

MARTE en la Tierra

Jesús Manuel Sobrado Vallecillo

En los últimos quince años, la cámara MARTE ha recreado el ambiente y el entorno del planeta rojo en el laboratorio. La simulación se postula como una herramienta fundamental en la preparación de misiones espaciales y en el estudio de objetos planetarios como Marte.

Uno de los principales retos científicos y tecnológicos en ciencias planetarias es simular en el laboratorio fenómenos ambientales de los objetos planetarios con mayor relevancia en relación al origen y evolución de la vida. La cámara MARTE del Centro de Astrobiología reúne en un solo equipo la tecnología para poder recrear ambientes extremos como el planeta rojo. En un único sistema se recrean ambientes y eventos atmosféricos como son las tormentas de viento y polvo, así como la compatibilidad y existencia de agua líquida en baja presión. Simulamos el ciclo hidrológico en la atmósfera, en la superficie y en el subsuelo bajo una capa de hielo. La evolución de estos fenómenos se caracteriza en tiempo real mediante sensores y técnicas espectroscópicas, lo que permite analizar y estudiar la instrumentación de carga útil de misiones espaciales, así como compuestos orgánicos o minerales en las condiciones más reales posibles para este tipo de ambiente extremo.

1. Introducción

El planeta rojo que está muy cerca en nuestra imaginación, en nuestras pantallas de televisión y a través de un telescopio, queda lejos de ser habitado por el ser humano, aunque probablemente será visitado en las próximas décadas. Una forma que tenemos de explorarlo desde la Tierra es a través de la simulación. Definimos la simulación en el laboratorio como una *observación inventada*. Intentamos «imitar» aquello que conocemos y vemos con nuestros ojos, por eso partimos de una observación, y es inventada, ya que es imposible reproducir todo un planeta en el laboratorio, por lo que escogemos los parámetros de nuestra observación dando sentido físico a la simulación. Marte es un planeta telúrico del sistema solar que se encuentra en el límite de la zona habitable. Es decir, posee unas condiciones que hacen posible que la vida tal y como la conocemos pueda existir. Sabemos que su superficie es hostil debido a la tenue atmósfera y ausencia de campo magnético, lo que hace que la radiación solar penetre y esterilice su superficie. El único sitio que pudiera albergar vida se encuentra en el subsuelo o coexistiendo con una fina capa de hielo.

A partir de la misión Mars Pathfinder (MPf) en 1996 hemos recuperado nuestro interés que se había iniciado con las primeras misiones Viking de los años setenta del siglo pasado. Durante todo este tiempo se han enviado distintos satélites, sondas y vehículos robóticos al planeta. Ahora mismo poseemos una información muy detallada de su superfi-

cie, de su atmósfera e incluso del subsuelo a través del radar. Tenemos datos que provienen de multitud de instrumentos que operan de manera robótica y son gestionados telemáticamente desde las estaciones del espacio profundo en la Tierra.

Desarrollar toda la tecnología necesaria para llegar a Marte ha sido posible gracias al interés científico que tiene el planeta desde el punto de vista astrobiológico [1]. Una parte del desarrollo de esta tecnología engloba la simulación. Simular permite caracterizar un sistema, modelarlo y trabajar sobre él realizando experimentos para probar hipótesis. Las simulaciones pueden ser virtuales, es decir, las que se realizan a través de modelos físicos con ayuda del *software* y *hardware* que nos permiten validar diseños mecánicos teniendo en cuenta, por ejemplo, cómo se comporta un dispositivo en un fluido, o como absorbe o disipa calor en distintos rangos de vacío. Esto supone una gran ventaja, ya que constituye la herramienta fundamental sobre la que se construyen los modelos de ingeniería de los instrumentos espaciales.

Sin embargo, siempre debemos someter el instrumento y/o las muestras a las condiciones más extremas con las que se va a encontrar cuando llegue, por ejemplo, a la superficie del planeta, a su atmósfera o donde quiera ser enviado. Es ahí donde entra en juego la ciencia y la ingeniería del vacío [2]. La mayoría de los procesos que ocurren en la naturaleza suceden en vacío. Es una tecnología que está presente en la instrumentación relacionada con las ciencias de la vida (biología, química). A partir del interés en explorar el espacio de manera *in situ* es lo que ha llevado a desarrollar potentes sistemas de simulación utilizando esta tecnología [3]. Dependiendo de qué es lo que se quiere probar, los sistemas de vacío se han ido desarrollado para este fin. Por ejemplo, hay cámaras de vacío enormes donde se prueba (certifica) el comportamiento térmico de los instrumentos, materiales y componentes, e incluso de los satélites ya montados, otras donde se valida (certifica) la compatibilidad electromagnética, otras estudian los procesos radiativos y el rendimiento de los paneles solares, etc. En definitiva, existe un catálogo amplísimo de instalaciones específicas para cada caso de estudio. Sin embargo, hay muy pocos sistemas de vacío que se enfoquen de manera global a un planeta debido a la complejidad del mismo. Los distintos ambientes que se pueden presentar en un planeta hacen que normalmente los sistemas de vacío se enfoquen cada uno de manera diferenciada, intentando posteriormente entender cómo se comportaría el instrumento o las muestras de manera global.

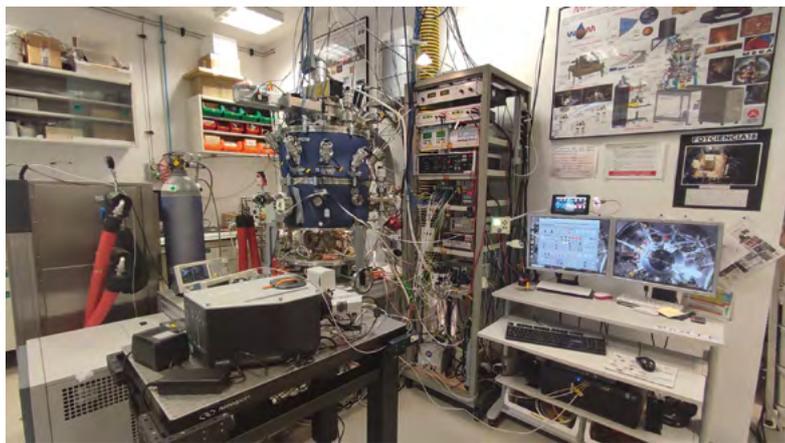


Fig. 1. Sistema de simulación MARTE que incluye: la cámara de vacío, el sistema óptico de espectrometría visible y ultravioleta, los criostatos para el portamuestras de MARTE y del BGR, el carro de gases para la creación de atmósferas y el espectrómetro de masas cuadrupolar mediante bombeo diferencial.

Existe un número casi infinito de problemas o situaciones que hacen que contar con un sistema de simulación sea una buena inversión desde el punto de vista científico y económico:

- Simulación de atmósferas y superficie (presión, composición gaseosa, temperatura, radiación, viento, polvo y ciclo hidrológico «aerosoles»).
- Esterilización biológica o Dry Heat Microbiological Reduction (DHMR).
- Cámara de ensayos funcionales de instrumentación a partir de Technology Readiness Levels (TRL) 4 (Technology validated in the Lab) hasta TRL9 (System prototype demonstration in operational environment).
- Ensayos ambientales con muestras orgánicas
 - Ensayos con polvo.
 - Ciclo del agua (combinación de agua, presión y temperatura).
 - Interfase entre superficie y atmósfera.
- Ensayos de ambientes dobles, como es el que forma el subsuelo bajo una interfase de hielo en el interior de un sistema de vacío.

Este último es el más complejo de todos los sistemas de simulación, ya que se requiere contar con un subsistema en el interior de una cámara de vacío principal.

En el Centro de Astrobiología (CAB) situado en el campus del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) en Torrejón de Ardoz, Madrid, se encuentra la cámara MARTE y el Biological Geological Reactor (BGR) (fig. 1). El módulo BGR es el que simula el subsuelo de Marte bajo una capa de hielo.

2. Caracterización planetaria

Cuando caracterizamos el planeta Marte nos basamos en los datos que hemos obtenido desde las misiones Viking. En la actualidad recibimos datos diarios de su atmósfera y superficie e incluso del subsuelo gracias a los satélites que lo orbitan. La información proviene de vehículos robóticos o *rovers*, sondas o *landers* que estudian la atmósfera y la habitabilidad del planeta *in situ*.

Gracias a las estaciones meteorológicas desarrolladas parcialmente por INTA, como el Rover

Environmental Monitoring Station (REMS), Mars Environmental Dynamics Analyzer (MEDA) y Temperature and Wind sensors for INSight (TWINS) situadas en el *rover* Curiosity de la misión Mars Science Laboratory (MPSL) y en el *rover* Perseverance del Mars 2020, así como en el Lander Insight, tenemos información de primera mano sobre la presión, el viento, la temperatura superficial y ambiental, la radiación ultravioleta y la humedad relativa, que son las principales variables ambientales que caracterizan un planeta. Además, los *rovers* cuentan con espectrómetros de masas que caracterizan la composición de los gases y con la posibilidad de realizar taladros en el suelo que permiten analizar su composición.

En el laboratorio, y utilizando la ciencia y la ingeniería de vacío reproducimos todas estas condiciones creando un entorno similar al del planeta rojo. La principal diferencia del sistema de vacío MARTE con respecto a otros sistemas de simulación es la capacidad de generar eventos atmosféricos como tormentas de polvo y viento y simular el ciclo hidrológico [4-6].

2.1. Presión

La presión en Marte al igual que en la Tierra depende de la distancia (altura) a la que se mida. Es decir, en el monte Olimpo, que es el más alto del sistema solar, la presión tiene un valor de 1 mbar, y en Hellas Planitia, que es una formación geológica debido al impacto de un meteorito, la presión es de 12 mbar, siendo la presión media del planeta de 8 mbar. No obstante, sabemos que bajo ciertas circunstancias especiales (verano y debido a la sublimación del hielo en los polos) es posible que la presión alcance valores alrededor de 20 mbar.

Recrear estos valores de presión y medirlos en el laboratorio es relativamente sencillo. Utilizamos bombas mecánicas que actúan desde presión atmosférica (1013 mbar) hasta los niveles de vacío requeridos. Estas bombas son de membrana, rotativas y *scroll*. Con este tipo de bombas podemos alcanzar presiones de hasta 10^{-3} mbar sin dificultad.

En cuanto a los medidores totales de presión disponemos de varios tipos. Los directos miden la presión independientemente del gas que compone la atmósfera, mientras que los indirectos utilizan, por ejemplo, la conductividad térmica del gas. En Marte, las sondas y vehículos robóticos hacen uso de medidores directos de tipo capacitivo. En el laboratorio es conveniente utilizar de varios tipos y en posiciones distintas. Esto es importante, ya que los indirectos (por ejemplo, el típico Pirani) suelen ser mucho más rápidos y son bastante precisos si la atmósfera es aire o nitrógeno. La ventaja de los capacitivos es su alta precisión, independientemente de los gases de la atmósfera, aunque son más delicados y la temperatura les afecta. Por tanto, es conveniente poseer una colección con varios tipos de medido-

res para el rango de vacío grueso (desde presión atmosférica hasta 10^{-4} mbar), entre los que destacamos como medidores directos el capacitivo y el piezoresistivo, y como medidor indirecto el Pirani y el Termopar.

2.2. Temperatura

La temperatura es una manifestación de la energía de un sistema en equilibrio. Medir la temperatura es complicado y su valor depende de la latitud y de la posición de Marte respecto al Sol. En las estaciones meteorológicas marcianas la temperatura ambiental se mide con termopares y la del suelo y atmósfera cercana a la superficie con termopilas (unión en serie de termopares) caracterizados para medir la emisión de radiación de la superficie en el infrarrojo. En el laboratorio podemos ser más precisos ya que conocemos la temperatura de todas las superficies y del ambiente del sistema de vacío. Utilizamos distintos tipos de sensores, normalmente mediante contacto térmico, excepto para el ambiente. Los más empleados son las resistencias de platino o Resistance Temperature Detector (RTD) de $100\ \Omega$ y $1000\ \Omega$. También utilizamos distintos tipos de termopares como tipo T y K.

En el caso de Marte el rango de temperatura media oscila entre $-90\ ^\circ\text{C}$ y $10\ ^\circ\text{C}$, pudiendo llegar hasta los $-140\ ^\circ\text{C}$ en los polos y $20\ ^\circ\text{C}$ en el cráter Gale en verano. Dada esta variabilidad es difícil establecer una temperatura media del planeta.

Para alcanzar esas temperaturas, MARTE cuenta con dos sistemas criogénicos independientes. El sistema que enfría la superficie del portamuestras, que puede refrigerarse por nitrógeno líquido, alcanza temperaturas de hasta $-160\ ^\circ\text{C}$, aunque dependiendo de las simulaciones utilizamos enfriadores de circuito cerrado. Uno de glicol, con el que alcanzamos $-15\ ^\circ\text{C}$, y otro de aceite de silicona con el que llegamos a $-80\ ^\circ\text{C}$. La cámara MARTE cuenta, además, con un intercambiador de calor de cobre que rodea la parte exterior y con anillos interiores que se pueden inundar de refrigerante. De este modo se consigue adecuar la temperatura no solo en la superficie del portamuestras, también en todo el ambiente. Para obtener resultados óptimos es necesario controlar la atmósfera en el interior de MARTE y permitir una buena conductancia térmica que homogenice la temperatura.

2.3. Radiación

Una diferencia entre Marte y la Tierra es que la atmósfera marciana es tan tenue que su superficie se ve afectada no solo por la radiación que proviene del Sol, sino que también por las partículas ionizantes que llegan desde el espacio profundo. La segunda diferencia con respecto a la Tierra es que, al estar más alejado del Sol, la irradiación es de unos $550\ \text{W}/\text{m}^2$, mientras que en la Tierra es de unos $1.361\ \text{W}/\text{m}^2$.

En el laboratorio se simula la radiación del Sol utilizando fuentes de xenón, que tienen un espectro continuo más parecido al del astro rey. Para complementar la radiación en el rango ultravioleta combinamos la fuente de xenón con una de deuterio, de este modo, en función de los experimentos a realizar, cubrimos todo el espectro electromagnético desde el UV al IR.

La cámara MARTE se diseñó, además, para simular la posición relativa del Sol con respecto a la muestra. En este caso, MARTE cuenta con 6 lámparas halógenas o led que simulan distintos ángulos de iluminación e intensidades. Este elemento es muy importante para comparar imágenes en el laboratorio con las obtenidas de las cámaras de los rovers enviados a Marte.

En Marte se mide la radiación que llega a la superficie utilizando fotodiodos con filtros que acotan la anchura espectral de detección. Estos fotodiodos apuntan hacia el cielo con diferentes ángulos. En MARTE utilizamos los mismos fotodiodos y un radiómetro para caracterizar la radiación y para estudiar la absorción bajo una fina capa de hielo o de agua.

2.4. Composición atmosférica

Los gases que componen una atmósfera determinan multitud de fenómenos físicos, como la transferencia de calor, la participación en reacciones de oxidación o reducción, la ionización, absorción de radiación, etc.

En el planeta rojo la composición atmosférica está formada por cinco gases principalmente: dióxido de carbono al 95 %; nitrógeno al 2,7 %; argón al 1,7 %; y los minoritarios son: vapor de agua al 0,13 % y monóxido de carbono al 0,08 %. En el laboratorio utilizamos botellas de gases de los tres mayoritarios. Para los minoritarios no es necesario utilizar nada especial, ya que el aire de nuestra atmósfera provee los mismos gases con concentraciones al menos similares.

Medimos la composición de gases en tiempo real mediante un espectrómetro de masas cuadrupolar que actúa mediante bombeo diferencial. Es decir, a través de un tubo aspiramos los gases que son introducidos en el espectrómetro de masas, que se encuentra en un sistema de vacío exterior a MARTE a 10^{-5} mbar. Es como si provocásemos una fuga en ese sistema de vacío y los gases de entrada son los de la cámara MARTE o del BGR, de este modo tenemos un conocimiento de la evolución de los iones formados en el cuadrupolo que forman los gases de la atmósfera en cualquier experimento.

2.5. Polvo y viento

Generar partículas en caída libre con movimiento browniano en sistemas de vacío con baja presión constituye un reto tecnológico. Galileo llevaba razón, y en baja presión el rozamiento es mínimo y,

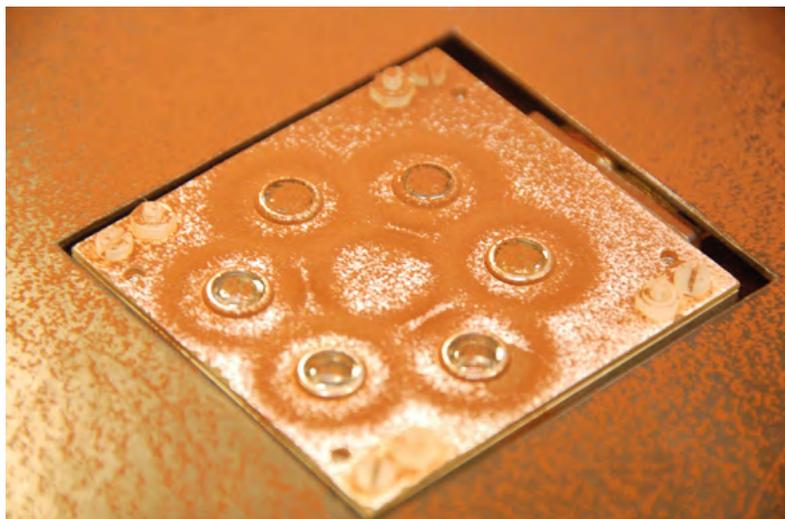


Fig. 2. Experimento de deposición de polvo marciano sobre el modelo de ingeniería del sensor UV de la estación meteorológica REMS a bordo del rover Curiosity. Se aprecia la dispersión del polvo sobre los fotodiodos y el efecto de los imanes de samario cobalto.

por tanto, todas las partículas describen trayectorias balísticas. La masa del planeta rojo es la décima parte de la de la Tierra y su tamaño la mitad, esto hace que la gravedad sea 2,6 veces inferior a la terrestre. Con una presión atmosférica media de tan solo 8 mbar permiten eventos en los cuales el polvo se desplaza en suspensión en la atmósfera y es depositado y removido en función de la climatología, lo que constituye las tormentas de polvo. Este polvo principalmente lo forman silicatos y partículas magnéticas de óxidos de hierro en un 15 %, con un tamaño medio de unas pocas micras. El polvo acaba por depositarse en todas las superficies del planeta, así como sobre la instrumentación que se encuentra en la misma. Este polvo obstruye los paneles solares, los orificios y las ventanas de los sensores cambiando los valores de emisividad de las superficies y modificando muchas variables instrumentales. En definitiva, el polvo constituye un problema en Marte. Algunas de las soluciones adoptadas para minimizar el polvo depositado es la utilización de imanes con una alta coercividad, como samario-cobalto, que crean atracción magnética para las partículas del polvo, despejando el campo óptico. De este modo se maximiza la supervivencia de los fotodiodos en la superficie. Esta solución se implementó en el sensor ultravioleta del REMS en el rover Curiosity (fig. 2).

En la cámara MARTE utilizamos un regolito de polvo marciano fabricado exprofeso para las simulaciones. El polvo es introducido en el sistema de simulación y mediante la vibración de dos tamices cruzados y, una vez tamizado, se deja caer dentro de la cámara de vacío principal por gravedad. Para conseguir que el polvo se comporte de manera browniana, la cámara MARTE posee una altura de 0,6 m entre las tapas inferior y superior, que es por donde entra el polvo. Entre las tapas además creamos un gradiente de temperatura, lo que nos permite generar ciclos convectivos a la presión de 200 mbar, que es la presión bajo la gravedad terrestre para el tamaño de partículas del rego-

lito que hace que el polvo caiga describiendo un movimiento browniano simulando Marte y manteniendo la misma velocidad relativa de caída que en el planeta rojo.

En Marte hay variaciones en la velocidad del viento. Una de las maneras de detectar estas variaciones es mediante la detección de cambios bruscos de presión. Estos cambios de presión se pueden detectar con el medidor de presión capacitivo que llevan los rovers Curiosity y Perseverance. La solución adoptada en la cámara MARTE es la de generar cambios de presión por la apertura de una válvula neumática de conductancia o flujo conocido que comunica la cámara principal con la cámara donde se encuentra el sistema de deposición de polvo. Al cambiar el volumen por la apertura de la válvula, se crea un incremento de presión que se utiliza para verificar la resolución y el tiempo de respuesta del sensor de presión en incrementos de presión a partir de 0,05 mbar. El efecto de la apertura de la válvula causa una depresión en la de más alta presión y una compresión en la de baja presión hasta que las presiones se igualan. Esto nos permite simular pequeños gradientes dinámicos de temperatura y de presión en tiempos de milisegundos para evaluar y medir los cambios de presión que se miden con los modelos de ingeniería de la estación meteorológica utilizada como carga útil en los rovers marcianos.

2.6. Ciclo hidrológico

Sabemos que en Marte hay vapor de agua en la atmósfera y hielo en los polos. Además, por las escorrentías detectadas y restos de deltas debió de haber agua líquida en el pasado.

Los líquidos y el vacío son mundos incompatibles. Es difícil que el agua fluya sobre la superficie de Marte. La presión de vapor, que es la presión de un vapor sobre su líquido, nos indica el valor a partir del cual las moléculas que lo componen se condensan y evaporan. La presión de vapor del agua a temperatura ambiente (25 °C) es de 22 mbar. Esto nos indica que por debajo de 22 mbar a temperatura ambiente el agua se evapora constantemente. Pero en Marte la temperatura y la presión media es muy distinta, y solo es posible que exista agua líquida bajo condiciones específicas en su superficie y no durante mucho tiempo. A pesar de ello, es posible que esto se produzca y que, por tanto, exista un ciclo hidrológico en el planeta. La dificultad está en crear este ciclo hidrológico en el laboratorio, y es donde de nuevo entra en juego la ciencia y la ingeniería del vacío.

La cámara MARTE trabaja habitualmente en dinámico, lo que quiere decir que para mantener una presión constante hay válvulas que regulan la entrada de gases y el bombeo. De este modo se puede modificar la composición de los gases sin alterar la presión total. Además, es posible simular la condensación, la evaporación, la congelación, la

fusión y la sublimación de agua. Utilizamos la combinación de un sistema de inyección a través de una válvula de pulsos que nos permite generar microgotas para depositarse sobre una superficie de modo similar a lo que sucede con el rocío (fig. 3).

También generamos láminas de agua que pueden llegar a recubrir una superficie. Para mantener el agua en estado líquido o congelarla o evaporarla debemos tener en cuenta la temperatura de las superficies y la velocidad de bombeo del sistema de vacío. Ser capaces de extraer todo el calor al agua mediante absorción nos permite generar una lámina de hielo en tiempo real del mismo modo que sucede en la naturaleza, es decir, de arriba abajo. Esta lámina de agua sobre una superficie mantiene el interior aislado térmicamente con el exterior, constituye un reservorio de agua (fusión) y, además, es un filtro a la radiación que proviene del exterior. Una vez formado la lámina de hielo mediante cambios en la temperatura y en la velocidad de bombeo podemos ajustar la humedad relativa (agua en vapor) y la hidratación (agua líquida) sobre un substrato en las condiciones de simulación deseadas.

3. MARTE y el BGR

El conjunto o sistema instrumental donde se simula el planeta rojo en el CAB se llama MARTE [7] y el módulo que simula el subsuelo del planeta rojo se llama BGR. El módulo BGR está dentro de MARTE (fig. 4).

MARTE es más que una cámara de vacío. Es un sistema de simulación formado por varios instrumentos: la cámara de vacío, el espectrómetro de masas por bombeo diferencial, el carro de gases, los criostatos y el espectrómetro que está diseñado para poder realizar Pulse Amplitude Modulation (PAM) y espectrometría en el visible y en el futuro espectroscopía RAMAN. La cámara de vacío la forman dos anillos de acero inoxidable de 0,5 m de diámetro y 0,3 m de altura. Estos anillos se unen mediante bridas de vacío tipo ISO LF. De este modo se puede modificar el volumen de MARTE en función de las necesidades experimentales. En los extremos se encuentran las tapas. En la tapa inferior, que es por donde entran las muestras, se desplaza en vertical y en horizontal, y en la tapa superior se encuentra el acceso a través de una válvula de guillotina a distinta instrumentación, como la subcamara para el sistema de deposición de polvo y carga de aire, y también para alojar distintas fuentes de radiación, como la fuente de xenón. Este conjunto está rodeado por fuera por un intercambiador de calor y por dentro por unos anillos que se pueden inundar de refrigerante. De este modo se puede controlar la temperatura de todo el contenedor. En el interior se encuentra el portamuestras, que posee unas dimensiones de $200 \times 200 \text{ mm}^2$, siendo la parte donde apoyan las muestras de cobre aumentando la conductividad

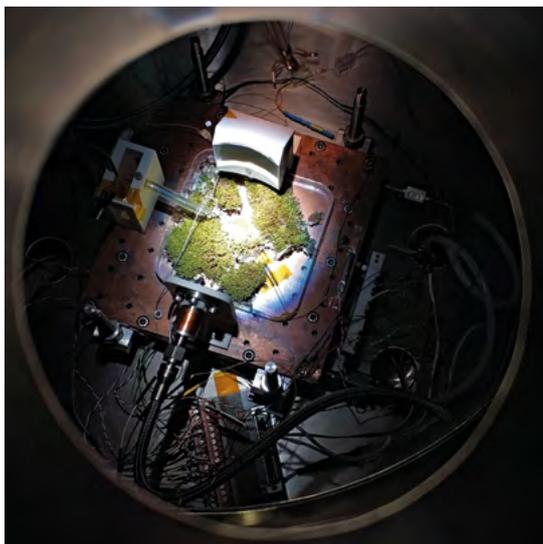


Fig. 3. Experimentos que simulan el ciclo hidrológico en Marte. Sobre el portamuestras de MARTE se ve un musgo *spagnum* que es sometido al ciclo diurno/nocturno marciano, cambiando las condiciones de temperatura, humedad y radiación. Los ciclos marcianos o días (SOLES) son aproximadamente de 24 h, igual que en la Tierra. Se observa en la fotografía el sistema de inyección de microgotas y la pantalla deflectora, así como el tubo por el que se capturan los gases para ser medidos por el espectrómetro de masas.

térmica con las muestras. El portamuestras posee una configuración similar a las mesas ópticas con huecos roscados de M4 equidistanciados 25 mm. Cada anillo (incluyendo las tapas) posee multitud de bridas o puertos con cierres en CF, KF y LF con distintos diámetros, de este modo es fácil incorporar cualquier instrumentación. Teniendo en cuenta el diseño en vacío, la cámara MARTE puede trabajar desde presión atmosférica hasta 10^{-8} mbar. Sobre el cuerpo principal se anexas a los puertos de vacío la siguiente instrumentación: bomba de vacío rotativa, *scroll* y turbo molecular; fuente de radiación de xenón y deuterio, así como un conjunto de 6 lámparas led de intensidad variable y un led RGB utilizado para facilitar el contraste en la captura de fotografías; medidores de vacío Pirani, capacitivo, piezoresistivo y uno combinado Pirani-Penning; sensor de temperatura y hume-

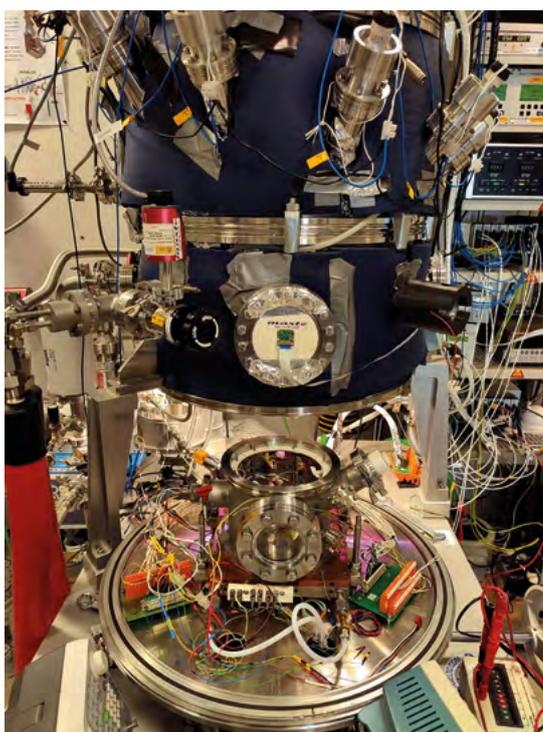
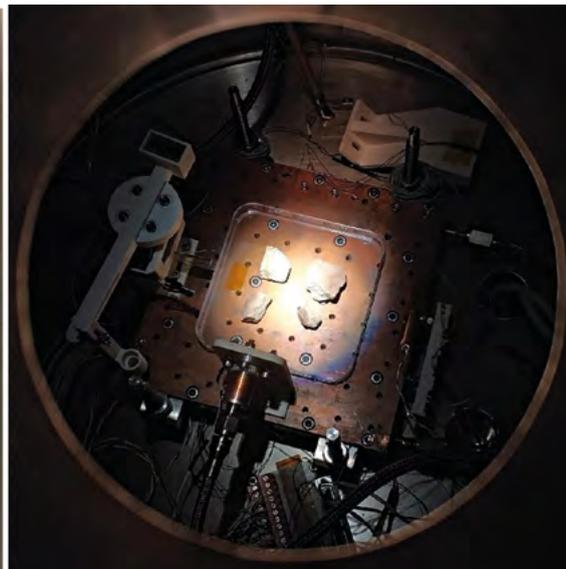
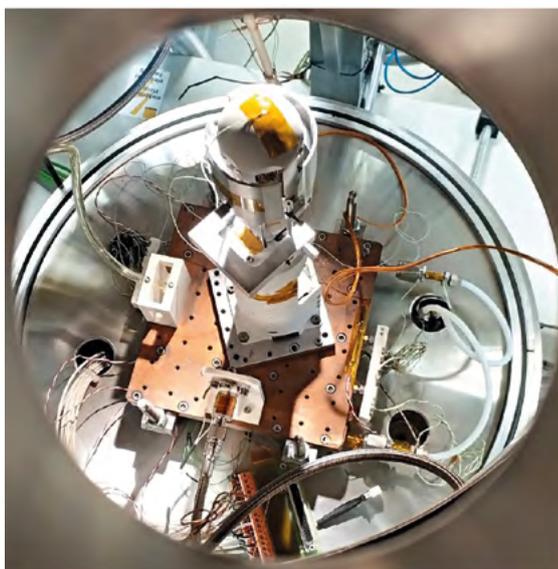


Fig. 4. Fotografía del interior de la cámara MARTE. Se aprecia la tapa inferior abierta y desplazada para la manipulación y preparación experimental. El BGR sin la ventana de hielo está sobre el portamuestras de cobre.

Fig. 5. La fotografía de la izquierda corresponde a pruebas de inercia térmica del modelo de ingeniería del boom (botavara) del sensor de viento de MEDA a bordo del rover Perseverance. La fotografía de la derecha corresponde a la simulación en condiciones marcianas (presión, temperatura, radiación y composición de gases) de un sustrato con bacterias del círculo polar ártico.



dad relativa, sensores de temperatura RTD Pt100 y Pt1000 y termopares tipo K.

El espectrómetro de masas mediante bombeo diferencial se conecta a través de un tubo corrugado KF con MARTE y con el BGR. El control de entrada de gases se realiza a través de una válvula automática de control de flujo. De este modo es posible mantener el espectrómetro de masas cuadrupolar a una presión mejor de 10^{-5} mbar, que es la más adecuada para ionizar los gases y poder conectar el multiplicador de electrones. Con el espectrómetro de masas sabemos en tiempo real la composición de la atmósfera hasta 200 uma (unidad de masa atómica).

Los criostatos suministran el líquido refrigerante al portamuestras y al BGR para el crecimiento y formación de hielo. Se trata en ambos casos de sistemas de refrigeración en circuitos cerrados que utilizan distintos refrigerantes como intercambiadores de calor. El criostato del portamuestras es de glicol y puede alcanzar -15 °C. El criostato del BGR es de aceite de silicona y permite alcanzar -80 °C.

El carro de gases permite la creación de una atmósfera real o imaginaria. Para ello cuenta con un recinto a temperatura controlada y de un mezclador para gases y líquidos. La atmósfera es monitorizada y controlada con la ayuda de un medidor capacitivo de temperatura constante y del espectrómetro de masas.

Por último, se encuentra el sistema óptico, que está formado por un espectrómetro y una combinación de fuentes led de alta intensidad y distintas longitudes de onda. A través de una fibra óptica múltiple y utilizando un doble pasamuros en vacío hacemos incidir y extraemos la señal óptica desde el espectrómetro al interior del BGR. De este modo realizamos espectrometría en el Visible y PAM sobre muestras biológicas para el estudio de la fotosíntesis. En un futuro lo ampliaremos para poder realizar espectroscopía RAMAN.

El BGR es el módulo dedicado al estudio del subsuelo y se encuentra en el interior de la cámara MARTE sobre el portamuestras. Se trata de dos cámaras de acero inoxidable 150 LF. La principal de 0,15 m de altura y la ventana de hielo de 0,12 m de altura. En la cámara principal se encuentran las bridas que permiten mantener el BGR con una atmósfera independiente de MARTE. Al estar el BGR sobre el portamuestras de MARTE se puede establecer un control de la temperatura de su superficie entre -15 °C y 125 °C. La cámara superior es donde se encuentra la interfase de hielo que aísla el interior del BGR con MARTE se enfría hasta -80 °C. Se trata de una ventana de hielo que es crecida y mantenida utilizando la tecnología de inyección Atomic Layer Injection (ALI) y el criostato de aceite de silicona. La ventana de hielo filtra la luz que proviene de las fuentes de radiación xenón y deuterio, aísla térmicamente el interior y hace de reservorio de agua. De este modo se crea un recinto cerrado en el que es posible controlar todas las variables ambientales mientras es posible estudiar y caracterizarlo con las espectrometrías de masas y visible.

Ambos conjuntos instrumentales se controlan y monitorizan a través de un *software ad hoc* realizado con LabVIEW®, siendo posible visualizar el interior de la cámara MARTE a través de la URL: <http://www.uhv.es/sites/mpsl/es/videos.html>.

4. Simulación planetaria. Casos de uso

La atmósfera, la superficie y el subsuelo son nuestros casos de uso, es decir, donde la simulación planetaria es importante para la ciencia y la tecnología y en particular para la astrobiología. Cada una de estas simulaciones poseen restricciones, pero, lejos de ser una limitación, acotan la solución de un problema o investigación al conjunto mínimo de variables que nos define un sistema en particular en el laboratorio.

4.1. La atmósfera y la superficie

Cualquier sistema de vacío está formado por un contenedor que encierra un volumen. El contenedor es la superficie y el volumen interior es la atmósfera. Tradicionalmente todos los sistemas de simulación se basan en este concepto. Ahora bien, dentro del contenedor o cámara de vacío se sitúa el portamuestras, que es la superficie donde se encuentra el objeto que se debe estudiar. El modelo ideal de simulación se basa en este sistema. Somos capaces de simular y caracterizar Marte y su superficie imitando todas las características citadas en el punto 2, excepto el subsuelo, que necesita una interfase con la atmósfera.

Los experimentos en laboratorio están enfocados, desde el punto de vista técnico y tecnológico, a caracterizar y probar instrumentación espacial utilizando modelos de ingeniería de instrumentos como las estaciones meteorológicas REMS, MEDA y TWINS (fig. 5). Es decir, modelos réplica de los que son embarcados en las sondas y rovers con destino a Marte. En la cámara MARTE se han realizado pruebas funcionales en las condiciones habituales en la atmósfera y en la superficie de Marte. Las únicas restricciones de la simulación en el laboratorio la componen las dimensiones de la cámara de vacío y la gravedad. A partir de ahí la cámara MARTE recrea las condiciones particulares del planeta rojo que pueden depender de la estación del año y de si es de día o de noche. Otra simulación importante es la que se realiza para entender los datos que llegan desde Marte. Es posible ajustar la atmósfera ideal para obtener y entender qué le está sucediendo a la instrumen-

tación. De este modo se puede detectar si los datos corresponden a un mal funcionamiento, a la rotura, por ejemplo, de la cápsula hermética TO-05 que encierra una termopila o la rotura parcial de un termopar.

Desde un punto de vista científico la cámara MARTE permite estudiar los efectos de su atmósfera sobre muestras biológicas como algas, líquenes, musgo y cianobacterias. Se estudia su evolución en tiempo real y su adaptación al entorno mediante la espectrometría de masas y la espectrometría en el visible, así como PAM (fluorómetro de clorofila). La incorporación del ciclo hidrológico del agua permite recrear grandes periodos de tiempo en vacío para muestras biológicas, y es ahí donde se estudian los mecanismos de adaptación a entornos extremos.

4.2. El subsuelo

Posiblemente es el mayor avance en la simulación planetaria en planetas telúricos con baja presión. El subsuelo alberga unas condiciones ideales para que un organismo se encuentre protegido en un planeta como Marte en el que tanto la radiación UV como la de partículas atraviese la atmósfera y sea frenada en el suelo o superficie. Sabemos que en algunas áreas del subsuelo marciano hay agua y que los polos están bajo una capa de hielo en su mayor parte de dióxido de carbono. Esas condiciones son más favorables para que la vida pueda emerger y constituyen un buen modelo donde estudiar fenómenos como la creación de oxígeno en ambientes anaerobios producidos por cianobacterias. Además, el subsuelo, al estar aislado de la

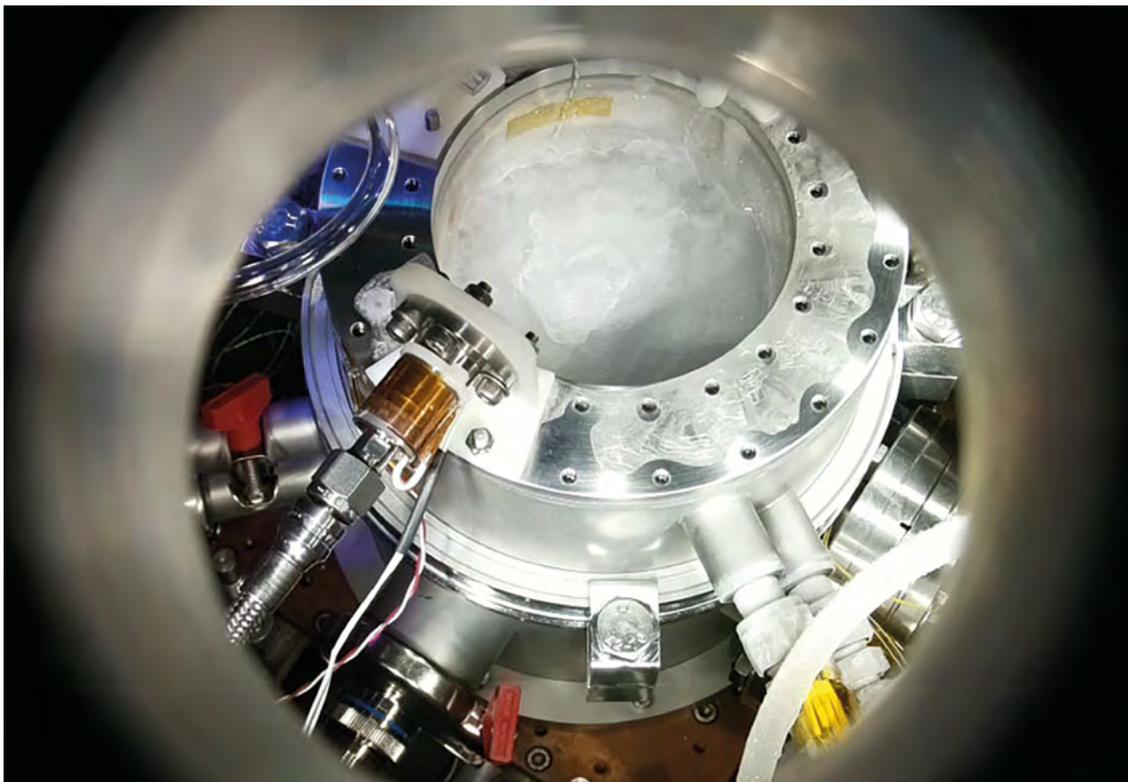


Fig. 6. Formación de la ventana de hielo en el BGR. El sistema de inyección mantiene el grosor de la lámina de agua/hielo y el criostato mantiene la temperatura homogénea. El hielo sella los dos ambientes de vacío creando una interfase que se sublima hacia el exterior y se sublima y funde hacia el interior.

atmósfera, posee un gradiente de temperatura que puede hacer que el agua permanezca en estado líquido y la composición de gases en el interior sea distinta a la de la atmósfera exterior.

El desarrollo del BGR es el que permite el estudio del subsuelo en la cámara MARTE. En nuestro caso una ventana de hielo hace de interfase entre la atmósfera y el interior. Esta ventana de hielo filtra la radiación que proviene de las fuentes de xenón y de deuterio y es un reservorio de agua líquida para el interior del reactor. Además, constituye un aislante térmico de la temperatura exterior. En el reactor se puede modificar la temperatura interna, creándose un gradiente que hace que se genere un ciclo hidrológico en función del ciclo solar (día y noche), lo que favorece la fotorresistencia del material biológico que se encuentra en su interior. Una colección de sensores permite estudiar lo que sucede en tiempo real. Por otro lado, al reducir el volumen donde se encuentra la muestra, los resultados obtenidos mediante espectroscopía de masas son más rápidos, así como los que se obtiene mediante el PAM.

El mayor logro desde el punto de vista tecnológico es cómo se consigue crear una lamina de hielo de 100 mm de diámetro en vacío en tiempo real. Para ello se diseñó un sistema de inyección de agua que permite que el agua se congele y haga de sello sobre una lamina de hielo creada en el exterior de la cámara MARTE (fig. 6).

El agua se reparte homogéneamente por todos los orificios y es congelada de manera rápida por absorción, creando un sello entre el interior y el exterior. Al congelarse el agua, el hielo producido aumenta su volumen, y, al expandirse, sella ambos recintos. Dependiendo de cómo se enfríe el agua, se consiguen modificar las propiedades ópticas del hielo, lo que es importante para cambiar la absorción del mismo a distintas longitudes de onda. Además, es posible hacerlo crecer o decrecer, con lo que se consigue que los fotones más energéticos sean frenados o no a voluntad. Una vez que el hielo y el sello están formados se pueden modificar las condiciones de presión y composición de gases a voluntad, tanto en el interior como en el exterior, creándose dos ambientes dentro del mismo entorno de vacío. El potencial del BGR permitirá demostrar modelos, simular, por ejemplo, la formación de oxígeno en la atmósfera terrestre primitiva, así como estudiar la posibilidad de que organismos simples puedan mantenerse bajo el suelo helado de planetas como Marte.

5. Conclusiones

La ciencia y la ingeniería de vacío, las técnicas experimentales, la simulación espacial y la instrumentación son las herramientas que se utilizan para tener Marte, el planeta rojo, en un laboratorio en la Tierra. La necesidad de conocimiento y la imaginación son los motores que permiten

desarrollar simuladores que constituyen la principal herramienta para validar instrumentación y para avanzar en el estudio de la astrobiología. La cámara MARTE del CAB aglutina la ciencia y la ingeniería del vacío y las innovaciones que ella se implementan facilitan avances en Astrobiología.

Agradecimientos

Especial agradecimiento a Javier Martín Soler y Ricardo Ferrándiz Guibelalde, así como al resto de compañeros del Departamento de Instrumentación del Centro de Astrobiología, a Santiago Martín Iglesias del INTA, a José Ángel Martín Gago y a los técnicos Miguel y Javier del ICMM-CSIC, y a Gonzalo Santoro Domingo del IEM-CSIC.

La cámara MARTE (<http://www.uhv.es/sites/marte/index.html>) del Centro de Astrobiología ha sido financiada desde su creación con fondos propios del INTA y con distintos proyectos del Plan Nacional de Investigación desde el año 2008. Actualmente con el proyecto MPSL (Mimicking Planetary Subsoil in the Laboratory) del plan nacional de investigación del MCIN/AEI/10.13039/501100011033 (código de proyecto: PID2020-114047GB-I00).

Referencias

- [1] D. BARRADO y S. CABAÑERO (eds.), *101 conceptos básicos de astrobiología/Astrobiology 101 concepts* (Ministerio de Defensa-INTA, Madrid, 2022).
- [2] J. M. SOBRADO y J. A. MARTÍN-GAGO, "La tecnología de vacío en la simulación espacial", *Revista Española de Física* **24**(3), 4-11 (2010).
- [3] S. WIFE, R. NITSCHKE, D. J. BURR y A. ELSAESSER, "Mars Simulation Facilities: A Review of Recent Developments, Capabilities and Applications", *Journal of the Indian Institute of Science* **3**, 677-682 (2023).
- [4] J. M. SOBRADO, "Mimicking the Martian Hydrological Cycle: A Set-Up to Introduce Liquid Water in Vacuum", *Sensors (Basel)* **20**(21), 6150 (2020).
- [5] J. M. SOBRADO, J. MARTÍN-SOLER y J. A. MARTÍN-GAGO, "Mimicking Martian Dust: An In-vacuum Dust Deposition System for Testing the Ultraviolet Sensors on the Curiosity Rover", *Review of Scientific Instruments* **86**(10), 105113 (2015).
- [6] J. M. SOBRADO, J. MARTÍN-SOLER y J. A. MARTÍN-GAGO, "Mimicking Mars: A Vacuum Simulation Chamber for Testing Environmental Instrumentation for Mars Exploration", *Review of Scientific Instruments* **85**(3), 035111 (2014).
- [7] J. M. SOBRADO, *Marte en la Tierra* (Unidad Editora del INTA, Madrid, 2016).

Jesús Manuel Sobrado Vallecillo
Centro de Astrobiología,
CAB (INTA-CSIC), Madrid, España

