

BÚSQUEDA DE VIDA EN MARTE

RAFAEL NAVARRO-GONZÁLEZ

Lab. de Química de Plasmas y Estudios Planetarios, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Apdo. Postal 70-543, México D.F. E-mail: navarro@nucleares.unam.mx

RESUMEN

La misión astrobiológica más importante que se ha realizado hasta la fecha ha sido sin duda el proyecto Vikingo de la NASA. Esta misión consistió en tres experimentos biológicos especialmente diseñados para la búsqueda de indicadores de vida en las capas superficiales del suelo marciano. Los tres experimentos dieron resultados positivos. Sin embargo, el análisis de materia orgánica en el suelo marciano demostró la ausencia total de carbono orgánico. Este hallazgo fue utilizado como uno de los argumentos más sólidos en contra de la existencia de vida en la superficie del planeta Marte. Como preparación para futuras misiones a Marte en búsqueda de vida es necesario probar los instrumentos en localidades terrestres que pudieran ser ambientes análogos a Marte. Uno de los desiertos más áridos del planeta es el de Atacama, en el norte de Chile. Estudios químicos y microbiológicos del suelo de Atacama sugieren que el corazón del desierto es en realidad un buen análogo de Marte, ya que no posee vida macroscópica y microscópica, tiene niveles muy bajos de materia orgánica, y sus suelos son muy reactivos. En colaboración con científicos franceses y estadounidenses, estamos preparando una misión robótica dirigida por la NASA para la búsqueda de vida pasada o presente en Marte por lo que el Desierto de Atacama en Chile es el escenario para la preparación de esta misión espacial.

Palabras Clave: Ambientes terrestres análogos a Marte, desierto de Atacama, Marte, Misión Vikingo, vida extraterrestre.

ABSTRACT

Undoubtedly the NASA Viking Project has been the most outstanding astrobiological mission conducted so far. This mission consisted of three biological experiments specially designed for the search of life indicators in the upper layers of the Martian soil. The three experiments yielded positive results, however the analysis of organic matter in the Martian soil showed the lack of organic carbon. In order to prepare future missions, it is important to test the instruments beforehand. This could be done in terrestrial places which are similar to Mars. One of such places is the Atacama desert in northern Chile. This desert is one of the most arid places on Earth. Chemical and microbiological studies of the soil in this area suggest that the driest core of the desert is similar to Mars because there is no macroscopic or microscopic life, the amounts of organic matter are low and the soils are very reactive. In collaboration with French and American scientists, we are developing a NASA robotic mission for the search of extinct or extant life in Mars. We are working in the Atacama desert in Chile as the setting to prepare the space mission.

Key words: Terrestrial environments analogs of Mars, Atacama Desert, Mars, Viking Mission, Extraterrestrial life.

INTRODUCCIÓN

De todos los planetas en nuestro Sistema Solar, Marte es ciertamente el que ha inspirado la mayor especulación sobre vida extraterrestre^{1,4} (Fig. 1). Las ideas de civilizaciones marcianas surgen a finales del siglo XIX, cuando el astrónomo italiano Giovanni Virginio Schiaperelli hace en 1877 las primeras observaciones de la superficie marciana con

Nota: Artículo recibido el 21 de septiembre de 2005 y aceptado el 8 de noviembre del 2005.

un telescopio óptico. Schiaperelli observó marcas lineales en la corteza de Marte a las que denominó en italiano “canali”, cuya traducción al castellano es cauce o canal. Sus hallazgos pasaron inadvertidos en la comunidad científica de su tiempo pero eventualmente fueron apoyados y documentados por otros astrónomos de Europa y los Estados Unidos de América. En particular un aristócrata americano, Percival Lowell aficionado a la astronomía, se interesó por este descubrimiento y construyó un observatorio en Flagstaff, Arizona, para estudiar las marcas



Figura 1. Esta imagen es un mosaico de varias fotografías que muestra la vista que se tendría de Marte desde una nave espacial (cortesía NASA). En el centro de la imagen se puede observar el Sistema de Cañones Valles Marineris de una extensión de 4000 km de largo y de 7 km de profundidad. Se extiende desde la región Noctis Labyrinthus al oeste hasta la Tierra Caótica al este. Muchos antiguos ríos inician desde la Tierra Caótica y corren hacia el norte. Tres volcanes Tharsis son visibles al oeste alcanzando alturas de 10 a 18 km.

de la superficie marciana, a las que él decidió interpretar como canales construidos por el trabajo de seres inteligentes. Basado en una observación meticulosa con un telescopio de 60 centímetros, construyó mapas detallados de la superficie de Marte en los que mostraba zonas claras que relacionaba con zonas desérticas y zonas oscuras que creía eran zonas densas de vegetación. Él, además llegó a concluir que el agua derretida en las zonas polares fluía por los canales largos de más de 1000 kilómetros de longitud, algunos presentes en forma paralela, para irrigar a la hipotética vegetación, y con intercepciones complejas a las que denominó "oasis", que llegan hasta las zonas ecuatorianas. La existencia de una vegetación en Marte fue sugerida en forma independiente por el astrónomo francés, Etienne L. Trouvelot, quien pensaba que los cambios estacionales en la coloración de la superficie de Marte se debían al florecimiento de una vegetación. Lowell creyó que estos canales fueron construidos por seres inteligentes que alguna vez se desarrollaron en la superficie de Marte. Sus puntos de vista los publicó en tres libros dados a conocer entre 1895 y 1908. Sin embargo, al construirse durante la primera mitad del siglo XX telescopios más potentes, los canales de Lowell fueron identificados como formaciones geológicas naturales generadas por la erosión de agua (Fig. 2), por lo que la existencia de vida inteligente en Marte quedaba descartada. En cuanto a los cambios en la coloración de la superficie marciana se seguían atribuyendo a una posible actividad vegetal incrementada por el verano marciano.



Figura 2. La presencia de canales en la superficie de Marte, como éstos en la región Chryse Planitia fotografiados por la misión Vikingo de la NASA, sugiere que alguna vez fluyeron ríos. Antiguamente se creyó que estas estructuras fueron construidas por civilizaciones marcianas cuando no se tenía buena resolución en los telescopios.

Finalmente, esta ilusión óptica fue descartada por las primeras misiones espaciales de la NASA al planeta Marte (las sondas Mariner en la década de los 60). De acuerdo a los resultados de estas misiones, los cambios de coloración de la superficie del planeta se deben a tormentas de arena incrementadas durante el verano.

A medida que nuestro conocimiento sobre Marte aumentó, las posibilidades de vida compleja disminuyeron notablemente, ya que se determinó que su clima era extremadamente frío y seco, por lo que sólo se podía pensar en formas de vida muy simples como bacterias.

LA MISIÓN ESPACIAL VIKINGO

La fascinación con Marte y la posibilidad de vida marciana continuaron hasta la era espacial y se vio claramente con las misiones Vikingo^{5,6} realizadas en 1976. Estas misiones espaciales fueron altamente exitosas y tuvieron como objetivo primordial la búsqueda de vida en Marte⁷. Para realizar esta búsqueda se enviaron dos naves espaciales idénticas que se posaron en lados opuestos del hemisferio norte (Fig. 3). Los resultados de las naves Vikingo mostraron que el suelo marciano es un desierto seco y frío⁸. Su atmósfera⁹ es tenue, de aproximadamente 8 mbar en la superficie y está compuesta de 95% de CO₂ con un 1.5% de N₂. El agua estaba también presente con una abundancia de 0.03% en la atmósfera y de 1-3% en los suelos donde se posaron las naves Vikingo^{9,10}.

EXPERIMENTOS BIOLÓGICOS CON EL SUELO MARCIANO

Estas naves contaban con cámaras que podían captar la presencia obvia de alguna forma de vida macroscópica¹¹. Adicionalmente, se realizaron tres experimentos especialmente diseñados para la búsqueda de indicadores de vida en las capas superficiales del suelo marciano¹²⁻¹⁴ (Fig. 4).



Figura 3. Fotografía del sitio de descenso de la nave Vikingo de la NASA.

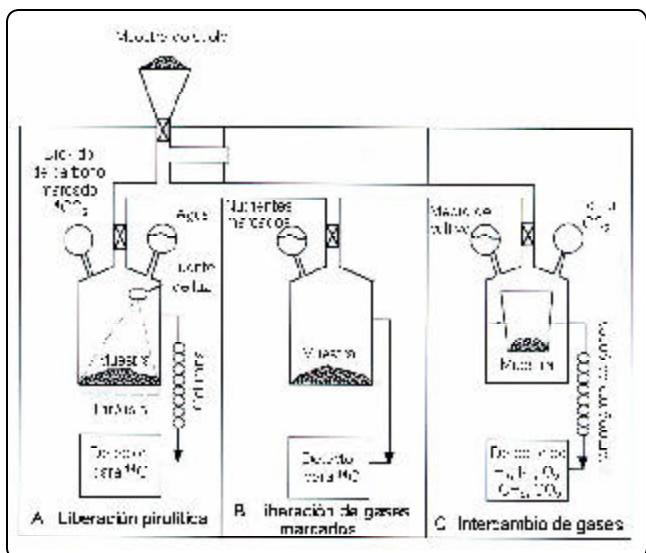


Figura 4. Experimentos biológicos realizados en Marte por las naves Vikingos.

Experimento de liberación pirolítica

El experimento está basado en la suposición de que la vida tendría la habilidad de incorporar dióxido o monóxido de carbono marcado en presencia de luz solar tal como ocurre en la fotosíntesis de las plantas¹⁵⁻¹⁷. El experimento consistió en exponer el suelo marciano humedecido a óxidos de carbono marcados radioactivamente (^{14}CO y $^{14}\text{CO}_2$) en presencia de luz solar simulada en longitudes de onda mayores a los 320 nm con el objeto de fijar compuestos orgánicos a través de la fotosíntesis. Posteriormente, los gases de la cámara de reacción fueron evacuados a una temperatura de 120°C y el suelo fue calentado a 625°C en presencia de óxido de cobre, con el objeto de oxidar el carbón

fijado en dióxido de carbono marcado con carbono-14. Asombrosamente una pequeña cantidad de ^{14}CO y/o $^{14}\text{CO}_2$ fueron fijados en compuestos orgánicos^{18,19}, por ejemplo 100 picomoles $^{14}\text{C}/\text{cm}^3$. La fijación de carbono disminuyó aproximadamente un orden de magnitud en la oscuridad y un 20% al someter el suelo a un tratamiento de calor por 175°C. La reactividad del suelo marciano era muy baja en comparación a aquella encontrada en suelos terrestres; sin embargo, sorprendentemente la fijación de carbono en el suelo marciano es inhibida por la humedad¹⁹.

Experimento de liberación de gases marcados

Este experimento trataba de encontrar la presencia de vida heterotrófica al liberar dióxido de carbono isotópicamente marcado al incorporar material orgánico radioactivo en una solución de nutrientes^{20,21}. El experimento medía la liberación de gas radioactivo ($^{14}\text{CO}_2$) después de adicionar al suelo una mezcla de nutrientes radioactivos con centros de carbono quirial y quiral (ácido fórmico, ácido glicólico glicina, D- y L-alanina, y ácido D y L láctico). Notablemente, los compuestos orgánicos eran consumidos como si hubiera vida presente en el suelo marciano. Los resultados mostraron una liberación rápida y después una lenta de CO_2 proveniente de la solución radioactiva de nutrientes. Este efecto era completamente inhibido al calentar la muestra a 160°C por 3 hrs, y parcialmente destruido a 40–60°C, y relativamente estable por calentamientos cortos a 18°C, pero también desaparecía completamente si la muestra se almacenaba por períodos largos^{18,22,23} a 18°C.

Experimento de intercambio de gases

Finalmente este experimento fue diseñado para determinar si la vida marciana podía metabolizar e intercambiar productos gaseosos en presencia de vapor de agua y una solución acuosa con nutrientes^{24,25}. En este experimento se tomaban muestras periódicamente de los gases acumulados por arriba del suelo marciano, el cual era incubado bajo condiciones de sequedad, humedad y mojado, y los gases eran analizados con un cromatógrafo de gases¹⁸. Variaciones inmediatas se registraron en la composición de los gases cuando los suelos eran expuestos a la humedad o bañados con una solución acuosa de nutrientes. La detección de nitrógeno molecular (N_2), dióxido de carbono (CO_2) y argón (Ar) fueron asociados al intercambio de gases atmosféricos absorbidos en el suelo causada por la adición de vapor de agua (H_2O). Sorprendentemente, ocurrió una rápida liberación de oxígeno molecular (O_2), en niveles de 70–770 nmoles cm^{-3} cuando el suelo era humedecido o bañado con una solución con nutrientes^{18,26}. Al reinyectar más solución al sistema, sólo se liberaba CO_2 , y su tasa de liberación decrecía con el número de recargas. Por otro lado, si se calentaba el suelo marciano previamente a 145°C por 3.5 hrs, había una disminución²⁶ de un 50% en la liberación de oxígeno.

ANÁLISIS ORGÁNICO DEL SUELO MARCIANO

Adicionalmente a los experimentos biológicos, se realizaron

análisis por fluorescencia de rayos X para determinar la composición elemental del suelo en los sitios de descenso de las naves espaciales²⁷. Desafortunadamente desde el punto de vista biológico, el instrumento sólo podía hacer determinaciones de elementos con número atómico superiores al Mg; por lo que no se pudieron realizar medidas directas de los bioelementos C, H, O, y N en el suelo. No obstante, se realizó un estudio químico detallado en busca de materia orgánica en el suelo marciano mediante técnicas de pirólisis acoplada con cromatografía de gases-espectrometría de masas^{28,29}, pir-CG-EM. Se realizaron 4 análisis del suelo marciano: 3 análisis de suelo superficial (0-10 cm) en el sitio de descenso Vikingo 1 y 2, y otro por debajo de una roca en el sitio del Vikingo 2. En estos experimentos, el suelo era sometido a un calentamiento rápido con el propósito de romper las moléculas grandes en fragmentos orgánicos pequeños (pirólisis) y los productos resultantes fueron analizados por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas^{30,31}. Quizá el resultado más sorprendente del análisis del suelo marciano fue la ausencia total de carbono orgánico en ambos sitios de descenso, con límites de detección de partes por billón (ppb) para moléculas de más de dos átomos de carbono y de partes por millón (ppm) para moléculas más pequeñas³⁰. La liberación³¹ de dióxido de carbono y agua, pero ningún otro compuesto orgánico, fue observado al calentar las muestras de suelo a temperaturas de 200°, 350° y 500°C.

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS VIKINGO

Una preocupación importante debido a las respuestas positivas de los experimentos biológicos, fue si el instrumento de pir-CG-EM operó correctamente³¹. Afortunadamente, existía información experimental que demostró sin lugar a dudas la correcta operación del instrumento. Trazas de solventes orgánicos, los cuales fueron utilizados para la limpieza de los módulos de aterrizaje, fueron detectados en la línea base de los cromatogramas, tales como el cloruro de metilo (15 ppb) y el perfluroéter (1-50 ppb). Estos contaminantes fueron detectados previamente en pruebas de prevuelo y de crucero³¹. Por lo tanto, la detección de contaminantes no deseables pero imposibles de eliminar demostró que el instrumento de pir-CG-EM funcionó correctamente. Por consiguiente, la presencia de vida en el suelo marciano estaba en aparente contradicción con los resultados de pir-CG-EM. La ausencia de materia orgánica en los experimentos de pir-CG-EM fue usada como el argumento más sólido en contra de la existencia de vida actual en la superficie de Marte^{13,14,31,32}.

PRESENCIA DE OXIDANTES EN EL SUELO MARCIANO

Existen al menos dos mecanismos no biológicos que podrían generar la acumulación de material orgánico en la superficie. Uno es la importación de orgánicos por la caída de meteoritos, muchos de los cuales sabemos contienen cantidades apreciables de compuestos orgánicos³¹. El otro mecanismo es la producción de materia orgánica por la acción de rayos ultravioleta sobre la superficie en presencia de dióxido de carbono, tal y como fue demostrado por el experimento de liberación pirolítica¹⁹. Por lo

tanto, la ausencia de materia orgánica sugiere que existe un mecanismo que destruye a los compuestos orgánicos en la superficie de Marte.

La actividad química del suelo marciano y la ausencia de materia orgánica es probablemente el resultado de la presencia de uno o más oxidantes presentes en el suelo. La composición química de estos oxidantes no está clara todavía. Basados en los comportamientos de los experimentos de intercambio de gases y de liberación de gases marcados, podría haber al menos tres diferentes oxidantes en la superficie de Marte^{33,34}. Los resultados del experimento de intercambio de gases implican la existencia de un oxidante muy fuerte que es térmicamente estable y capaz de romper las moléculas de agua en oxígeno molecular^{35,36}. Un segundo oxidante fuerte debe existir para explicar los resultados del experimento de liberación de gases marcados. Este oxidante difiere del primero en que es inestable térmicamente³³. Un tercer oxidante débil, por ejemplo ($\text{gamma-Fe}_2\text{O}_3$), se requiere para explicar la oxidación lenta del nutriente radioactivo y liberación de CO_2 en el experimento de liberación de gases marcados³³.

Los posibles oxidantes para el experimento de intercambio de gases³⁴⁻³⁶ incluyen superóxidos como KO_2 , ZnO_2 , y CaO_2 . Estos oxidantes deberían estar presentes en concentraciones de 2-25 ppm para explicar los resultados observados. Un posible oxidante para el experimento de liberación de gases marcados es el H_2O_2 , cuya reacción sería catalizada por los minerales del suelo³⁴. El H_2O_2 se puede producir en la atmósfera por reacciones fotoquímicas con una tasa de 2×10^9 moléculas $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y podrían ser la fuente de oxidantes para el experimento de liberación de gases marcados^{35,36}. La concentración requerida de H_2O_2 para explicar los resultados del experimento de liberación de gases marcados³⁷ es de 1 ppm.

Existen explicaciones alternativas para los experimentos biológicos de las naves Vikingo, que incluyen la sugerencia de reacciones químicas debidas al peroxonitrito producido por la acción de rayos ultravioleta en suelos ricos en contenido de nitratos³⁴. Se ha sugerido que el oxígeno liberado en el experimento de intercambio de gases podría deberse a moléculas de oxígeno físicamente atrapadas en microporos o a la liberación de gases físicamente absorbidos por el suelo marciano sin la participación de algún tipo de reacción química.

DESIERTO MARCIANO

Las naves Vikingo aportaron datos con resultados negativos, pero ambiguos respecto a la pregunta de la existencia de vida marciana. No obstante, una minoría de científicos considera que la respuesta positiva del experimento de liberación de gases marcados se debió a la presencia de vida marciana microbiana³⁸. Basados en los resultados de la misión Vikingo, se puede concluir que Marte es un desierto de extrema hiperaridez en donde sus suelos pueden tener agua en forma de vapor y/o

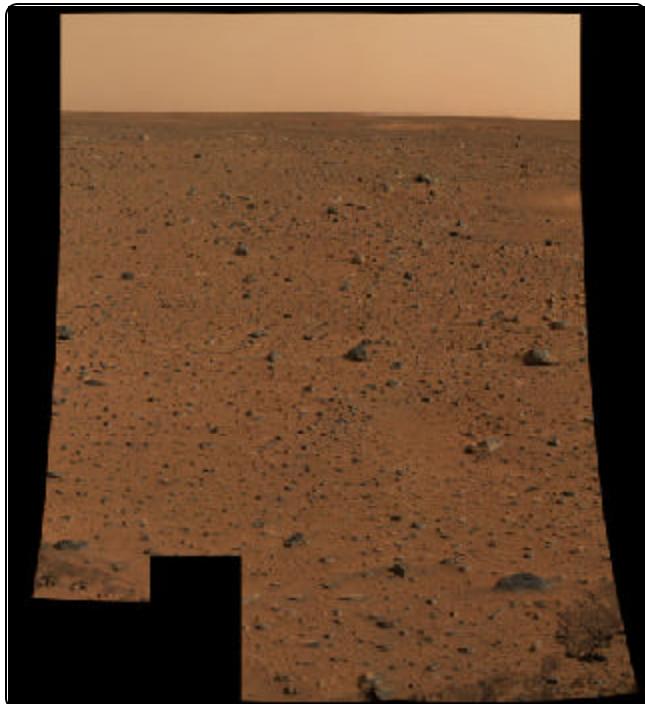


Figura 5. Ésta fue la primera fotografía a color tomada por la cámara panorámica del robot Spirit de la NASA y es la imagen con mayor resolución que tenemos de la superficie de otro planeta.

hielos pero carecen de agua líquida (Fig. 5). Las misiones espaciales posteriores de la NASA para explorar el suelo marciano, como el Mars Pathfinder³⁹ y los Robots Spirit y Opportunity⁴⁰ no se han enfocado específicamente en la búsqueda de vida en Marte. Y aquellas misiones que sí lo han hecho, han fracasado como la misión rusa³⁴ Marte 1996 y la misión británica⁴¹ Beagle-2 en 2004.

MARTE EN LA TIERRA

Como preparación de las misiones Vikingo a Marte fue necesario realizar varias pruebas con los instrumentos en localidades terrestres que pudieran ser ambientes análogos a Marte^{28,29,42}. Un análogo marciano es un sitio en la tierra cuyas condiciones ambientales, características geológicas, atributos biológicos o una combinación de éstas se aproxima en alguna forma a aquéllas esperadas u observables en Marte. Durante la era preVikingo, los Valles Secos de la Tierra del Sur de Victoria en la Antártica sirvieron como el mejor análogo de Marte debido a sus bajas temperaturas, considerando que es el desierto más seco de la Tierra. Sin embargo, aunque en algunas zonas se encontraron zonas estériles, es decir sin presencia de actividad microbiana, los suelos de la zona son ricos en material orgánico, contrario a lo observado en Marte⁴²⁻⁴⁵.

La NASA en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA) están planeando desarrollar una misión espacial en el 2009 para la búsqueda de vida pasada o presente en la superficie y

subsuelo marciano hasta 1 m de profundidad. Por tal motivo, es importante encontrar mejores análogos de Marte en la Tierra para probar nuevas metodologías e instrumentaciones para la búsqueda de indicadores de vida que deberán utilizar ésta u otras misiones subsecuentes. Por esta razón nuestro equipo de investigación multidisciplinario, conformado por investigadores y estudiantes de la UNAM, la NASA y diferentes universidades americanas y francesas, está estudiando diferentes ambientes extremos del planeta en donde la bioproductividad es limitada con el propósito de identificar el tipo de biomolécula o biomarcador que pudiera sobrevivir en las condiciones oxidantes de la superficie marciana y que deberá ser utilizado en la futura exploración de Marte.

UN DESIERTO CARENTE DE VIDA: EL DESIERTO DE ATACAMA EN CHILE

El segundo desierto más árido del planeta después de la Antártica, es el Desierto de Atacama en el norte de Chile. El desierto es templado y se extiende por más de 1200 km entre las latitudes 18° a 30° Sur a lo largo de la costa de Chile y Perú con el Océano Pacífico. McGinnies *et al.* Clasificaron⁴⁶ al Desierto de Atacama como “Ea23” dentro de la escala de Meigs (“E” indica que es extremadamente árido, una “a” que no hay una marcada temporada de precipitación, el “2” indica que las temperaturas promedio durante los meses más fríos oscilan entre los 10°C y 20°C y el “3” indica que las temperaturas promedio entre los meses más cálidos oscilan entre los 20°C y 30°C). Las temperaturas promedios del aire se encuentran entre los 15°C y son sorprendentemente estables a lo largo del año con una variación de tan sólo 2°C.

El Desierto de Atacama es una zona hiperárida debido a los efectos combinados de un sistema de alta presión en el oeste del Océano Pacífico, el efecto secante del flujo frío de las corrientes oceánicas Humboldt con dirección norte, el efecto barrera para el paso de nubes por el oeste debido a la cordillera de la Costa y por el este por la cordillera de los Andes⁴⁷⁻⁵⁰ (Fig. 6). El río Copiapó (27°S) delimita el límite sureño de la zona de extrema aridez del desierto. El norte del Copiapó recibe humedad por neblinas ocasionales llamadas camanchacas por la gente local, o lluvias esporádicas, con una frecuencia de un par por década. Al sur del Copiapó se reciben algunas precipitaciones debidas a incursiones invernales del frente polar. Los elementos principales de la dinámica del clima en la región árida a lo largo de la Costa del Pacífico, y en particular en el Desierto de Atacama, se han descrito con detalle⁵¹⁻⁵⁵. Algunas estimaciones climáticas sugieren que algunos eventos de lluvia ocurrieron entre 10,000 y 16,000 años, pero la lluvia no ha penetrado el corazón del desierto⁵⁶. Además estudios paleoclimáticos de los que se han logrado obtener registros de 325,000 años en el Salar de Atacama sugieren que han ocurrido algunos eventos episódicos de lluvia^{57,58}. Un estudio meteorológico reciente de la zona más árida del Desierto de Atacama demuestra que en cuatro años de estudio (1994-1998), sólo una noche ocurrió un episodio de lluvia

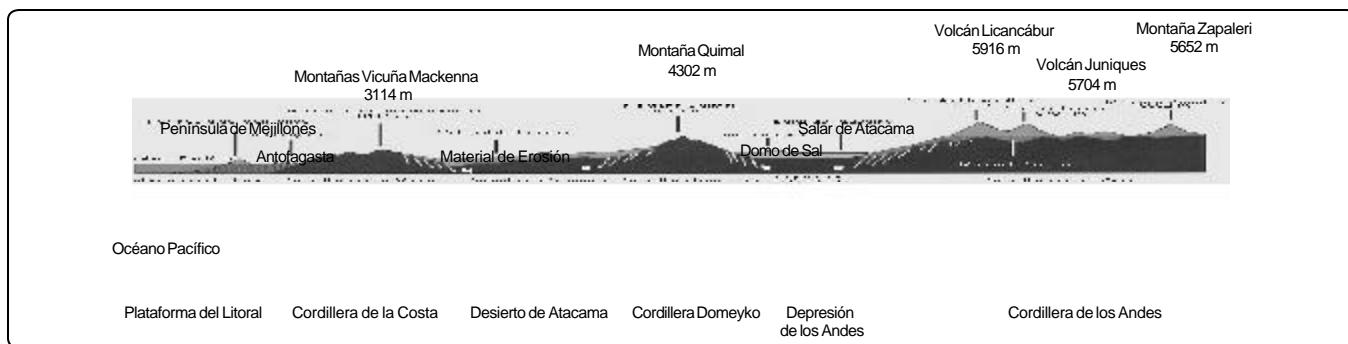


Figura 6. Perfil topográfico de la región desértica de Atacama en la cercanía de Antofagasta, Chile.

de 2.3 mm, el cual se cree se debió a la condensación de la fuerte neblina o camanchaca⁵⁹.

La evidencia geológica y mineralógica sugiere que la zona más árida del desierto ha permanecido en estas condiciones por más de 10-15 millones de años^{60,61}, convirtiéndolo en el desierto más antiguo del planeta.

Atacama es un desierto templado y aunque no es extremadamente caliente, es uno de los desiertos más áridos en el mundo. Las partes más áridas del Desierto de Atacama se localizan entre los 22° a 26° Sur y los 70° Oeste en un amplio valle formado entre la cordillera de la Costa y la cordillera media⁴⁷ (Fig. 7). La edad y aridez del Desierto de Atacama son probablemente responsables de la acumulación de los depósitos más grandes de nitratos en el mundo⁶². Los nitratos son probablemente de origen atmosférico⁶² y no son consumidos por la vida o transportados por el agua, debido a la extrema aridez que ha hecho que se hayan acumulado en concentraciones significativas debido a la edad del desierto. A finales del siglo XIX y principios del siglo XX se realizaban excavaciones en las minas de Atacama, ya que el nitrato se usaba como fertilizante y como explosivo. Sin embargo, la minería del nitrato fue abandonada después del descubrimiento de la síntesis industrial de amoniaco mediante el proceso Haber.

Los Experimentos Vikingo en Atacama

En el año 2001 recibí una invitación del Dr. Christopher McKay de la NASA para realizar una expedición en octubre de ese año al corazón del Desierto de Atacama. En esa ocasión se realizó un estudio detallado del contenido de materia orgánica en el suelo implementando la misma técnica que usaron las naves Vikingo por pir-CG-EM, pero en lugar de realizar las mediciones *in situ*, se tomaron muestras en el Desierto de Atacama y se llevaron al Laboratorio de Química de Plasmas y Estudios Planetarios del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM para su análisis subsecuente⁶³. Los resultados fueron extremadamente interesantes, ya que por primera vez no se encontraba materia orgánica en el suelo del planeta Tierra, el cual se creía dominado por la vida en forma global. En esa misma expedición, el Dr. Fred Rainey de la Universidad de Louisiana, colectó suelos de las

mismas localidades y buscó la presencia de bacterias heterótrofas mediante técnicas convencionales de microbiología. Los resultados fueron sorprendentes, ya que se encontró que los suelos eran totalmente estériles. Los resultados químicos y microbiológicos sugerían que el corazón del Desierto de Atacama es en realidad un buen análogo de Marte basado en los resultados de las naves Vikingo⁶⁴. Para tratar de explicar la ausencia de materia orgánica y presencia de vida, se realizó una segunda expedición al Desierto de Atacama un año después (octubre de 2002) con los mismos integrantes del equipo. En esta ocasión, diseñamos un experimento de liberación de gases marcados similar al elaborado por las naves Vikingo, pero mucho más sofisticado. El experimento consistió en incubar suelo del Desierto



Figura 7. Fotografía del Desierto de Atacama al norte de Chile tomada por el transbordador espacial de la NASA. El Desierto de Atacama se encuentra geográficamente aislado a la penetración de nubes por la cordillera de la Costa al oeste y de los Andes al este.

de Atacama con tres diferentes nutrientes marcados con carbono-13. En un experimento se utilizó ácido fórmico marcado, ya que es el compuesto que se cree se descompuso en el suelo marciano. En los otros dos experimentos se colocaron mezclas equimolares de dos moléculas quirales: alanina y glucosa. En los experimentos se añadieron estas moléculas de tal forma que los organismos pudieran (*L*-alanina + *D*-glucosa) o no pudieran (*D*-alanina + *L*-glucosa) desarrollar metabolismo. Las muestras fueron llevadas a nuestro laboratorio en la UNAM y obtuvimos resultados extraordinarios. En todos los casos hubo descomposición de material orgánico, pero dado que la tasa de descomposición fue igual para el par *L*-alanina + *D*-glucosa y *D*-alanina + *L*-glucosa, se concluyó que la descomposición fue enteramente abiótica. Estos resultados confirman que los suelos del Desierto de Atacama son oxidantes y capaces de destruir el material orgánico, tal y como ocurrió en Marte durante los experimentos de las naves Viking. Con el objeto de poder entender la naturaleza del material oxidante presente en el suelo de Atacama y de delimitar con mayor precisión la zona más reactiva, se ha realizado otra expedición en abril del 2003 para buscar superóxidos y peróxido de hidrógeno en el suelo. Implementamos una técnica enzimática para la detección de estas especies químicas, y nuestras detecciones fueron positivas, pero las concentraciones de estos oxidantes están por debajo del límite esperado para explicar la descomposición del material orgánico en nuestro experimento de liberación de gases marcados. En noviembre del 2003 y junio del 2004 se han realizado nuevas expediciones a Atacama con el propósito de delimitar la extensión de los suelos tipo marciano. Los resultados obtenidos a la fecha demuestran que el Desierto de Atacama es el mejor análogo de Marte en la Tierra aunque no hemos podido identificar la naturaleza del o los oxidantes del suelo (Fig. 8). Por consiguiente, nuestras investigaciones se han recopilado en un artículo de alto impacto⁶⁵.

CONCLUSIONES

Nuestros estudios en el Desierto de Atacama han sido considerados de gran importancia para las agencias espaciales de los Estados Unidos, NASA y de la Comunidad Europea, ESA, ya que se podrán probar en el Desierto de Atacama las nuevas tecnologías para la búsqueda de vida en Marte. Los robots Spirit y Opportunity de la NASA que están estudiando en este momento el suelo marciano, han enviado las imágenes con mayor resolución que se tienen hasta la fecha de su superficie. Es impresionante la gran similitud del suelo marciano con el del Desierto de Atacama. En colaboración con científicos franceses y americanos estamos preparando una misión espacial para el año 2009 con el fin de continuar la búsqueda de vida pasada o presente en el subsuelo de Marte y estamos utilizando el Desierto de Atacama en Chile como escenario para la preparación de esta misión espacial.

AGRADECIMIENTOS

La investigación científica del autor fue realizada con los apoyos económicos otorgados por la UNAM (DGAPA- IN101903),



Figura 8. Imagen de la zona más árida del Desierto de Atacama en el norte de Chile en donde virtualmente no ha habido precipitación pluvial en los últimos 10 a 15 millones de años. Un episodio de lluvia de 2 a 4 mm suele ocurrir una vez cada 10 años.

CONACyT (45810-F) y el programa de la NASA (NASA Astrobiology Science and Technology for Exploring Planets Program).

REFERENCIAS

1. Lederberg, J. & Sagan, C. Microenvironments for Life on Mars. *Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)* **48**, 1473-1475 (1962).
2. Salisbury, F.B. Martian Biology. *Science* **136**, 17-26 (1962).
3. Rea, D.G. Evidence for Life on Mars. *Nature* **200**, 114-116 (1963).
4. Sagan, C. & Lederberg, J. The Prospects for Life on Mars: A Pre-Viking Assessment. *Icarus*, **28**, 291-300 (1976).
5. Soffen, G.A. Status of the Viking Missions. *Science* **194**, 57-59 (1976).
6. Soffen, G.A. Scientific results of the Viking Missions. *Science* **194**, 1274-1276 (1976).
7. Soffen, G.A. The Viking Project. *J. Geophys. Res.* **82**, 3959-3970 (1977).
8. Hess, S.L., Henry, R.M., Leovy, C.B., Ryan, J.A. & Tillman, J.E. Meteorological Results from the Surface of Mars: Viking 1 and 2. *J. Geophys. Res.* **82**, 4559-4574 (1977).
9. Owen, T. et al. The composition of the atmosphere at the surface of Mars. *J. Geophys. Res.* **82**, 4635-4639 (1977).
10. Farmer, C.B., Davies, D.W., Holland, A.L., LaPorte, D.D. & Doms, P.E. Mars: Water vapor observations from the Viking orbiters. *J. Geophys. Res.* **82**, 4225-4248 (1977).
11. Levinthal, E.C., Jones, K.L., Fox, P. & Sagan, C. Lander imaging as a detector of life. *J. Geophys. Res.* **82**, 4468-4478 (1977).
12. Klein, H.P. General constraints on the Viking Biolog investigations. *Origins of Life* **7**, 273-279 (1976).
13. Klein, H.P. The Viking biological experiments on Mars. *Icarus* **34**, 666-674 (1978).
14. Klein, H.P. The Viking mission and the search for life on Mars. *Rev. Geophys. Space Phys.* **17**, 1655-1662 (1979).
15. Hubbard, J.S., Hobby, G.L., Horowitz, N.H., Geiger, P.J. & Morelli, F.A. Measurement of $^{14}\text{CO}_2$ assimilation in soils: An experiment for the biological exploration of Mars. *Appl.*

- Microbiol.* **19**, 32-38 (1970).
16. Horowitz, N.H., Hubbard, J.S. & Hobby, G.L. The carbon-assimilation experiment: The Viking Mars Lander. *Icarus* **16**, 147-152 (1972).
 17. Hubbard, J.S. The pyrolytic release experiment: Measurement of carbon assimilation. *Origins of Life* **7**, 281-292 (1976).
 18. Klein, H.P. *et al.* The Viking biological investigation: Preliminary results. *Science* **194**, 99-105 (1976).
 19. Horowitz, N.H., Hobby, G.L. & Hubbard, J.S. The Viking carbon assimilation experiment: Interim report. *Science* **194**, 1321-1322 (1976).
 20. Levin, G.V. Detection of metabolically produced labeled gas: The Viking Mars lander. *Icarus* **16**, 153-166 (1972).
 21. Levin, G.V. & Straat, P.A. Labeled release. An experiment in radiorespirometry. *Origins of Life* **7**, 293-311 (1976).
 22. Levin, G.V. & Straat, P.A. Viking labeled release biology experiment. Interim results. *Science* **194**, 1322-1329 (1976).
 23. Levin, G.V. & Straat, P.A. Recent results from the Viking labeled release experiment on Mars. *J. Geophys. Res.* **82**, 4663-4667 (1977).
 24. Oyama, V.I. The gas exchange experiment for life detection: The Viking Mars Lander. *Icarus* **16**, 167-184 (1972).
 25. Oyama, V.I., Berdahl, B.J., Carle, G.C., Lehewalt, M.E. & Ginoza, H.S. The search for life on Mars: Viking 1976. Gas changes as indicators of biological activity. *Origins of Life* **7**, 313-333 (1976).
 26. Oyama, V.I. & Berdahl, B.J. The Viking gas exchange experiment results from Chryse and Utopia surface samples. *J. Geophys. Res.* **82**, 4669-4676 (1977).
 27. Toulmin, P., III *et al.* Geochemical and mineralogical interpretation of the Viking organic chemical results. *J. Geophys. Res.* **82**, 4625-4634 (1977).
 28. Simmonds, P.G., Shulman, G.P. & Stemberger, C.H. Organic analysis by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry. A candidate experiment for the biological exploration of Mars. *J. Chromat. Sci.* **7**, 36-41 (1969).
 29. Biemann, K. Test results on the Viking gas chromatograph-mass spectrometry experiment. *Origins of Life* **5**, 417-430 (1974).
 30. Biemann, K. *et al.* The search of organic and volatile inorganic compounds in two surface samples from the Chryse Planitia region on Mars. *Science* **194**, 72-76 (1976).
 31. Biemann, K. *et al.* The search of organic substances and inorganic volatile compounds in the surface of Mars. *J. Geophys. Res.* **82**, 4641-4658 (1977).
 32. Biemann, K. The implications and limitations of the findings of the Viking organic analysis experiment. *J. Mol. Evol.* **14**, 65-70 (1979).
 33. Zent, A.P. & McKay, C.P. The chemical reactivity of the martian soil and implications for future missions. *Icarus* **108**, 146-157 (1994).
 34. McKay, C.P. *et al.* The Mars oxidant experiment (MOx) for Mars '96. *Planet. Space Sci.* **46**, 769-777 (1998).
 35. Yen, A.S., Skim, S.S., Hecht, M.H., Frant, M.S. & Murray, B. Evidence that the reactivity of the martian soil is due to superoxide ions. *Science* **289**, 1909-1912 (2000).
 36. Yen, A.S. Unusual reactivity of the martian soil: Oxygen release upon humidification. *Lunar and Planetary Science* **XXXIII**, 1760 (2002).
 37. Levin, G.V. & Straat, P.A. A search for a nonbiological explanation of the Viking labeled release life detection experiment. *Icarus* **45**, 494-516 (1981).
 38. Levin, G.V. & Straat, P.A. Antarctic Soil No. 726 and Implications for the Viking Labeled Release Experiment. *J. Theor. Biol.* **91**, 41-45 (1981).
 39. Rieder, R. *et al.* The Chemical Composition of Martian Soil and Rocks Returned by the Mobile Alpha Proton X-ray Spectrometer: Preliminary Results from the X-ray Mode. *Science* **278**, 1771-1774 (1997).
 40. Kerr, R.A. Planetary science - A wet early Mars seen in salty deposits. *Science* **303**, 1450 (2004).
 41. Butler, D. Mars satellite flies into hunt for lost Beagle 2. *Nature* **427**, 5 (2004).
 42. Horowitz, N.H. *et al.* Sterile soil from Antarctic: Organic analysis. *Science* **164**, 1054-1056 (1969).
 43. Horowitz, N.H., Cameron, R.E. & Hubbard, J.S. Microbiology of the Dry Valleys of Antarctic. *Science* **176**, 242-245 (1972).
 44. Friedmann, E.I. & Ocampo, R. Endolithic blue green-algae in the Dry Valleys: Primary producers in the Antarctic Desert ecosystem. *Science* **193**, 1247-1249 (1976).
 45. Friedmann, E.I. Endolithic microorganisms in the Antarctic cold desert. *Science* **215**, 1045-1053 (1982).
 46. McGinnies, W.G., Goldman, B.J. & Paylore, P. *Deserts of the World* (University of Arizona Press, Tucson, 788 pp., 1968)
 47. Börgel, R.O. The coastal desert of Chile. En *Coastal Deserts, Their Natural and Human Environments* (eds. Amiran D.H. & Wilson, A.W.) 111-114 (University of Arizona Press, Tucson, 1973).
 48. Caviedes, C.L. A climatic profile of the north Chilean desert at latitude 20 south. En *Coastal Deserts, Their Natural and Human Environments* (eds. Amiran D.H. & Wilson, A.W.) 115-121 (University of Arizona Press, Tucson, 1973).
 49. Miller, A. The climate of Chile. En *World Survey of Climatology, Vol. 12: Climate of Central and South America* (ed. Schwerdfeger, W.) 113-145 (Elsevier, Amsterdam, 1976).
 50. Rundel, P.W. *et al.* The phytogeography and ecology of the coastal Atacama and Peruvian deserts. *Aliso* **13**(1), 1-49 (1991).
 51. Lettau, H. Dynamics and energetic factors which cause and limit aridity along South America's Pacific coast. En *World Survey of Climatology, Vol. 12: Climate of Central and South America* (ed. Schwerdfeger, W.) 188-192 (Elsevier, Amsterdam, 1976).
 52. Ruttlant, J. & Ulriksen, P. Boundary layer dynamics of the extremely arid northern part of Chile: the Antofagasta Field Experiment. *Boundary Layer Meteor.* **17**, 41-55 (1979).
 53. Abreu, M.L. & Bannon, P. Dynamics of the South American coastal desert. *J. Atmos. Sci.* **50**, 2952-2964 (1993).
 54. Ruttlant, J., Fuenzalida, H., Torres R. & Figueroa, D. Ocean-atmosphere-land interaction in the Antofagasta Region (Chile, 23 S): the DICLIMA field experiment. *Rev. Chilena Historia Natural* **71**, 405-427 (1998).
 55. Ruttlant, J. *et al.* Coastal climate dynamics of the Antofagasta region (Chile, 23 S): the 1997-1998 DICLIMA experiment. En *6th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Santiago, 3-7 April 2000*, (2000), American Meteorological Society, Boston, pp. 268-269 (2000).
 56. Betancourt, L.J., Latorre, C., Rech, J.A., Quade, J. & Rylander, K. AA 22,000-Year Record of Monsoonal Precipitation from Northern Chile's Atacama Desert. *Science* **289**, 1542-1546 (2000).
 57. Bobst, A.L. *et al.* A 106 ka paleoclimate record from drill core of the Salar de Atacama, northern Chile. *Palaeogeography*

- Palaeoclimatology Palaeoecology* **173**, 21-42 (2001).
58. Lowenstein, T.K. *et al.* An assessment of stratigraphic completeness in climate-sensitive closed-basin lake sediments: Salar de Atacama, Chile. *J. Sedimentary Res.* **73**, 91-104 (2003).
59. McKay, C.P. *et al.* Temperature and Moisture Conditions for Life in the Extreme Arid Region of the Atacama Desert: Four Years of Observations Including the El Niño of 1997–1998. *Astrobiology* **3**, 393-406 (2003).
60. Erickson, E. The Chilean nitrate deposits. *Amer. Scientist* **71**, 366–374 (1983).
61. Berger, I.A. & Cooke, R.U. The origin and distribution of salts on alluvial fans in the Atacama Desert, Northern Chile. *Earth Surface Processes Landforms* **22**, 581-600 (1997).
62. Böhlke, J.K., Erickson, G.E. & Revesz, K. Stable isotope evidence for an atmospheric origin of desert nitrate deposits in northern Chile and southern California, USA. *Chemical Geology* **136**, 135-152 (1997).
63. Navarro-González, R., Molina, P. & McKay, C.P. Organic Characterization of Atacama Soils along a North-To-South Precipitation Gradient, *Proc. 3rd European Workshop on Exo/Astrobiology. Mars: The search for life*, Madrid (Spain), 18-20 November 2003, ESA Special Publication SP-545, pp. 245-248 (2004).
64. Navarro-González, R. *et al.* Mars-Like Soils in the Yungay Area, the Driest Core of the Atacama Desert in Northern Chile. In *Life in the Universe* (eds. Chela-Flores, J., Owen, T., Raulin, F. & Seckbach, J.) 211-216 (Kluwer Academic Pub., Dordrecht, 2004).
65. Navarro-González, R. *et al.* Mars-like soils in the Atacama Desert, Chile, and the dry limit of microbial life. *Science* **302**, 1018-1021 (2003).