de observación remota y los dos booms de REMS (ver detalle del boom 2 que contiene sensores de viento, de humedad y de temperatura del aire) así como una parte de la plataforma superior del cuerpo del vehículo (ver detalle del sensor de UV de REMS). (Crédito: NASA/JPL).

(2008), todas ellas de la NASA, con sondas relativamente pequeñas que incluían poca carga de instrumentación científica. El nuevo vehículo, *Mars Science Laboratory* (MSL) *Curiosity*, ver figura 1, que salió en dirección a Marte el pasado 26 de noviembre de 2011, es la versión más ambiciosa, grande y compleja de vehículo de exploración de superficie que se ha desarrollado hasta la fecha. La plataforma MSL es en realidad un laboratorio autónomo móvil, del tamaño de un mini-cooper, que puede alcanzar una velocidad de hasta 90 m/h, y desde el cual operarán conjuntamente varios instrumentos para caracterizar el lugar de amortizaje. Esta misión ha sido diseñada para operar al menos dos años en la superficie de Marte.

3. Objetivo científico de la misión

Por sus similitudes con la Tierra, Marte es un objetivo de exploración planetaria de indiscutible interés. Por un lado es un planeta de tipo terrestre cercano, al Sol y a la Tierra, con rangos térmicos similares a nuestro planeta. Marte, al igual que la Tierra, posee una atmósfera (aunque 100 veces menos densa) que contiene CO₂ y N₂, y esta atmósfera tiene una circulación similar a la de nuestro planeta. Existen remanentes de un campo magnético fragmentado lo cual sugiere que, en el pasado, Marte pudo haber tenido un campo magnético más intenso que protegiera su superficie y la atmósfera de las partículas ionizantes solares, como ocurre ahora en la Tierra. La atmósfera de Marte ha evolucionado y se postula que en un pasado la superficie pudo haber estado más protegida de radiación y tener agua líquida en forma estable. Se ha inventariado una gran cantidad de agua distribuida por todo el planeta en forma de hielo y/o minerales hidratados en la sub-superficie. Igualmente existen evidencias morfológicas que sugieren que Marte en el pasado pudo tener agua líquida en

su superficie. Finalmente las condiciones actuales en Marte son frías y secas, por lo tanto, son favorables para la preservación de restos orgánicos de vida que pueden haber sido formados bajo condiciones más clementes en el pasado.

MSL tiene como objetivo fundamental verificar la habitabilidad de Marte, focalizándose en cuatro aspectos principales: determinar si se disponen de los elementos básicos para la vida, es decir su potencial biológico; caracterizar la geología, a través del estudio de los minerales, composición elemental y morfología de la superficie y del subsuelo; estudiar la historia geoquímica de Marte y determinar su posible influencia en la existencia de vida en el pasado, valorando por ejemplo la existencia de agua líquida en algún periodo y por último, determinar los niveles de radiación que llegan a la superficie.

Las medidas de REMS proporcionarán información esencial para los dos últimos objetivos de MSL, investigando los procesos planetarios que ocurren en su superficie y que influyen en su habitabilidad, como por ejemplo el ciclo del agua y los niveles de radiación UV, así como los ciclos térmicos del suelo y aire. Por otra parte, REMS, a través de sus medidas, estudiará los fenómenos atmosféricos globales y de media-escala (frentes, chorros, etc), fenómenos de micro-escala (turbulencia en la capa límite, flujos de calor, etc), el ciclo hidrológico a nivel local (variaciones espaciales y temporales, difusión en el regolito, etc), el ciclo del polvo, los niveles de radiación ultravioleta (relacionado con la fotoquímica atmosférica y los fenómenos de producción de radicales en superficie y oxidación etc) y la inercia térmica del entorno de amortizaje.

4. Marte: atmósfera y condiciones medioambientales

El conocimiento adquirido hasta la fecha sobre la atmósfera y las condiciones ambientales en la superficie de Marte se basa en medidas desde las plataformas espaciales (orbitadores, landers y rovers) y en los modelos físicos sobre la atmósfera, su equilibrio y su circulación. A continuación exponemos algunos aspectos de la atmósfera y la climatología de Marte, sobre los que las medidas de REMS aportarán información adicional que permitirá profundizar nuestro conocimiento.

La atmósfera Marciana está compuesta principalmente por CO₂ (dióxido de carbono) y tiene una presión superficial media de 600 Pa (6 mb), esto es una presión mucho menor que la presión media en la Tierra ~10⁵ Pa (= 1000 mb = 1 bar). Uno de los efectos de la baja densidad atmosférica es que la atmósfera reacciona mucho más rápido a un flujo energético de lo que lo hace nuestra atmósfera. Como consecuencia la atmósfera de Marte, a diferencia de la de la Tierra que sólo presenta mareas gravitacionales (*gravitational tides*), muestra fuertes mareas térmicas (*thermal tides*) producidas por el calentamiento solar. Dichas mareas pueden ser significativas e inducir variaciones de presión de hasta un 10% de la presión atmosférica total, típicamente unos 50 Pa (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 masa (presión) de la atmósfera terrestre.

Como consecuencia de la baja densidad atmosférica, la temperatura de la superficie de Marte está controlada principalmente por el calentamiento solar (y el posterior enfriamiento infrarrojo a la atmósfera y al espacio), más que por intercambio de calor con la atmósfera. Durante el día los kilómetros más bajos de la atmósfera y, durante la noche, los últimos 10-100 metros, son los que se ven afectados por intercambio de calor con la superficie y por absorción de radiación infrarroja emitida por el Sol y la superficie y re-emisión de radiación a la superficie, espacio y resto de la atmósfera. Para las mismas condiciones (de velocidad de viento, cielos claros, etc) 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 de su planeta que la atmósfera de Marte.

En el caso de Marte el efecto invernadero causado por el CO₂ sólo incrementa en 3 K la temperatura de equilibrio del planeta. La temperatura de la superficie puede alcanzar valores por encima del punto de congelación del agua a presión terrestre (0 °C). Sin embargo, el agua líquida es siempre inestable en Marte debido a que la presión atmosférica está por debajo de la del punto triple del agua. Por consiguiente, el hielo de agua sublima directamente en forma de vapor. Excepciones notables son las zonas más profundas del planeta. Efectivamente, podrían existir algunas zonas profundas donde se dieran las condiciones mínimas necesarias para la estabilidad del agua líquida: es decir, que la presión y la temperatura estén por encima del punto triple (6.1 mb, y 0° C), y por debajo del punto de ebullición a la presión correspondiente. Según un trabajo de Haberle et al. [1], utilizando modelos GCM (*Global Circulation Model*), la región donde existe una mayor presión (12.4 mb) es en el fondo de Hellas Basin (una zona profunda creada por el impacto de un meteorito). El problema es que a estas presiones tan bajas el punto de ebullición del agua está a una temperatura del orden de 10°C. Si existiera hielo en la superficie, éste licuaría al llegar a 0°C, y se evaporaría al llegar a 10° C. Por tanto, el agua líquida podría ser estable frente a la congelación para un rango térmico y de presión adecuado, pero durante el día al subir la temperatura, sería inestable frente a la evaporación y se dispersaría rápidamente en la atmósfera (no saturada) en forma de vapor.

A pesar de que Marte es más pequeño (tiene un 11% de la masa de la Tierra) y está un 50% más alejado del Sol que la Tierra, el clima marciano tiene importantes similitudes con el de la Tierra. Por ejemplo existen casquetes polares, eras glaciares, cambios estacionales y patrones meteorológicos. Esta materia ha sido estudiada tanto por planetólogos como por climatólogos. Sin embargo existen diferencias notables tales como la ausencia de agua líquida en forma estable y una inercia térmica mucho más baja. La capa límite (PBL, *Planetary Boundary Layer*) es la capa de aire cercana al suelo y que se ve afectada por la convección debida al intercambio diurno de calor, humedad y momento con el suelo. En la Tierra esta capa varía en espesor a lo largo del día y de las estaciones, y puede medir desde unos cientos de metros hasta dos kilómetros de espesor. 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.

La temperatura de Marte y la circulación varían de año en año, como es de esperar para un planeta con atmósfera. Marte carece de océanos, una fuente de gran variación interanual en el caso de la Tierra. Los datos de la *Mars Orbital Camera* (en el orbitador MGS) que analizaron 2.5 años marcianos (desde marzo de 1999), muestran que el clima de Marte tiende a ser más repetitivo y por lo tanto más predecible que el de la Tierra.

El polvo, que es elevado de la superficie de Marte por los vientos, sirve como núcleo para inducir la formación de nubes [2]. Estas nubes se pueden formar a grandes alturas, hasta 90 km sobre la superficie del planeta. Son nubes tenues que, en general, solo se distinguen en el reflejo del sol por la noche. Son parecidas a las nubes mesoscalares de la Tierra. En nuestro planeta aparecen a unos 80 km de altura y son conocidas con el nombre de nubes noctilucentes.

En Septiembre del 2008, el lander *Phoenix* tomó imágenes de la caída de nieve desde nubes situadas a 4.5 km por encima de su lugar de amartizaje, cerca del cráter Heimdall en la zona polar [3]. La precipitación en forma de nieve se evapora antes de llegar al suelo, este fenómeno se conoce con el nombre de virga.

Las observaciones de la temperatura atmosférica desde orbitadores dan una visión muy útil y a gran escala de la estructura térmica global, pero incluso las medidas de ocultación de señales de radio carecen de la resolución vertical necesaria para caracterizar en detalle el extremo cercano a la superficie de la capa límite planetaria. Las temperaturas de la capa límite a nivel de superficie han sido medidas directamente a través de termopares montados en los dos landers *Viking* y en el *Pathfinder* [4], y han podido ser recuperadas, a través de procesos de *retrieval*, de las medidas espectrales infrarrojas (IR) tomadas por los rovers MER con el instrumento MINITES. Tanto las medidas de termopares como las medidas IR muestran un patrón diario similar. La atmósfera está más fría y estratificada de forma estable justo antes de la puesta de Sol. Poco después de la salida del Sol, la atmósfera se calienta, de abajo a arriba, por efecto del calentamiento de la superficie. A media mañana, en los últimos 100 m de la atmósfera se establece un gradiente térmico vertical superadiabático. La convección turbulenta comienza a actuar en esta capa inferior, produciendo fluctuaciones de temperatura de hasta 15 o 20 K, tal como se ha medido en el metro más próximo al suelo de la atmósfera, y de hasta unos 5 K en los últimos 100 m con escalas de tiempo de 30 a 60 s. La convección turbulenta continúa hasta bien pasada la tarde, aproximadamente a las 16:30 marcianas, cuando la superficie empieza a enfriarse hasta el punto de estar más fría que la atmósfera más cercana. En este momento, la convección se apaga y el gradiente térmico cercano a la superficie se invierte. La capa invertida va creciendo a lo largo de la noche hasta alcanzar una profundidad de 1 km, antes de revertirse de nuevo en la mañana.

El comportamiento dinámico de la capa límite de la atmósfera de Marte es todavía poco conocido. Un objetivo particular 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 amartizaje como para las operaciones en el caso de misiones tripuladas.

En cuanto al entorno radiativo, hasta la fecha no existen medidas del nivel de radiación ultravioleta (UV) en la superficie. Los fotones del rango UV tienen energía suficiente para excitar y extraer electrones de átomos y moléculas, induciendo la formación de radicales e iones. Algunos de estos productos pueden recombinarse en una reacción química dando lugar a la formación de nuevas moléculas. Por lo tanto la radiación UV condiciona la fotoquímica atmosférica y la química de los minerales de la superficie, así como la formación de radicales oxidantes fuertemente dañinos para la vida. Por otro lado las moléculas más relevantes y características de todas las formas de vida conocida, los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y las proteínas, son muy sensibles a la radiación UV. Los ácidos nucleicos muestran una fuerte absorción de radiación en torno a 260 nm y las proteínas en torno a 280 nm. Debido a esta sensibilidad, un alto nivel de radiación UV puede disociar por completo estas moléculas y esterilizar una superficie. Un conocimiento adecuado de los niveles de radiación UV en superficie permitirá estimar la dosis (concepto que aúna tiempo de exposición e intensidad de radiación, ver por ejemplo [5]) biológica esperada para moléculas o tejidos cuya respuesta espectral ha sido caracterizada en la Tierra. A través de la medida sistemática del flujo de radiación UV en la superficie de Marte, REMS contribuirá a explorar y cuantificar el potencial de la zona donde amartice MSL para sostener la vida en su superficie o subsuperficie.

Los aerosoles atmosféricos (partículas minerales del tamaño de micras) que dotan a la atmósfera marciana de ese color rojo característico, son elevados del suelo a la atmósfera a través de: vientos, circulaciones ascendentes convectivas, torbellinos o *dust-devils*, plumas de polvo, y tormentas globales que pueden llegar a cubrir el planeta por completo de polvo. Debido a su pequeño tamaño quedan en suspensión hasta que, poco a poco, a lo largo de varios meses, por acción de la gravedad se van depositando lentamente aclarando la opacidad de la atmósfera. Este ciclo está todavía pobremente caracterizado, y las propiedades apantallantes del polvo frente a la radiación son todavía desconocidas. Los aerosoles de polvo se encuentran presentes siempre en suspensión en la atmósfera de Marte. Su presencia afecta significativamente a la estructura térmica de la atmósfera y es un factor decisivo en los patrones de circulación atmosférico en todas las escalas espaciales. El *Mariner 9* con su espectrómetro IR, IRIS, monitorizó la lenta deposición y caída de la tormenta de escala planetaria de 1971. El *thermal mapper* de IR térmico (IRTM) monitorizó la opacidad en el visible durante el tiempo de la misión *Viking*, incluyendo la observación de dos tormentas de polvo de escala planetaria. Más recientemente, MGS (Mars Global Surveyor) ha realizado un mapeo de opacidad durante tres años utilizando los espectros de IR térmico de TES junto con imágenes globales de la *Mars Orbiter Camera* (MOC). En la actualidad los datos recibidos de los tres orbitadores operativos (MRO con los instrumentos MCS, CRISM y MARCI, *Mars Odyssey* con THEMIS y *Mars Express* con PFS, OMEGA y SPICAM) siguen controlando los aerosoles de polvo. Las observaciones del Sol realizadas desde la

superficie por los *Viking* landers y por *Pathfinder*; así como las realizadas con los instrumentos Pancam e IR *retrievals* de mini-TES en los MER, se han utilizado para monitorizar el polvo desde superficie. Las observaciones desde orbitadores indican un patrón estacional de aparición de tormentas de polvo y un fondo continuo de opacidad. El ciclo anual presenta tormentas de forma intermitente, tanto a escala regional como planetaria. Las tormentas más intensas tienen lugar durante la estación $L_s = 180-360$, cuando globalmente las temperaturas de superficie y atmósfera son más cálidas. Estos eventos, suceden de forma aleatoria pero en promedio se da una tormenta global uno de cada tres años.

El estudio *in-situ* de la magnitud y la dependencia espectral de la opacidad UV se utilizará para cuantificar los procesos de carga de polvo atmosférico y deposición de polvo, el tamaño del polvo, las propiedades dispersivas y las propiedades absorbentes en el rango UV. Estos parámetros son necesarios a su vez como inputs para los modelos radiativos que se utilizan para la interpretación de medidas remotas de la superficie y la extracción de concentraciones de ozono [6].

Hasta la fecha existen pocas medidas directas de los vientos en Marte. Los lander *Viking* y *Pathfinder* llevaban anemómetros de hilo-caliente para medir tanto la dirección del viento como la intensidad. La *Pathfinder* llevaba además un conjunto de tres indicadores de viento (*windsocks*), montados a tres alturas de un mástil para medir la dirección del

mismo. Estas medidas muestran típicamente que las velocidades superficiales del viento están en el rango de 0-10 m/s, con rotaciones diarias de su dirección en respuesta a vientos descendentes junto a pendientes y al paso de mareas térmicas inducidas por el calentamiento solar. Las velocidades de los vientos son en general pequeñas durante el invierno, y los valores máximos se dan durante la mañana, detectándose ocasionalmente rachas de vientos más fuertes.

5. Componentes del instrumento REMS y operación

REMS (ver figuras 1-3) se compone de cuatro unidades principales: *Boom 1*, *Boom 2*, sensor ultravioleta (UV) y una Unidad de Control o *Instrument Control Unit* (ICU), incluyendo esta última el sensor de presión. Los dos booms están situados en el Mástil principal de MSL; el sensor UV se sitúa en la plataforma superior del rover (ver figura 1) y la ICU en el interior del vehículo. Cada mástil o boom contiene un sensor de viento, y un sensor de temperatura de aire (termistores). El sensor de temperatura de suelo (IR) está en el boom1, y el de humedad en el boom.

El diseño del instrumento ha tenido que adaptarse para satisfacer las fuertes requerimientos necesarios para operar en MSL. Entre otros retos tecnológicos se encuentra la limitación en el peso total de 1,3 kg, o el tener que utilizar la electrónica de preprocesado de los sensores de los booms sin ningún tipo de protección térmica así como el problema de la deposición de polvo sobre el sensor ultravioleta. La masa ha podido ser reducida optimizando la integración de la electrónica, la mecánica y los sensores. Durante la evolución del proyecto se han explorado diferentes opciones de integración de la electrónica de los booms.

El sensor de temperatura del suelo recoge la radiación infrarroja que este emite y a partir de ella se estima su temperatura. El sensor que mide la temperatura del aire lo hace a través de varios termistores colocados en un soporte de tal forma que se vean lo menos perturbados posible por el calor del cuerpo del boom y del rover (ver figura 2). La velocidad y dirección del viento se obtiene a partir de la medida de la velocidad del aire sobre el cuerpo del boom y gracias a tres anemómetros de lamina caliente situados sobre su superficie. Seis fotodiodos de SiC son los que proporcionan información sobre seis rangos de radiación ultravioleta. La presión se mide a partir de la deformación de una membrana y la humedad relativa gracias a los cambios de capacidad que producen las variaciones de humedad en una lamina de un material sensible a este efecto.

El instrumento REMS 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 UV. Estas medidas (con el resto de datos de ingeniería, de salud y de operación del instrumento), se recibirán junto con las medidas de los otros instrumentos y 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 ser decisivos para la programación de actividades del día siguiente. Por ejemplo las

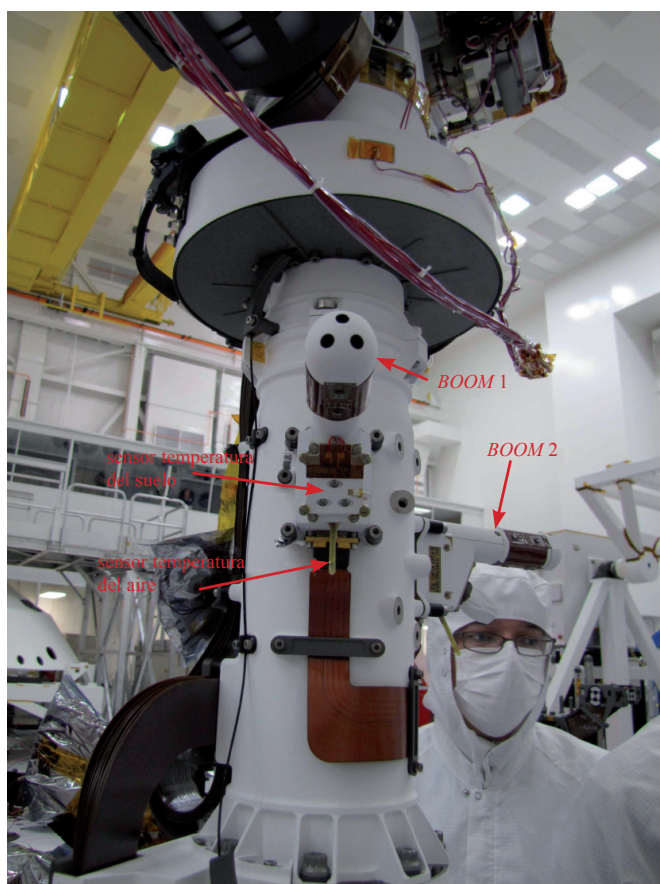


Fig.2. Imagen tomada durante la integración, en una sala limpia, de REMS en MSL, en ella se pueden ver ambos booms. (Crédito: NASA/JPL).

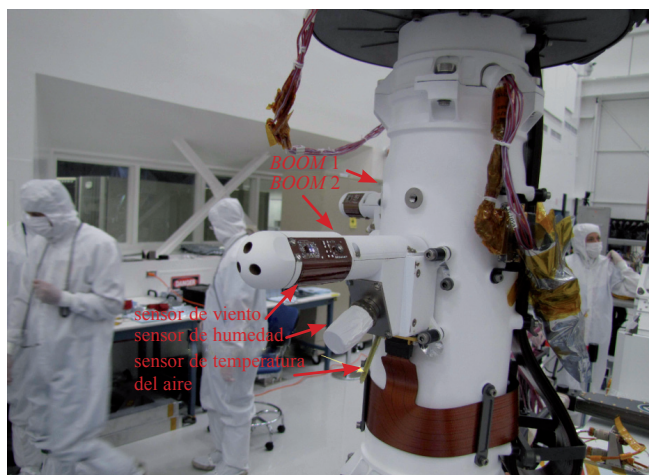


Fig.3. Imagen tomada durante la integración, en la que se puede ver el Boom1 y sobre el que se han identificado los diferentes sensores que lo forman. La electrónica de acondicionamiento de los sensores se encuentra en la parte posterior del boom. (Crédito: NASA/JPL).

oscilaciones térmicas diarias pueden condicionar el período óptimo de operación de otro instrumento, o bien la dirección e intensidad del viento puede influir sobre la operación del vehículo y sus instrumentos. Igualmente, la detección de una anomalía local en el flujo de humedad puede requerir un estudio detallado del contenido hídrico del subsuelo que pudiera ser medida con el instrumento DAN, y una anomalía en el nivel de radiación UV debida a un aumento de actividad solar se enriquece con una medida simultánea 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 de potencia, de comunicación con el satélite, de movilidad del vehículo, de horas óptimas de operación, etc, hacen que todo el flujo de decisiones sobre la operación de los instrumentos y el vehículo tengan que ser consensuada entre un grupo internacional formado por unos trescientos científicos e ingenieros. Esta fase se realiza en tiempo real, a lo largo de un día, empieza con el análisis rápido de los datos recibidos, pasa por las reuniones de discusión científica análisis de resultados y propuesta de actividades y termina con la carga de la secuencia definitiva e integrada de las operaciones programadas para el vehículo y sus instrumentos para el día siguiente. Este es uno de los retos mayores de las operaciones *in-situ*, la rápida toma de decisiones y la re-definición de estrategias de observación a corto, medio y largo plazo en tiempo real.

6. Descripción somera pruebas de la calibración e instalaciones del CAB

La calibración se ha realizado en tres niveles: transductor, sensor y conjunto. En el primer nivel se han calibrado los diferentes transductores de temperatura, presión, humedad,

componentes de los anemómetros, las termopilas del sensor de temperatura del suelo y fotodiodos. A este nivel, por ejemplo, se ha comprobado su respuesta en condiciones nominales y como modifican su respuesta cuando cambia la temperatura o el ángulo de incidencia, como en el caso de los fotodiodos. El segundo nivel se realiza una vez el sensor se ha integrado completamente. Este es el caso por ejemplo del sensor de temperatura del suelo, cuando el conjunto se coloca en condiciones marcianas (presión, composición atmosférica y temperatura) y se analizan sus prestaciones frente a un cuerpo negro. La última prueba, poco antes de enviarse al *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) para su integración en MSL (ver figuras 2 y 3), se hizo cuando todo el instrumento estaba montado e interconectado y se comprobó su correcto funcionamiento.

Ha sido necesario construir dos cámaras atmosféricas específicas para el proyecto. Una de ellas permite verificar el efecto del polvo en el sensor ultravioleta, la respuesta del sensor de presión ante rápidos cambios de presión, o la respuesta del sensor de temperatura de aire ante la contaminación térmica del boom. La otra cámara permite ensayar el sensor de viento y los sensores de aire bajo condiciones de convección forzada. Estas cámaras siguen operativas y disponibles para su uso en el diseño, validación y calibración de futuros instrumentos o componentes espaciales.

Referencias

- [1] HABERLE, R.M., MCKAY, C.P., SCHAEFFER, J., CABROL, N.A., GRIN, E.A., ZENT, A.P. Y QUINN, R., 2001, *On the possibility of liquid water on present-day Mars*, Journal of Geophysical Research, vol. 106, n. E10, pp. 23317-23326.
- [2] NEUMANN, G.A., SMITH, D.E., ZUBER, M.T., 2003, *Two Mars years of clouds detected by the Mars Orbiter Laser Altimeter*, Journal of Geophysical Research, vol. 108, n. E4, artículo #5023.
- [3] WHITEWAY, J.A. ET AL., 2009, *Mars Water-Ice Clouds and Precipitation*, Science vol. 325, n. 5936, pp. 68-70.
- [4] SCHOFIELD, J.T. ET AL., 1997, *The Mars Pathfinder Atmospheric Structure Investigation/Meteorology (ASI/MET) Experiment*, Science vol. 278 no. 5344 pp. 1752-1758.
- [5] CORDOBA-JABONERO, C., ZORZANO, M.-P., SELSIS, F., PATEL, M.R. AND COCKELL, C.S., 2005, *Radiative habitable zones in martian polar environments*. Icarus, **175**, 360-371.
- [6] ZORZANO, M.-P. AND CORDOBA-JABONERO, C., 2007, *Influence of aerosol multiple scattering of ultraviolet radiation on Martian atmospheric sensing*. Icarus, **190**, 492-503.

Equipo de REMS:

J. Gómez-Elvira, C. Armien, L. Castañer, M. Domínguez, M. Genzer, F. Gómez, R. Haberle, A.-M. Harri, V. Jiménez, H. Kahanpää, L. Kowalski, A. Lepinette, J. Martínez-Frías, J. Martín, L. Mora, J. Moreno, S. Navarro, M.A. de Pablo, V. Peinado, A. Peña, J. Polkko, M. Ramos, N. O. Renno, J. Ricart, M. Richardson, J. Rodríguez-Manfredi, J. Romeral, E. Sebastián, J. Serrano, M. de la Torre Juárez, J. Torres, F. Torrero, R. Urquí, L. Vázquez, T. Velasco, J. Verdasca, M.-P. Zorzano, F. J. Martín-Torres
Centro de Astrobiología (INTA-CSIC)
Torrejón de Ardoz - Madrid