

El impacto de los recientes descubrimientos sobre la exploración de petróleo y gas natural. Énfasis sobre India.

Por

**J. Marvin Herndon
Transdyne Corporation
11044 Red Rock Drive
San Diego, California, 92131, Estados Unidos
mherndon@san.rr.com**

Traslación cortesía de **Cecilia de León**

Resumen: Dos descubrimientos recientes impactan de gran manera la comprensión respecto al origen y ubicación de depósitos de petróleo y gas natural. Uno de los descubrimientos, relacionado con la formación de hidrocarburos a partir del metano, amplía significativamente las regiones potenciales donde se podrían encontrar depósitos de petróleo y gas natural abióticos. El otro, el descubrimiento de la imposibilidad física de la convección del manto terrestre, restringe el rango y campo de comportamiento geodinámico, y conduce a nuevos conocimientos sobre la formación de depósitos de petróleo y gas natural. Este artículo resalta el impacto y las implicaciones de estos descubrimientos, especialmente al relacionarse con la exploración de petróleo y gas natural en India y alrededor del mundo. A partir del razonamiento desarrollado aquí, de las generalidades de las consideraciones involucradas, del entendimiento desarrollado con respecto al Sistema de Rifts (Fosas de Hundimiento) del Este de África y la experiencia adquirida de las Trampas siberianas, más antiguas y extensas; el pronóstico y el potencial de la región bajo las Trampas de Deccan en India de convertirse en un lugar de grandes descubrimientos de recursos energéticos, le parecen al autor bastante favorables.

Introducción

Las medidas geofísicas in situ y los supuestos geológicos son la clave del éxito de la exploración de petróleo y gas natural. Pero por décadas, las suposiciones estuvieron obstaculizadas por potenciales desconocimientos relacionados con el origen del petróleo y el gas natural, y por ciertos conceptos erróneos en relación al comportamiento geodinámico de la Tierra. Dos recientes descubrimientos, sin embargo, impactan de manera fundamental y positiva la comprensión de la geología referente a la exploración de petróleo y gas natural y su eventual explotación. Uno, la verificación experimental de la formación de hidrocarburo a partir del metano, CH₄, a temperaturas y presiones superiores a las del manto terrestre [1], amplía de modo significativo las regiones potenciales en las que pueden encontrarse depósitos abióticos de

petróleo y gas natural. El otro, el descubrimiento de la imposibilidad física de la convección del manto terrestre [2], restringe el rango y campo de comportamiento geodinámico y conduce a nuevos conocimientos sobre la formación de depósitos de petróleo y gas natural. El propósito de este artículo es resaltar el impacto y las implicaciones de estos descubrimientos, especialmente al relacionarse con la exploración de petróleo y gas natural en India y alrededor del mundo.

Origen del petróleo y el gas natural

La idea de que una proporción significativa de las reservas de petróleo y gas natural son de origen no-biológico es todavía controvertida, pero hay cada vez más discusión, observación y experimentación. El concepto base de petróleo abiótico como una erupción de materia desde lo profundo de la Tierra fue anunciada a principios del siglo 19 por Alexander von Humboldt y Louis Joseph Gay-Lussac. En 1951, Kudryatsev [3] creó la teoría Ruso-ucraniana del petróleo y el gas natural abióticos. Los experimentos de laboratorio que demostraron la viabilidad de la formación de hidrocarburos bajo condiciones de profundidad terrestre, incluso en ausencia de hidrocarburos primarios, constituyeron el primer apoyo importante para esta teoría [4] y ya existen informes de observaciones realizadas que proporcionan evidencia [5, 6].

Como subrayó Herndon [7], en última instancia, la prognosis de vastas potenciales reservas de petróleo y gas natural del manto y de la corteza profunda depende críticamente de la naturaleza y circunstancias de la formación de la Tierra. En ese artículo general en *Current Science*, Herndon mostró que el popular “modelo estándar de la formación del sistema solar” llevaría a la contradicción de que los planetas terrestres tienen un núcleo masivo insuficiente. Presentó pruebas que apoyaban la idea de que la Tierra se formó inicialmente como un planeta gigante gaseoso, al precipitarse desde el interior de un protoplaneta gigante gaseoso. Antes de serle quitado su envoltorio de gas, la proto-Tierra tenía cerca de 300 veces la masa de la Tierra actual, siendo casi idéntica a Júpiter. Particularmente, la evidencia señala que la formación de la Tierra en su totalidad se llevó a cabo en asociación íntima con gases primordiales, que incluyen alrededor de 1,3 masas del tamaño de la Tierra de metano, CH₄. Bajo estas condiciones, la posibilidad de oclusión de compuestos de carbono mejora enormemente en comparación al concepto previo de formación de la Tierra, y es indudablemente relevante para el pronóstico mejorado de reservas de metano en la profundidad de la Tierra, y de una fuente de carbón para petróleo y gas natural abióticos.

Anteriormente, el propósito de los experimentos era la demostración que la formación de hidrocarburos *n*-alcanos bajo condiciones termodinámicas en profundidad, alrededor de 1.500 °C at 50 kbar, involucraba el uso de carbonato de Calcio, CaCO₃, como fuente de carbón [4]. Recientemente, Kolesnikov y otros [1] mostraron que, cuando el metano es expuesto a una presión mayor a 2 GPa y a temperaturas en el rango de 700-1200 °C, éste reacciona formando hidrocarburos que contienen átomos de carbono 2-4. Los resultados de esa investigación no solo

conforman un soporte experimental del concepto de la formación de petróleo abiótico, sino que también adelantan la posibilidad de su formación directamente del metano, en vez del CaCO_3 .

Cuando las plantas utilizan dióxido de carbono atmosférico, CO_2 , fotosintéticamente, ocurre una fracción isotópica. Las plantas retienen preferencialmente el isótopo de carbono más liviano, ^{12}C . La variación observada en el rango de $\delta^{13}\text{C}$ en el petróleo, al ser similar a la variación en el rango de $\delta^{13}\text{C}$ en el carbono de las plantas, se utiliza como base para suponer un origen biológico del petróleo. Pero esta similitud no puede tomarse como prueba que el petróleo es de origen biológico exclusivamente. Como se verá más abajo, las circunstancias para atrapar el petróleo abiótico derivado del manto son las mismas que para el petróleo biogénico, por consecuencia, la contaminación de las muestras sería inevitable. Es más, la composición isotópica del metano de la profundidad de la Tierra se desconoce, y ciertamente cambiaría durante su trayecto a través de medios porosos y se volvería progresivamente más liviano por el fraccionamiento por difusión [8]. Circunstancialmente, el carbono no-carbonatado de meteoritos carbonáceos es isotópicamente más liviano que el carbono atmosférico [9], como también lo son los diamantes que se encuentran en la profundidad del manto [10]. Actualmente, no se conoce una manera de medir el radio de isótopos de carbón estables que caractericen sin ambigüedad el origen del petróleo.

La formación experimental de hidrocarburos n-alcenos a partir del metano bajo condiciones similares al manto Terrestre hecha por Kolesnikov et al. [1] no se ocupó de la posibilidad de los efectos del fraccionamiento isotópico kinético o de la manera en la que pueden ocurrir. Con suerte, esto se hará en futuros experimentos, al ser la formación de petróleo completamente consistente con el pronóstico mejorado de un reservorio de metano en la profundidad de la Tierra que se ha descrito previamente [7] y cada vez más significativa a la luz de la evidencia que se detalla más abajo.

La Imposibilidad Física de la Convección en el Manto

Durante la Segunda Guerra Mundial, Hess [11] dejó que su equipo de sonda náutica funcionara continuamente durante sus extensos viajes a través del Océano Pacífico, proporcionando por primera vez, extensos perfiles del lecho oceánico. Imaginó correctamente que, a medida que el nuevo lecho oceánico se forma en las crestas del océano medio, el lecho oceánico más antiguo se desliza a través de la extensión del océano, hundiéndose finalmente en las trincheras submarinas. Hess creía que esto era sólo la parte visible de una gran curva causada por la convección en el manto terrestre [11]. La convección en el manto se convirtió entonces en el componente fundamental de su teoría de expansión de lecho oceánico y, subsecuentemente, un componente crucial de la teoría de tectónica de placas, la cual adoptó de manera completa la expansión del lecho oceánico.

Elsasser [12] había allanado el camino para una aceptación rápida de la convección en la profundidad de la Tierra al proponer en 1939 su idea de que el campo geomagnético se genera por la acción de dinamo impulsada por la convección en el núcleo líquido de la Tierra. El hecho que el manto sea sólido y no líquido no era una preocupación seria ya que, por ejemplo, se puede observar que las ventanas de vidrio de iglesias se empiezan a combar al cabo de largos períodos de tiempo y se pensaba que el manto era un tanto plástico. Es más, el cálculo del Número adimensional de Rayleigh [13] usando parámetros realísticos del manto, producía invariablemente un valor alto que supuestamente indica convección. Más aún, la teoría de tectónica de placas parecía explicar tan bien las observaciones del lecho marino, que muchos pensaron que la convección en el manto "debe existir". Durante décadas, la idea de la convección en el manto ha sido virtualmente la base de todas las consideraciones geofísicas relacionadas con el manto de la Tierra. Pero hay un problema muy serio, descubierto por Herndon [2]: La convección en el manto terrestre, así como la convección en el núcleo terrestre [14], es físicamente imposible.

Chandrasekhar [15] describió la convección de la siguiente forma: "El ejemplo más simple de convección por inducción térmica surge cuando una capa horizontal de fluido se calienta desde abajo y se mantiene una temperatura gradiente adversa. El adjetivo "adverso" se usa para calificar la temperatura gradiente prevaleciente ya que, debido a la expansión térmica, el fluido en la parte inferior se vuelve más liviano que el fluido en la parte superior, y este arreglo más pesado en la parte superior es potencialmente inestable. Bajo estas circunstancias el fluido intentará redistribuirse a sí mismo para corregir esta debilidad en su arreglo. Así es cómo se origina la convección térmica: Representa los esfuerzos del fluido de restaurarse cierto grado de estabilidad." La claridad en la explicación de Chandrasekhar inspiró a Herndon [2] a reflexionar y, más tarde, a descubrir por qué la convección en el manto terrestre es físicamente imposible.

Se hace referencia (incorrectamente) de manera frecuente a los parámetros del manto terrestre que producen un Número Rayleigh alto, que indican supuestamente una convección vigorosa. En 1916, Lord Rayleigh [13] aplicó la aproximación de Boussinesq [16] a las ecuaciones Eulerianas de movimiento, para derivar aquel número adimensional para cuantificar el comienzo de inestabilidad en una delgada capa horizontal de fluido que se calienta desde abajo. Las suposiciones que lo sustentan, sin embargo, son inconsistentes con los parámetros físicos del manto de la Tierra, a saber, que el manto terrestre es "incompresible", que la densidad es una "constante" excepto cuando se modifica por expansión térmica.

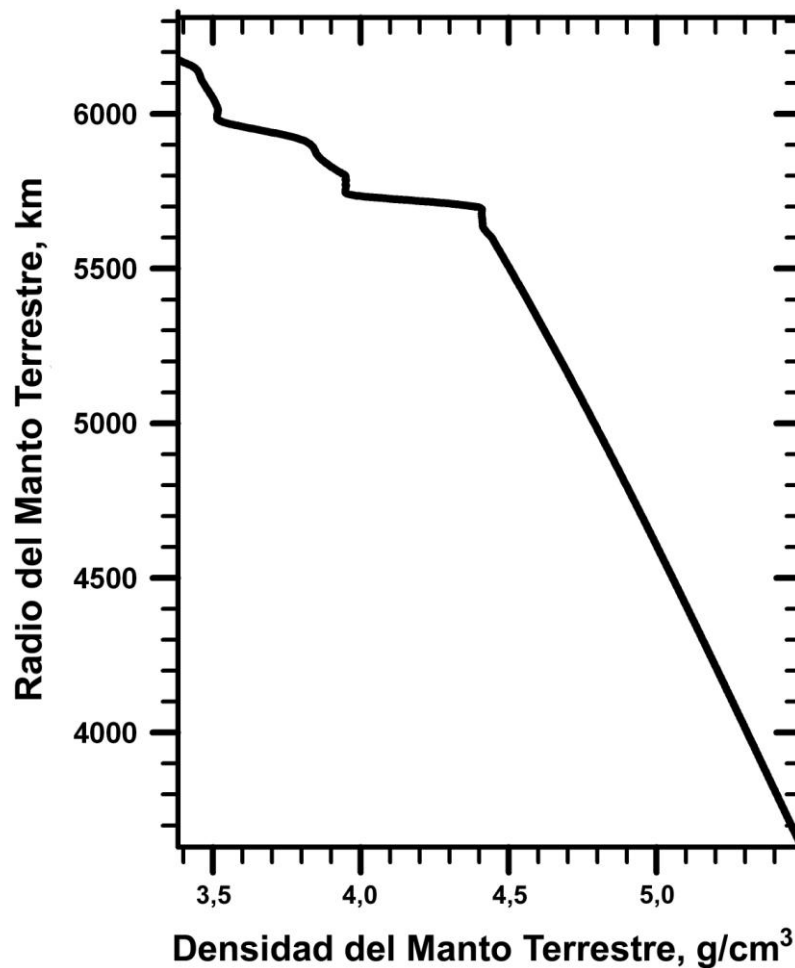


Figura 1. La densidad como función del radio del manto terrestre [17, 18].

Como se muestra en la figura 1, el manto de la Tierra es un 62% más denso en la parte inferior que en la superior debido a su propio peso y el peso de la corteza [17, 18]. La ínfima cantidad de expansión térmica que puede llegar a ocurrir en la parte inferior del manto, $< 1\%$, no puede superar tal diferencia en densidad, lo que significa que el manto terrestre no puede volverse más pesado en la parte superior; y también significa que una "parcela" de material de la parte inferior del manto, expandida térmicamente, no puede volverse lo suficientemente liviana como para flotar hacia la parte superior del manto. En el manto de la Tierra, por lo tanto, no puede haber convección.

En las ciencias naturales físicas es difícil, y algunos podrán decir que es imposible, probar que una proposición es correcta; pero, por otro lado, es posible probar que es falsa. El autor ha

probado que la proposición de convección en el manto es falsa [2]. Por lo tanto, todas las consideraciones geofísicas que están basadas en esta suposición de convección en el manto deben ser revisadas.

La Geología sin Convección en el Manto

Las interpretaciones geológicas modernas están frecuentemente guiadas y/o dirigidas por inferencias derivadas de las placas tectónicas. Pero ahora, el autor puede enunciar unívocamente que la teoría de placas tectónicas es incorrecta [2]. Después de haber sido la teoría geodinámica dominante, aceptada ampliamente durante más de cuarenta años, la teoría de placas tectónicas es incorrecta porque depende críticamente de la suposición de convección en el manto, la cual es físicamente imposible. En ciertos aspectos, el fracaso de la tectónica de placas no debería ser sorprendente: La teoría de la tectónica de placas no solo se basaba sobre una supuesta convección no observada, sino que fue formulada sin conocimientos de una fuente de energía que pueda impulsar actividad geodinámica durante el tiempo que la Tierra ha existido.

La aparentemente convincente similitud entre las observaciones del fondo del océano y las placas tectónicas surge como consecuencia de la dinámica global descrita en la dinámica de la descompresión de toda la Tierra de Herndon [19, 20] que no requiere, o no depende, de la convección del manto terrestre. En resumen, la dinámica de la descompresión de toda la Tierra es la consecuencia de la formación de la Tierra como una gigante de gas similar a Júpiter. Debajo de las casi 300 masas terrestres de hidrógeno, helio y componentes volátiles como el metano, el núcleo de piedra de sílice y aleaciones fue comprimido hasta casi el 64% del radio actual, una cantidad suficiente como para producir una estrecha cáscara continua de roca continental sin lechos oceánicos.

Después de haber sido despojada de su gran sobrecarga de gases volátiles protoplanetarios por las altas temperaturas y/o por la actividad violenta del viento solar de la fase T Tauri, asociado con la ignición termonuclear del Sol, la Tierra habría empezado inevitablemente a descomprimirse, buscando un nuevo equilibrio hidrostático. La descompresión de la Tierra entera resultaría en un sistema global de mayores rupturas primarias que aparecen en la corteza rígida que persiste y se identifican como el sistema global de crestas del océano medio, como explica la teoría de la expansión de la Tierra [21, 22]. Pero aquí termina la similitud con esta teoría. La dinámica de la descompresión de la Tierra entera [19], propone un mecanismo diferente para la geodinámica global que implica la formación de grietas de descompresión secundarias y el rellenado de estas grietas, un proceso que no se ha limitado a los últimos 180 millones de años, la edad máxima del piso oceánico.

Como la Tierra se descomprime y se hincha desde adentro, se puede esperar que las cortezas del interior profundo se ajusten a cambios en radio y curvatura por deformación plástica. A medida

que la Tierra se descomprime, el área de la superficie rígida de la Tierra aumenta por la formación de grietas de descompresión secundaria, frecuentemente ubicadas cerca de los márgenes continentales e identificadas actualmente como trincheras submarinas. Estas grietas de descompresión secundaria son seguidamente rellenadas con basalto proveniente de las crestas del océano medio que atraviesan el lecho oceánico por arrastre gravitacional, zambulléndose finalmente adentro y rellenando las grietas de descompresión secundaria, emulando de este modo el concepto de subducción de las placas tectónicas, pero sin convección del manto y sin recirculación de la corteza a través del manto como se supone en la teoría de placas tectónicas.

El antiguo supercontinente, Pangea, imaginado por Wegener [23] e incluido en la teoría de placas tectónicas, fue imaginado como rodeado por el océano, ocupando casi 1 ½ veces su superficie. En cambio, en la dinámica de descompresión de la Tierra entera, hay un único real continente antiguo: una costra 100% unida de roca continental llamada Ottland en honor a Ott C. Hilgenberg, el primero en concebir su existencia [22]. Más aún, nunca pudo haber habido otra cosa. La fragmentación de Ottland por grietas de descompresión primaria y la formación de lechos oceánicos intersticiales en conjunción con grietas de descompresión secundaria no necesita producirse inmediatamente después de la remoción de los gases primordiales, ni ocurre necesariamente en un único punto en el tiempo. Las aún-no-delineadas secuencias de la subdivisión y desplazamiento de Ottland tienen sólo un ligero parecido con la popular, pero hipotética, ruptura de Pangea, en la que se supone que los continentes están a la deriva, rompiéndose y agregándose, como cabalgando en la cima de celdas de una inexistente convección del manto. En la dinámica de la descompresión de la Tierra entera hay pocos grados de libertad. Si bien es compleja, también tiene mucha simplicidad porque la fragmentación y dispersión continental representa la aproximación a un equilibrio dinámico, no la azarosa ruptura y reagregación antes imaginada.

Mucha de la geología y geofísica está basada en la presunción de la convección del manto y la construcción de modelos basados en esa suposición, y la construcción de modelos sobre esos modelos. La imposibilidad física de la convección del manto significa, por ejemplo, que no hay razón para creer que el manto fue revuelto y mezclado repetidamente y no hay razón para creer que el manto fue significativamente desgasificado. Esta última circunstancia aumenta considerablemente la prognosis del abastecimiento futuro de energías abióticas, al menos en comparación con las ideas previas [7].

Investigaciones sismológicas revelaron la estructura física interna de la Tierra [24-26]. Más recientemente, con el establecimiento de redes sismológicas extensas y la tecnología de poderosas supercomputadoras, la tomografía sísmica comenzó a visualizar estructuras adentro del manto [27-29]. Como los datos base son limitados, consistentes en velocidad de ondas P y ondas S, las imágenes producidas están sujetas a interpretaciones frecuentemente basadas en el comportamiento pre-percibido de la Tierra. Por ejemplo, uno encuentra descripciones de

imágenes, teñidas por la creencia en la convección del manto como “bloques que se zambullen profundamente”, que también pueden ser interpretadas en cambio como “grietas de descompresión secundaria rellenas”.

Las imágenes tomográficas de los llamados penachos del manto son cada vez más importantes para la comprensión de la geología. Pero, incluso con el advenimiento del tomógrafo sísmico, existe todavía una gran controversia sobre la verdadera naturaleza de los penachos del manto y sobre la cuestión de si los penachos del manto existen realmente [30, 31].

El concepto del penacho del manto se originó en la sugerencia de Wilson en 1963 [32], de que el arco volcánico comprendido entre las Islas Hawaianas se formó cuando el lecho marino se movió a través de un persistente y fijo punto caliente. En 1971, Morgan [33] propuso que los focos calientes eran manifestaciones de la convección en el manto inferior.

En ciertos casos, tomografías sísmicas visualizaron focos calientes que se extendían a la base del manto inferior, alentando la idea obsesiva de la convección del manto [27, 29]. Luego de décadas de controversia sobre los focos calientes, sin embargo, el autor puede ahora establecer inequívocamente que los penachos del manto no son una manifestación de la convección del manto porque la convección en el manto de la Tierra es físicamente imposible [2]. Los penachos del manto implican transporte térmico, no transporte de masa. De este modo el ámbito y dominio del conocimiento geológico, particularmente en lo inherente a la exploración del petróleo y del gas natural, está más limitado otra vez.

La controversia de décadas alrededor de los focos calientes y los penachos del manto tuvieron como consecuencia la generación de una plétora de confusiones e interpretaciones geológicas contradictorias, frecuentemente basadas en la proposición no válida de la convección del manto o en presunciones basadas en el modelo de las placas tectónicas. Dejemos esto a un lado y consideremos de nuevo la conducta de la Tierra particularmente en sus manifestaciones de superficie.

La Nueva Dinámica de la Tierra de Herndon

Globalmente, casi toda la actividad geológica importante es la consecuencia de un único proceso, la formación de una nueva área de la superficie para acomodarse al volumen planetario aumentado por la descompresión, que involucró primariamente la fractura de la extensión de la corteza, extrusión del basalto y el rellenado de las grietas de descompresión [19, 20]. La principal consecuencia es la separación de la superficie de la Tierra por dos tipos de grietas de descompresión. Bajo las grietas de descompresión primarias subyacen fuentes de calor suficiente para generar y extrusar basalto fundido. Por otra parte, las grietas de descompresión secundaria, que no poseen esas fuentes de calor, producen trincheras en las que el basalto, extrudado en otra

parte, viene finalmente a infiltrarse y rellenarlas. La energía para la actividad geológica es primariamente la vasta energía acumulada por la compresión protoplanetaria, aumentada hasta cierto punto por la energía de la fisión nuclear georeactiva [34-37] y la energía de la desintegración radioactiva.

La descompresión del manto tiende a propagarse a través del manto como un tsunami, hasta que alcanza el obstáculo constituido por la base de la corteza. Allí, la rigidez de la corteza se opone a la continua descompresión, aumenta la presión y comprime la materia en la interfaz manto-corteza que resulta en calentamiento por compresión. Finalmente, la presión se libera en la superficie a través de la formación de grietas de descompresión primaria, es decir, fracturas de extensión con su asociada formación de lecho y vulcanismo, y mediante la formación de una grieta de descompresión secundaria y/o ensanchamiento. El proceso del “tsunami térmico” de la descompresión del manto puede ser muy significativo en el enfriamiento de la superficie de la Tierra, por el gradiente geotérmico observado en la corteza, el vulcanismo substancial y, quizás también, la generación de terremotos [20]. Este proceso también aumenta enormemente el pronóstico de recursos de energía abiótica por aumento de la presión y calor de la base de la corteza, un punto potencial de colección para el metano del manto u otras materias carbonáceas [7]. Una consecuencia del descubrimiento de Herndon de la imposibilidad física de la convección del manto [2] es la comprensión de que la descompresión de la Tierra entera y el fenómeno antes llamado “penachos del manto” están íntimamente y activamente conectados.

En los 1960, geocientíficos descubrieron helio ocluido en basalto oceánico que, notablemente, tenían una proporción de $\text{He3}/\text{He4}$ más alta que la del aire. En aquel momento no se conocía ningún mecanismo de la profundidad de la Tierra que pudiera servir para la medición experimental del He3 , por lo que se supuso que su origen era un He3 atrapado en la época de la formación de la Tierra que fue luego diluido con He4 de la desintegración radioactiva. Las simulaciones numéricas de vanguardia de un georeactor, llevadas a cabo en Oak Ridge National laboratory, produjeron un helio de fisión, como se muestra en la figura 2, con una composición isotópica dentro del rango exacto de las composiciones típicamente observadas en basaltos oceánicos [36, 38]. Para más información, ver Rao [39].

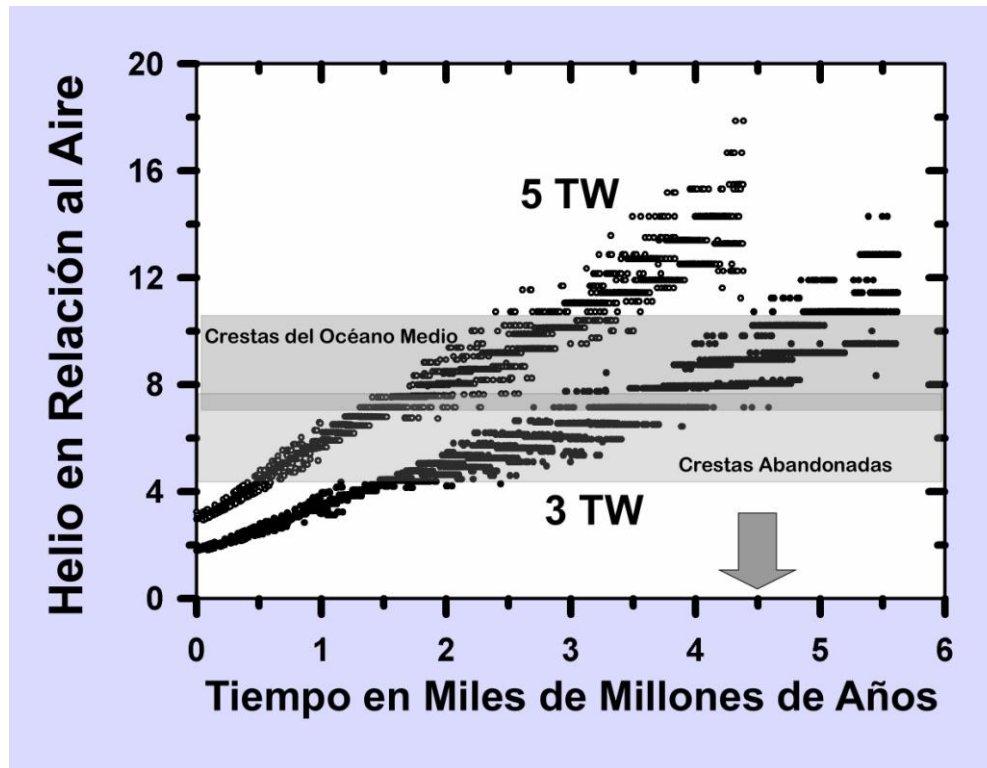


Figura 2. Proporción de $3\text{He}/4\text{He}$ producido por fisión, en relación con la del aire, RA, proveniente de cálculos numéricos de un georeactor nuclear a 5 TW (máx.) y 3 TW (mín.) niveles de poder [36]. La banda que comprende el 95% de nivel de confianza para valores medidos en basaltos del pliegue del océano medio (MORB), está indicada con líneas llenas. La edad de la Tierra está marcada por la flecha. Nótese la distribución de valores calculados a 4.5 Gyr, la edad aproximada de la Tierra. Los valores que se incrementan son consecuencia de la combustión del uranio. Los basaltos de “penacho” de las fuentes profundas de Islandia presentan valores en el rango más alto de 37 RA [40]. Figura del [41].

Cuarenta y nueve focos calientes fueron identificados, pero no todos tienen la misma superficie o manifestaciones de composición [42]. Cerca del 18%, incluyendo las Islas Hawái e Islandia, están caracterizados por basaltos que contienen helio con alta proporción $\text{He}3/\text{He}4$, es decir, $\text{RA} > 10$. Por debajo de ambas, Hawái e Islandia, la tomografía sísmica visualiza estructuras tipo penacho que se extienden hacia abajo hasta la base del manto inferior [27-29]. Como la convección del manto es físicamente imposible [2], estas estructuras no pueden ser penachos, ni tampoco materia transportada por su flotabilidad desde el fondo del manto inferior hasta la superficie. En cambio parecen ser de origen térmico, caminos por los que el calor del núcleo de la Tierra se dirige a la superficie.

El helio, siendo un gas inerte muy ligero, altamente móvil, puede aparentemente viajar desde el núcleo de la Tierra hasta la superficie a través de estos conductos de calor, progresando hacia arriba, hacia siempre decrecientes densidades. Además de presagiar la eventual desaparición del campo geomagnético [36], la alta proporción $\text{He3} / \text{He4}$ observada, sirve como marcador, identificando el basalto particular como uno en cuya extrusión fue necesario que calor del núcleo de la Tierra pasara por un canal.

Más que una extrusión de basalto produciéndose simplemente mientras el lecho marino pasa por encima de un foco caliente, a escala global, la descompresión del planeta íntegro parece estar intrínsecamente involucrada, al menos en circunstancias donde el calor del núcleo de la Tierra en esos canales puede ser identificado por altas proporciones de $\text{He3} / \text{He4}$. Mjelde y Faleide [43] descubrieron, por ejemplo, variaciones en la producción de basalto en Islandia que tienen la misma periodicidad y tiempo relativo que las variaciones del basalto de Hawái, en el lado opuesto de la Tierra. Su descubrimiento puede tener amplias, pero aún ignoradas, consecuencias.

El lecho marino que pasa sobre focos calientes ofrece una explicación razonable de la formación de arcos de islas basálticas como las de Hawái y la cadena asociada Emperador Seamount. Esta explicación está significativamente de acuerdo con la dinámica de descompresión de la Tierra íntegra. La generalización del concepto “paso sobre un foco caliente” a aluviones de basalto del continente medio, como en las trampas de Deccan en la India y en las Trampas Siberianas en Rusia central, que tienen ambas altas proporciones $\text{He3} / \text{He4}$ [44, 45], sin embargo, es insostenible a la luz de la imposibilidad de tectónica de placas [2].

Implicaciones

Durante cuatro décadas, la geología de la exploración de petróleo fue descrita en términos de placas tectónicas que se basa en la convección del manto, físicamente imposible [2]. Las manifestaciones de superficie, como cuencas conectadas (foreland) y cuencas back-arc que parecen bien descritas por las placas tectónicas, son muchas veces descritas de manera similar por la dinámica de la descompresión de la Tierra, aunque con sutiles pero importantes diferencias, especialmente las relativas a la ausencia de subducción.

En la terminología de las placas tectónicas, “falla” (rift) se refiere a la interfaz entre dos placas que están empezando a desprenderse. En la dinámica de la descompresión de la Tierra, “falla” se refiere al comienzo de la formación de una grieta de descompresión. La falla es una parte integral de los procesos de descompresión de la Tierra de sucesivas fragmentaciones en continentes, comenzando con Ottland y continuando hasta el presente, y acerca de las cuales el autor hace las siguientes generalizaciones: El proceso de fragmentación de los continentes comienza con la formación de una grieta de descompresión. Con el transcurso del tiempo, la grieta se ensancha, formando un valle de falla o cuenca. Erupciones volcánicas pueden

producirse subsecuentemente, dependiendo normalmente de la cantidad de calor disponible. La cuenca de la falla formada de este modo se convierte en un entorno ideal para el desarrollo de estratos geológicos frecuentemente asociados con depósitos de petróleo y gas natural y pueden seguir siendo una parte de los márgenes continentales aún después de la formación del lecho oceánico.

Virtualmente, todos los depósitos de petróleo están conectados de alguna manera con, o son la consecuencia de, fallas; aún aquéllos depósitos como las cuencas conectadas (forelands) que implican compresión hacia abajo, que puede resultar del agrietamiento y extensión en otro lugar. La fragmentación de los continentes, tanto las exitosas como las fracasadas, comienzan con un agrietamiento. Las observaciones del agrietamiento que ocurre actualmente en el triángulo de Afar, en el nordeste de Etiopía, y la observación de las consecuencias del agrietamiento a través de Sistema de Rifts (Fosas de Hundimiento) del Este de África (Figura 3), puede ayudar a echar luz sobre la naturaleza del agrietamiento relacionado con depósitos de petróleo que ha ocurrido en otros lugares.

El triángulo de Afar es el triple empalme donde la falla del Mar Rojo, el pliegue de Carslberg del Océano Índico y el Sistema de Rifts del Este Africano se encuentran. Las imágenes de tomografía sísmica tomadas por debajo de esta región, muestran una muy amplia zona de baja velocidad que se extiende hasta la base del manto inferior, interpretada como un “súper-penacho” [46, 47]. Como el calor en la base del manto inferior no puede hacer que la materia del fondo del manto sea lo suficientemente ligera como para flotar hacia arriba [2], la alta proporción He3/He4 , $\text{RA} > 10$, medida en el basalto volcánico de Afar [48], indican conductos de calor del manto profundo que permiten al helio inerte de alta movilidad, migrar hacia regiones de cada vez menor densidad.

Los procesos relacionados con la extensión observados en Afar y a lo largo del Sistema de Rifts del Este de África, proporciona todos los componentes cruciales para la formación de depósitos de petróleo. El agrietamiento produce la formación de profundas cuencas, como se evidencia, por ejemplo, en el Lago Tanganika, con 1,4 km. de profundidad, el segundo lago más profundo en el mundo; y por el Lago Nyasa, de 0,7 km. de profundidad, el cuarto más profundo, los que surgieron como parte del Sistema de Rifts del Este Africano. Las elevaciones que se observan causadas por la dilatación bajo la superficie [49] hacen que la tierra elevada sea susceptible a la erosión, proveyendo así gran cantidad de material sedimentario para el relleno de cuencas con rocas almacén. El material sedimentario de derivación volcánica puede estar mineralizado abundantemente, lo cual asegura fuertes florecimientos (blooms) de fitoplancton. El levantamiento puede tomar tierras inundadas por mar, provocando la formación de depósitos de halita por desecación, y puede también provocar además la formación de domos.

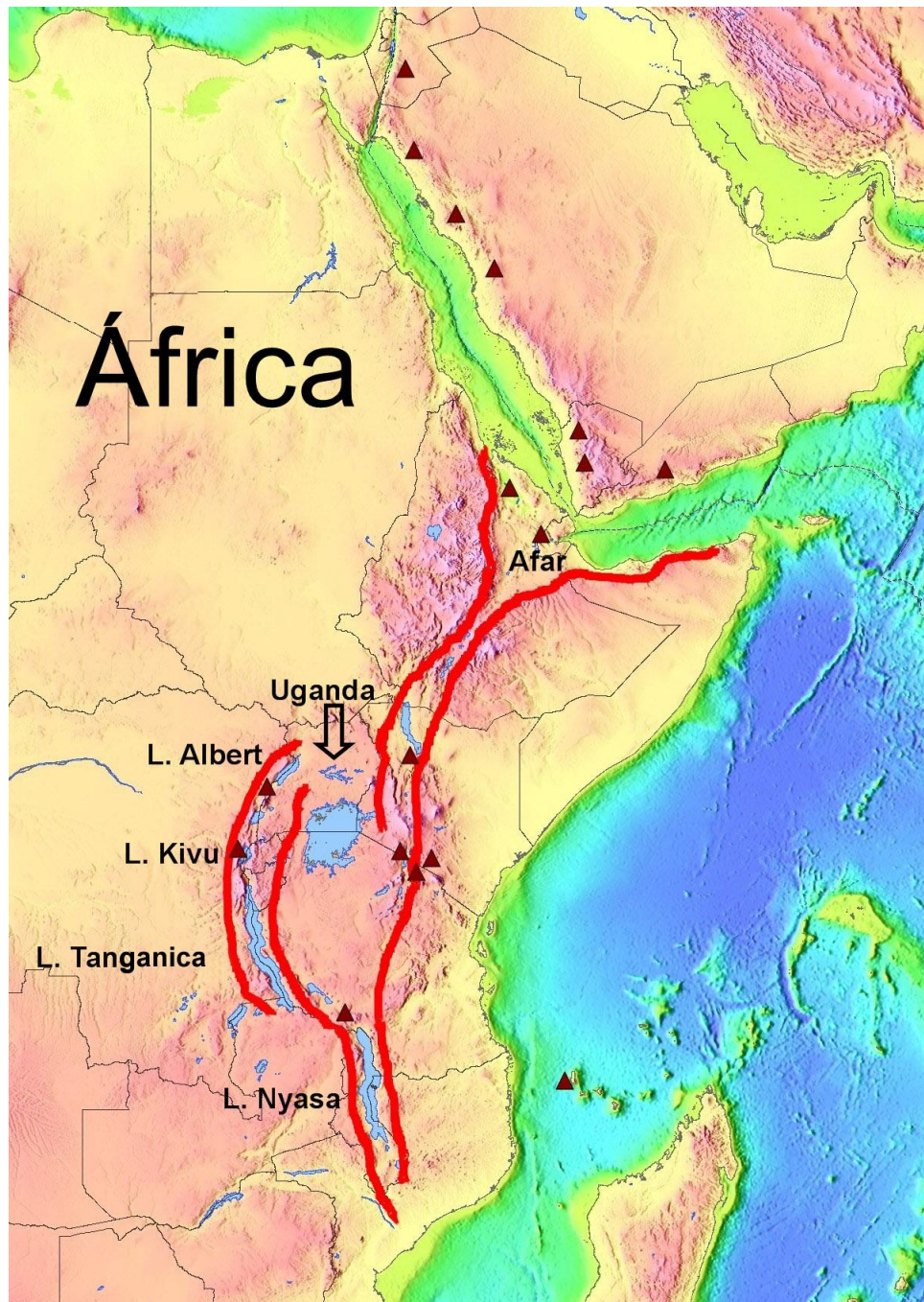


Figura 3. La porción noreste de África. Las líneas rojas muestran las mayores fallas comprendidas en el Sistema Africano de Fosas de Hundimiento. La actividad volcánica está indicada por triángulos marrones.

El aumento de volumen en Afar provee importantes sedimentos para arena de //yacimiento/reservorio///, liberada por los ríos Congo, Níger y Nilo hacia cuencas en el borde continental, que se formaron durante la temprana fragmentación por extensión del continente y que son las principales provincias petroleras de África. Todos los componentes del reservorio, fuente y tapa (sello) están relacionados con el influjo de sedimentos [50]. El agrietamiento local puede provocar todos estos componentes, además de la formación de cuencas, como se indicaba en el informe publicado el 2 de Junio de 2009 por el *East African Business Week*, donde se señala que, según recientes resultados, un oficial de rango del Departamento de Energía indicaba que las reservas de petróleo de Uganda [la cuenca del lago Alberto del Sistema de Rifts del Este Africano] podían ser mayores que las de los países del Golfo Pérsico.

¿Y qué respecto de la posibilidad de petróleo abiótico? Aunque no hay un modo inequívoco de constatar la amplitud de un petróleo de posible origen abiótico, la posibilidad, aún controversial, no debe ser descartada, especialmente cuando está implicado el agrietamiento. Por ejemplo, en 1980 Gold y Soter [51] establecieron que el Lago Kivu, parte del Sistema de Rifts del Este Africano, contiene 50 millones de toneladas de metano disuelto para las que no hay una fuente microbiana adecuada.

La región, incluyendo la Cuenca del Oeste Siberiano, que se ubica entre las montañas Urales y la plataforma siberiana, sufrió un extenso agrietamiento cerca de 500-250 millones de años atrás [52] y movimientos ascendentes que provocaron la formación de cuencas de fallas que desarrollaron estratos geológicos a gran escala, sumamente aptos para atrapar petróleo o gas natural [53]. Cerca de 250 millones de años atrás, oleadas masivas de basalto surgieron a borbotones por alrededor de un millón de años, cubriendo el área con quizás más de 2000 km³ de basalto que contenía helio con alta relación H₃/H₄ [44]. Estos basaltos se conocen como Trampas Siberianas. La evidencia indica que el agrietamiento continuó luego de la extrusión de basalto. El agrietamiento parece subyacer la formación de cuencas de fallas y la masiva erupción de basalto posterior. La alta relación He₃/He₄ indica que el calor fue conducido desde el núcleo de la Tierra. Hoy en día, esta área es conocida por contener uno de los más extensos depósitos de petróleo, gas natural y carbón mineral del mundo.

India puede ser entendida geológicamente como un continente en proceso de fragmentación; sus aspectos específicos son descriptos en detalle por Sheth [54]. Figura 4, la representación esquemática de la India, adaptada de Seth [54], enfatiza sus numerosas fallas importantes. El autor ha agregado a la figura en magenta, las ubicaciones relacionadas con el agrietamiento (Rifts) donde se hicieron descubrimientos importantes de petróleo y gas natural. Las formaciones de cuencas de fallas tienden a desarrollar estratos geológicos aptos para atrapar petróleo o gas natural.

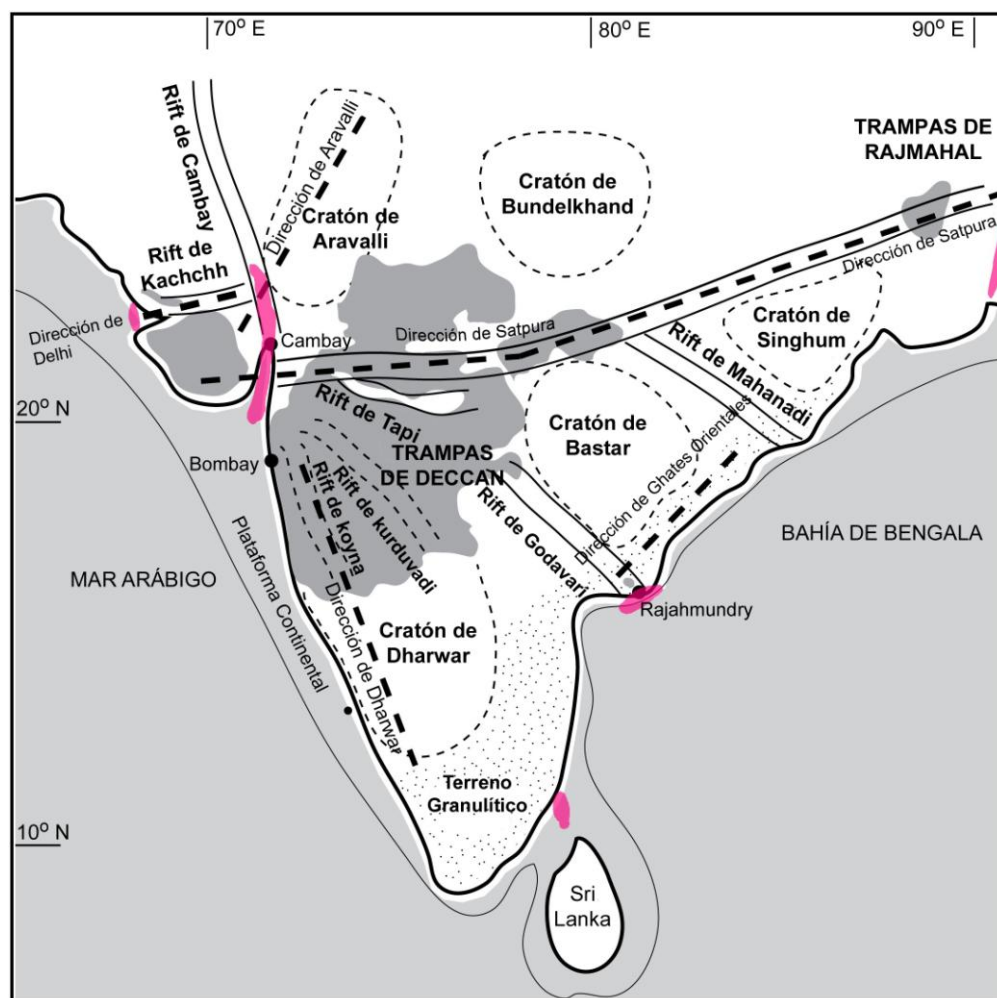


Figura 4. Representación esquemática de India, adaptada con el permiso de Sheth [54], muestra las zonas de fallas a través de la península de la India y muestra las áreas actuales de afloramiento de los basaltos de inundación de Deccan y Rajmahal (sombreado). Las áreas donde se hicieron descubrimientos importantes de petróleo relacionado con el agrietamiento, están en magenta. No a escala.

Sheth [54] presentó evidencia convincente que las Trampas de Deccan en India fueron originadas por agrietamiento. La consecuencia del agrietamiento es la formación de cuencas de fallas y valles de fallas, los que, a través del tiempo geológico, pueden haberse desarrollado y convertido en cuencas sedimentarias con estratos geológicos favorables para encerrar petróleo y gas natural. Como las Trampas Siberianas, las Trampas de Deccan son la consecuencia de oleadas masivas de erupciones de basalto hace cerca de 65 millones de años, que tapizaron los

rasgos geológicos subyacentes. La alta proporción de He3/He4 observada en los basaltos de Deccan es indicadora del Calor que fue conducido desde el núcleo de la Tierra [45], lo que es consistente con la observación de una zona de baja velocidad sísmica profunda por debajo [55].

En un artículo del 1ro de Mayo de 2008 aparecido en *The economics Time*, se anunciaba el descubrimiento hecho por ONGC de petróleo y gas natural bajo las trampas de Deccan. A partir del razonamiento desarrollado aquí, de las generalidades de las consideraciones involucradas, del entendimiento desarrollado con respecto al Sistema de Rifts del Este de África y la experiencia adquirida de las Trampas siberianas, más antiguas y extensas; el pronóstico y el potencial de la región bajo las Trampas de Deccan en India de convertirse en un lugar de grandes descubrimientos de recursos energéticos, le parecen al autor bastante favorables.

En general, la fragmentación continental, como resultado de la descompresión de la Tierra íntegra y del calor conducido desde el fondo, sea en curso, completada o detenida, nos lleva a la formación de cuencas de fallas cuya superficie se eleva y forma domos; y a la formación de voluminosos depósitos volcánicos. Las consecuencias geológicas de esto, como se describe en este artículo, pueden proveer todos los componentes cruciales para la formación de petróleo y gas natural: cuenca, reservorio, fuente y sello. No sorprende entonces que muchas de las actividades de exploración de petróleo y gas estén centradas a lo largo de los márgenes continentales donde ocurrió la fragmentación y probablemente la formación de depósitos de petróleo. Pero ¿qué pasa en el caso en que las masas continentales, fragmentadas por el agrietamiento, están forzadas a volver hacia atrás por las interacciones competitivas provocadas por extensiones en otros lugares? Es tentador especular sobre si el petróleo interconectado (foreland) y los depósitos de gas natural de Asma o Tripura en el nordeste de India pueden tener su origen en el agrietamiento de la fragmentación continental, antes de que la India fuera forzada a colisionar con Asia y formara cuencas interconectadas.

Referencias

1. Kolesnikov, A., Kutcherov, V. G., and Goncharov, A. F., Mantle-derived hydrocarbons produced under upper-mantle conditions. *Nature Geos.*, 2009, **2**, DOI: 10.1038/NGO591.
2. Herndon, J. M., Uniqueness of Herndon's georeactor: Energy source and production mechanism for Earth's magnetic field. *arXiv.org/abs/0901.4509*, 2009.
3. Kudryavtsev, N., *Petroleum Econ. (Neftianoye Khozyaistvo)*, 1951, **9**, 17-29.
4. Kenney, J. F., et al., The evolution of multicomponent systems at high pressures: VI The thermodynamic stability of the hydrogen-carbon system: The genesis of hydrocarbons and the origin of petroleum. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 2002, **99**(17), 10976-70981.
5. Fiebig, J., et al., Excess methane in continental hydrothermal emissions is abiogenic. *Geol.*, 2009, **37**, 495-498.

6. Proskurowski, G., et al., Abiogenic hydrocarbon production at Lost City Hydrothermal Field. *Sci.*, 2008, **319**(5863), 604-607.
7. Herndon, J. M., Enhanced prognosis for abiotic natural gas and petroleum resources. *Curr. Sci.*, 2006, **91**(5), 596-598.
8. Galimov, E. M., Isotopic composition of carbon in gases of the Earth's crust. *Internat. Geol. Rev.*, 1969, **11**, 1092-1103.
9. Krouse, H. R. and Modzeleski, V.E., C13/C12 abundances in components of carbonaceous chondrites and terrestrial samples. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1970, **34**(4), 459-474.
10. Tappert, R., et al., Deep mantle diamonds from South Australia: A new record of Pacific subduction at the Gondwanan margin. *Geol.*, 2009, **37**(1), 43-46.
11. Hess, H.H., in *Petrologic Studies: A Volume in Honor of A. F. Buddington*. 1962, Geological Society of America, Boulder, 599.
12. Elsasser, W. M., On the origin of the Earth's magnetic field. *Phys. Rev.*, 1939, **55**, 489-498.
13. Lord_Rayleigh, On convection currents in a horizontal layer of fluid where the higher temperature is on the under side. *Phil. Mag.*, 1916, **32**, 529-546.
14. Herndon, J. M., Nature of planetary matter and magnetic field generation in the solar system. *Curr. Sci.*, 2009, **96**, 1033-1039.
15. Chandrasekhar, S., Thermal Convection. *Proc. Amer. Acad. Arts Sci.*, 1957, **86**(4), 323-339.
16. Boussinesq, J., *Theorie Analytique de la Chaleur*. 1903, Gauthier-Villars: Paris., 172.
17. Dziewonski, A. M. and Anderson D. A., Preliminary reference Earth model. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1981, **25**, 297-356.
18. Dziewonski, A. M. and Gilbert F., Observations of normal modes from 84 recordings of the Alaskan earthquake of 1964 March 28. *Geophys. Jl. R. Astr. Soc.*, 1972, 393-446.
19. Herndon, J. M., Whole-Earth decompression dynamics. *Curr. Sci.*, 2005, **89**(10), 1937-1941.
20. Herndon, J. M., Energy for geodynamics: Mantle decompression thermal tsunami. *Curr. Sci.*, 2006, **90**, 1605-1606.
21. Carey, S. W., *The Expanding Earth*. 1976, Amsterdam, Elsevier, 488.
22. Hilgenberg, O. C., *Vom wachsenden Erdball*. 1933, Berlin, Giessmann and Bartsch., 56.
23. Wegener, A. L., Die Entstehung der Kontinente. *Geol. Rundschau*, 1912, **3**, 276-292.
24. Lehmann, I., P'. *Publ. Int. Geod. Geophys. Union, Assoc. Seismol., Ser. A, Trav. Sci.*, 1936, **14**, 87-115.
25. Mohorovicic, A., *Jb. Met. Obs. Zagreb*, 1909, **9**, 1-63.
26. Wiechert, E., Ueber die Massenverteilung im Inneren der Erde. *Nachr. K. Ges. Wiss. Goettingen, Math.-Kl.*, 1897, 221-243.
27. Bijwaard, H. and Spakman W., Tomographic evidence for a narrow whole mantle plume below Iceland. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, **166**, 121-126.
28. Ji, Y. and Nataf H.-C., Detection of mantle plumes in the lower mantle by diffraction tomography: Hawaii. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998, **159**(3-4), 99-115.
29. Nataf, H.-C., Seismic Imaging of Mantle Plumes. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2000, **28**, 391-417.

30. Foulger, G. R., et al., The great plume debate. *Eos, Trans. Am. Geophys. U.*, 2006, **87**(7), 76, 80.
31. Sankaran, A. V., The row over earth's mantle plume concept. *Curr. Sci.*, 2004, **87**(9), 1170-1172.
32. Wilson, J. T., A possible origin of the Hawaiian Islands. *Can. J. Phys.*, 1963, **41** 863-870.
33. Morgan, W. J., Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 1971, **230**, 42-43.
34. Herndon, J. M., Feasibility of a nuclear fission reactor at the center of the Earth as the energy source for the geomagnetic field. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1993, **45**, 423-437.
35. Herndon, J. M., Planetary and protostellar nuclear fission: Implications for planetary change, stellar ignition and dark matter. *Proc. R. Soc. Lond*, 1994, **A455**, 453-461.
36. Herndon, J. M., Nuclear georeactor origin of oceanic basalt $^3\text{He}/^4\text{He}$, evidence, and implications. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 2003, **100**(6), 3047-3050.
37. Herndon, J. M., Nuclear georeactor generation of the earth's geomagnetic field. *Curr. Sci.*, 2007, **93**(11), 1485-1487.
38. Hollenbach, D. F. and Herndon J. M., Deep-earth reactor: nuclear fission, helium, and the geomagnetic field. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 2001, **98**(20), 11085-11090.
39. Rao, K. R., Nuclear reactor at the core of the Earth! - A solution to the riddles of relative abundances of helium isotopes and geomagnetic field variability. *Curr. Sci.*, 2002, **82**(2), 126-127.
40. Hilton, D. R., et al., Extreme $\text{He-3}/\text{He-4}$ ratios in northwest Iceland: constraining the common component in mantle plumes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, **173**(1-2), 53-60.
41. Herndon, J. M., *Maverick's Earth and Universe*. 2008, Vancouver, Trafford Publishing. ISBN 978-1-4251-4132-5.
42. Coutillot, V., et al., *Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle*. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, **205**: p. 295-308.
43. Mjelde, R. and Faleide J. I., Variation of Icelandic and Hawaiian magmatism: evidence for co-pulsation of mantle plumes? *Mar. Geophys. Res.*, 2009, **30**, 61-72.
44. Basu, A. R., et al., High- ^3He plume origin and temporal-spacial evolution of the Siberian flood basalts. *Sci.*, 1995, **269**, 882-825.
45. Basu, A. R., et al., Early and late alkali igneous pulses and a high- ^3He plume origin for the Deccan flood basalts. *Sci.*, 1993, **261**, 902-906.
46. Ni, S., et al., Sharp sides to the African superplume. *Sci.*, 2002, **296**, 1850-1852.
47. Zhao, D., Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, **192**, 251-265.
48. Marty, B., et al., He, Ar, Nd and Pb isotopes in volcanic rocks from Afar: Evidence for a primitive mantle component and constraints on magmatic sources. *Geochem. J.*, 1993, **27** 219-228.
49. Almond, D. C., Geological evolution of the Afro-Arabian dome. *Tectonophys.*, 1986, **331**, 302-333.

50. Burke, K., D.S., MacGregor, D. S. and Cameron, N. R., Africa's petroleum systems: Four tectonic 'Aces' in the past 600 million years, in Petroleum geology of Africa: New themes and developing technologies. In *Geological Society Special Publication No. 207*. Editors, T. Arthur, D. S. MacGregor, and N. R. Cameron, 2003, 21-60.
51. Gold, T. and Soter, S., The deep Earth gas hypothesis. *Bull. Verein Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure*, 1980, **46**, 11-35.
52. Saunders, A. D., et al., A mantle plume origin for the Siberian traps: uplift and extension in the West Siberian Basin, Russia. *Lithos*, 2005, **79**, 407-424.
53. Reichow, M. K., et al., $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates from the west Siberian basin: Siberian flood basalt province doubled. *Sci.*, 2002, **296**, 1846-1849.
54. Sheth, H. C., From Deccan to Reunion: no trace of a mantle plume, in *Geological Society of America Special Paper 388*, Foulger, G. R., et al., Editors, 2005, Geological Society of America. p. 477-501.