

¿UN REACTOR NUCLEAR EN EL CENTRO DE LA TIERRA?

G. SÁNCHEZ

La Tierra emite un flujo de calor de 45 a 50 TW. La mayoría procede de emisiones desde la corteza y el manto terrestre. Las desintegraciones radiactivas de isótopos de las series del uranio y del torio y del potasio 40 explican 30-35 TW; sin embargo parece existir una fuente de calor oculta. Un reactor natural, llamado georeactor, en el centro de la Tierra, con una potencia de 3-10 TW, podría ser la respuesta. Ello podría además explicar algunos interrogantes del campo magnético terrestre. Con un detector de neutrinos sería posible probar, o rechazar, su existencia. Si el georeactor existe habría que cuestionar el modelo actual que explica el origen y evolución de Sistema Solar.

At present the terrestrial heat flux is 45-50 TW, and most seems to emanate from the crust and mantle. The radioactive decay from uranium and thorium series and the potassium 40 can explain 30-35 TW; however, there is still a "hidden" source of heat. A natural nuclear reactor, called the georeactor, with a power output of 3-10 TW at the centre of the Earth inner core could be the answer. It could also be the solution of the earth's magnetic field puzzle. It can be tested using an antineutrinos detector. If the georeactor is detected, the standard planetary hypothesis about the origin of the Solar System perhaps should be modified.

EL CALOR QUE VIENE DEL INTERIOR DE LA TIERRA

Después de varios años de observación por medio de satélites, se ha llegado a elaborar un mapa con el flujo de calor emitido por la Tierra, que se muestra en la Ilustración 1. El calor total [1] es de 45 a 50 Terawatios (Tera = 10^{12}), algo más de tres veces el consumo mundial de energía primaria. Puede parecer mucho pero equivale a un flujo de sólo 0.04-0.08 W/m² (necesitaríamos 1.000 m² para poder encender un bombilla de 60 vatios) que es unas cinco mil veces menos energía de la que recibimos del Sol. Sin embargo, esa energía es la punta del iceberg de una serie de procesos sin los cuales no existiría la vida en la Tierra, al menos tal como la conocemos. La pregunta que nos hacemos es ¿dónde y cómo se produce este calor? La respuesta no es sencilla, de hecho no podemos dar una respuesta completa. Como a veces ocurre lo importante es recorrer el ca-

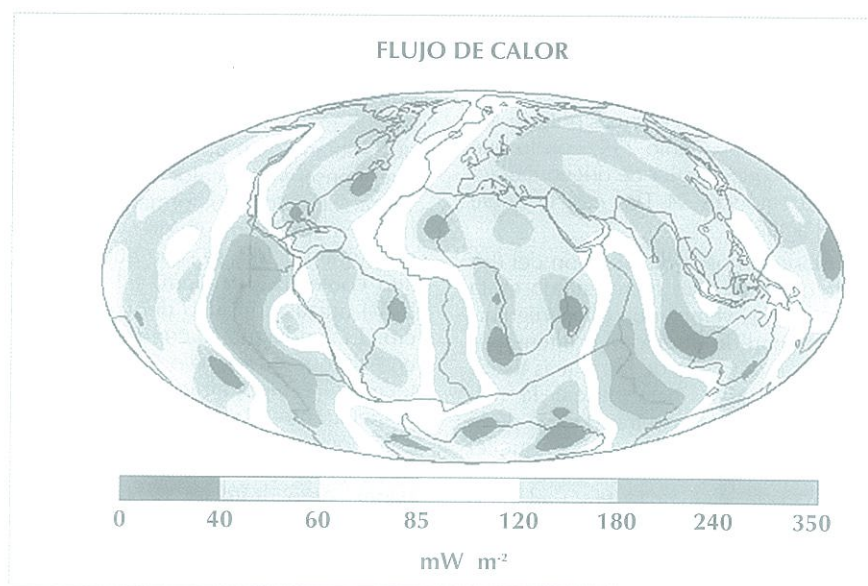


Ilustración 1. Distribución del flujo de calor interno en la superficie terrestre. (Fuente: <http://www.geo.lsa.umich.edu/IHFC/heatflow.html>)

mino aunque no lleguemos al lugar al que pretendíamos ir.

Existe un acuerdo general en que gran parte del calor generado por la Tierra procede de la desintegración radiactiva de isótopos de las series del uranio y del torio y del potasio 40 (Otras fuentes naturales de calor, como es la debida a la presión generada por la atracción gravitatoria y a la liberada por efectos de cristalización, carecen de relevancia). En la tabla 1 se muestran las concentraciones estimadas de estos elementos en la corteza y en el manto, y en la tabla 2 se muestra el calor generado. Con esto se explica unos 32 TW, pero resta por explicar 10-15 TW para completar el flujo total de calor de origen terrestre (En el pasado, el calor de origen radiactivo era considerablemente mayor, pues cuando se formó la Tierra, hace unos

Tabla 1. Estimación de la concentración de uranio, torio y potasio en la Tierra

Material	U, ppm	Th, ppm	K (%)
Manto	0.026	0.103	0.026
Basalto	0.1	0.35	0.2
Granito	4	17	3.2

Tabla 2. Calor radiactivo generado por distintas sustancias radiactivas naturales

Isotopo	Potencia (μW/kg)	Calor total que genera en la Tierra (10 ¹² W)
Series Uranio	98.4	11.8
Series Torio	26.6	11.5
Potasio (K-40)	0.0035	8.4
Total	---	31.7

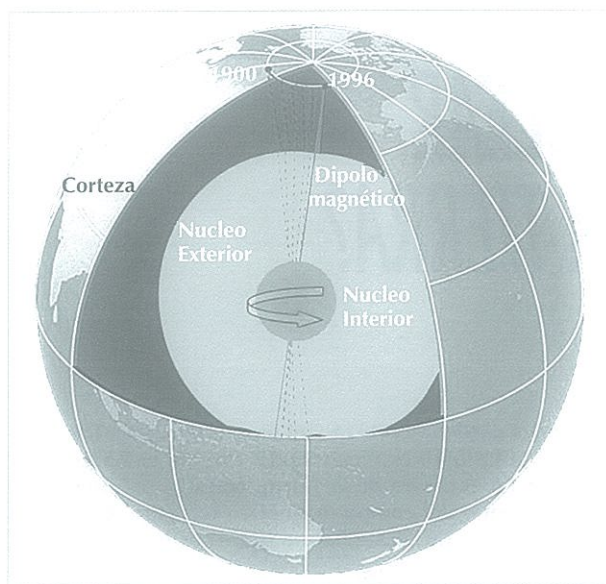


Ilustración 2. Estructura interna de la Tierra.

4.500 millones de años, había el doble de uranio 238, 11 veces más potasio 40, y 86 veces más uranio 235, con lo que se obtiene que el calor de origen radiactivo era entonces 54 TW, casi el doble que el actual).

Si observamos la distribución del flujo de calor terrestre representado en la Ilustración 1, vemos que está irregularmente repartido, siendo más intenso en los puntos de unión de las placas tectónicas. Por tanto, para buscar la respuesta hemos de penetrar debajo de la corteza terrestre, pero sucede que el sondeo más profundo realizado hasta la fecha sólo alcanza 12 km, y el radio de la Tierra es 6.371 km, es decir por medios mecánicos hemos accedido el 0.2% del radio terrestre (Ilustración 2). A través del material procedente de las

erupciones volcánicas y de medios geofísicos (principalmente las ondas sísmicas) se han podido establecer cinco esferas concéntricas bien diferenciadas (Ilustración 3) que representan la estructura de la Tierra. La primera es la propia corteza cuyo espesor varía entre 5 y 35 km, le sigue el manto superior que llega hasta 650 km de profundidad, el manto inferior hasta 2.890 km, el núcleo exterior que va hasta 5.150 km, y finalmente tenemos el núcleo interior. Con menos precisión se ha estimado la temperatura de las distintas zonas que alcanza unos 6.000 grados centígrados en el núcleo interior, la misma que la corona solar. En cuanto a su composición química, la de la corteza es muy variada. La mayoría son silicatos y óxidos que actúan como un excelente aislante que conserva el calor interno de la Tierra. El manto lo forman sustancias ricas en silicio, magnesio y hierro. En cuanto al núcleo, se sabe que tiene un alto contenido en hierro (al menos el 80%) quizás con algo de azufre y silicio. Es fundamental conocer qué hay en él y qué procesos ocurren para entender el comportamiento del resto del planeta. Entre otras cosas, es en el núcleo donde se genera el campo magnético bipolar que rodea a la Tierra cuyo papel como protector de la radiación cósmica es decisivo.

Se estima que del núcleo proceden, en forma de calor, entre 6-12 TW [1], pero ¿cuál puede ser la fuente que lo

produce? Entre los numerosos intentos por encontrarla, y a partir de ello entender el campo magnético, está la propuesta realizada por Herndon en 1993 [2] que consiste en suponer que en el centro del núcleo existe un reactor nuclear de fisión. En principio esta conjetura estaba poco sustentada, sin embargo en los últimos años ha surgido una relativamente importante bibliografía apoyándola. En cualquier caso no es la mayoritariamente defendida (no conozco ninguna bibliografía en español donde se cite) lo que no es extraño dado lo radical de su planteamiento.

REACTORES NUCLEARES NATURALES HACE MILES DE MILLONES DE AÑOS

Antes de seguir con el núcleo volvamos a la corteza terrestre. Como consecuencia de la más rápida desintegración del ^{235}U que del ^{238}U , la relación $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ hace miles de millones de años era considerablemente mayor que el actual (Ilustración 4). En concreto cuando se formó la Tierra hace 4.5 eones, era de 0.33 que equivale a un enriquecimiento del 23%, en ^{235}U . En 1956 Kuroda [3] postuló que hace 2.000 millones de años o antes, debido a los altos enriquecimientos existentes, tendrían que haberse producido reacciones de fisión en yacimientos de uranio. En 1972 [4], en Pierrelatte (Francia), en un análisis isotópico rutinario de una muestra de uranio procedente de un yacimiento en Oklo (Gabón) se observó que el enriquecimiento era ligeramente menor que el del uranio natural (0.717 % átomos de U-235 frente a 0.720 at. U-235% en el uranio natural). Se interpretó [5] que era debido a que hace 1800 millones de años, cuando el enriquecimiento era el 3%, en U-235, se habían producido reacciones de fisión que habían consumido U-235. En el mismo lugar se encontraron seis zonas con evidencias de que se habían comportado como reactores rápidos durante miles de años. Eso confirmaba que los reactores nucleares naturales eran una realidad, al menos en el pasado.

EL GEOREACTOR Y EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Se sabía que dos de los grandes planetas solares exteriores emiten el doble de energía de la que reciben del Sol. Herndon en 1992 [6] propuso la existencia de reactores nucleares en el centro de estos planetas como posible explicación de ese hecho. Poco después [2] sugirió la existencia de un reactor nuclear en el interior del núcleo de la Tierra al que llamó georeactor,

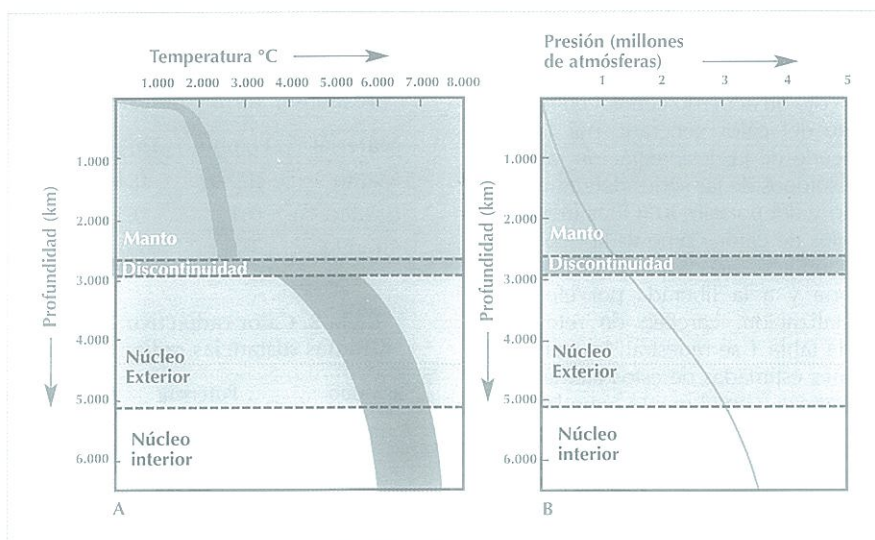


Ilustración 3. Variación de la temperatura y la presión con la profundidad.

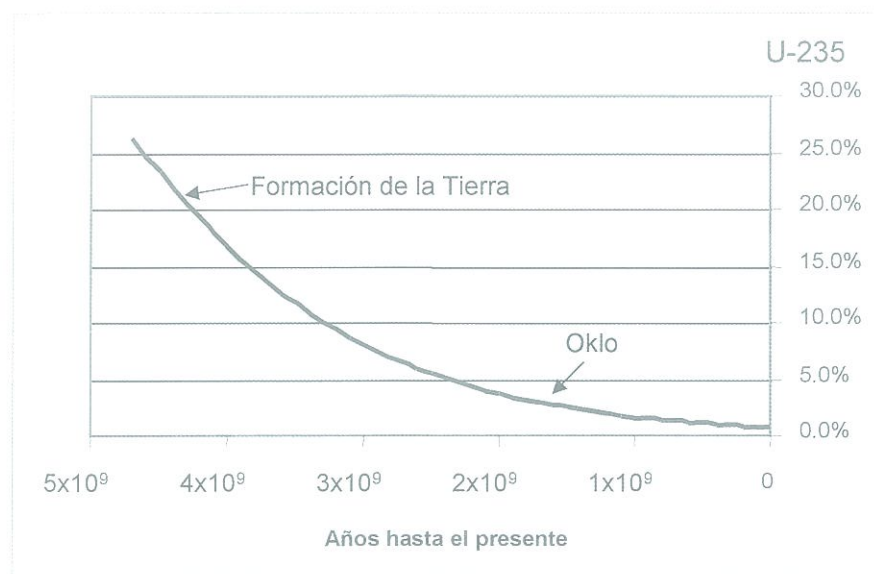


Ilustración 4. Evolución del contenido de U-235, % en peso, en el uranio natural desde la formación del Sistema Solar.

era la posible explicación del campo magnético terrestre.

El campo magnético terrestre va variando su inclinación en ciclos de miles de años (también hay pequeños cambios diarios), además invierte su polaridad de forma aparentemente aleatoria, con una media de 200.000 años. Los cambios de polaridad dejan trazas claras en las rocas ferrosas, utilizándose como elemento de datación, así se ha podido determinar que la base del famoso nivel 6 de Atapuerca tiene una antigüedad próxima a 800.000 años.

El campo geomagnético consume entre 0.1 y 1 TW. Tiene una importancia fundamental como protector contra el viento solar. No hay una explicación científica que dé respuesta a todos los interrogantes, aunque hay un acuerdo en que su comportamiento es el de una dinamo, para ello es necesario que el núcleo de la Tierra esté constituido en su mayoría por hierro. Sin una fuente de calor propia en el núcleo éste no podría mantener un campo magnético como el actual más de 1.000 millones de años. Además, es necesario alguna variabilidad de dicha fuente que explique los cambios que experimenta el campo magnético (Por ejemplo, suponer que la energía que consume procede de las desintegraciones radiactivas presenta el problema de que éstas siguen una regularidad que es difícil conciliar con la aleatoriedad observada). El modelo de reactor nuclear daba una posible explicación a este problema. El supuesto georeactor fue modelado en ORNL [7] utilizando el conocido código de cálculo SCALE (en concreto la secuencia SAS2, que incluye el programa ORIGEN-S) ampliamente utiliza-

do en estudios de reactores comerciales. Se estudiaron distintos modelos, el que mejor se adaptaba a la potencia requerida (3-5 TW) y a la enorme duración es el de un reactor rápido reproductor (esto es coherente por la no presencia de moderadores en el núcleo terrestre) formado por un esferoide en el centro del núcleo interior de un radio de unos 5 km con una densidad de 36.84 g/cm³ (casi el doble que la del uranio metal a presiones normales). En la parte central estaría constituida por actínidos rodeados por productos de fisión. Al tratarse de un reactor rápido, el ²³⁸U sometido a los neutrones rápidos se transforma en ²³⁹Pu que puede fisionarse, desintegrarse en U-235 o convertirse en un isótopo más pesado. La probabilidad de ocurrencia de las formas de transformación descritas está asociada a las características del flujo neutrónico a las que esté sometido. En el georeactor se contempla un flujo neutrónico bajo (1.2×10^8 n/cm² s) predominando la reacción $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow ^{235}\text{U}$. En estas condiciones se obtiene que aún podría seguir funcionando dicho reactor, siendo la relación actual de $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} > 10\%$ [8]. Es decir, el enriquecimiento en ²³⁵U en el georeactor sería muy superior al que tiene el uranio natural en el resto del planeta. Los productos de fisión irían migrando hacia la periferia del reactor, originándose cortos periodos de subcriticalidad. No se trataría de un reactor perfectamente homogéneo sino de varias zonas distribuidas irregularmente sometidas a condiciones que irían variando en el tiempo. Herndon [9] las relaciona con los cambios que se producen en el campo magnético, sin detallar como. ¿Hasta

cuando podría seguir funcionando? No se sabe (La película *The Core* (2003) utilizaba este hecho como parte de la trama).

Aunque desde el punto de vista de teoría de reactores puede explicarse su duración, el problema estriba en justificar el modelo utilizado. ¿Cómo llegó el uranio a concentrarse en el centro del núcleo interior?

Para poder evaluar esta posibilidad hay que remontarse de nuevo al origen del sistema solar 4.500 millones de años atrás. En la nube primordial que dio lugar al Sol y los planetas, la distribución de los isótopos era homogénea. Los isótopos pesados procedían de restos de una supernova [10]. En el modelo más aceptado de formación de la Tierra y los otros planetas interiores se supone que estos se constituyeron por el impacto de numerosos meteoritos que se fueron agrupando como una bola de nieve. Uno de los argumentos en favor de esta hipótesis es el altísimo calor existente en el interior de la Tierra (Ilustración 3), que es calor residual, generado por estos impactos y conservado hasta el presente por las excelentes propiedades aislantes de la corteza (Con la desintegración radiactiva se justifica gran parte del calor emitido pero en ningún caso sería suficiente para calentar el manto y el núcleo a los niveles actuales).

Algunos meteoritos sobrevivieron a los choques: los que contienen condritas. Las condritas están formadas por cóndrulos (gotas fundidas que se formaron en las primeras colisiones que dieron origen a los planetas) y consiguientemente poseían la composición de aquella época. Además no sufrieron un calentamiento posterior suficiente para fundirlos. Por tanto, serían representativos de los materiales a partir de los cuales se formó la Tierra. Su composición ha servido, entre otras fuentes de información, para definir la composición del manto. Su papel sería fundamental a la hora de establecer la composición del núcleo.

Hay diferentes tipos de condritas, las más abundantes son las condritas carbonáceas, que según los modelos geoquímicos vigentes, indicarían un alto grado de oxidación en las condiciones primigenias de la Tierra, que es incompatible con un núcleo que contenga uranio. Según esto el uranio sólo se presentaría en la corteza, formando óxidos. Los óxidos no podrían penetrar a través del manto ni agruparse en el núcleo. Sin embargo, según Herndon son los meteoritos que contienen enstatitas, condritas poco frecuentes, y no

las condritas carbonáceas, los representativos de las condiciones de formación de los planetas interiores. Estas indicarían una situación primigenia pobre en oxígeno, en cuyo caso se podría haber formado uranio metal o formas sulfatadas, compatibles con la presencia de un reactor en el centro de la Tierra.

En definitiva, puede admitirse la posibilidad de que exista un reactor nuclear en el centro de la Tierra, pero ¿qué pruebas tenemos de su existencia? En un análisis del contenido de helio en rocas basálticas procedentes del lecho marino, encontradas en Islandia, Hawai, Samoa y Galápagos y otras islas volcánicas [11], se encontró una relación $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.4 \times 10^{-6}$, que es 7 veces mayor que la que se da en la atmósfera. El helio 4 procede en su mayoría de la desintegración de isótopos de las series de uranio y torio (son partículas alfa que han capturado electrones). El helio 3 puede tener un origen primigenio y también es el isótopo resultante de la desintegración del tritio, que en la naturaleza prácticamente no existe (el que hay es casi todo artificial, se produce en los reactores nucleares por captura neutrónica en el hidrógeno del agua del refrigerante). El georeactor da una posible explicación a este alto contenido de helio 3: El tritio también puede ser un producto de fisión pues cada 10.000 fisiones el núcleo fisiónado se divide en tres, en vez de los dos habituales, en la mayoría de los casos el tercer fragmento es tritio, emisor beta que con un semiperiodo de 12.32 años se desintegra en helio 3 que es estable. Por tanto, o el helio 3 primigenio se ha acumulado en el manto en una proporción muy superior a la que se da en la atmósfera o procede de reacciones de fisión, probablemente procedentes del núcleo. Hay otro dato que viene a complicar la explicación: En la rocas lunares se ha observado también una proporción alta de helio 3 ¿guarda alguna relación con el alto contenido de He 3 en el manto terrestre?

Todo lo anterior se ve complicado por las condiciones especiales del núcleo: las presiones son de varios millones de atmósferas, la gravedad es escásima (casi nula en lo 5 km centrales, donde estaría el georeactor) y la temperatura es de varios miles de grados (Ilustración 3). En esta situación, la química poco tiene que ver con la que conocemos y lo que se sabe de ella no es mucho [12], por ejemplo, el hierro puro a dos millones de atmósferas es líquido y cuando la presión aumenta se solidifica, pero esto varía si el hierro es una aleación como probablemente ocurra en el núcleo. También el potasio

se vuelve más soluble a altísimas presiones. Una de las hipótesis alternativas para explicar el déficit de TW comentado al principio, se basa en considerar que la concentración de potasio 40 [13] es muy superior en el manto a la que hasta ahora se pensaba.

A PARTIR DE AHORA

Hay una forma de verificar o descartar definitivamente la hipótesis del georeactor y es utilizando un detector de neutrinos apropiado, mejor dicho de antineutrinos. Los neutrinos (y los antineutrinos) lo penetran todo, se necesitaría un blindaje de agua mucho mayor que el sistema solar para absorber la mitad de ellos. Esta propiedad es la que hace extremadamente dificultosa su detección, pero a su vez permite que nos lleguen desde el centro de la Tierra. Se conoce perfectamente el espectro típico de los neutrinos de un reactor de fisión, que presentan una energía diferenciada de los neutrinos procedentes de las emisiones beta de los productos de desintegración de U/Th. Incluso, de existir el georeactor, a través de los antineutrinos podría obtenerse mucha información sobre sus características. Ya hay una propuesta para construirlo [14] en Curaçao, debido, entre otras razones, a que el sitio está suficientemente alejado de reactores nucleares comerciales como para que pueda conseguirse un fondo adecuado.

La detección de un reactor en el centro de la Tierra obligaría a revisar muchas cosas de las que creíamos saber, incluido el modelo que describe la formación de nuestra Tierra y del Sistema Solar. En mi opinión, el modelo vigente está haciendo aguas, así lo demuestra el hecho de que en los casi 150 planetas extraplares recientemente descubiertos (el primero lo fue en 1995), se han observado la presencia de planetas gigantes que describen orbitas muy próximas a sus estrellas (algunos de ellos están más cerca que Mercurio del Sol). Esto implica que o bien nuestro Sistema Solar es una rara avis o el modelo de impacto propuesto para la formación de los planetas próximos a sus estrellas no es correcto.

Sería curioso que además de vivir encima de un mundo "hirviente", protegido por una finísima capa, bajo nuestros pies hubiese un reactor nuclear equivalente a 5.000 reactores convencionales (de 1 GW), que además sería la fuente que alimenta al campo magnético que nos protege del viento solar. No sé que dirían los antineutrinos si el detector de neutrinos confirmase su existencia. Estamos ante

una propuesta fascinante, compatible con lo que sabemos, que merecería la pena comprobar. En cualquier caso, en el camino aprenderemos mucho sobre el origen de nuestro planeta.

REFERENCIAS

- [1] Buffett, B. A. 2003. Science, 299, 1675-16.
- [2] Herndon, J. M. 1993. H. Geomagn, Geoelect. 45, 423-437.
- [3] Kuroda, P.K. 1956. J. Chem. Phys. 25 781-782.
- [4] Neuilly M., et al. 1972. C.R. Acad. Sci. Paris 275, 1845-1849.
- [5] Cowan G.A., Sci Am, July 1976.
- [6] Herndon J.M. 1992. Naturwissenschaften 79, 7-14.
- [7] Hollenbach, D. F. and Herndon, J. M., 2001. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 98, 11085-11090.
- [8] Seifritz W, 2003. Some comments on Herndon's nuclear georeactor, Kerntechnik 68.
- [9] Herndon, J. M., 2003. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 100, 3047 - 3050.
- [10] Sánchez, G. 1994. Los isótopos radiactivos y nuestro pasado. Mundo Científico. Mayo 1994.
- [11] Kurtz, M. D. and Geist, D. 1999. Geochim. et Cosmochim. Acta, 63, 4139 - 4156.
- [12] Scandolo, Sandro y Jeanloz, Raymond. Septiembre 2004. El interior de los planetas. Investigación y Ciencia, 336.
- [13] Murthy R. 2003. Nature 423, 163 - 165 (08 May 2003) Letters to Nature.
- [14] de Meijer, R.J. van der Graaf, E.R. Jungmann, K.P. 2004. Nuclear Physics News 14(2), 20 - 25.



Guillermo SÁNCHEZ (gsal@fal.enusa.es, <http://web.usal.es/~guillermo/>) es doctor en Matemáticas, Físico e Ingeniero Técnico de Minas. Ingresó en 1983 en ENUSA Industrias Avanzadas S.A., donde empezó trabajando en temas de Ingeniería Nuclear y Radiológica, ahora está en el Departamento de Logística y Suministros de la fábrica que Juzbado. Da clases como profesor asociado en la Universidad de Salamanca. Es pionero en el desarrollo de programas de modelización utilizando programación simbólica, a algunos de ellos puede accederse desde <http://www3.enusa.es/web/Mathematica/Public/Public-index.html>.