

Evaluación del potencial, biogénesis y características esenciales de los sistemas geotérmicos submarinos en México

- Norte de la Costa Mexicana del Océano Pacífico y Golfo de California -

Mario César Suárez Arriaga

Escuela de Ciencias Físico-Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

E-mail: msuarez@zeus.umich.mx, <http://polya.dme.umich.mx/msuarez/>

Resumen

La energía geotérmica en México abarca todos los tipos de sistemas conocidos: desde los grandes reservorios tradicionales, localizados entre 500 y 3000 metros de profundidad, hasta los recursos geotérmicos profundos, a más de 3000 metros de profundidad. Las fuentes geotérmicas no tradicionales incluyen las partes profundas y los límites de los reservorios hidrotermales tradicionales, los sistemas en roca seca o húmeda caliente, los yacimientos geopresurizados del Golfo de México y los sistemas submarinos hidrotermales observados principalmente en la costa norte mexicana del Océano Pacífico. La energía geotérmica submarina surge por la existencia de rupturas profundas en el fondo marino, a lo largo de los centros de dispersión oceánicos entre las placas tectónicas. Estos sistemas tienen una longitud total aproximada de 65,000 km en la corteza oceánica. Hay dos tipos básicos de sistemas marinos existentes en el Golfo de California: los recursos profundos, localizados a lo largo de las cordilleras entre las placas de la corteza oceánica a más de 2000 m bajo el nivel del mar, y los recursos poco profundos cerca de las plataformas continentales, entre 20 y 50 metros de profundidad. El calor submarino poco profundo también se relaciona con fallas y fracturas en el fondo del mar cerca de algunas costas. Este subsistema se encuentra también en la costa de Punta Banda en Ensenada, Baja California. El potencial preliminar de la energía contenida en tales reservorios se estima, en promedio, en 1120 MW_t por cada km^3 de roca submarina. Las características químicas específicas de las aguas hidrotermales encontradas en esos sistemas oceánicos indican que las interacciones agua-roca, ocurren bajo condiciones de presión y temperatura altas. La energía geotérmica submarina soporta ricas variedades de comunidades biológicas a profundidades donde las plantas no tienen acceso a la luz solar para realizar la fotosíntesis. Hay indicios de que las posibles condiciones para la síntesis de sustancias y elementos químicos necesaria para el origen de la vida primitiva, pudieron ser los sistemas hidrotermales submarinos.

Palabras Clave: Sistemas geotérmicos submarinos, grietas hidrotermales, potencial energético, vida marina profunda, México, Golfo de California, Punta Banda, Océano Pacífico.

Evaluation of the energy potential, biogenesis and essential characteristics of the geothermal submarine systems in Mexico

- Northern Mexican Coast of the Pacific Ocean and Gulf of California -

Abstract

Geothermal energy in Mexico embraces both near-surface traditional reservoirs located between 500 and 3000 meters depth, and deep geothermal resources over 3000 meters in depth. Non-traditional geothermal energy sources in Mexico include the deep portions and boundaries of traditional hydrothermal reservoirs,

systems in hot dry or wet rock, geo-pressured reservoirs in the Gulf of Mexico and hydrothermal submarine systems mainly located close to the northern Mexican coast of the Pacific Ocean. Deep submarine energy is related to the existence of hydrothermal vents emerging in many places along the oceanic spreading centers between tectonic plates. These systems have a total length of about 65,000 km in the Earth's oceanic crust. There are two kinds of ocean systems in the Gulf of California: deep resources, located along the rifts between tectonic plates of oceanic crust over 2000 m below sea level, and shallow resources near continental platforms at 20-50 m depth. The shallow, submarine heat is related to faults and fractures in the sea bottom close to some coasts. This type of shallow, sub-sea system is found offshore at Punta Banda in Ensenada, Baja California. The preliminary energy potential of such reservoirs is estimated at an average of 1120 MW_t per cubic kilometer of sub-sea rock.. The specific chemical characteristics of the submarine hydrothermal waters found in those systems indicate that water-oceanic rock interactions occur under high-temperature and high-pressure conditions. At the same time, submarine geothermal energy supports rich biological communities at depths where living organisms find no sunlight for photosynthesis. Recent research suggests that possible locations for the synthesis of chemicals needed for the origin of life include submarine hydrothermal systems.

Keywords: Submarine geothermal systems, hydrothermal vents, geothermal energy potential, deep sea life, Mexico, Gulf of California, Punta Banda, Pacific Ocean.

1. Introducción

La energía geotérmica profunda representa un potencial esencialmente infinito. Los reservorios hidrotermales a lo largo de las cordilleras y centros de dispersión en las fronteras entre placas tectónicas de la corteza oceánica son ejemplos notables. Ahí, los movimientos divergentes de las placas producen grietas, permitiendo el traslado vertical de calor magmático desde el manto hacia el suelo del océano. El agua fría del mar, al entrar en esas fisuras, se calienta y cambia químicamente durante su contacto con la roca de la corteza oceánica. Esa agua caliente, enriquecida con H₂S (Spiess *et al.*, 1980), es expulsada a través de aberturas, grietas y respiraderos hidrotermales. Además de plantas, en la vecindad inmediata de las grietas hidrotermales, se ha detectado la existencia de un tipo de bacterias llamadas quimiosintéticas que usan el ácido sulfhídrico como una fuente de energía metabólica, llegando a conformar fuentes de comida para cangrejos, almejas, mejillones y gusanos tubícolas o sea, con forma de tubo (Felbeck, 1981; Le Pennec *et al.*, 1983).

De esta manera, la energía geotérmica deviene la base físico-química de ricas cadenas alimenticias en lugares donde es imposible que ocurra la fotosíntesis, porque la luz solar no alcanza esa profundidad. Investigaciones recientes señalan claramente que los posibles sitios para la realización efectiva de la síntesis de elementos químicos necesarios para que la vida primitiva surgiera, fueron los sistemas hidrotermales submarinos (Gallo, 1998; Rummel, 1998; Imai, 1999). Estos resultados son coherentes con la situación bien conocida de la agresividad y toxicidad original de la atmósfera primitiva en la Tierra, muy diferente de la que hoy conocemos e incompatible con la vida. Así comparadas, las condiciones generales de los océanos eran mucho más favorables para permitir el surgimiento de lo biológico.

Los sistemas geotérmicos submarinos conocidos en México se localizan entre dos profundidades extremas: los recursos poco profundos cerca de la plataforma continental, entre 20 y 50 m de profundidad; y los recursos profundos a más de 2000 m debajo del nivel del mar (Suárez, 1998; Suárez, 2000b). Ambos tipos de sistemas existen en la costa norte mexicana del Océano Pacífico. En particular, varias manifestaciones hidrotermales submarinas se encuentran a lo largo de ambas costas de la península de Baja California, sobre todo en el Mar de Cortés o Golfo de California (Figura 1). En estas regiones se descubrió un potencial

geotérmico considerable entre los años de 1980 a 1990 (Grijalva, 1986; Mercado, 1990) y que podría explotarse en un futuro cercano. En la Depresión de Wagner, al norte del Golfo mencionado, los reservorios hidrotermales submarinos se localizan a menos de 30 m de profundidad. Otras áreas termales submarinas accesibles con la tecnología actual, se localizan frente a la costa de Punta Banda, cerca del puerto de Ensenada en Baja California (Figura 2), donde se han medido temperaturas hasta de 140°C a 30 m de profundidad a menos de 500 m de la costa. Ambas zonas geotérmicas son accesibles a la explotación instalando plataformas *offshore*, similares a las usadas por la industria petrolera.

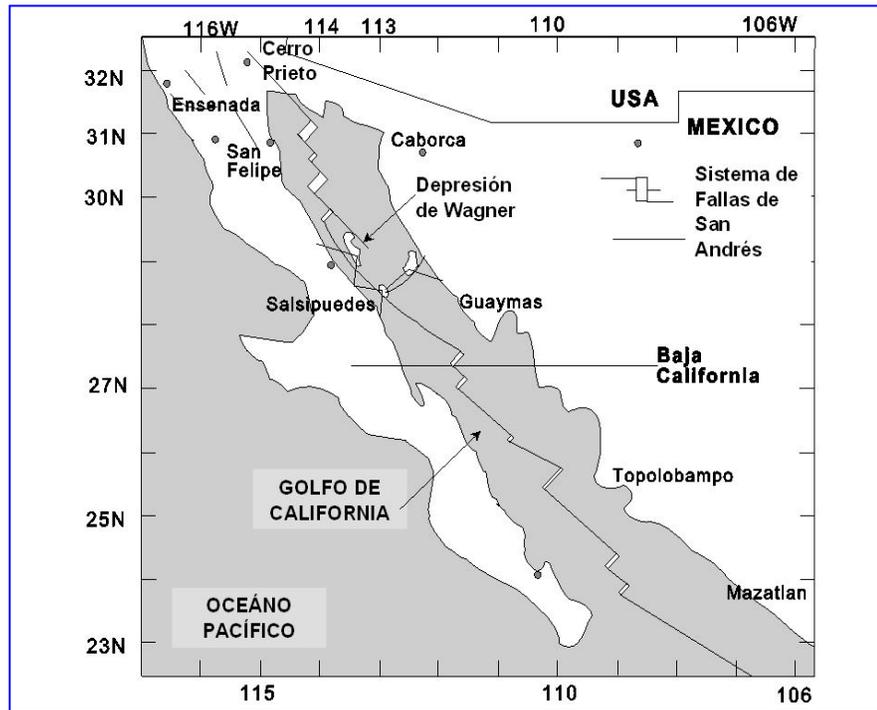


Fig. 1. Localización de la península de Baja California.

Para obtener una rápida imagen comparativa del potencial energético que representa la geotermia submarina, es suficiente esta cifra: el flujo conductivo de calor promedio en el Cinturón Volcánico Mexicano es del orden de 0.10 W/m² (García, 2000); el flujo de calor submarino medido en el Golfo de California es del orden de 0.34 W/m². Este valor fue medido en fuentes termales del fondo marino, que se encuentran a una temperatura promedio estimada en 330°C (Mercado, 1990). El potencial geotérmico de estas fuentes se estima, con una aproximación volumétrica burda, en miles de veces más grande que la energía contenida en los reservorios de Cerro Prieto (Grijalva, 1986; Mercado, 1990; Suárez, 1998; Suárez, 2000b). Otro interés suplementario para el estudio de sistemas geotérmicos submarinos,

proviene de resultados de análisis químicos del agua de mar en contacto con manifestaciones hidrotermales oceánicas. Por ejemplo, las concentraciones de plomo, de manganeso y de hierro contenidos en este fluido hidrotermal submarino, son mucho más altas que las del agua marina normal en aproximadamente 8 mil, 50 mil y 59 mil veces, respectivamente (Mercado, 1993).

2. Geotermia submarina en Punta Banda, Baja California

En Punta Banda, Ensenada, BC (Fig. 2), a 400 m de la costa y entre 20 y 30 m de profundidad, se observan manifestaciones termales submarinas en varios sitios. Se forman por descargas de agua caliente que escapa a través de fisuras asociadas a una estructura transversal mayor en Baja California Norte, de unos 130 km de longitud, llamada la Falla de Agua Blanca. Hace 21 años, se estimó que el flujo de agua ahí descargado era aproximadamente de 100 litros por minuto en los manantiales calientes inter-mareas del sitio (Bustos-Serrano, 1983).

Hay diferencias químicas claras entre esas descargas submarinas y el agua de mar local: las concentraciones de Cl, Na, Mg, Cu, Ni, Cd y Cr son más bajas en el manantial submarino de agua caliente que en el agua marina local. Pero las concentraciones de SiO₂, Ca, K, Li, B, Ba, Rb, Fe, Mn, Cr y Zn son más altas en el manantial submarino que en el agua marina local (Vidal *et al.*, 1978). Por ejemplo, muestras de agua de las

descargas calientes mostraron concentraciones de Ca (2805 ppm), Mg (449 ppm), Mn (4 ppm) y H₂S (0.65 ppm), más altas que el agua de mar normal (Bustos-Serrano, 1983). Comparando, los valores del agua de mar no hidrotermal son: Ca (412.8 ppm), Mg (1288.2 ppm), Mn (2.7469×10^{-4} ppm). El H₂S normalmente es de 0 ppm, excepto en sitios contaminados.

En algunos lugares se midió una temperatura de 102°C a 4 bar de presión (Vidal *et al.*, 1978). En otras áreas, las temperaturas del geotermómetro usado en descargas están entre 90°C y 140°C. Posiblemente este sea el rango de las temperaturas poco profundas del reservorio submarino (Lira, 1999; Bustos-Serrano, 1983). Paralelamente a la costa de Ensenada, en las playas de la Bahía de Todos los Santos, varias grietas termales inter-mareas fueron detectadas a temperaturas entre 30°C y 98°C (Bustos-Serrano, 1983). Vidal *et al.* (1978) calcularon aproximadamente una descarga de agua caliente total de 3.3×10^5 m³ por año a 102°C y un flujo convectivo de calor de 4190 W/m². Esta área geotérmica podría ser accesible a la explotación instalando plataformas *offshore*, similares a las usadas por PEMEX en el Golfo de México. La construcción de un sistema dual de inyección-extracción sería muy simple y relativamente barato de instalar. Las grietas hidrotermales de Punta Banda que brevemente se describen aquí, son muy similares a las existentes en los centros de dispersión oceánicos tectónicamente activos, situados a gran profundidad (Vidal *et al.*, 1981).

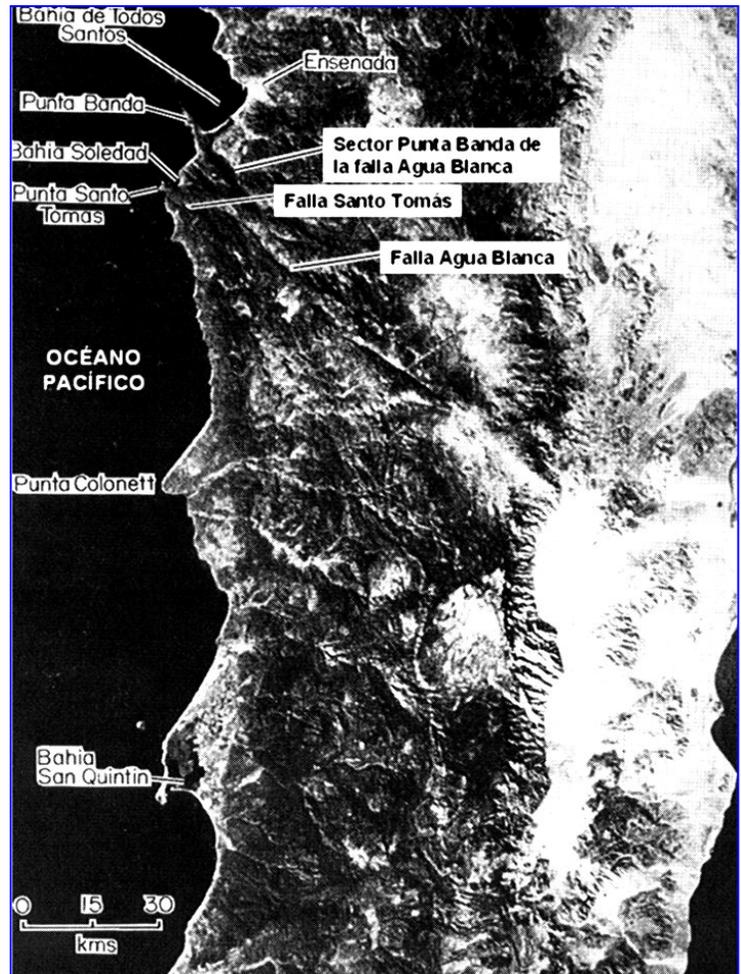


Fig. 2. Imagen de satélite de la región de Punta Banda.

3. Los sistemas geotérmicos submarinos en el Golfo de California

Los reservorios geotérmicos del Golfo de California se formaron por movimientos divergentes entre las placas tectónicas en esa región, permitiendo el traslado vertical de calor magmático hacia el suelo del mar. La falla de San Andrés se localiza a lo largo del límite transformante entre las placas del Pacífico y Norteamérica, donde la cordillera del Pacífico Oriental está dividida en segmentos. El movimiento tectónico relativo divergente entre las placas causa rupturas en la corteza oceánica, llamadas cuencas *pull-apart*. Ello permite el transporte vertical del magma profundo. La temperatura de este magma es de aproximadamente 1000°C (Grijalva, 1986). Tal proceso formó un gigantesco reservorio geotérmico submarino bajo toda la zona del Golfo.

En los años ochenta se hicieron estudios oceanográficos detallados en el Golfo de California, incluyendo trece inmersiones profundas en el submarino *Alvin* (Grijalva, 1986; Mercado, 1990). Los primeros cruceros oceanográficos, hechos para estudiar las corrientes del mar profundo en el Golfo, fueron organizados y financiados por las instituciones oceanográficas Scripps y Woods Hole de los EUA. Mercado (1990) informó sobre muestreos del agua de mar realizados en una región localizada entre los 21°N y los 109°W, a 200 km al

sur del Cabo San Lucas (Fig. 1), cubriendo un área de 50 km de radio. De estas muestras, se registraron anomalías de metano, helio e hidrógeno asociadas a fluidos geotérmicos. El flujo submarino de calor por conducción medido en el Golfo de California, resultó ser del orden de 0.34 W/m^2 . En esa zona el flujo de agua caliente expelido por chimeneas naturales, blancas y negras, tiene una velocidad aproximada de 2.5 m/s, fluyendo a través de agujeros con diámetros de 10 a 20 cm aproximadamente. Estos datos proporcionan un flujo continuo de agua caliente de unos 44 kg/s expelido por cada una de las chimeneas existentes. Mercado (1990) estimó un potencial geotérmico submarino de aproximadamente $97,000 \text{ MW}_t$ durante 30 años, a una temperatura promedio de 330°C y suponiendo dimensiones del reservorio de 5 km de ancho por 1600 km de longitud y 0.6 km de espesor, dentro del Golfo.

La geoquímica de las manifestaciones submarinas a 350°C , puede ayudar a entender mejor la geoquímica de la geotermia terrestre. Las rocas calientes del fondo marino causan reacciones químicas que alteran la composición química natural del agua marina. Los análisis realizados por Mercado (1993), describen procesos que involucran interacción agua-roca y mezcla de fluidos magmáticos que causan variaciones de sales disueltas en el agua de mar. Mediciones hechas por ese autor muestran que el plomo, el manganeso y el hierro del fluido hidrotérmico, aumentan 8 mil, 51 mil y 59 mil veces respectivamente en el agua descargada por manifestaciones hidrotermales submarinas, con respecto al agua del mar normal.

4. La geotermia en la Depresión de Wagner

Otro estudio en el Golfo de California fue el realizado por Nicolás Grijalva entre agosto y noviembre de 1986. Fue el fruto de un trabajo conjunto con el Centro de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional de La Paz, Baja California, y la Institución Scripps de Oceanografía. Esta investigación oceanográfica tuvo lugar en la Depresión de Wagner localizada entre las latitudes N de $31^\circ00'$ y $31^\circ15'$ y las longitudes W de $113^\circ50'$ y $114^\circ10'$ (Fig. 1). El crucero logró completar estudios de geomorfología, oceanografía, geofísica, geología, geoquímica, y sedimentología (Grijalva, 1986). La zona estudiada se localiza en yacimientos sedimentarios, teniendo dimensiones aproximadas de 10 km de ancho por 20 km de largo y 180 m de espesor. Durante ese crucero se observaron montículos de lodo, descargas de gases, hidrocarburos y agua caliente fluyendo desde el fondo marino hasta la superficie del mar. A 180 m de profundidad la temperatura del agua era mayor a 200°C . Grijalva (1986) demostró experimentalmente que las burbujas observadas desde el barco son hidrocarburos en forma de gas butano. Las muestras de agua contenían manganeso, mientras que en las muestras de sedimentos se encontró azufre, hierro y níquel.

En 1969 ocurrió un terremoto “en racimo” en la Depresión de Wagner. Fueron más de cincuenta sismos de magnitud promedio 5 en la escala de Richter (Grijalva, 1986). Sus ondas sísmicas indicaron a los analistas que la cuenca pudiera ser un reservorio geotérmico de gran magnitud. En contraste con las cuencas profundas en el sur del Golfo, cuyos inmensos recursos son inaccesibles actualmente, la cuenca de Wagner representa recursos energéticos cuya explotación es posible con la tecnología existente. A partir de datos inéditos, Grijalva estimó que el potencial geotérmico de esta zona submarina, podría ser de 100 a 500 veces más grande que la energía termal contenida en el campo geotérmico de Cerro Prieto.

En los perfiles sísmicos del lecho marino en la cuenca pudieron observarse patrones concéntricos de estructuras geológicas colapsadas. Según Grijalva (1986), las fisuras corresponden a fallas transformadas y el colapso de estructuras corresponde a centros de dispersión. A más profundidad, la penetración del agua marina en el subsuelo es mayor, existiendo rupturas a través de las cuales se genera circulación hidrotermal y se producen hidrocarburos. Esta formación geológica da lugar a la emergencia de material magmático y metales. Los resultados hacen pensar en la presencia de tres fuentes de recursos primarios: metales, hidrocarburos y reservorios geotérmicos.

5. Origen y significado de los isótopos ^3He en la Depresión de Wagner

Hacia la parte NW del Golfo de California, durante el crucero ya descrito, las muestras de agua recolectadas se encontraron enriquecidas con un isótopo del Helio, el ^3He (Fig. 3). Se sabe que este isótopo es indicativo de fuentes magmáticas, pues las fuentes naturales ricas en ^3He sólo existen en el manto debajo de la corteza de la Tierra (Truesdell, 1998). Así la única explicación posible para su presencia en las aguas del Golfo es que este gas helio viene de fuentes locales de origen magmático.

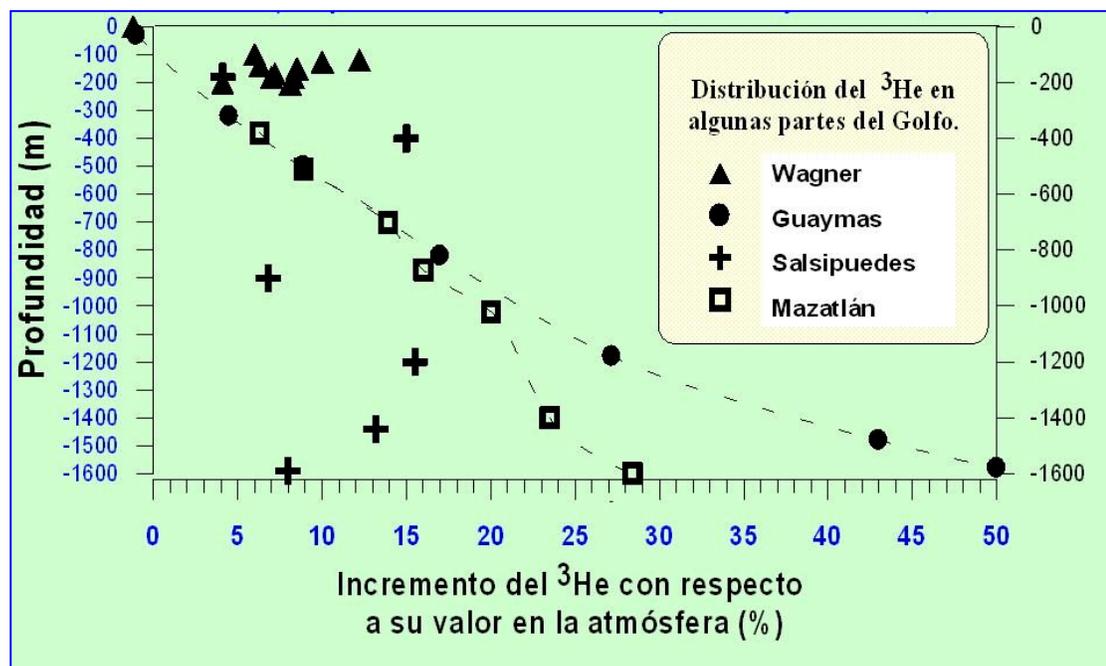


Fig. 3. Isótopos de ^3He en el Golfo de California. (Adaptada de datos tomados por Grijalva, 1986.)

El ^3He muestreado en la depresión de Wagner, después de ser transportado desde el fondo hasta cerca de la superficie en rocas del manto, debe ser disuelto por agua de mar infiltrada y llevado por plumas submarinas de agua caliente en forma vertical ascendente. A pesar de los efectos de la acción de las fuertes mareas en la zona (rango de la marea de hasta 10 m de altura) y de mezclarse con aguas marinas de diferentes densidades, los valores del cociente $^3\text{He} / ^4\text{He}$ encontrados en la cuenca bajo estudio fueron significativamente más altos que el valor atmosférico del mismo cociente. El valor numérico de esta razón de isótopos $^3\text{He} / ^4\text{He}$, acompañando a manantiales hidrotermales en el fondo del océano, puede ser hasta nueve veces mayor que la misma proporción encontrada en la atmósfera terrestre cuyo valor es de 1.4×10^{-6} . Grijalva (1986) estimó un promedio de la razón $^3\text{He} / ^4\text{He}$, hasta 4.5 veces más alto que la misma proporción en el agua marina a 150 m de profundidad para todo el Golfo de California.

6. Potencial de la energía geotérmica submarina en las costas mexicanas del Océano Pacífico

Aun con la escasa información disponible, es posible efectuar un cálculo preliminar y estimar el potencial energético que representan los recursos geotérmicos submarinos en la República Mexicana. Este cálculo queda restringido a las zonas submarinas cercanas a las costas del Océano Pacífico y más particularmente a la región delimitada por las siguientes coordenadas (Fig. 1): latitud N entre 32° y 23° , y longitud W entre 117° y 106° . Con los datos reportados para esa zona, construí la Tabla 1.

Tabla 1. POTENCIAL GEOTÉRMICO PRELIMINAR DE LA COSTA MEXICANA DEL OCEANO PACÍFICO POR CADA KM³ DE VOLUMEN DE RESERVOIRIO SUBMARINO

Nombre de la zona (*)	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Densidad de Energía (MJ/m ³)	Energía Disponible (1 × 10 ¹⁵ J)	Potencial Energético (MW _t /km ³)
Punta Banda	51	220	574	231.8	245
Wagner	55	260	674	331.2	350
Golfo de California	220	360	906	499.5	528
Total	-	-	-	1062.5	1123

*Nota: Para las propiedades termodinámicas en Punta Banda, construí un modelo lineal (z representa la profundidad positiva en metros bajo el nivel del mar) dado por:

$$P(z) = 1.0 + 0.1 z \text{ [bar]}$$

$$T(z) = 97.082 + 0.246 z \text{ [°C]}$$

(1)

En todos los casos consideré una densidad promedio de roca volcánica de 2500 kg/m³, una porosidad del 10 % y un calor específico de 1000 J/kg/°C, para un volumen de roca fijo e igual a un kilómetro cúbico (1.0 × 10⁹ m³). Esta operación es necesaria porque el volumen de roca porosa y caliente es la incógnita principal en este tipo de sistemas. La última columna de la Tabla 1 es, por consiguiente, el potencial térmico, susceptible de uso directo o eléctrico en cada kilómetro cúbico de roca oceánica en la vecindad de las grietas hidrotermales. En los cálculos empleé el siguiente modelo volumétrico para reservorios submarinos, adaptado de Suárez (2000a):

Densidad de Energía del Fluido:

$$E_i^{\text{fluido}} = \frac{\text{energía interna}}{\text{volumen de fluido}} = \sum_{\alpha = \text{liq, vap}} \phi S_{i\alpha} \rho_{i\alpha} e_{i\alpha} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right] \quad (2)$$

Densidad de Energía de la Roca:

$$E_i^{\text{roca}} = \frac{\text{energía interna de roca}}{\text{volumen de roca solida}} = (1 - \phi) \rho_r c_r T_i \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right] \quad (3)$$

Energía Total del Reservorio:

$$E_0 = (E_i^{\text{fluido}} + E_i^{\text{roca}}) \cdot V_r \text{ [kJ]} \quad (4)$$

Las energías finales se consideran correspondientes al estado termodinámico calculado con la presión de abandono dada como dato conocido (de 5 bar en Punta Banda). Las diferencias algebraicas entre ambos estados se considera que son las energías disponibles, dadas por las siguientes fórmulas.

Para la roca:

$$\Delta E^{roca} \approx (1 - \phi) c_r \rho_r (T_i - T_f) \quad (5)$$

Para el fluido:

$$\Delta E^{fluido} = (\phi \rho h)_{liquido}^i - (\phi \rho h)_{2-fases}^f \quad (6)$$

La Energía Total disponible en el Reservorio es:

$$\Delta E^{TOTAL} = \Delta E^{roca} + \Delta E^{fluido} \quad (7)$$

El coeficiente de transformación de esa energía disponible (Suárez, 2000a) para convertirse y utilizarse directamente en forma de calor (MW_t) es dado por:

$$c_e = \frac{1.0 \cdot 10^6}{31,557,600 \cdot t_a} \quad (8)$$

Donde t_a es el tiempo de amortización de la inversión y de duración de la instalación. Si se quiere calcular la energía eléctrica recuperable del reservorio (Suárez, 2000a), entonces hay que multiplicar la energía disponible dada por la ecuación (7), por el coeficiente c_e dado por la ecuación (8) y por los coeficientes f_e de recuperación de esa energía:

$$G_e = f_e c_e \cdot \Delta E^{TOTAL} \quad [MW_e] \quad (9)$$

Por ejemplo, considerando que sólo pudiera transformarse en electricidad el 1% de la energía submarina ($f_e = 0.01$), durante $t_a = 30$ años, y utilizando los datos de las referencias de Mercado (1993), Grijalva (1986) y Bustos (1983), se deduce la la capacidad mínima teóricamente instalable en MW_e en función de la energía disponible dada en la Tabla 2.

Tabla 2. POTENCIAL GEOTERMOELÉCTRICO PRELIMINAR DE LA COSTA MEXICANA DEL OCÉANO PACÍFICO EN CADA VOLUMEN ESTIMADO DE RESERVORIO SUBMARINO.

Zona:	Punta Banda	Wagner	Golfo	Total
Volumen (km ³):	10	200	4800	5010
Potencial (MW _e):	25	700	25,344	26,069

7. Energía geotérmica y vida en el mar profundo

Durante las inmersiones con el submarino *Alvin*, se observaron diversas manifestaciones hidrotermales. Los llamados Jardines Colgantes se descubrieron a 2600 m de profundidad (Mercado, 1990 y 1993). Los miembros de la expedición observaron, en la misma zona, impresionantes chimeneas naturales de 6 metros de alto, aproximadamente a la misma profundidad, descargando chorros de agua a 350°C. Esas chimeneas

naturales son casi metálicas y están formadas en parte por hierro y en parte por sulfuro de cobre. En los cientos de fotografías tomadas por Mercado (1990) y por Corliss y Ballard (1977), se muestra que las fisuras y grietas en la roca del fondo marino cercanas a una chimenea aparecen incrustadas por acumulaciones amarillas y blancas luminosas de precipitados químicos.

A una distancia de entre 15 y 20 metros de la chimenea hay grandes y abundantes comunidades de organismos bentónicos. La explicación es que las plumas de agua caliente producen condiciones materiales en el agua adyacente ricas en nutrientes suspendidos, ideales para nutrir desde gusanos hasta grandes moluscos tipo bivalvo. En los Jardines Colgantes y en la Cordillera del Pacífico Oriental, las fotografías analizadas muestran la existencia de grandes anémonas de mar y peces tipo pluma. Se encuentran también bolsas locales de sedimentos excavados por animales que se alimentan de nutrientes ahí depositados (Ballard, 1992).

Un aspecto fascinante es la estrecha relación entre los componentes del agua hidrotermal y la vida en el mar profundo. La mayor parte de los organismos que viven en las grietas geotérmicas dependen para subsistir del ácido sulfhídrico (H_2S). En su artículo Corliss y Ballard (1977) reportan evidencias de que el ácido sulfhídrico que emerge de las chimeneas provee energía para el metabolismo de las bacterias quimiosintéticas que pueden más que alimentar y satisfacer las necesidades de los organismos bentónicos.

Cualesquiera que sean las fuentes básicas de alimentación, está claro que los oasis hidrotermales son suficientemente ricos como para sostener grandes poblaciones locales de racimos de gusanos en forma de tubo de hasta 46 cm de largo, varios animales tipo cangrejo, peces tipo brótulas rojizas, langostas y otros carnívoros en forma de cefalópodos. Sobre la lava aparecen incrustadas lapas, esponjas y otras formas poco conocidas de protozoarios (Corliss y Ballard, 1977; Mercado, 2000). Todos esos organismos viven en tales oasis a temperaturas cercanas a los $17^{\circ}C$, fruto del fuerte gradiente de temperatura entre las chimeneas y la fría agua de mar ($\sim 4^{\circ}C$). La dependencia de la vida con el H_2S se ha llegado a demostrar, pues en algunas zonas de grietas donde el ácido sulfhídrico ha cesado de fluir, desaparecen las bacterias y, con ellas, la comunidad entera del ecosistema hidrotermal (Gallo, 1998).

Se ha observado también que los gusanos tubícolas viven sistemáticamente en el H_2S y se alimentan de él mediante el siguiente mecanismo: dentro de su cuerpo llevan una especie de bolsa llena de bacterias que procesan ese gas y proveen con energía al gusano. Algo similar ocurre con las almejas gigantes, quienes también tienen una relación simbiótica con las bacterias. Otro ejemplo es el de los cangrejos blancos que se alimentan directamente de esas bacterias como si fueran ganado. Los llamados gusanos de Jericó aparecen adheridos a las grietas geotérmicas absorbiendo H_2S junto con las bacterias. El *poliqueto albinelo* es otro gusano tubícola que tiene la mayor tolerancia a altas temperaturas de todos los animales del planeta ($80^{\circ}C$). Los pulpos son los últimos depredadores de esta cadena alimenticia, y se alimentan de cangrejos y otras criaturas. Debido a la falta de luz solar, todos esos organismos son ciegos, aunque sorprendentemente, algunos tienen ojos que no ven (Ballard, 1992; Gallo, 1998).

En la década de 1990 la Woods Hole Oceanographic Institution de los EUA (WHOI) realizó una serie de expediciones, en el mismo submarino Alvin, a la región conocida como 9N (9 North), situada en aguas internacionales, a unos 800 km al sur de la costa mexicana del Pacífico ($9^{\circ}50'$) y a 2600 m de profundidad. Durante una de esas expediciones, miembros de la WHOI tuvieron la oportunidad única de observar el nacimiento de una grieta hidrotermal (Gallo, 1998). Después de un año de la erupción inicial en esa grieta las chimeneas surgidas estaban completamente cubiertas de vida como en cualquier arrecife coralino. De esta forma la expedición logró presenciar la evolución completa de la comunidad biológica desde la formación de la grieta geotérmica. Se llegaron a identificar ahí más de 300 especies nuevas de organismos bentónicos.

8. El papel de la geotermia en el origen de la vida primitiva

El material orgánico existente en los mares profundos no pudo surgir ni puede mantenerse a través de la fotosíntesis normal de energía solar. Es claro que la energía y el material necesarios derivan de fuentes geotérmicas. Ya se describió en la sección anterior la manera en que se constituyen las bases de ricas cadenas alimenticias no sólo en el Golfo de California, sino en muchos otros lugares a lo largo de las cordilleras de dispersión entre las placas tectónicas de la corteza oceánica. Estos prolíficos lugares pueden considerarse como “*oasis submarinos en un frío desierto desprovisto de luz*”. Queda ahora por mostrar, en forma plausible, el probable mecanismo geotérmico mediante el cual la vida primitiva pudo surgir.

Esa hipótesis biogenética, surgida en la década de 1970, se ha ido consolidando y aparece actualmente como la más aceptada por amplios sectores de la comunidad científica (Corliss y Ballard, 1977; Marshall, 1979; Felbeck, 1981; Ballard, 1992; Gallo, 1998; Rummel, 1998; Imai, 1999; Mercado, 2000). En particular, cierta investigación experimental reciente (Imai, 1999), puntualiza claramente que los posibles sitios de ocurrencia de la síntesis de químicos necesaria para que surgieran formas primitivas de vida, fueron los sistemas hidrotermales submarinos, donde el agua del mar circula a través de, y reacciona con, la corteza oceánica, hasta el día de hoy. Además de la erupción de lava en esos lugares, el agua de mar entra en las grietas y fisuras, se calienta y cambia químicamente por interacción con la roca. Esta agua marina calentada es lanzada hacia arriba a través de las chimeneas y de las grietas hidrotermales. El agua así transformada contiene ahora ácido sulfhídrico derivado de la reducción del sulfato oceánico (Marshall, 1979). Todo queda listo para que las bacterias quimiosintéticas usen el H₂S como fuente metabólica de energía y puedan generarse, reproducirse y florecer como alimento para invertebrados como cangrejos, almejas, mejillones y gusanos poliquetos.

En general, las bacterias pueden eliminarse al hervir el agua, pero no por la alta temperatura en sí sino por la actividad de agitación molecular directa del vapor. Las bacterias quimiosintéticas detectadas por varios científicos en los sitios antes descritos (Corliss y Ballard, 1977; Marshall, 1979; Rummel, J. D., 1998; Imai, 1999), se adaptan y desarrollan a temperaturas más altas que el punto de ebullición. Debido a la alta presión del agua a esas profundidades, el agua no produce vapor y entonces las bacterias sobreviven. De esta forma las bacterias crecen y se constituyen en el primer eslabón de una cadena alimenticia basada en la energía geotérmica submarina. Esto abre una ventana nueva a la comprensión del origen de la vida sobre la Tierra.

La biogénesis es la creación de vida. En el caso de las grietas hidrotermales, se trata de la creación de vida desde las entrañas mismas del planeta, por un mecanismo asociado a la actividad volcánica. Se han realizado algunos trabajos de laboratorio fascinantes, de creación de compuestos orgánicos en lugares que se asemejan a las grietas hidrotermales (Imai, 1999; Rummel, 1998). Según algunos químicos, más que provocar su destrucción, la alta presión del agua junto con el calor, es capaz de producir compuestos orgánicos a partir de las sustancias disponibles. Las condiciones únicas de fluidos hidrotermales muy calientes ricos en minerales junto con el agua fría del océano a grandes presiones proveen el ambiente adecuado para que un compuesto inorgánico se transforme en orgánico.

¿Puede la Tierra por sí misma generar la energía y el material como para crear vida? Aún no se ha comprobado irrefutablemente que la vida se haya originado en las grietas, pero una teoría aceptada por muchos biólogos (Gallo; Rummel, 1998) es que la vida primitiva evolucionó en medios con altas temperaturas. Se podría pensar que el origen de la vida estuvo acompañado por temperaturas elevadas y altas presiones, condiciones características de las grietas y chimeneas hidrotermales.

Lejos de las grietas en el fondo del lecho oceánico casi no hay vida, y lo poco que hay crece muy lentamente. En cambio en las grietas hidrotermales hay una verdadera explosión de vida. La velocidad de crecimiento biológico es tan alta como en las selvas tropicales más fértiles (Gallo, 1998). En las grietas hidrotermales se

han encontrado formas de vida que probablemente sean las más primitivas del planeta, lo que genera más argumentos para pensar que la biogénesis pudo haberse originado en estos increíbles ambientes de la profundidad oceánica. Se han encontrado fósiles animales en grietas hidrotermales en depósitos minerales separados por miles de kilómetros y que tienen unos 400 millones de años de antigüedad (Rummel, 1998). Estos fósiles son la prueba de que los ecosistemas de grietas hidrotermales son los más antiguos del planeta, y aún contienen organismos que coexistieron con los dinosaurios.

Los organismos que vivían en la tierra primitiva no necesitaban la luz solar pues estaban protegidos por los kilómetros de agua arriba de ellos, de manera que los cambios en la superficie terrestre y en la atmósfera tenían poco efecto en la vida del mar profundo. Impactos de meteoritos como el que se cree hicieron desaparecer a los dinosaurios o erupciones volcánicas catastróficas, ahí en el fondo marino pasaron desapercibidos. Por eso algunos geólogos piensan que los ecosistemas de grietas hidrotermales actuaban como un refugio de vida en momentos geológicamente violentos de la historia de la Tierra (Gallo, 1998). De hecho, han de haber actuado como oasis de vida en momentos en los cuales fuera de los océanos o muy lejos de ellos las condiciones eran realmente malas para la supervivencia en la Tierra.

9. Conclusiones

- En el Golfo de California y en la costa mexicana del Océano Pacífico existe un potencial geotérmico considerable. Este recurso es parte de un gigantesco sistema hidrotermal que abarca el golfo mismo, Cerro Prieto y los campos geotérmicos de California, todos relacionados con el sistema de fallas de San Andrés. Este sistema es la manifestación superficial de movimientos laterales en proceso, que causaron la separación de la península Baja California de la porción continental mexicana y que la siguen moviendo hacia el noroeste.

- En el fondo del mar, en la Depresión de Wagner, están ocurriendo procesos hidrotermales y magmáticos de gran importancia: flujos horizontales y verticales, formación de minerales y generación de hidrocarburos a partir de sedimentos orgánicos de gran magnitud. El isótopo ^3He descubierto en la Depresión de Wagner es de origen magmático, proviene directamente del fondo del mar y es transportado hasta la superficie por corrientes submarinas verticales.

- La interacción agua-roca y los fluidos magmáticos causan variaciones anómalas en el contenido de sales disueltas en el agua del mar profundo. El plomo, el manganeso y el hierro contenidos en el fluido hidrotermal, aumentan sus concentraciones respectivas aproximadamente en 8 mil, 51 mil y 59 mil veces en el agua de mar en contacto con manifestaciones hidrotermales submarinas. Esto constituye otra atracción suplementaria de gran interés comercial para el estudio de sistemas geotérmicos submarinos.

- Las chimeneas naturales fotografiadas por Mercado (1990) a 2600 metros de profundidad en el Golfo de California, descargan chorros de agua a 350°C . Estas plumas de agua caliente generan condiciones favorables en el agua adyacente para producir materiales suspendidos como fuente de alimentación para diferentes organismos vivos. El agua marina profunda circula a través de fisuras en la corteza y reacciona químicamente con la roca oceánica. Esta interacción pudo haber producido las primeras sustancias químicas necesarias para que la vida pudiera surgir por primera vez.

- La energía geotérmica submarina es la base de ricas cadenas alimenticias no sólo en el Golfo de California sino también en muchos otros lugares a lo largo de las cordilleras entre las placas tectónicas de la corteza oceánica. Las bacterias quimiosintéticas usan el ácido sulfhídrico del agua de mar calentada y expulsada por las chimeneas y las grietas hidrotermales, formando alimento para invertebrados como almejas, mejillones y gusanos. Dentro de un radio de 20 m con centro en las chimeneas, existen grandes comunidades de plantas y

animales, formando un tipo de oasis submarinos profundos que atraen abundantes poblaciones de organismos vivos, todos viviendo a temperaturas cercanas a los 17°C.

Referencias

- Bustos-Serrano, H., 1983. Caracterización Física, Química y Morfológica de la Zona Hidrotermal Marina de La Jolla, Punta Banda, B.C., México. Tesis Profesional. Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, 114 pp. Inédito.
- Ballard, R. D., 1992. Oases of Life in the Cold Abyss. Presentation at the IX Congreso Nacional de Oceanografía. Veracruz, México.
- Corliss, J.B., and Ballard, R.D., 1977. Oases of Life in the Cold Abyss. *National Geographic Magazine*, Vol. 152, No. 2, pp. 441-453.
- Felbeck, H., 1981. Chemoautotrophic potential of the hydrothermal vent tube worm. *Riftia pachyptila* Jones (Vestimentifera). *Science*, N.Y. 213:336-338.
- Gallo, D. (1998), Director of Special Projects WHOI - Comunicación personal.
- García, G.H., 2000. Modelo del Estado Térmico Inicial del Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México. Tesis de Doctorado, Instituto de Geofísica, UNAM, 184 pp. Inédito.
- Grijalva, N., 1986. Investigación de la Energía Geotérmica en la Depresión de Wagner en el Golfo de California. Latitud 31° 00' al 31° 15' y Longitud 113° 50' al 114° 10'. Reportes no publicados preparados para la Comisión Federal de Electricidad, Cerro Prieto, BC, bajo Contrato No. CCP-CLS-002/86. Fecha del primer Reporte: 10/1/1986, (22 pp). Fecha del segundo Reporte: 11/22/1986, (38 pp). Inédito.
- Imai, 1999. Citado in *Science*, Vol. 283, No. 5403, issue of 5 Feb. 1999 (p. 831), AAAS.
- Le Pennec, M., Lucas A. and H. Petit, 1983. Études Preliminaire sur un Mytilidae des sources Hydrothermales du Pacifique. *Haliotis* **13**:69-82.
- Lira, H., 1999. Comunicación Personal.
- Marshall, N.B., 1979. Hydrothermal "Oases". In: *Developments in Deep-Sea Biology*. Blandford Press, London, pp. 284-307.
- Mercado, S., 1990. Manifestaciones Hidrotermales Marinas de Alta Temperatura (350°C) Localizadas a 21°N, a 2600 m de Profundidad en la Elevación Este del Pacífico. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 6, No. 3, pp. 225-263.

- Mercado, S., 1993. Geotermoquímica de Manifestaciones Hidrotermales Marinas de Alta Temperatura. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 9, No. 2, pp. 155-164.
- Mercado, S., 2000 - Comunicación personal.
- Rummel, J. D., 1998. Planetary Protection Officer - Nasa. Comunicación personal.
- Spiess, F.N., K.C. MacDonald, T. Atwater, R. Ballard, A. Carranza, D. Cordoba, C. Cox, V.M. Díaz García, J. Francheteau, J. Guerrero, J. Hawkins, R. Haymon, R. Hessler, T. Juteau, M. Kastner, R. Larson, B. Luyendyk, J.D. MacDougall, S. Miller, W. Normark, J. Orcutt and C. Rangin, 1980. East Pacific Rise: Hot springs and Geophysical experiments. *Science* **207**:1421-1433.
- Suárez, M.C., 1998. Deep Geothermal Systems in Mexico: An Integral Diversified Resource for the Energy of the Future. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 22, pp. 327-331.
- Suárez, M.C., 2000a. Modelo volumétrico para la evaluación de reservorios geotérmicos con información incipiente. Informe Técnico No. DEX-013 / 2000, Dpto. de Exploración - CFE. Inédito.
- Suárez, M.C., 2000b. Potencial de los Sistemas Geotérmicos Submarinos en México - Costa Mexicana del Océano Pacífico y Golfo de California - Informe Técnico No. DEX-SG-014 / 2001. Subgerencia de Estudios, Dpto. de Exploración, CFE. Julio de 2001. Inédito.
- Truesdell, A., 1998 - Comunicación personal.
- Vidal, V.M., Vidal, V.F., Isaacs, J.D. and Young, D.R., 1978. Coastal Submarine Hydrothermal Activity off Northern Baja California (Parte 1). *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83, No. B4, pp. 1757-1774.
- Vidal, V.M., Vidal, F.V. and Isaacs, J.D., 1981. Coastal Submarine Hydrothermal Activity off Northern Baja California (Parte 2). Evolutionary History and Isotope Geochemistry. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. B10, pp. 9451-9468.