

CHIMENEAS HIDROTERMALES Y LAS CIUDADES PERDIDAS ABISALES

por ENRIQUE MORENO OSTOS

DEPARTAMENTO DE ECOLOGÍA, UNIVERSIDAD DE MÁLAGA, 29071 - MÁLAGA (ESPAÑA)

QUIQUE@UMA.ES

Palabras clave: surgencias hidrotermales, Ciudad Perdida, biogeoquímica abisal, ecología microbiana

Enviado: 9 marzo 2016. Aceptado: 15 marzo 2016

En las zonas más profundas del océano, a miles de metros por debajo de las capas de agua iluminadas por el sol, levantan sus impresionantes estructuras góticas las surgencias hidrotermales. El paisaje fantasmagórico que dibujan alberga una sorprendente diversidad biológica, adaptada a la vida en estos ambientes extremos. Las comunidades que habitan estos oasis del abismo están soportadas por la incansable actividad productiva de bacterias y arqueas, y algunas evidencias apuntan a que la vida pudo comenzar en estos crisoles. Adentrémonos un poco más en estos increíbles ecosistemas.

In the deepest areas of the ocean, thousands of meters below the photic depth, hydrothermal fields rises their impressive gothic-like structures. These phantasmagoric landscapes host an unexpected biological diversity, well-adapted to live in such extreme environments. The biological communities living in these abyssal oasis are supported by the tireless productive activity of bacteria and archea, and some scientific evidences point out that life could have its origin within these habitats. Let's venture deeper into these incredible ecosystems.

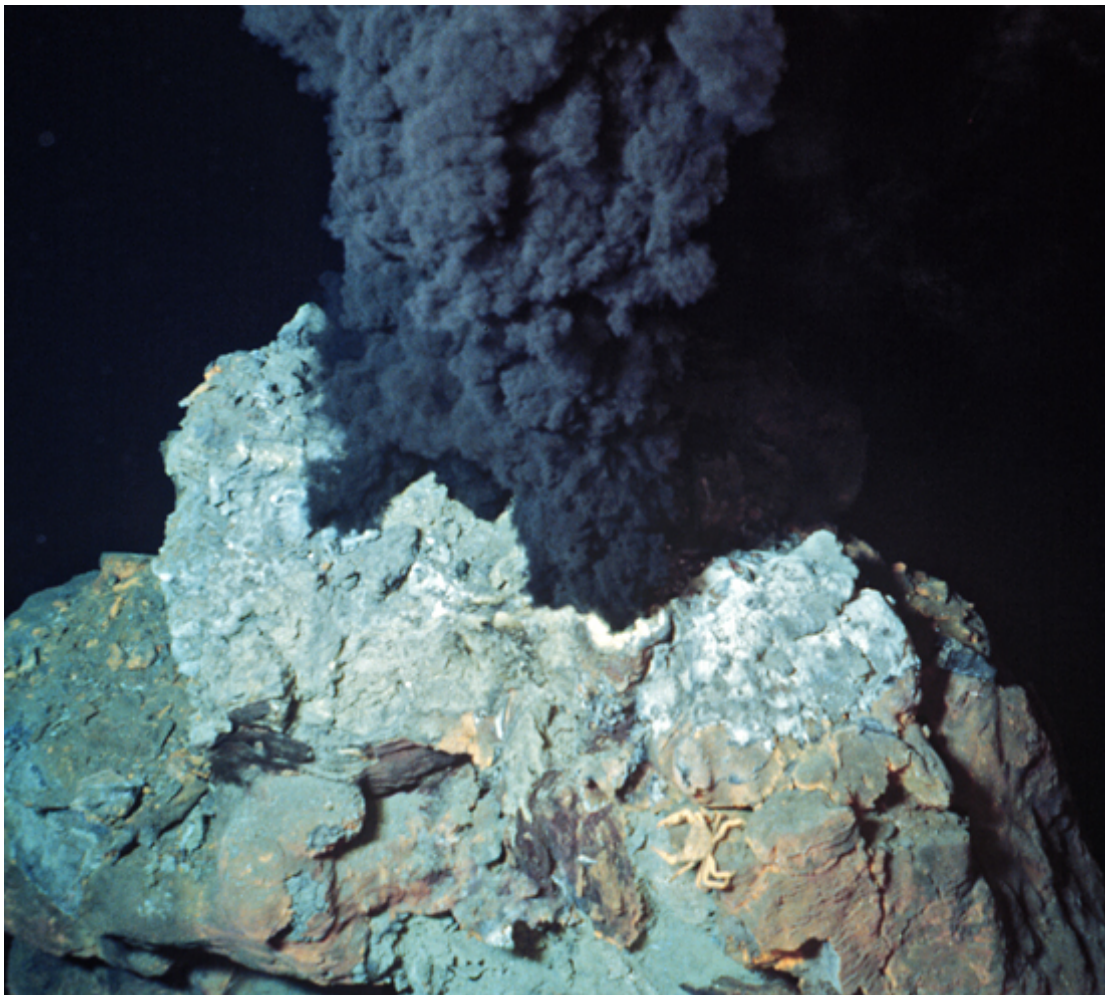


Figura 1. Una chimenea liberando fluido hidrotermal repleto de partículas minerales, que le dan aspecto de humo. Nótese la presencia de crustáceos en su entorno. (Reproducida con permiso del Instituto Oceanográfico Woods Hole).

Chimeneas hidrotermales: islas de vida en el abismo

Las surgencias hidrotermales aparecen ligadas a la actividad de las dorsales oceánicas, donde se genera la nueva corteza y se separan las placas tectónicas. Se encuentran entre los 1500 y 4000 metros de profundidad, muy por debajo de la capa fótica de los océanos. En estas zonas, el agua marina se infiltra a través de la corteza oceánica, comenzando un complejo proceso de circulación y cambio químico. A las altas temperaturas del interior de la corteza se producen una serie de reacciones geoquímicas de reducción, que enriquecen el agua de mar en H_2S , S , CH_4 , H_2 , NH_4^+ , NO_2^- , Fe_2^+ , Mn_2^+ y otros elementos reducidos, lo que resulta en un fluido a gran temperatura (más de $400\text{ }^\circ\text{C}$), ácido y reductor, que viaja de nuevo a la superficie de la corteza y es expulsado al exterior (Figura 1).

El enfriamiento brusco y la rápida oxidación de elementos por el contacto con el agua del fondo del océano (entre 2 y $3\text{ }^\circ\text{C}$, y bien oxigenada) promueve la precipitación de azufre y sulfuros metálicos (principalmente de cobre, hierro y zinc) y genera la estructura de la chimenea. El fluido hidrotermal cálido y reductor se mezcla rápidamente con el agua de mar (en una proporción de más de 99% agua de mar y menos de 1% de fluido hidrotermal), constituyendo una pluma que se eleva cientos de metros sobre el fondo del océano y que puede viajar a cientos de kilómetros de su fuente, transportando calor, sustancias químicas y, como veremos a continuación, vida microbiana.

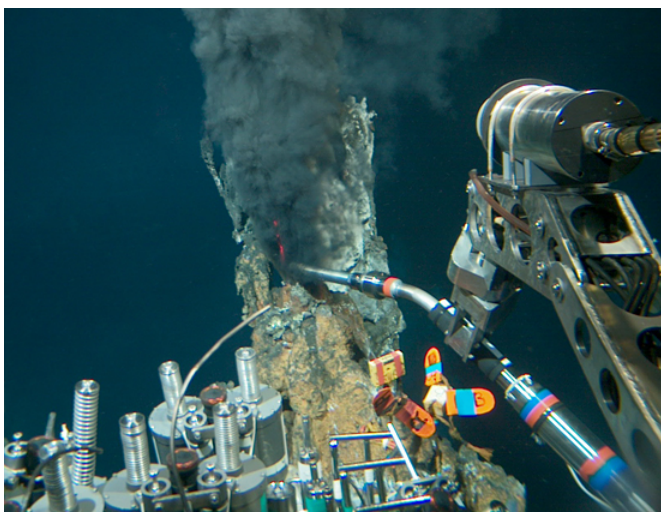


Figura 2. Un brazo mecánico del sumergible oceanográfico Alvin tomando una muestra de fluido hidrotermal en una surgencia del Pacífico Oriental. (Reproducida con permiso del Instituto Oceanográfico Woods Hole).

En 1977 el sumergible Alvin del Instituto Woods Hole (Figura 2) llevaba a cabo un reconocimiento de chimeneas hidrotermales en el Océano Pacífico, cerca de las Galápagos. Lo que encontró causó una profunda sorpresa en los afortunados científicos que lo tripulaban: en torno a las chimeneas había una comunidad de extraordinaria diversidad y elevada biomasa de organismos invertebrados (crustáceos, moluscos y anélidos tubícolas de gran tamaño) desconocidos hasta entonces, que se alimentaba por filtración de microorganismos, o que establecían relaciones de simbiosis con ellos.

La causa última de esta riqueza biológica en el océano profundo se encuentra en la actividad de bacterias quimio-lito-autotróficas, que oxidan compuestos inorgánicos reducidos y usan la energía liberada para sintetizar materia orgánica a partir del carbono inorgánico. La gran diversidad de condiciones físicas y químicas presentes en los diferentes microhábitats de las surgencias hidrotermales, y los marcados gradientes espaciales entre estas condiciones, genera un amplio rango de nichos biogeoquímicos y de potenciales fuentes de energía para los microorganismos. Así, los microorganismos quimio-lito-autotróficos son capaces de obtener la energía que requieren para producir materia orgánica a partir de reacciones redox entre los materiales reducidos del fluido hidrotermal (H_2 , H_2S , Fe_2^+ , entre otros) y las sustancias oxidantes presentes en el agua de mar (O_2 , NO_3^- , Fe_3^+ , SO_4^{2-} , entre otros). Este proceso quimiosintético es especialmente activo en el interior de las plumas hidrotermales, donde se encuentra una elevada biomasa de microorganismos procedentes de la chimenea y de la biosfera profunda^[1], así como del agua marina que envuelve la pluma. El resultado de esta quimiosíntesis es la formación de biomasa bacteriana y de carbono orgánico disuelto, que sirven de sustento a las bacterias quimio-organo-heterotróficas (tanto aeróbicas como anaeróbicas), también dentro de la pluma. La sedimentación de material orgánico y de microorganismos desde la pluma permite el mantenimiento de comunidades microbiológicas cercanas al suelo^[2]. La Tabla 1 resume las reacciones redox mediadas por microorganismos que han sido descritas en los campos de surgencias hidrotermales.

La actividad quimiosintética en las surgencias hidrotermales revela una producción primaria neta que representa del 0.1 al 1% de la producción primaria neta fotosintética del océano. Como sólo una pequeña fracción del carbono orgánico producido en superficie alcanza el abismo oceánico, la contribución de los quimiosintéticos de las surgencias hidrotermales representaría en torno al 25% del inventario global de carbono en el océano profundo^[3].

Una de las más recientes sorpresas obtenidas de las surgencias hidrotermales ha sido el hallazgo una bacteria foto-lito-autotrófica anaeróbica obligada (aunque soporta relativamente bien los efectos tóxicos del O₂), que fue aislada a 50 cm del orificio de una surgencia del Pacífico Occidental^[4] (Beatty et al. 2005). La bacteria parece emparentada con las bacterias verdes del azufre, como *Chlorobium*. La radiación que estos organismos necesitan para la fotosíntesis parece ser de origen geotermal, radiación térmica emitida por el agua caliente (en torno a 370 °C, en este caso). La mayor parte de esta radiación tiene longitudes de onda entre 740-1050 nm (infrarrojo), aunque también existe un flujo muy tenue (pero detectable) de radiación de menor longitud de onda, en el rango de la radiación visible en coherencia con el espectro de emisión de un cuerpo negro a 350 °C. A pesar de existir radiación visible en pequeñas dosis, el mayor pico de absorción lumínica para esta bacteria se encuentra a 750 nm. Más tarde, se descubrió^[5] que ciertas bacterias verdes del azufre pueden usar de forma eficiente la radiación de onda larga (de hasta 1300 nm), alcanzando tasas fotosintéticas considerables. Estos mismos autores apuntan a una ventaja adicional de los fotosintéticos profundos respecto a los de la superficie del océano: no hay efecto nocivo o inhibidor de la radiación UV. Este hallazgo, todavía en investigación, puede ser clave para entender el origen y evolución de la fotosíntesis, que podría haber ocurrido en las profundidades de las surgencias hidrotermales, en ausencia de luz solar. A raíz de esto, los astrobiólogos especulan con la posible existencia de vida extraterrestre basada en fotosíntesis anoxigénica en planetas y lunas muy alejados del sol.

La producción primaria de los quimioautotrofos (y de los fotoautotrofos anoxigénicos recién descritos, en menor medida) no sólo sostiene a los componentes heterotróficos de la comunidad microbiana, sino también a la comunidad animal de las surgencias hidrotermales. Estos depredan sobre las bacterias de vida libre y sobre los *biofilms*, pero además algunos de ellos han desarrollado intensas relaciones simbióticas con los microorganismos. Por ejemplo, cuando se descubrió en las surgencias el anélido tubícola *Riftia pachyptila* resultó un misterio zoológico, ya que no presenta un tracto digestivo evidente y su cuerpo es demasiado grande como para vivir de compuestos orgánicos disueltos. Unos análisis histológicos sobre este gusano revelaron actividad de fijación de CO₂ y de oxidación de H₂S, lo que en principio hizo pensar que este era el primer animal quimioautotrófico

jamás descrito^[6]. Poco después, se puso de manifiesto que esta actividad la llevaban a cabo bacterias quimioautotróficas en una relación de endosimbiosis con el gusano. Estos tubícolas tienen una estructura única, el trofosoma, donde alberga gran cantidad de bacterias oxidadoras del azufre endosimbiontes (un gramo de trofosoma tiene mil millones de bacterias). El gusano aporta sulfuro y oxígeno (a través de la hemoglobina) a las bacterias, y recibe compuestos orgánicos a cambio.

Tipo metabólico	Reacción
Metanotrofia aeróbica	$\text{CH}_4 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Metanotr. anaeróbica	$\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} \longrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{S}$
Metanogénesis	$\text{H}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$
Sulfatorreducción	$\text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{S}$
Oxidac. aeróbica de S	$\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+$
Oxidac. anaerób. de S	$\text{H}_2\text{S} + \text{NO}_3^- \longrightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{N}_2$
Oxidac. aerób. de H	$\text{H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$
Oxidac. anaerób. de H	$\text{H}_2 + \text{Fe}^{3+} \longrightarrow \text{H}^+ + \text{Fe}^{2+}$
Oxidac. aerób. de Fe	$\text{Fe}^{2+} + \text{H}^+ + \text{O}_2 \longrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$

Tabla 1. Algunos tipos metabólicos microbianos descritos en surgencias hidrotermales^[2] (las reacciones no están ajustadas). Es seguro que la tabla se alargará en un futuro próximo con otras reacciones termodinámicamente posibles pero aún no confirmadas empíricamente.

La Ciudad Perdida: los fantasmas del abismo

Muy recientemente, en el año 2005 se descubrió un campo hidrotermal muy especial porque no estaba ligado a las dorsales oceánicas sino a grandes sistemas de fallas. A este sistema se le llamó *La Ciudad Perdida*^[7]. Se encuentra en el océano Atlántico, a latitud 30 °N, a unos 15 km de la dorsal y a una profundidad de 780 metros. Las rocas de estas surgencias provienen del manto, y tienen una composición química muy diferente a la de las surgencias asociadas a las dorsales. El pH del efluente hidrotermal es muy alto (9 a 11), su temperatura ronda los 40 - 90 °C, es pobre en metales y rico en H₂, CH₄ y otros carbohidratos de bajo peso molecular. Las estructuras físicas de La Ciudad Perdida son de carbonato cálcico, que precipita en contacto con el agua por el elevado pH y forman torres como la denominada *Poseidon*, de hasta 60 metros de altura (Figura 3).



Figura 3. El vehículo robótico *Hércules* muestreando las intrincadas estructuras de carbonato de *La Ciudad Perdida*. Fotografía cortesía de Deborah Kelley (Universidad de Washington), Institute for Exploration, URI-IAO, y NOAA. Reproducida con permiso del Instituto Oceanográfico Woods Hole.

Análisis isotópicos han revelado que el H_2 y el CH_4 del fluido hidrotermal tienen origen geoquímico abiótico^[8]. El CH_4 proviene fundamentalmente del proceso de serpentización, una reacción geoquímica en la que el olivino (el mineral más abundante en la corteza oceánica, junto con el piroxeno, que también puede participar en este proceso) reacciona con agua y carbono inorgánico (en forma de CO_2 , procedente del manto) y forma serpentina, brucita, magnetita, H_2 , CH_4 y otros compuestos de carbono, como acetato y formato^[9].

Este proceso geoquímico probablemente sucede desde que aparecieron los océanos en la Tierra. La serpentización proporciona grandes cantidades de H_2 , que actúa como una gran fuente de electrones para la producción primaria en los ecosistemas submarinos. Este mismo H_2 puede reducir el CO_2 a CH_4 también de forma geoquímica. Actualmente se estudia si estas reacciones geoquímicas pudieron ser precursores inorgánicos para el surgimiento de los primeros metabolismos metanógenos y acetógenos (hipótesis *metabolism-first*). De ser así, el origen de la vida podría estar en estas especiales surgencias hidrotermales, que aparecieron tan pronto como se acumuló agua en la Tierra (hace más de 4200 millones de años) y que habrían actuado como una red de reactores geoquímicos que darían origen a los primeros metabolismos^[10]. La vida microbiana en La Ciudad Perdida es ciertamente abundante y asombrosa: nu-

merosos estudios genómicos concluyen que los tipos microbianos exclusivos de surgencias hidrotermales constituyen las ramas más antiguas de los árboles de la vida, y se ha demostrado la similitud estructural entre las enzimas más antiguas conocidas y minerales precipitados en estas surgencias alcalinas. De acuerdo con todo esto, estas Ciudades Perdidas podrían ser los ecosistemas más antiguos de la Biosfera^[11].

La Ciudad Perdida exhibe una exuberante diversidad biótica entorno a sus torres y chimeneas, con una diversidad específica tan alta (o aún mayor) que la de cualquier chimenea hidrotermal asociada a dorsales. La abundancia de microorganismos en las chimeneas carbonatadas es de 10^8 a 10^9 células por gramo^[7]. El ecosistema tiene su base en comunidades microbianas asociadas a procesos metabólicos sobre el sulfuro y el metano. Así, los principales tipos metabólicos encontrados en estas surgencias son metanógenos anaeróbicos, metilótrofos aeróbicos y anaeróbicos, bacterias sulfato-reductoras y bacterias del azufre^[12]. En el interior de las chimeneas, donde el ambiente es anóxico y rico en CH_4 y H_2 , se localizan las arqueas metanogénicas y las bacterias sulfato-reductoras. En las capas más exteriores, el fluido hidrotermal reducido entra en contacto con el agua marina, rica en sustancias oxidantes, y la comunidad microbiana se enriquece sustancialmente. Además del proceso de sulfato-reducción, en estas capas se produce la oxidación aeróbica de CH_4 , S y H_2S ^[12]. A base

de esta comunidad microbiana viven numerosas especies animales (gasterópodos, anfípodos, poliquetos, nematodos, eufausiáceos, foraminíferos, ostrácodos, demosponjas, gorgonias, ofiuras, así como algunas especies de peces).

Sin duda alguna, el campo hidrotermal de La Ciudad Perdida no es un hito único en el océano global. En la corteza oceánica actual hay numerosos enclaves de fallas ricos en serpentina susceptibles de albergar este tipo de ecosistemas. De hecho, recientemente se ha descubierto otro enclave de muy similares características biogeoquímicas en la Fosa de las Marianas^[13]. El conocimiento de estos ecosistemas abre nuevas perspectivas para la búsqueda de vida en otros planetas, especialmente en mundos helados con océanos sub-superficiales como Europa, una de las lunas de Júpiter, o Encélado, una de las de Saturno. Se sabe que en Marte hay agua y también hay evidencias de la presencia de rocas ultrabásicas^[7], de manera que ecosistemas basados en la serpentina similares a la Ciudad Perdida podrían existir (o haber existido) también en el planeta rojo.

Referencias

¹Wankel SD y otros. Influence of substrate biosphere on geochemical fluxes from diffuse hydrothermal fluids. *Nature Geoscience*, 4: 461-468. 2011.

²Dick GJ y otros. The microbiology of deep-sea hydrothermal vent plumes: ecological and biogeographic linkages to seafloor

and water column habitats. *Frontiers in Microbiology*, 4: 1-15. 2013.

³Maruyama y otros. Global hydrothermal primary production rate estimated from the southern East Pacific Rise. *Cahiers de Biologie Marine*, 39: 249-252. 1998.

⁴Beatty y otros. An obligately photosynthetic bacterial anaerobe from a deep-sea hydrothermal vent. *PNAS*, 28: 9306-9310. 2005.

⁵Pérez N y otros. The potential for photosynthesis in hydrothermal vents: a new avenue for life in the Universe? *Astrophysics and Space Science*, 346: 327-331. 2013.

⁶Felbeck H. Chemoautotrophic potential of the hydrothermal vent tube worm, *Riftia pachyptila* Jones (Vestimentifera). *Science*, 213: 336-338. 1981.

⁷Kelley DS y otros. A serpentinite-hosted ecosystem: the Lost City hydrothermal field. *Science*, 307: 1428-1434. 2005.

⁸Proskurowski G y otros. Low temperature volatile production at the Lost City hydrothermal field, evidence from a hydrogen stable isotope geothermometer. *Chemical Geology*, 229: 331-343. 2006.

⁹Martin WF y otros. Hydrothermal vents and the origin of life. *Nature Reviews Microbiology*, 6: 805-814. DOI 10.1038/nrmi-cro1991. 2008.

¹⁰Braakman R. Mapping metabolism onto the prebiotic organic chemistry of hydrothermal vents. *PNAS*, 110: 13236-13237. 2013.

¹¹Martin WF, Sousa FL, Lane N. Energy at life's origin. *Science*, 344: 1092-1093. 2014.

¹²Brazelton WJ y otros. Methane- and Sulfur- metabolizing microbial communities dominate the Lost City hydrothermal field ecosystem. *Applied and Environmental Microbiology*, 72: 6257-6270. 2006.

¹³Ohara Y y otros. A serpentinite-hosted ecosystem in the Southern Mariana Forearc. *PNAS*, 109: 2831-2835. 2012.