

# **Preservación de actividad biológica en condiciones extremas como modelo para la búsqueda de vida en Marte**

## **Preservation of biological traces under extreme conditions as a proxy to search for life in Mars**

**David C. Fernández Remolar**

*Centro de Astrobiología (INTA-CSIC). Ctra. de Ajalvir km 4  
E-28850 Torrejón de Ardoz (Madrid). España.  
fernandezrd@cab.inta-csic.es*

**PALABRAS CLAVE: Preservación, ambientes extremos, Astrobiología, Marte**

**KEY WORDS: Preservation, extreme environments, Astrobiology, Mars**

### RESUMEN

Las últimas misiones robóticas a Marte muestran que el planeta rojo ha tenido una actividad térmica manifestada en forma de grandes edificios volcánicos desde su formación. Como consecuencia, el planeta ha mantenido una hidrosfera activa que ha surgido de forma episódica y cuya duración máxima ha podido abarcar cientos de millones de años. El resultado de dicha evolución ha permitido el desarrollo de diferentes ambientes asociados al agua, pero extremos si se comparan con las condiciones terrestres normales. Por esta razón, parte de la búsqueda racional de trazas de vida en Marte se basa en el conocimiento sobre el desarrollo y preservación de la vida en aquellos ambientes terrestres cuyas condiciones se aproximan a las que tuvieron lugar en los hábitat potenciales sostenidos por la presencia de hidrosferas transitorias del planeta rojo. En este trabajo se muestran algunos ejemplos de ambientes extremos donde la preservación de la información biológica se ha previsto inviable pero ha resultado ser de tal detalle que en ciertos casos alcanza el grado molecular.

### ABSTRACT

The last robotic missions to Mars show that Mars has had a thermal activity manifested in the form of large volcanoes since its formation. As a result, the planet has maintained an active hydrosphere that has emerged episodically, which maximum length has spanned hundreds of millions of years. The result of this evolution has allowed the development of various water-related environments, which had extreme conditions when compared to normal terrestrial conditions. For this reason, part of the rational search for traces of life on Mars is based on knowledge of the development and preservation of terrestrial life in environments where conditions are close to those that took place in the potential habitat sustained by the presence of the transient hydrospheres of the red planet. This paper shows some examples of extreme environments where preservation of

biological information has been inferred unviable, but resulting of such a great detail that in some cases reaches the molecular level.

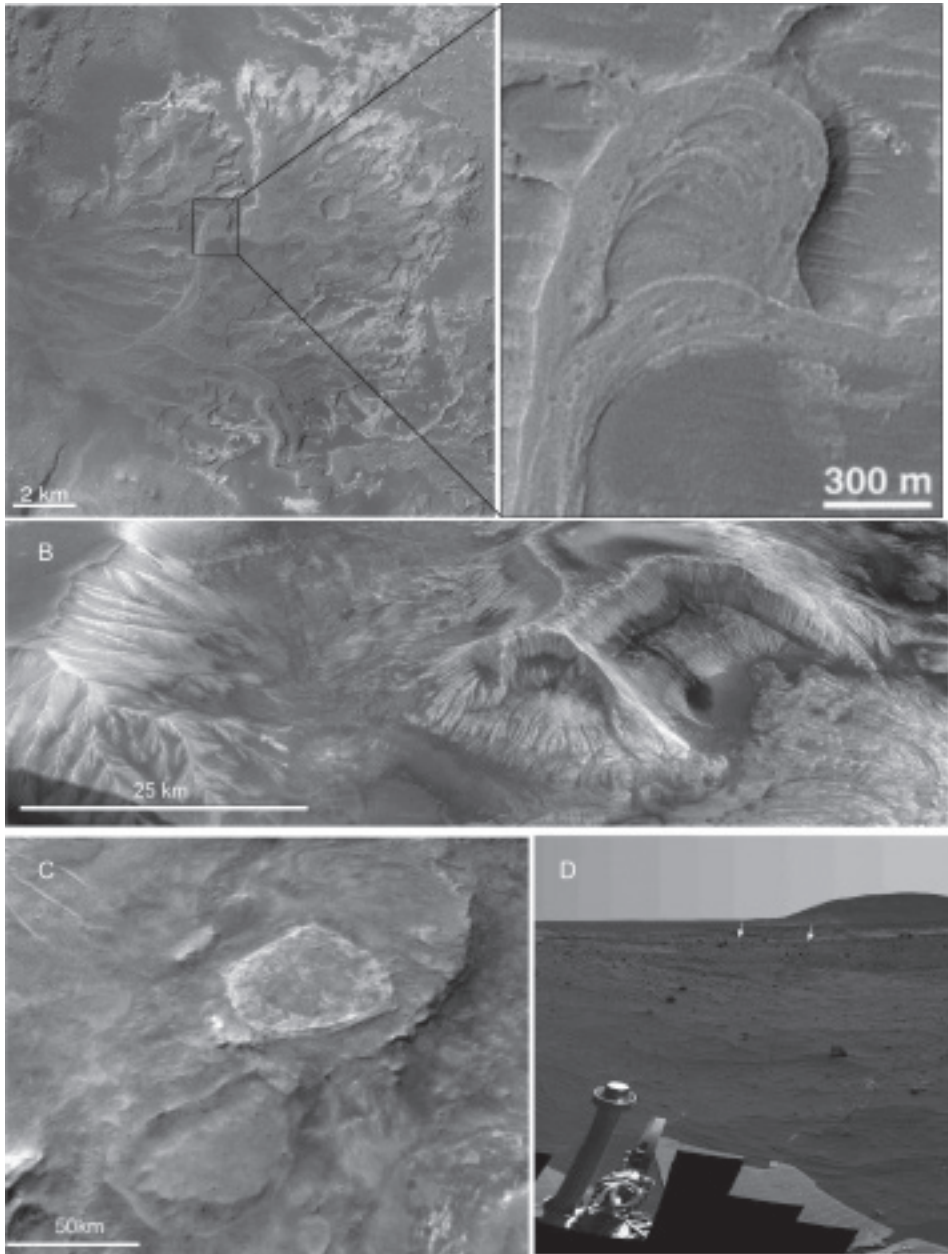
## 1. INTRODUCCIÓN

Durante la última década, las diferentes sondas robóticas que exploran la superficie de Marte están descubriendo una realidad distante de un planeta poco activo, seco e inhabitable. La detección de diferentes cuencas sedimentarias, sistemas hidrotermales y grandes edificios volcánicos (HYNEK *et al.*, 2003; MURCHIE *et al.*, 2009; ALLEN & OEHLER, 2008), cuya actividad se ha desarrollado a lo largo de miles de millones de años, sugiere la presencia de ambientes potencialmente habitables que pudieron albergar una biosfera emergente (Fig. 1). El estudio de los depósitos sedimentarios y materiales de alteración, así como el desarrollo de estructuras geomorfológicas de diferente entidad (BIBRING *et al.*, 2006; HYNEK *et al.*, 2010) que ocupan parte del planeta, ha permitido conocer las características físico-químicas de los sistemas hidrológicos desarrollados en Marte. A grandes rasgos, se tiene constancia de que la superficie de Marte estuvo expuesta a tres grandes etapas ambientales a partir del registro geológico detectado por las sondas espaciales (BIBRING *et al.*, 2006; FERNÁNDEZ-REMOLAR *et al.*, 2011), que han mostrado (Fig. 2) la abundancia de filosilicatos en los terrenos más antiguos sucedidos a escala planetaria por sulfatos de naturaleza ácida. Concretamente, las etapas se caracterizan por: (a) una una hidrosfera neutra a ligeramente ácida y un tanto oxidante (4.5-4.2 Ga), (b) una segunda etapa dominada por una hidrosfera ácida y fuertemente oxidante (4.4-3.5 Ga) y (c) una tercera etapa que condujo al planeta a una desecación y enfriamiento generalizado intercalados con la activación puntual de la hidrosfera por eventos térmicos internos (<3.5 Ga). Obviamente, este esquema evolutivo es un modelo global y no debe olvidarse que Marte, al tratarse de un planeta terrestre activo hasta la actualidad (HAUBER *et al.*, 2011), acoge una gran diversidad de sistemas geológicos formados a su vez por diferentes ambientes asociados al agua.

En cualquier caso, las sondas robóticas han mostrado que los sistemas geológicos asociados al agua en Marte con mayor desarrollo son aquellos relacionados con los ambientes hipersalinos, los sistemas ácidos y los mantenidos por sistemas hidrotermales (GROTZINGER *et al.*, 2005; OSTERLOO *et al.*, 2008; YEN *et al.*, 2008). En la Tierra se pueden encontrar análogos de estos sistemas pero que, en algunos casos, aparecen limitados a áreas más restringidas, como el caso de los sistemas lacustres hipersalinos, o son mucho más marginales como el de los ambientes ácidos (Fig. 3). Por tanto, es el estudio del desarrollo de formas de vida adaptadas a estos ambientes extremos, así como el registro de la información biológica producida por su actividad, la que se utiliza como método fundamental para la búsqueda de trazas de vida en el planeta rojo. Sin embargo, en muchas ocasiones se ha planteado paradigmáticamente que la preservación de la información biológica de mayor detalle solo es posible en ambientes de condiciones físico-químicas normales, asociadas a pH, redox y temperaturas moderados, donde la vida puede emerger fácilmente o preservar su componente molecular sin sufrir una degradación acusada. Esta suposición, basada en la idea clásica del origen de vida en soluciones de condiciones ambientales moderadas, ha impedi-

---

Fig. 1 (pág. opuesta). Evidencias de masas de agua en dos cuerpos planetarios como Marte y Europa. A. En Marte la existencia de un sistema deltaico ha quedado registrada en forma de depósitos sedimentarios de arcillas (crédito: NASA/JPL/Malin



Space Science Systems), mientras que en Europa (B) la hidrosfera se encuentra actualmente activa tal y como sugieren las estructuras lineales y en forma de domo que aparecen en su superficie helada. (Crédito: NASA). **B.** Depósitos de sulfatos de origen ácido que rellenan una gran depresión cerrada en la región de *Hebes* al norte de *Valles Marineris*. (Crédito: ESA/DLR/F U Berlin [G. Neukum]). **C.** Imagen de satélite de un área conocida como *Home Plate* (cráter Gusev) con volcanismo y evidencias de hidrotermalismo. (Crédito: University of Arizona/NASA). **D.** Imagen de superficie tomada por el Spirit que muestra la localización de materiales hidrotermales (flechas blancas) en el área de *Home Plate*. (Crédito: JPL/NASA).

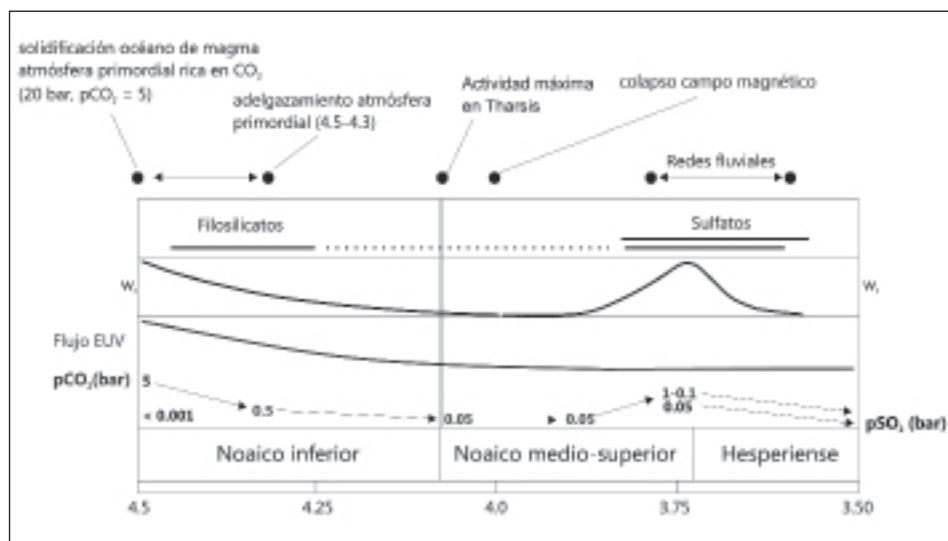


Fig. 2. Síntesis general de los principales parámetros que han regido los procesos geoquímicos en Marte. La evolución general de Marte se considera como una consecuencia de los cambios en la concentración atmosférica de  $p\text{CO}_2$  y  $p\text{SO}_2$  que controlan las condiciones climáticas, el pH de las soluciones de superficie y la tasa de meteorización ( $W_r$ ). Por otra parte, el diagrama incluye los principales episodios geológicos y eventos que se asocian a los cambios en el grosor y la composición atmosférica de Marte, como flujo EUV (UV extremo), la actividad de Tharsis, el colapso del campo magnético planetario y la aparición de las redes fluviales (modificado de FERNÁNDEZ-REMOLAR *et al.*, 2011).

do la búsqueda de trazas moleculares que portan un mayor grado de información biológica en sedimentos originados bajo condiciones extremas. Se demostrará con dos ejemplos que la preservación de la información biológica en condiciones extremas no solo es viable, sino que puede alcanzar un gran detalle de los organismos productores.

## 2. PRESERVACIÓN EN CONDICIONES ÁCIDAS

El estudio geobiológico elaborado en la cuenca fluvial de río Tinto (Fig. 3A) ha demostrado que ha acogido un sistema ácido cuya hidroquímica ha estado mantenida por el hierro en los últimos 6 millones de años. Dicha actividad fluvial extrema ha conducido a la formación de una serie de terrazas compuestas por óxidos de hierro (Fig. 4) y que demuestran la presencia de un sistema ácido natural independiente y anterior a la actividad humana (FERNÁNDEZ-REMOLAR *et al.*, 2003, 2005; FERNÁNDEZ REMOLAR & KNOLL, 2001). A pesar de las condiciones extremas de bajo pH (<3), alto redox (>400 mV) y sobresaturación en cationes de metales pesados (FERNÁNDEZ-REMOLAR *et al.*, 2005), este ambiente está habitado por una diversa comunidad de microorganismos (AMILS *et al.*, 2007). Inicialmente, el estudio macro y microscópico de los depósitos antiguos demostró que las comunidades de microorganismos y restos de macroorganismos (Fig. 4B-C) eran factibles de preservarse debido a la alta concentración iónica en forma de envueltas de polímeros inorgánicos de hierro y azufre en torno a los restos que igualmente permiten la permineralización de tejidos biológicos por medio

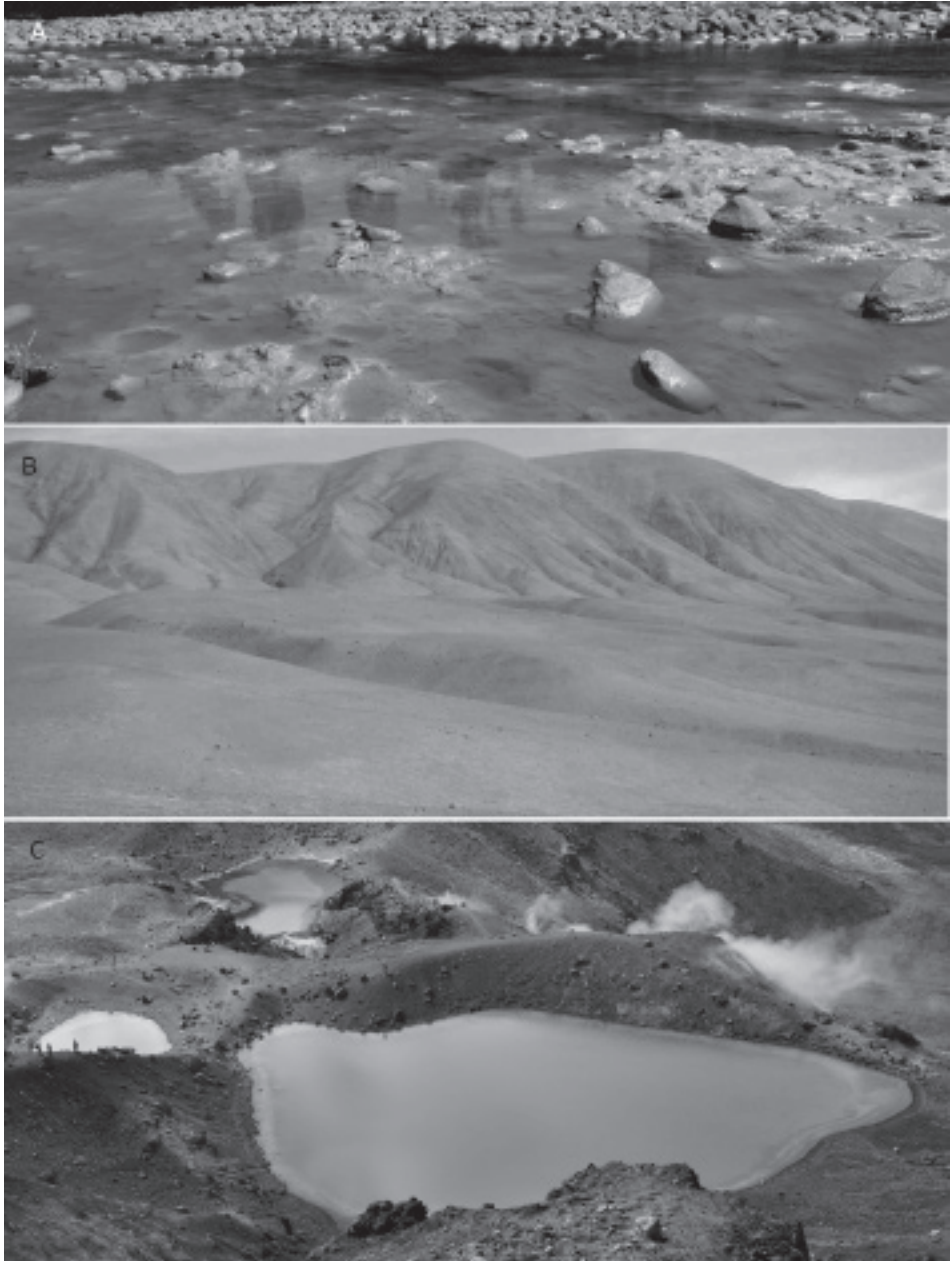


Fig. 3. Ambientes extremos terrestres descritos en este trabajo. **A.** Cuenca fluvial ácida de río Tinto (España). **B.** Desierto de Atacama (Chile). **C.** Sistema geotérmico del complejo volcánico de Tongariro (Nueva Zelanda).

de óxidos de hierro (FERNÁNDEZ-REMOLAR & KNOLL, 2008). La observación de secciones delgadas sugiere igualmente que la preservación de restos de macroorganismos está en muchos casos favorecida por la presencia de envueltas de *biofilms* sobre los mismos. Dicho proceso favorece igualmente la precipitación



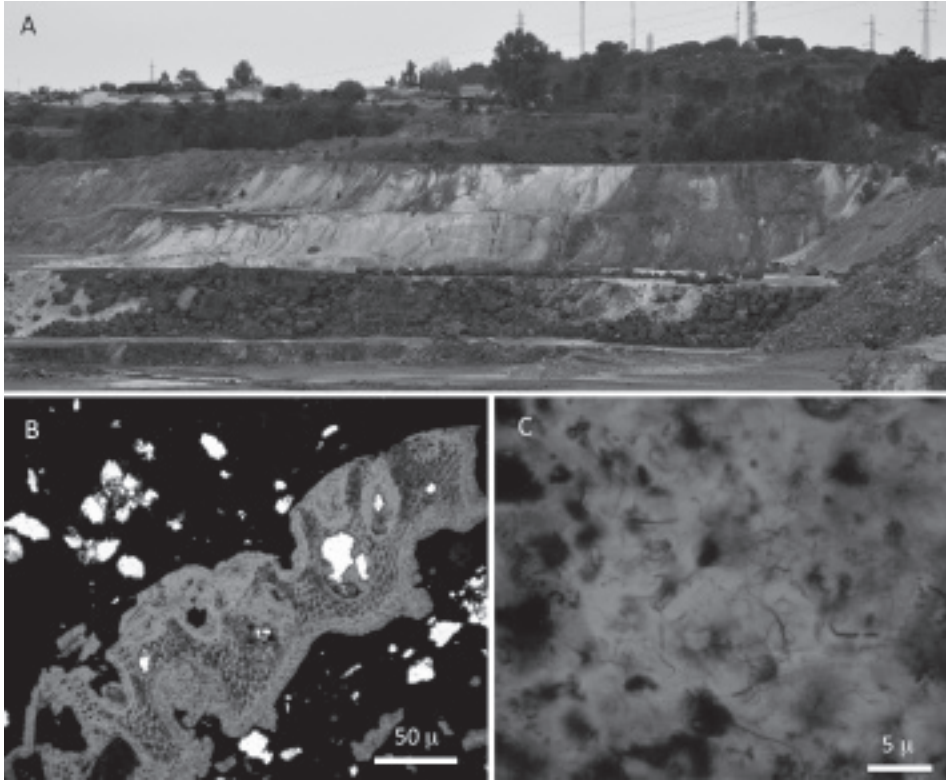
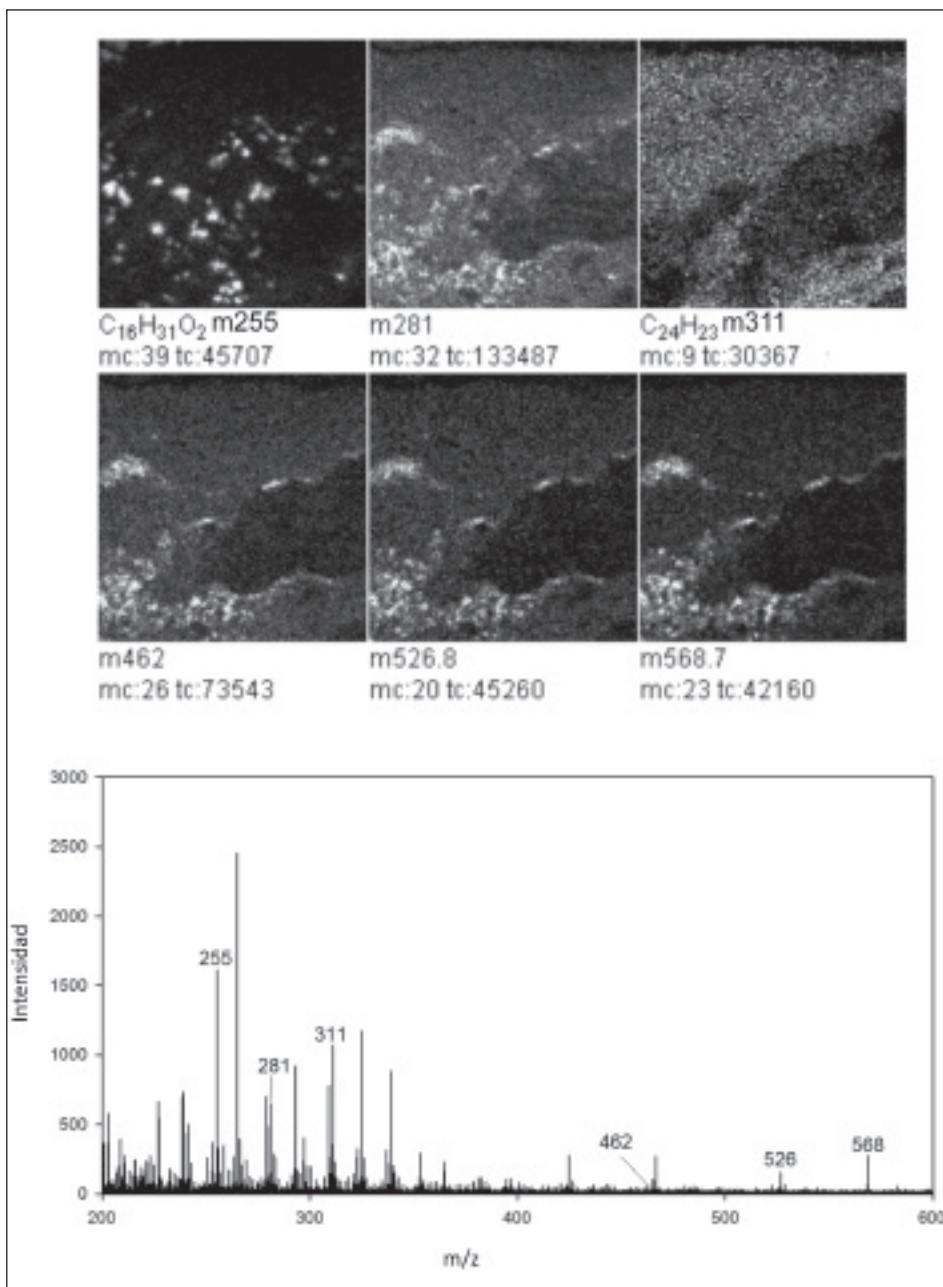


Fig. 4. Depósitos sedimentarios dejados por el sistema fluvial de río Tinto (A) hace 2 Ma. Sección delgada de un fragmento vegetal (B) y de filamentos bacterianos (C) observados en la terraza de 2 Ma abandonada por el sistema fluvial antiguo (FERNÁNDEZ-REMOLAR *et al.*, 2005, 2012).

de complejos iónicos de hierro con carga positiva sobre los exobiopolímeros (exopolisacáridos) que desarrollan un entramado mineral protector sobre el resto potencialmente preservable.

La aplicación de técnicas moleculares basadas en instrumentos de alta resolución analítica ha detectado la presencia de distintos tipos de moléculas que pueden registrar información biológica de alto nivel. Este es el caso de la detección de cadenas peptídicas en las terrazas más antiguas por medio de FTIR-MS (COLÍN-GARCÍA *et al.*, 2011), un espectrómetro de masas de gran resolución que puede detectar moléculas de mayor tamaño. Por otra parte, el uso de TOF-SIMS, una técnica analítica de superficie con detector de masas, ha permitido reconocer compuestos moleculares asociados a estructuras preservadas de origen biológico (Fig. 5) que demuestran su origen asociado a la actividad microbiana antigua.

Fig. 5 (pág. opuesta). Análisis de una muestra de la terraza antigua por medio de TOF-SIMS que permite conocer su composición y distribución molecular. El equipo barre un área de 250 x 250 micras con un haz de iones que arrastra complejos moleculares en forma de iones positivos o negativos hacia el analizador de masas. El resultado es



un mapa semicuantitativo de la distribución de las moléculas detectadas en función de su masa. En el ejemplo la distribución adopta patrones en forma de agregados celulares. La imagen aporta seis mapas correspondientes a las masas negativas 255, 281, 311, 462, 526 y 568 que el sistema analítico ha identificado como cadenas de moléculas de carbono de diferente tamaño que sugiere una preservación elevada de los compuestos moleculares producidas por las comunidades microbianas acidófilas. La importancia de este método radica en que permite asegurar el origen natural de los compuestos orgánicos y asegurar que no se han producido por contaminación.

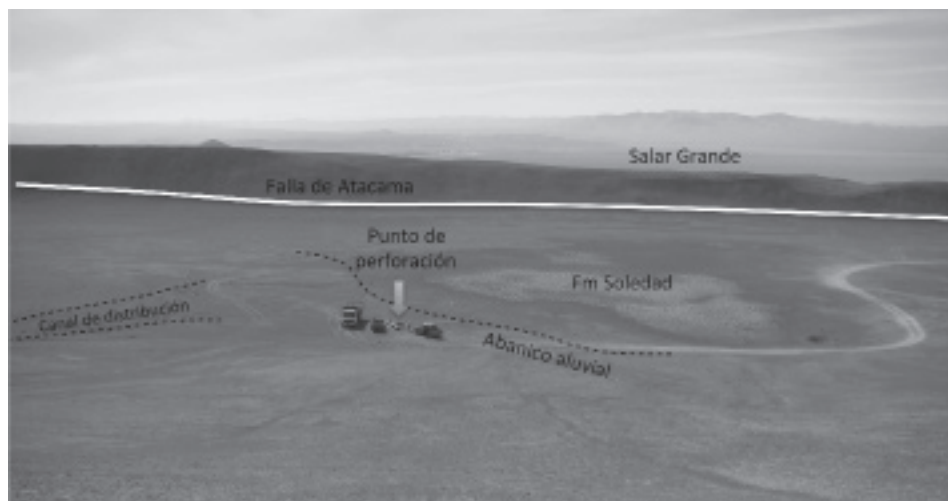


Fig. 6. Localización de la perforación realizada en una zona marginal del Salar Grande (desierto de Atacama) cuyo objetivo fueron los depósitos salinos de la Formación La Soledad formada por cloruros y la unidad inferior enriquecida en percloratos y nitratos.

### 3. PRESERVACIÓN EN AMBIENTES HIPERSALINOS

El desierto de Atacama (Fig. 3B) es un excelente análogo terrestre de Marte de ambientes expuestos a la irradiación UV, condiciones hiperáridas y la formación y acumulación de minerales muy solubles incluyendo cloruros y sulfatos. El desierto de Atacama es también uno de los pocos ambientes conocidos terrestres donde se acumula perclorato de origen natural (CATLING *et al.*, 2010). Su formación ha sido una respuesta directa al crecimiento y la evolución de los Andes durante las últimas decenas de millones de años. Durante el Paleógeno tardío la actividad volcánica e hidrotermal proporcionó los iones cloruro y sulfato de las salmueras que produjeron halita y anhídrita (LOWESTEIN & RISSACHER, 2009). Como resultado de las condiciones prevalecientes hiperáridas, algunos depósitos de sal han persistido casi inalterados durante varios millones de años y desde su formación. Estas condiciones postsedimentarias simulan aquellas que acompañan a las sales de cloruro detectados en *Terra Sirenum* (OSTERLOO *et al.*, 2008).

Los análisis microbianos y moleculares de los depósitos salinos de Atacama, que incluyen suelos y evaporitas antiguas, sugieren que se trata de materiales excepcionales para conservación a largo plazo. Aunque se ha procedido al estudio de las comunidades fotosintéticas activas que ocupan micronichos en minerales delicuescentes como la halita (DÁVILA *et al.*, 2008; WIERZCHOS *et al.*, 2011), sólo unas pocas investigaciones se han centrado en el análisis microbiano de los materiales en el subsuelo de Atacama. Sólo un trabajo ha informado de la preservación microbiana y molecular de depósitos de sal en el subsuelo del Salar Grande. Este estudio por GRAMAIN *et al.* (2011) describe la presencia de varios taxones de *Halobacterium*, un taxón de arqueobacterias, en testigos recuperados hasta 20 m de profundidad en los depósitos de Salar Grande. La aplicación de técnicas de biología molecular para estas muestras ha revelado la presencia de ADN intacto y 16S rRNA, que demuestra la preservación de información biológica a largo plazo y de alta calidad, y el potencial de preservación de depósitos de sal.



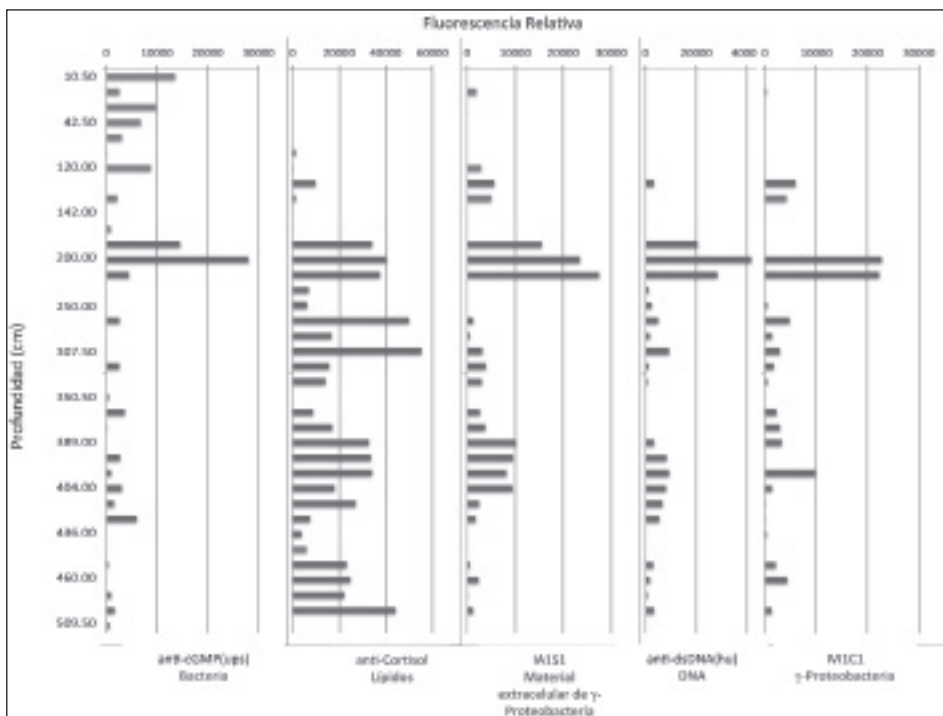


Fig. 7. Resultados principales obtenidos del análisis molecular de las muestras obtenidas en el Salar Grande, Desierto de Atacama (ver Fig. 6). La aplicación de instrumentación *in situ* como SOLID (*Sign Of Life Detector*), basada en la detección de biomoléculas por técnicas inmunológicas (PARRO *et al.*, 2011a), ha permitido la detección en profundidad de diferentes tipos de moléculas excepcionalmente preservadas en las sales.

Para la detección de biomoléculas en depósitos del Salar Grande (Fig. 6) se realizó el análisis molecular de las muestras del subsuelo por medio del SOLID (*Sign Of Life Detector*) que contiene el LDChip300 (PARRO *et al.*, 2011a, b). Este chip contiene aproximadamente 300 anticuerpos elaborados a partir de diferentes moléculas que incluyen membranas celulares de bacterias y arqueas, polímeros extracelulares, proteínas, ADN, péptidos, exopolisacáridos, aminoácidos y otras biomoléculas (PARRO *et al.*, 2011b). Si la molécula diana está presente en el extracto elaborado a partir de la muestra, se obtiene una señal fluorescente que permite la generación de un inmunograma de cada nivel estratigráfico muestreado. Para estudiar el grado de preservación en materiales hipersalinos, se realizó una perforación de los primeros 6 metros más superficiales del salar. Los materiales muestreados consistieron en cloruros de la Formación La Soledad (2-5 Ma) seguidos de una unidad con sales enriquecidas en percloratos y nitratos (>5 Ma) (CHONG-DÍAZ *et al.*, 1999; CHONG *et al.*, 2007; SÁEZ *et al.*, 1999). Aunque la mayoría de las muestras recogidas dieron resultados positivos, la señal y la diversidad de las moléculas detectadas fueron especialmente altas a una profundidad de ~2 m en el subsuelo (Figs. 6, 7).

La elaboración de diagramas de dispersión que utilizan el índice de Simpson como marcador de diversidad molecular frente a la fluorescencia relativa total para cada muestra permite clasificar las muestras analizadas respecto a su grado de preservación. Como resultado, en el Salar Grande las muestras se organizan

formando tres grupos diferentes en función de su composición y edad. Aquellas muestras con el mayor índice de Simpson y mayor fluorescencia relativa total se corresponden con los sedimentos con mayor contenido en halita y una edad en torno a los 2 millones de años. Sin embargo, las muestras compuestas por nitrato y perclorato, que se asocian a ambientes altamente secos y oxidativos, así como de edad superior a los 5 millones de años, presentan igualmente una diversidad molecular y fluorescencia relativa total elevadas, lo cual evidencia una preservación de la información biológica neta. Por otra parte, la detección de antígenos de moléculas poco resistentes a la degradación como los ácidos nucleicos en los depósitos formados en condiciones extremas hace millones de años sugiere una preservación a gran detalle de las comunidades que habitaron el ambiente hipersalino.

#### 4. PRESERVACIÓN EN CONDICIONES EXTREMAS Y EL REGISTRO DE TRAZAS DE VIDA EN MARTE

Las condiciones extremas de acidez, oxidación, temperatura, radiación UV o, entre otras, actividad de agua pueden jugar un papel esencial en la diversidad de comunidades microbianas que se adaptan a un ambiente dado. Sin embargo, los organismos extremófilos han adaptado sus mecanismos celulares para desarrollarse en ambientes con dichas condiciones. Por lo tanto, los ambientes extremos contienen formas de vida productoras de estructuras orgánicas y biomoléculas que potencialmente pueden quedar registradas en los depósitos asociados a dichos ambientes. La preservación de información biológica queda supeditada a las condiciones físico-químicas y la actividad microbiana degradadora de las estructuras biológicas y compuestos moleculares una vez que estos son producidos. Las condiciones ácidas y oxidantes favorecen reacciones de hidrólisis y oxidación de los polímeros biológicos que forman las estructuras moleculares de los microorganismos. La oxidación de compuestos biológicos son favorecidos en condiciones aeróbicas, donde microorganismos heterótrofos los degradan rápidamente en presencia de oxígeno. Por otra parte, la presencia de compuestos altamente oxidantes como los percloratos favorecen la degradación inorgánica de los compuestos biológicos en soluciones acuosas, aunque pueden quedar remanentes algunas moléculas orgánicas de menor tamaño (KOLB, 2009). Sin embargo, los ambientes extremos aquí descritos se caracterizan por un alto grado de mineralización que incide fuertemente en la actividad del agua. La reducción de la actividad del agua disminuye notablemente no solamente la actividad microbiana (TOSCA *et al.*, 2008), sino los procesos puramente químicos que intervienen en la degradación de moléculas biológicas. Finalmente, la temperatura es igualmente otro factor que dirige la velocidad de reacción en los procesos metabólicos o reacciones químicas asociadas a la destrucción de compuestos biológicos.

En Marte se tiene constancia de que los depósitos salinos formados en ambientes ácidos o hipersalinos, como cloruros o sulfatos, se caracterizaron por una rápida formación en condiciones de sobresaturación por la alta tasa de evaporación que favoreció una rápida precipitación y mineralización (TOSCA *et al.*, 2008). En efecto, el desarrollo episódico de hidrosferas transitorias favoreció la formación de grandes masas salinas que posteriormente sufrieron escasos procesos postsedimentarios asociados a la presencia de soluciones acuosas por una rápida deshidratación de la superficie del planeta. Este efecto se sumó a una caída de la temperatura superficial como consecuencia de la pérdida atmosférica relacionada con el colapso de la actividad interna del planeta. De esta forma, la reducción de la actividad del agua junto a la de la temperatura han podido ejercer

un umbral crítico para la preservación de la información biológica, si es que la vida emergió alguna vez en el planeta rojo.

#### BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, C.C. & OEHLER, D.Z. 2008. A Case for Ancient Springs in Arabia Terra, Mars. *Astrobiology*, **8**: 1-20.
- AMILS, R., GONZALEZ-TORIL, E., FERNANDEZ-REMOLAR, D., GOMEZ, F., AGUILERA, A., RODRIGUEZ, N., MALKI, M., GARCIA-MOYANO, A., FAIREN, A.G., DE LA FUENTE, V. & LUIS SANZ, J. 2007. Extreme environments as Mars terrestrial analogs: The Rio Tinto case. *Planetary and Space Science*, **55**: 370-381.
- BIBRING, J.-P., LANGEVIN, Y., MUSTARD, J.F., POULET, F., ARVIDSON, R., GENDRIN, A., GONDET, B., MANGOLD, N., PINET, P., FORGET, F., THE OMEGA TEAM, BERTHE, M., GOMEZ, C., JOUGLET, D., SOUFFLOT, A., VINCENDON, M., COMBES, M., DROSSART, P., ENCRENAZ, T., FOUCHET, T., MERCHIORRI, R., BELLUCI, G., ALTIERI, F., FORMISANO, V., CAPACCIONI, F., CERRONI, P., CORADINI, A., FONTI, S., KORABLEV, O., KOTTSOV, V., IGNATIEV, N., MOROZ, V., TITOV, D., ZASOVA, L., LOISEAU, D., PINET, P., DOUTE, S., SCHMITT, B., SOTIN, C., HAUBER, E., HOFFMANN, H., JAUMANN, R., KELLER, U., ARVIDSON, R., DUXBURY, T., FORGET, F. & NEUKUM, G. 2006. Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data. *Science*, **312**: 400-404.
- CATLING, D.C., CLAIRE, M.W., ZAHNLE, K.J., QUINN, R.C., CLARK, B.C., HECHT, M.H. & KOUNAVES, S. 2010. Atmospheric origins of perchlorate on Mars and in the Atacama. *Journal of Geophysical Research*, **115**: E00E11.
- COLÍN-GARCÍA, M., KANAWATI, B., HARIR, M., SCHMIDT-KOPPLIN, P., AMILS, R., PARRO, V., GARCÍA, M. & FERNÁNDEZ-REMOLAR, D. 2011. Detection of peptidic sequences in the ancient acidic sediments of Río Tinto, Spain. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, **41**: 523-527.
- HYNEK, B.M., PHILLIPS, R.J. & ARVIDSON, R.E. 2003. Explosive volcanism in the Tharsis region: Global evidence in the Martian geologic record. *Journal of Geophysical Research*, **108**: 5111-5127.
- HYNEK, B.M., BEACH, M. & HOKE, M.R.T. 2010. Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes. *Journal of Geophysical Research*, **115**: E09008.
- FERNÁNDEZ-REMOLAR, D.C., MORRIS, R.V., GRUENER, J.E., AMILS, R. & KNOLL, A.H. 2005. The Rio Tinto Basin, Spain: Mineralogy, sedimentary geobiology, and implications for interpretation of outcrop rocks at Meridiani Planum, Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, **240**: 149-167.
- FERNÁNDEZ REMOLAR, D.C. & KNOLL, A.H. 2011. *En la Tierra como en el Cielo: el Río Tinto como análogo terrestre de Marte*. 84 págs. Fundamental, 17, Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel-Dinópolis. Teruel.
- FERNÁNDEZ-REMOLAR, D.C., PRESTON, L.J., SÁNCHEZ-ROMÁN, M., IZAWA, M.R.M., HUANG, L., SOUTHAM, G., BANERJEE, N.R., OSINSKI, G.R., FLEMMING, R., GÓMEZ-ORTÍZ, D., PRIETO BALLESTEROS, O., RODRÍGUEZ, N., AMILS, R. & DARBY DYAR, M. 2012. Carbonate precipitation under bulk acidic conditions as a potential biosignature for searching life on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, **351**: 13-26.
- FERNÁNDEZ-REMOLAR, D.C., SÁNCHEZ-ROMÁN, M., HILL, A.C., GÓMEZ-ORTÍZ, D., PRIETO-BALLESTEROS, O., ROMANEK, C.S. & AMILS, R. 2011. The environment of early Mars and the missing carbonates. *Meteoritics and Planetary Science*, **46**: 1447-1469.
- HAUBER, E., BROŽ, P., JAGERT, F., JODŁOWSKI, P. & PLATZ, T. 2011. Very recent and widespread basaltic volcanism on Mars. *Geophysical Research Letters*, **38**: L10201.
- KOLB, V. 2009. Oxidation of organic materials with perchlorates: relevance to the chemistry on the Martian surface. In: HOOVER, R.B., LEVIN, G.V., ROZANOV, A. YU. & RETHERFORD, K. D. Eds. *Instruments and methods for Astrobiology and planetary missions*. 10.1117/1112.824161. San Diego.

- MURCHIE, S.L., MUSTARD, J.F., EHLMANN, B.L., MILIKEN, R.E., BISHOP, J.L., MCKEOWN, N.K., NOE DOBREA, E.Z., SEELOS, F.P., BUCZKOWSKI, D.L., WISEMAN, S.M., ARVIDSON, R.E., WRAY, J.J., SWAYZE, G., CLARK, R.N., DES MARAIS, D.J., MCEWEN, A.S. & BIBRING, J.P., 2009. A synthesis of Martian aqueous mineralogy after one Mars year of observations from the Mars Reconnaissance Orbiter. *Journal of Geophysical Research*, **114**: 10.1029/2009JE003342.
- OSTERLOO, M.M., HAMILTON, V.E., BANDFIELD, J.L., GLOTCH, T.D., BALDRIDGE, A.M., CHRISTENSEN, P.R., TORNABENE, L.L. & ANDERSON, F.S. 2008. Chloride-Bearing Materials in the Southern Highlands of Mars. *Science*, **319**: 1651-1654.
- PARK, J.S., VREELAND, R.H., CHO, B.C., LOWENSTEIN, T.K., TIMOFEEFF, M.N. & ROSENZWEIG, W.D. 2009. Haloarchaeal diversity in 23, 121 and 419 MYA salts. *Geobiology*, **7**: 515-523.
- PARRO, V., FERNÁNDEZ-REMOLAR, D.C., RODRÍGUEZ-MANFREDI, J.A., CRUZ-GIL, P., RIVAS, L.A., RUIZ-BERMEJO, M., MORENO-PAZ, M., GARCÍA-VILLADANGOS, M., GÓMEZ-ORTIZ, D., BLANCO-LÓPEZ, Y., MENOR-SALVÁN, C.S., PRIETO-BALLESTEROS, O. & GÓMEZ-ELVIRA, J. 2011a. Classification of modern and old río Tinto sedimentary deposits through the biomolecular record using a life marker biochip: Implications for Detecting Life on Mars. *Astrobiology*, **11**: 29-44.
- PARRO, V., DIEGO-CASTILLA, G., MORENO-PAZ, M., BLANCO-LÓPEZ, Y., CRUZ-GIL, P., RODRÍGUEZ-MANFREDI, J.A., FERNÁNDEZ-REMOLAR, D.C., GÓMEZ, F., GÓMEZ-RODÍGUEZ, M., RIVAS, L., ECHEVERRÍA, A., URTUVIA, V., RUIZ-BERMEJO, A., GARCÍA-VILLADANGOS, A., PÓSTIGO, M., SÁNCHEZ-ROMÁN, M., CHONG-DÍAZ, G. & DEMERGASSO, C. 2011b. A microbial oasis in the hypersaline Atacama subsurface discovered by a life detector chip: implications for the search of life on Mars. *Astrobiology*, **11**: 969-996.
- TOSCA, N.J., KNOLL, A.H. & McLENNAN, S.M. 2008. Water activity and the challenge for life on early Mars. *Science*, **320**: 1204-1207.
- YEN, A.S., MORRIS, R.V., CLARK, B.C., GELLERT, R., KNUDSON, A.T., SQUYRES, S., MITTLEFEHLDT, D.W., ARVIDSON, R., MCCOY, T., SCHMIDT, M., HUROWITZ, J., LI, R. & JOHNSON, J.R. 2008. Hydrothermal processes at Gusev Crater: an evaluation of Paso Robles class soils. *Journal of Geophysical Research*, **113**: 0.1029/2007JE002978.