

para que la cantidad actual se reduzca a la mitad) es muy largo, 4 479 millones de años, y por tanto su radiactividad es muy pequeña (miles de millones de veces menor que otros isótopos artificiales como el cobalto 60 utilizado en medicina). La cadena del U-235 desde el punto de vista radiactivo tiene mucha menos importancia. En la naturaleza los elementos de estas cadenas suelen estar en equilibrio secular, esto significa que en cada cadena la actividad de sus isótopos es la misma.

Tabla 1
Radisótopos existentes en 1 t de uranio natural en equilibrio secular

| Nucleido | Cantidad |
|-----------------|----------|
| Uranio 238 | 992,9 kg |
| Uranio 235 | 7,1 kg |
| Uranio 234 | 54 g |
| Protactinio 231 | 334 mg |
| Torio 230 | 16 g |
| Actinio 227 | 0,21 mg |
| Radio 226 | 340 mg |
| Plomo 210 | 3,77 mg |
| Polonio 210 | 7,4 µg |

Si el uranio y sus descendientes permaneciesen en el mismo sitio se mantendrían casi indefinidamente las condiciones de equilibrio pero se producen desequilibrios por el desigual comportamiento químico de los elementos de esta cadena. Por ejemplo, el torio 234 suele formar parte de compuestos de solubilidad mayor que su padre el U-238 pudiendo ser desplazado por el agua de su lugar de formación. Como el U-234 es un descendiente del Th-234 la relación $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ no es la misma en todos los sitios, mientras que la relación $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ sí se mantiene constante al ser ambos los elementos iniciales de sus cadenas. Estos hechos son utilizados para estudios de datación, geoquímicos, oceanográficos, etc.

Los isótopos de estas cadenas, y en menor medida los otros isótopos primigenios (en especial rubidio 87 y potasio 40) han tenido una importancia fundamental en el pasado y la continúan teniendo, por dos razones:

a) La desintegración radiactiva implica liberación de energía que se disipa en el medio circundante calentándolo contribuyendo a mantener el Planeta a una temperatura por encima de la que tendría si solo recibiese el calor del Sol, sin su aporte estaríamos en un planeta helado. Se estima que en el primer km de la corteza terrestre la desintegración radioactiva libera sobre la superficie terrestre 34 kilojulios al año

por metro cuadrado. Esta cantidad fue muy superior en el pasado.

El aporte energético al núcleo terrestre es mucho mayor, contribuyendo a mantenerlo en estado plasmático y permitiendo que la Tierra disponga de un intenso campo magnético que nos protege de las erupciones solares. Este plasma es a su vez responsable del movimiento tectónico de placas.

b) Las emisiones radiactivas han tenido un papel fundamental en el origen de la vida y en su posterior evolución al favorecer la existencia de mutaciones que es un mecanismo fundamental de la evolución. Este efecto fue mucho más importante hace miles de millones de años cuando la radiactividad en el planeta era mucho mayor.

FISIONES NUCLEARES EN EL PASADO DE LA TIERRA

Todos conocemos la propiedad del uranio 235 de fisionarse al ser bombardeado por neutrones de prácticamente cualquier energía emitiendo a su vez nuevos neutrones que pueden originar una reacción en cadena. La fisión del uranio 235 es conocida desde 1937. La reacción en cadena fue puesta en práctica por Fermi quien en 1942 fabricó, en los vestuarios del estadio de los Yanquis en Chicago, una pila nuclear. Sin embargo en la Tierra ya se había producido reacciones en cadena durante miles de años liberando probablemente mucha más energía que todas las centrales nucleares actuales juntas. En 1972 en un análisis isotópico rutinario en un rico yacimiento de uranio en Oklo (Gabón) se observó que el contenido de U-235 era inferior al 0,71%, lo que no era coherente con todas las observaciones anteriores hechas en el uranio natural. Un análisis más detallado encontró elementos químicos descendientes del plutonio que demostraba⁵ que en aquel lugar habían tenido lugar reacciones de fisión. Esto fue posible pues en el pasado el grado de enriquecimiento del uranio natural era superior al actual, mayor mientras más atrás vamos en el pasado (véase figura 2) debido a que el período de desintegración del U-235 aunque

lento es 7 veces mayor que el del U-238. El yacimiento de Oklo tiene una antigüedad de 2000 millones de años, entonces el enriquecimiento era el 3 % y las reacciones de fisión eran posibles en las partes del yacimiento más ricas cuando eran atravesadas por aguas subterráneas. Este caso no es excepcional, con posterioridad se han observado estas anomalías isotópicas en otros yacimientos. Este tipo de lugares son un excelente laboratorio para estudiar el comportamiento de los residuos radiactivos en almacenamientos subterráneos en plazos larguísimo.

EL URANIO EN LA NATURALEZA Y SUS USOS

El uranio está relativamente repartido en la Tierra, aunque escaso es mil veces más abundante que el oro. La superficie terrestre contiene en promedio 3 g U por tonelada y el agua de mar contiene 3 mg por tonelada. En los yacimientos uraníferos la concentración sobrepasa 1 kg por tonelada (t) del mineral aunque en la actualidad para que sean rentables su contenido debe exceder 10 kg/t. En Canadá, primer productor mundial, se encuentran los mejores yacimientos (En Key Lake/MacArthur River hay explotaciones que alcanzan 210 kg U/t.) Otros grandes productores son: Australia, Níger, Namibia, Uzbekistán, EE. UU. y Kazajistán. La producción mundial en 1999 fue de 31072 t U⁶. En la Unión Europea no hay yacimientos rentables. En España el único yacimiento en explotación estaba en Saelices El Chico (Salamanca), acaba de ser cerrado (Diciembre 2000) por agotamiento de las reservas mineras a los precios actuales de mercado. La capacidad de producción mundial excede claramente a la demanda, y

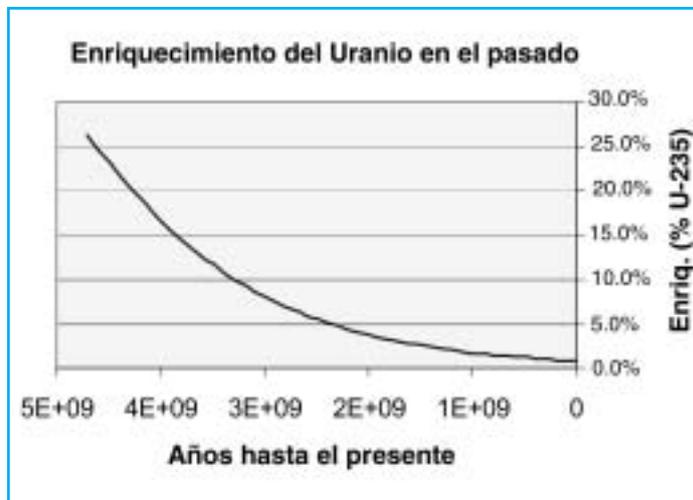


Figura 2. Evolución del enriquecimiento del uranio, en U-235, desde formación del Sistema solar hasta el presente.

desde hace años estamos asistiendo a una caída del precio del concentrado de uranio. Esta tendencia puede verse acrecentada por la puesta en el mercado, por países de la antigua Unión Soviética, de uranio de origen militar⁷.

El principal uso del uranio en la actualidad es obtener combustible para los reactores nucleares que producen el 17% de la electricidad mundial. Es bien conocido que el uranio natural para su empleo en reactores nucleares necesita ser enriquecido en U-235, excepto en el caso de reactores de grafito o deuterio de escasa implantación. En los procesos previos al enriquecimiento: obtención de concentrados (U₃O₈) y primera conversión (transformación de U₃O₈ en UF₆) son eliminados buena parte de los descendientes del U-238 y U-235, excepto el U-234. En el proceso de enriquecimiento se realiza con el uranio en forma de gas (UF₆) y consiste en aprovechar la ligera diferencia entre la masa atómica del U-235 y U-238 para separar el uranio de alimentación del proceso en dos fracciones: una enriquecida en U-235 y otra empobrecida en U-235. Este último es un subproducto conocido como uranio empobrecido. Su contenido en U-235 normalmente está entre el 0,2 y 0,3%. Aunque no se pretende, en la fracción enriquecida además aumenta el contenido de uranio 23, a la inversa ocurre con la fracción empobrecida. La UF₆ enriquecida es transformada en polvo de UO₂ (muy estable químicamente y con un alto punto de fusión), a partir del cual se fabrican los elementos combustibles utilizados por los reactores nucleares. El UF₆ empobrecido resultante se almacena y la mayor parte de él se transforma en óxidos de uranio o uranio metal.

RIESGOS RADIOLÓGICOS Y TÓXICOS

La primera vez que se observó el fenómeno de la radiactividad fue en 1896 por Becquerel quien por casualidad mantuvo varios días en un cajón guardada una película formada por una sal de uranio. Su sorpresa fue mayúscula al encontrar la película impresa. La interpretación que hizo del fenómeno fue correcta y puso patas arriba la concepción que se tenía del átomo como indivisible.

Los isótopos más significativos del uranio tienen una bajísima radiactividad, Como ejemplo, se muestran las actividades de varios isótopos radiactivos (El I 131 se emplea en medicina y el Cs 137 en la industria):

Tabla 2
Actividad específica de distintos isótopos

| | |
|----------------------------------|------------------------|
| Iodo 131 | 4 598 000 000 000 Bq/g |
| Cesio 137 | 3 206 000 000 000 Bq/g |
| Plutonio 239 | 2 298 000 000 000 Bq/g |
| Uranio natural con descendientes | 50 000 Bq/g |

El riesgo radiológico de los isótopos del uranio tiene fundamentalmente su origen en las emisiones alfa, siendo la inhalación e ingestión los caminos a considerar. La irradiación externa es muy pequeña.

El efecto biológico (riesgo) de las radiaciones sobre las personas se mide en mSv. (miliSievert).

Tabla 3.

Dosis (en mSv/mg) inhalado para uranio insoluble (*) con distintas características

| | |
|---|------|
| Uranio natural con descendientes (Radio y otros): | 0,70 |
| Uranio natural eliminado descendientes: | 0,22 |
| Uranio de origen natural enriquecido al 3,5% | 0,75 |
| Uranio empobrecido (0,2%, U-235) | 0,12 |

(*) Las dosis son al menos 10 veces menores para el uranio soluble.

Puede resultar curioso que el uranio enriquecido al 3,5% (valor típico del combustible de las centrales nucleares) tenga un riesgo radiológico similar al uranio tal como se presenta en la naturaleza. Esto es así pues el uranio en la naturaleza se presenta asociado a sus descendientes que son radiactivos. En proceso seguido para obtener el uranio enriquecido hemos visto que se eliminan estos descendientes, lo mismo puede decirse para el uranio empobrecido. En este caso el riesgo radiológico del uranio apenas se ve aumentado. Para valorar los datos anteriores es conveniente saber que la radiación de origen natural (rayos cósmicos, radón, potasio-40, uranio natural, etc.) que todos recibimos equivale en media a más de 2 mSv al año, pudiendo superar 10 mSv en algunas zonas. El límite para trabajadores profesionalmente expuestos es de 20 mSv/año adicionales a la dosis de origen natural. Se ha probado que dosis superiores a 250 mSv son potencialmente perjudiciales. Para dosis menores existe un riesgo probabilístico cuya cuantificación es fuente de grandes controversias, incluso hay estudios que indican que pequeñas dosis pueden ser beneficiosas, efecto conocido como hormesis (Ocurre algo similar a la ingestión de vino).

Lo anterior no debe llevarnos a la

conclusión de que el uranio es inofensivo pues especialmente a causa de sus descendientes (radio 226 y radón 222) muchas personas han sufrido las consecuencias de sus efectos nocivos. Estas propiedades nocivas ya se vislumbraron a principios del siglo XVI una mina de plata (pero que también contenía uranio) en Ergerbirge (frontera de república Checa y Alemania) donde un joven, Georg Bauer (1494-1555) que se hacía llamar por su nombre latino Agrícola, era el jefe médico se dio cuenta la existencia entre los obreros de una enfermedad mortal que llamó *Bergsucht* que hoy sabemos era cáncer de pulmón, asociado a las altas concentraciones de radón que se producían en las minas subterráneas. En su tratado *De re metallica* nos describe como para evitarlo hizo instalar un sistema de ventilación y animaba a las mujeres de los mineros a hacer filtros respiratorios para sus maridos. Una vez descubierta la radiactividad se han hecho numerosos estudios sobre los obreros de las minas de uranio. En algunos casos se ha observado un índice de cánceres de pulmón y de huesos superior a los que se consideran normales. Estos riesgos se han visto substancialmente disminuidos con la minería a cielo abierto y a las mejores condiciones de ventilación de las minas subterráneas. Los efectos indeseables se atribuyen en su mayor parte al radón 222 y al radio 226 pues estudios en instalaciones de tratamiento de uranio (plantas de enriquecimiento conversión y elementos combustibles) no han observado incidencias en los trabajadores.

La metabolización del uranio, y de otros elementos, viene siendo estudiada desde hace años. A partir de datos experimentales recogidos en personas y en ensayos de laboratorio con animales han permitido construir modelos matemáticos para predecir como se distribuye en las personas y como evoluciona con el tiempo permitiendo así evaluar el riesgo radiológico. Estos mismos modelos nos permiten estimar a partir de datos experimentales (bioensayos) las cantidades incorporadas. Por ejemplo: A partir de medidas con el contador de radiactividad corporal puede estimarse para una persona concreta la cantidad de uranio retenida en pulmones. Este dato, con alguna información adicional, puede servirnos para evaluar la cantidad de bequerelios inhalada y valorar si esto constituye un riesgo. Otros tipos de bioensayos son el análisis de la excreción urinaria y fecal, análisis de sangre, etc. En el caso de los compuestos insolubles (óxidos de uranio u uranio metal) la fracción

que se excreta por orina es muy pequeña aunque se puede ser medida por técnicas como es la fosforescencia por excitación láser que es capaz de detectar concentraciones menores de 0,05 ng/L. El problema que surge es que concentraciones tan pequeñas son indistinguibles del fondo ambiental. Si la concentración es suficientemente elevada los análisis anteriores pueden complementarse con espectrometría (alfa, gamma o de masas) para comprobar si se trata de uranio natural, enriquecido o empobrecido.

Además de los efectos radiológicos, hay que tener en cuenta que el uranio posee, especialmente en formas solubles, una elevada toxicidad química que afecta principalmente a los riñones.

EL CASO DEL URANIO EMPOBRECIDO Y EL "SÍNDROME DE LOS BALCANES"

En los últimos meses ha sido noticia el uranio empobrecido al ser relacionado por algunos políticos en apuros (Amato y Prodi) o mal informados con la aparición de leucemias, y otros tipos de cánceres, en soldados de la OTAN con su estancia en los Balcanes⁸.

Hemos visto que el uranio empobrecido es un subproducto que se genera al enriquecer el uranio, es considerablemente menos radiactivo (véase Tabla 3) que el uranio tal cual se da en la naturaleza (cinco veces menos si tenemos en cuenta que la proporción de descendientes es mucho menor que la presente en el uranio natural). Hay millones de toneladas almacenadas, en su mayor parte es considerado un deshecho cuyo destino una vez convertido en óxido de uranio es ser enterrado de forma definitiva. Sin embargo hay una parte comparativamente minúscula que se destina a diversos usos. Es un excelente blindaje frente a las radiaciones siendo utilizado con este fin en fuentes radiactivas empleadas en inspección de soldaduras e incluso en hospitales para proteger las fuentes de cobalto 60. También se emplea como contrapeso (entre 700 y 1000 kg) en los aviones DC 10, B 747 y L 1011 (En 1992 se estrelló un avión en Holanda, con 850 kg de U empobrecido). También se utiliza en odontología y como quilla en veleros de competición. Ha sido su aplicación militar y en concreto su empleo como proyectil contra blindajes la que le ha hecho famoso en los últimos meses. Se da la aparente paradoja de que el uranio empobrecido posee gran resistencia a la penetración por lo que algunos tanques lo utilizan como blindaje.

La historia del empleo del uranio empobrecido como proyectil es un hito más en la carrera que desde hace milenios mantienen la flecha y la coraza. El ejército de EE.UU. a principio de la década de los sesenta, en plena guerra fría, veía como las tropas del Pacto de Varsovia disponían de tanques con blindajes cada vez más eficientes que ponían en aprietos a los proyectiles de carburo de wolframio, que hasta entonces se consideraba el mejor material para estos usos. Lo que las hace especialmente útiles como proyectil es que el uranio metal es muy denso (19,07 g/cm³ de densidad teórica, similar a la del wolframio y 1,7 veces más que el plomo) y duro lo que favorece su penetración pero su mayor interés reside militar reside en que al penetrar un blindaje el uranio metal se calienta y fragmenta en pequeñas partículas que entran en combustión (oxidación) transformándose en óxidos de uranio, para que esta oxidación se retrase el uranio metal va mezclado con 0,75% de titanio. Este proceso llamado piroforicidad es fuertemente exotérmico, es decir emite una enorme energía calorífica que literalmente abrasa a la tripulación que esté dentro de los vehículos blindados. Como consecuencia de este desarrollo se dispone desde 1976 el modelo que se muestra en la Figura 3 que ha sido el más utilizado en la guerra de los Balcanes y antes en la guerra del Golfo. Consta de una cabeza en forma cónica de 95 mm de altura y 16 mm de diámetro de uranio metal con titanio recubierto de aluminio. Su peso es 292 g. Suelen ser lanzadas desde aviones contra vehículos blindados. Es su pequeño tamaño y peso lo que las hace muy adecuadas para estos usos.

El uranio empobrecido utilizado por ejército de EE.UU. tanto como proyectiles como blindaje, según el Dpto. de Defensa de EE.UU., procede del tratamiento de uranio militar durante la década de los 60 y principios de lo 70,

del pasado siglo. Según las mismas fuentes ese uranio empobrecido contiene una pequeña proporción de uranio reciclado⁹ que incrementa en menos del 1% el riesgo radiológico respecto al uranio empobrecido de origen natural teniendo en ello en cuenta la presencia de U-236 y trazas de transuránidos (Pu, Np, Am). Esta información fue suministrada al Congreso de EE.UU.: en 1995, por lo que debe tratarse de información fiable.

Del Departamento de Defensa de EE.UU. se ha sabido que en la guerra de los Balcanes se lanzaron 31000 obuses de este tipo (9,3 t U) y en la Guerra del Golfo se arrojaron 300 t. En ambos casos ha habido intentos de relacionarlo con la presunta aparición de diversos tipos de cánceres, especialmente leucemias. Al parecer se ha observado entre la población iraquí incrementos de cánceres tras la guerra del golfo, pero no se ha determinado que la causa sea el uranio empobrecido, apuntándose como posibles causas una combinación de factores no aclarados. El Congreso Norteamericano ordenó una investigación sobre las posibles consecuencias en el personal militar americano, el informe



Figura 3. Proyectiles antiblindajes de uranio empobrecido (UE). Las ametralladoras suelen estar montadas en aviones A10.



Figura 4. Los proyectiles a pesar de su pequeño tamaño poseen un alto poder destructor contra los tanques, pues a su capacidad de penetración le añaden el calor que generan al oxidarse el uranio metal como consecuencia del impacto. El riesgo de exposición a la inhalación de uranio es insignificante comparado con el efecto destructor del proyectil.

resultante concluye que no puede establecerse dicha relación.

Hay razones básicas que hacen muy improbable la relación entre la aparición de leucemias y el uranio empobrecido. El uranio empobrecido es muy poco radiactivo, incluso cuando procede de uranio reciclado. Aun así existe un riesgo que no se puede despreciar que procede principalmente de los aerosoles de óxido de uranio que se producen tras el impacto (véase figura 4). Estas partículas al principio están calientes, se van enfriando depositándose su mayor parte para mezclarse en el medio, serán detectables pero se irán distribuyendo hasta confundirse con el uranio natural. El riesgo principal del uranio en forma insoluble, como es el óxido de uranio, es la inhalación y en mucha menor medida la ingestión, el riesgo por irradiación externa es insignificante. Como ejemplo: Las emisiones beta-gamma procedente de los fragmentos metálicos producidos tras el impacto pueden ser detectadas sin problemas a unos 10 cm pero más allá de 1 metro se hace difícil su detección. El riesgo de inhalar una cantidad importante se produce si inmediatamente después de la explosión se penetra en las proximidades de la misma (pocos metros) sin ningún tipo de protección. El organismo para el medio ambiente de las Naciones Unidas estimaba¹⁰ que en estas condiciones se recibiría una dosis total efectiva de menos de 1 mSv (menos de la mitad de la que recibimos durante un año por fuentes naturales). A estas condiciones pocos soldados de OTAN, si es que alguno lo fue, se vieron expuestos, toda vez que la ocupación militar fue posterior al bombardeo aéreo. Después del bombardeo y durante días puede haber aerosoles resuspendidos que originarían en caso de exposición continua durante 1 año una dosis efectiva de 0,3 mSv. Para otros caminos de exposición las dosis serían menores.

Las dosis anteriores no justifican la aparición significativa de cánceres, en los Balcanes, mucho menos en el caso de las tropas de la OTAN. Esto es especialmente cierto en la presunta aparición de leucemias por los siguientes motivos:

1. La radiación puede causar leucemia (hay varios tipos, unas son más específicas de la radiación) pero para que esto ocurra la vía más probable es la irradiación externa aguda. Las tasas de irradiación del uranio son muy bajas. En ninguna situación imaginable podría dar lugar a una irradiación aguda
2. La incorporación de isótopos radiactivos al organismo por contami-

nación (inhalación/ingestión/heridas) en determinados elementos y compuestos químicos también puede causar leucemia pero en el caso del uranio por su tipo de metabolización se requiere inhalar una cantidad muy elevada para que afecte a la médula ósea (donde se forman los glóbulos blancos) y origine leucemia. Aun en ese caso la proporción de leucemias sería mucho menor que otros tipos de cáncer (en concreto el de pulmón y huesos). Además se requerirían largos periodos de tiempo antes de que se manifestase la enfermedad, cosa que no confirma la información difundida por los medios. Hay estudios abundantes sobre mineros expuestos durante años al uranio. En el caso de minería subterránea se ha observado una incidencia mayor que la media de la población de algunos tipos de cáncer, principalmente de pulmón. Para estos casos se determinó como causa principal el radón (El radón es un descendiente del uranio natural pero su presencia en el uranio empobrecido es insignificante). Para aclarar sirva el siguiente ejemplo: Si en una población se registrase un número elevado de cánceres de riñón, pero no cánceres de pulmón, y alguien los atribuye al tabaco todo el mundo comprendería que la hipótesis de que la fuente de los cánceres del riñón fuese el tabaco sería indefinible.

Se están realizando estudios epidemiológicos para saber si existe una incidencia anormal de leucemias y otros tipos de cánceres en la población presuntamente afectada. Los informes hasta ahora emitidos indican que no se ha encontrado dicha relación, incluso se dice que la tasa de cánceres encontrada no es superior a la normal de grupos de población similares. En el caso del informe emitido por una comisión de las Naciones Unidas se indica la conveniencia de tomar medidas preventivas tendientes a identificar los puntos potenciales en los que podría presentarse uranio metal en aguas subterráneas por la toxicidad química que este elemento tiene.

Resulta chocante que en esta polémica se haya dado mucha más importancia al riesgo potencialmente insignificante de que en los bombardeos se produzcan víctimas como consecuencias de la radiactividad frente a otros daños de los bombardeos comparativamente muy superiores. Es algo parecido a lo que está ocurriendo con los teléfonos móviles: causa más inquietud el riesgo potencial de que estos aparatos puedan producir cánceres de cerebro (riesgo que de existir sería bajísi-

mo) que el riesgo comprobado de que un porcentaje no despreciable de los accidentes de carretera puede ser atribuido a su uso.

BIBLIOGRAFÍA

Radiation and Radioactivity: On Earth and beyond. I. Dragononic, Z. Dragononic y J.P. Adloff. CRC Press 1990.

Uranium Series Disequilibrium . M. Ivanovich. Clarendon Press 1981.

Los isótopos radiactivos y nuestro pasado. Guillermo Sánchez. Mundo Científico. Mayo 1994.

UNSCEAR 2000. Naciones Unidas.

<http://web.usal.es/~guillerm/UranioEmpobrecido.htm>(enlaza a distintas paginas que incluyen gran parte de la información utilizada en la elaboración de este artículo

NOTAS

¹Este artículo esta basado en el publicado por el autor en la Revista Mundo Científico de Mayo 2001

²En algunos sitios la composición isotópica se prefiere expresar en porcentaje de átomos de cada isótopo respecto del total de átomos de uranio (concepto conocido como: abundancia isotópica). Utilizando esta unidad el uranio natural tiene 0,720 % átomos de U-235. Este tema no es baladí pues puede dar lugar a errores cuando se comparan composiciones isotópicas. En este artículo las composiciones isotópicas las expresamos en porcentaje en masa.

³ En esta misma revista Nuclear España 1999, se ha tratado el tema del origen del uranio en el artículo: "La biografía del uranio. Desde la nube protosolar hasta el comienzo de la atmósfera oxigénica" de Garzón Ruy Pérez de León.

pasa a la pág. 22



Guillermo SÁNCHEZ DE LEÓN (Doctor en Matemáticas, Lcdo. en C. Físicas e Ingeniero técnico) trabaja en ENUSA Industrias Avanzadas S.A. desde 1983, donde ha realizado distintos tipos de actividades (seguridad nuclear, ingeniería radiológica, contabilidad del material nuclear, programación, planificación, etc.). Es profesor asociado en la Universidad de Salamanca. Su pág web es: <http://web.usal.es/~guillerm/>

⁴Una supernova es una estrella supermásica que explota liberando gran parte de su masa. Su participación es imprescindible para explicar la formación de elementos pesados. El universo primitivo solo contenía elementos ligeros, los elementos pesados se "cocinan" en el centro de estrellas supermásicas. Estrellas de tamaño medio, como el Sol, en su combustión sólo son capaces de llegar a producir elementos de masa atómica intermedio y bajo (el de mayor masa es el hierro).

⁵ El tema de Oklo fue dado a conocer por primera vez en 1972 por Neuilly y otros (acta de conferencia de prensa recogida por el Commissariat a l' Energie Atomique) aunque es en 1976 en un artículo de Cowan (A Natural Fission Reactor, Scientific American, 7/76:3647) cuando se difunde este extraordinario fenómeno. La primera vez que supe del tema fue en una publicación de la JEN (1979?) que no he conseguido localizar. En número de mayo de 1994 de la revista Mundo Científico me referí a este asunto.

⁶ Fuente: The global Nuclear Fuel Market: Supply and Demand 1998-2020. The Uranium Institute Market report 2000.

⁷ Hasta la caída de la URSS existía demanda de uranio altamente enriquecido para fabricación de armamento militar. Ahora la situación es la contraria: Hay un excedente de uranio altamente enriquecido y plutonio procedente del desmantelamiento de parte del arsenal nuclear, especialmente en los países de la antigua URSS. La exis-

tencia de este material constituye un grave problema, sobretudo por la inseguridad en el control que sobre esos productos existen en dichos países. La solución más sencilla es diluir el uranio altamente enriquecido para su uso en reactores civiles convencionales, en cierta medida así se está haciendo.

⁸ Permítanme que sobre el asunto haga alguna referencia personal: La incoherencia que existía entre la información científica que sobre los efectos del uranio se tiene y los efectos atribuidos por los medios de comunicación al uranio empobrecido me llevo a enviar un artículo sobre el asunto a algunos periódicos de amplia difusión. Lo único que conseguí es publicar unas líneas en la sección de "Cartas al Director". Este mismo artículo lo envié por correo electrónico a algunas personas (menos de 10) que consideré podían estar interesadas en el tema. Sin yo pedírselo estas mismas personas lo distribuyeron a su vez. Casi en paralelo empecé a recibir preguntas sobre el tema lo que me llevo a elaborar una sencilla página web (<http://web.usal.es/~guillerm>) con hiperenlaces a las fuentes utilizadas. Me consta que tanto el artículo como la página web han sido leídos por numerosas personas, cosa que agradezco. Los medios de comunicación de masas obviaron durante semanas dar información científica sobre el tema. Finalmente las comisiones de investigación nombradas por gobiernos para analizar el hecho han venido a corroborar lo que cualquiera que conociese en

profundidad el asunto sabía desde el principio.

⁹ Según el Departamento de Energía de EE.UU. (DOE) en junio de 1998 tenía almacenados 734000 t de uranio empobrecido, el 70% como óxido. Parte de este material tiene su origen en el reprocesado de uranio-plutonio procedente de la industria militar. Este material no debía estar clasificado según su origen pues la NRC requirió en 1995 análisis isotópico de ese material, encontrándose trazas de transuranidos y tecnecio 99. Precisamente de acuerdo a dichos análisis la NRC estimó que el riesgo radiológico adicional respecto al uranio empobrecido de origen natural era menor al 0,8% (Los resultados de los análisis y la evaluación de la NRC esta disponible en Internet). Aunque los transuranidos, en especial los plutonios, levantan muchas inquietudes cuando se presentan como trazas su riesgo es insignificante.

¹⁰ UNEP/UNCHS The potential effects on human health from possible use of depleted uranium during the 1999 Kosovo conflict (October 1999). La evaluación de dicho informe es bastante conservadora. Por ejemplo: Se supone que el 70% del proyectil se convierte en aerosoles de tamaño muy pequeño. He podido comprobar que dicha hipótesis procede de estudios preliminares (1975) realizados por el Dpto. de Defensa de USA. Un estudio más elaborado de 1982 reducía a menos del 30% el porcentaje de aerosoles e incrementaba su tamaño, disminuyendo considerablemente el riesgo radiológico.