

Actínidos y más allá.

Nadir Jori, Larisa Ferreyra y Alberto L. Capparelli*

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Los actínidos constituyen un grupo de 15 elementos cuyos números atómicos Z se hallan entre 89 y 103. Poseen una configuración electrónica interna equivalente a la del gas noble Radón (Rn, Z = 86 cuya configuración electrónica es $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^6$). Pertenecen al período 7 de la tabla periódica. Se hallan ubicados debajo de los lantánidos en la Tabla Periódica como se aprecia en la Tabla 1.

A diferencia de los lantánidos, el conocimiento químico de muchos de actínidos se ve dificultado por las propiedades radiactivas de los mismos. En la Tabla 1 se listan los elementos que integran este grupo, que se caracterizan por ser radiactivos. Entre los más conocidos se encuentran el uranio (U, Z=92) y el plutonio (Pu, Z=94) [1]-[4].

Debido a su estructura electrónica y radios iónicos, que disminuyen con el aumento del número

Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas
 Universidad Nacional de La Plata
 Calle 47 y 115, (1900) La Plata
 *Autor correspondiente

Tabla 1: Ubicación de los actínidos en la Tabla Periódica: Números atómicos de los actínidos naturales y sintetizados por el hombre.



INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY

For notes and updates to this table, see www.iupac.org. This version is dated 8 January 2016. Copyright © 2016 IUPAC, the International Union of Pure and Applied Chemistry.

Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103

atómico, el comportamiento químico de estos elementos se asemeja al de los lantánidos pero sin la homogeneidad que se observa en los segundos. Los actínidos reaccionan con facilidad con halógenos formando sales del tipo MX_3 y MX_4 , así como con oxígeno, azufre, etc [1][2]. Los nombres de algunos de estos elementos recuerdan a los correspondientes a dioses de la civilización greco-romana y de los planetas más externos del

sistema solar. Así, los elementos uranio y neptunio se designaron en recuerdo de los planetas Urano y Neptuno, siguiendo el orden en que estos planetas fueron descubiertos, mientras que el plutonio se designó en honor a Plutón, el planeta enano más externo del sistema solar hasta ahora.

TIEMPO DE VIDA MEDIA DE LOS ACTÍNIDOS

El tiempo de vida media es el requerido para que la concentración del radionúcleoido

decaiga a la mitad de la concentración inicial. El decaimiento sigue una cinética de primer orden, por lo que este tiempo no depende de la cantidad inicial de emisores. En la Tabla 2 se listan los tiempos de vida media de varios actínidos y algunos de sus isótopos.

El Ac, Pa, U y el Th se encuentran en la naturaleza ya que sus tiempos de vida media ($t_{1/2}$) son lo suficientemente largos y por lo tanto es posible

separados de minerales existentes y aislarlos. Los tiempos medios pueden ser mayores o del mismo orden que la edad de la Tierra ($\cong 4,5 \times 10^9$ años), o bien estos elementos se forman que se forman durante el decaimiento radiactivo, la mayoría originados en minerales de U y de Th.

En la Tabla 2 se listan elementos transuránicos que poseen tiempos de vida media relativamente cortos. Aquellas especies más estables que

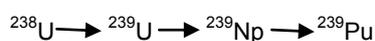
podieron formarse en los primeros estadios de la vida de la Tierra ($4,5 \times 10^9$) debieron desaparecer de la corteza del planeta en los primeros 1.000 millones de año. Esto no implica, que en el proceso de decaimiento de uranio, algunos elementos pudieran haberse formado y trazas de los mismos pueden ser hallados en los minerales de U, tal como es el caso de Pu y Np.

Tabla 2: Tiempos medios de vida de actínidos. En esta Tabla, a, d, h y m indican años, días, horas y minutos respectivamente [7][8].

Actínidos	$t_{1/2}$	Actínido	$t_{1/2}$
²²⁷ Ac	21,77 a	²⁴¹ Am	$7,38 \times 10^3$ a
²³² Th	$1,41 \times 10^{10}$ a	²⁴⁷ Cm	$1,56 \times 10^7$ a
²³¹ Pa	$3,28 \times 10^4$ a	²⁴⁷ Bk	$1,38 \times 10^3$ a
²³⁵ U	$7,08 \times 10^8$ a	²⁴⁹ Cf	351 a
²³⁸ U	$4,47 \times 10^9$ a	²⁵¹ Cf	898 a
²³⁷ Np	$2,14 \times 10^6$ a	²⁵² Es	472 d
²³⁹ Pu	$2,14 \times 10^4$ a	²⁵⁷ Fm	100,4 d
²⁴⁰ Pu	$6,57 \times 10^3$ a	²⁵⁸ Md	55 d
²⁴² Pu	$3,76 \times 10^5$ a	²⁵⁹ No	1 h
²⁴⁴ Pu	$8,26 \times 10^7$ a	²⁶⁰ Lr	3,0 m

Sin embargo, la fuente más importante de estos dos elementos provienen de las reacciones nucleares artificiales (o naturales) a partir de neutrones emitidos por la fisión espontánea de ²³⁵U, que son incorporados al ²³⁸U para formar, por decaimientos con emisión de partículas β , los isótopos ²³⁹Np y

²³⁹Pu, tal como se ejemplifica en esta serie de procesos [1],



El primer elemento de esta serie es el actinio (Ac, Z=89, configuración electrónica [Ra]6d¹7s²). De manera similar a lo observado en los lantánidos, el torio (Th, Z=90, configuración electrónica [Rn]7s² 6d²) es el

primer elemento. Le sigue el Proactinio (Pa, Z=91, configuración electrónica [Rn]7s²5f²6d¹) donde comienzan a completarse los estados 5f. El último elemento del grupo es el Lawrencio (Lr, Z=103, configuración electrónica [Rn]5f¹⁴7s²7d¹).

El actinio, Ac, se origina en el decaimiento radiactivo del uranio, por lo que está presente en todos

los minerales que contengan este elemento, en particular pechblenda de donde fuera aislado a fines del siglo XIX. El Ac es unas 150 veces más radiactivo que el Radio (Ra, Z=88), razón por la cual se le considera un elemento muy peligroso. El Ra fue descubierto en 1898 por Marie y Pierre Curie en minerales de uranio.

El torio, Th, en presencia de O₂ a 1000°C, se oxida para formar ThO₂. Este óxido es un material refractario con un punto de fusión superior a otros óxidos conocidos (3390 °C). Se le suele emplear como aditivo del tungsteno ya que estabiliza su estructura. También, contruidos con esta mezcla, se emplea en la fabricación de filamentos ya que presenta una alta estabilidad mecánica.

Los transuránicos no se presentan en la naturaleza, habiendo sido sintetizados por el hombre en experimentos de química nuclear. Varios de estos elementos llevan el nombre en homenaje a científicos, como son los casos del curio (Cm, Z=96), einstenio (Es, Z=99), fermio (Fm, Z=100), mendelevio (Md, Z=101), o de personalidades científicas como es el caso del nobelio (Nb, Z=103) e instituciones de Estados Unidos, tal es el caso de los elementos berkelio (Bk, Z=97) y californio (Cf, Z=98).

Los estados de oxidación más frecuentes en la mayoría de estos elementos es el +3, aunque en el caso del Th y el Pu se observa es

+4, en el U son los estados +4 y +6, en el Np es el estado +5, y por su parte el No se halla normalmente en el estado de oxidación +2. [1]

A diferencia de otros iones de esta familia de elementos, el U⁺³ se oxida fácilmente al aire y más lentamente en soluciones acuosas.

Varios de estos elementos presentes en muestras naturales fueron también sintetizados por el hombre. Este es el caso del isótopo ²³⁸Pu con una vida media de 88 años. Sin embargo, el ²⁴⁴Pu es lo suficientemente estable geológicamente, con una vida media del orden de 80 millones de años, razón por la cual puede hallarse en la naturaleza en muy bajas concentraciones. En el ambiente, este elemento se presenta principalmente como Pu⁺⁴ bajo la forma de especies insolubles. El ión Pu⁺⁴ se hidroliza fácilmente formando especies coloidales, que pueden facilitar el transporte hacia aguas subterráneas donde pueden estar presentes por largos períodos de tiempo. Incorporado en los animales se acumula en los huesos.

OBTENCIÓN Y SÍNTESIS DE ACTÍNIDOS

El actinio fue aislado por A. Debierne en 1899 como resultado de las investigaciones realizadas sobre residuos de pechblenda, mineral empleado previamente

por Pierre y Marie Curie en sus estudios.

El torio, Th, fue descubierto por J.J. Berzelius en 1829. Su nombre recuerda al dios Thor de la mitología nórdica, como un homenaje de Berzelius a uno de los dioses representativos de la cultura de su país. Está presente en minerales que contienen tierras raras, por lo que suele ser un subproducto no deseado del proceso de extracción de lantánidos. La vida media del ²³²Th es del orden de 1,4·10¹⁰ años. Este elemento, cuando es bombardeado por electrones lentos forma el isótopo fisionable ²³³U. El empleo de ²³²Th con este fin está en etapa de desarrollo. Se estima que la energía disponible resultante del uso de Th presente en la corteza terrestre (9,6 ppm) es mayor que la que resultaría del uso simultáneo de uranio y fuentes fósiles. Por otro lado, en la corteza terrestre, el torio es más abundante que el uranio. Su producción anual es superior a las 30.000 toneladas y los principales proveedores son EE.UU, Brasil, Australia, Rusia, India entre otros.

DESCUBRIMIENTO DE ELEMENTOS RADIATIVOS Y LOS EFECTOS SOBRE LA SALUD

El fenómeno de la radiactividad fue descubierto a fines del siglo XIX por las contribuciones de Henry Becquerel (1852-1908), Pierre Curie (1859-1906) y Marie Curie (1867-1934)[5].

Sin embargo, el uranio y el torio eran dos de los elementos radiactivos conocidos antes del descubrimiento de este fenómeno. El polonio y el radio fueron descubiertos en 1898 y el actinio en 1899. Los avances que caracterizaron al siglo XX condujeron al descubrimiento de otros elementos radiactivos y esta aventura del conocimiento continúa.

Los estudios sobre pechblenda encarados por el matrimonio Curie, condujeron a descubrir el polonio, al observar que la pechblenda era más radiactivo que el uranio, elemento que se separa de este mineral. El nuevo elemento fue bautizado así en honor a Polonia. La obtención de fuentes naturales requiere procesar 10 toneladas de pechblenda para aislar del orden de 1 mg de Po. El polonio (Po) se presenta en la naturaleza en cantidades muy bajas. Así en la corteza terrestre su concentración es de 10^{-10} ppm (1 g/tonelada), pero su síntesis en experimentos nucleares conduce a cantidades mayores que las existentes en los minerales naturales.

Los efectos de la radiactividad sobre los tejidos fue parte de los primeros estudios realizados a principios del siglo XIX, aunque se desconocían la peligrosidad de las sustancias bajo investigación. Pierre Curie, basado en estudios previos, aplicó durante mediodía apósitos conteniendo BaSO_4 (radiactivo por su contenido de radio) sobre un brazo observando como consecuencia un daño similar a una quemadura, cuyo origen debía buscarla en la radiación emitida. En su trabajo conjunto con H. Becquerel cuyo título traducido es "*La acción fisiológica de los rayos del radio*", detallan los cambios que observaron durante 40 días después de la aplicación [6]. La descripción de estos resultados y la evolución del daño inducido son muy vívidos por la precisión científica y detallada con la que están redactados. Las precauciones propias del manejo de material radiactivo no formó parte del trabajo de los primeros investigadores, ni del alcance a largo alcance de los efectos de la radiactividad sobre la salud humana. Hoy por hoy, los documentos y notas elaboradas por M. Curie están contaminadas y los mismos están guardados bajo estrictas reglas de seguridad y no se pueden consultar a menos que se cuente con la vestimentas correspondientes. El uso del radio con fines medicinales se puede rastrear hasta mediados de la década de 1930 y en su ignorancia dieron origen a la radioterapia.

El isótopo ^{210}Po es altamente tóxico y se obtiene en reactores nucleares bombardeando con neutrones el isótopo ^{209}Bi . Asimismo, este isótopo se usa en celdas termoeléctricas en satélites artificiales y sondas lunares.

Desde la década de 1960 se conoce que el tabaco contiene este elemento y se ha vinculado su acumulación por largos períodos de tiempo como uno de los causales de muerte por cáncer de pulmón. La EPA ha realizado estimaciones de unos 130 casos de muerte por cáncer por cada 1000 fumadores regulares que consumen en promedio 1,5 atados de cigarrillos por día durante un período de 30 años [9]. Estos números son consistentes con las estimaciones realizadas por el sector industrial desde 1960 y trabajos recientes [10]. Aunque es posible eliminar el ^{210}Po del tabaco mediante un tratamiento ácido desarrollada en la década de 1980, el sector industrial evita este proceso por la hidrólisis de la nicotina y el cambio que esta tiene en la estimulación cerebral que está asociada con su consumo.

Sus óxidos se emplean en el sector industrial. Combinados con tungsteno permite obtener focos

incandescentes, y con wolframio reduce la temperatura de fusión siendo de utilidad en soldaduras

de arco. Se le emplea también como emisor de partículas alfa. Su decaimiento da lugar a la

generación del elemento Ra y finalmente de Pb.

El protoactinio, Pa, fue identificado en 1913 por K. Fajans y O.H. Göhring, trabajando en la Universidad de Karlsruhe,

Alemania, aunque identificaron a un isótopo de 6,7 horas de vida media. Posteriormente (1918), en Berlín, Lise Meitner (1878-1968), conjuntamente con Otto Hahn (1879-1968) fueron capaces de separar distintos isótopos de este elemento a partir de pechblenda mezclado con óxido de tántalo.

Simultáneamente, F. Soddy y colaboradores, trabajando en Glasgow, descubrieron este elemento en forma independiente y lo bautizaron como protoactinio, por ser la fuente de actinio por decaimiento. Este elemento no es abundante en la naturaleza, siendo su separación de la pechblenda un procedimiento de alto costo comparativamente con otros elementos de este grupo que se obtienen naturalmente. Su alta toxicidad y su baja concentración en la corteza

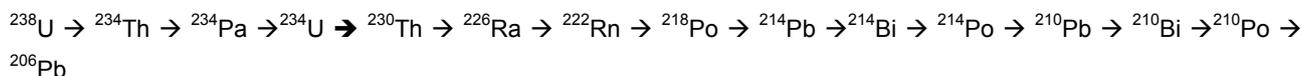
terrestre ($1,4 \cdot 10^{-6}$ ppm) limita sus potenciales aplicaciones. El tiempo de vida media del isótopo ^{231}Pa es de 32760 años y se origina en la desintegración por emisión de partículas alfas del ^{235}U . Se observa entre los productos de fisión de U, Th y Pu. La mayor producción de este elemento se obtuvo en 1961 en Inglaterra, recuperando unos 120 g de 99,9 % de pureza a partir de productos de fisión nuclear.

El uranio es uno de los elementos más conocidos de esta familia. Fue descubierto en 1789 por M.J. Klaproth en Berlín trabajando sobre la pechblenda. Su nombre fue dado en honor al dios Urano, padre de los dioses en la mitología griega. Se le encuentra principalmente en pechblenda y uranita, principalmente como UO_2 . En la corteza terrestre se encuentra en concentraciones de 2,7 g/tonelada, y en los océanos en concentraciones del orden de $3 \cdot 10^{-3}$ ppm. Su tiempo de residencia en aguas oceánicas supera los 2 millones de años. Su

concentración en un humano adulto de unos 70 kg es del orden de 0,07 mg. El uranio natural está constituido por los isótopos ^{238}U (99,3 %) y ^{235}U (0,7%), siendo este último la especie fisionable. La vida media del isótopo ^{238}U es del orden de la edad de la tierra ($4,5 \cdot 10^6$ años).

En 1938, Lise Meitner y Otto Hahn llevaron a cabo los primeros experimentos que demostraron que al bombardear el isótopo ^{235}U por neutrones (n) se producen cantidades considerables de energía por fisión, como consecuencia de una del orden del 0,1% de la masa original en esta reacción y la validez de la ecuación de Einstein, $\epsilon = \Delta m \times c^2$, según el proceso $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U}$ (inestable) $\rightarrow ^{139}\text{Ba} + ^{94}\text{Kr} + 3n + \text{energía}$, sentando las bases para el desarrollo de la tecnología nuclear. La fisión de 1 g de ^{235}U produce 1 MW de energía.

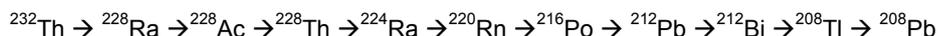
El esquema de decaimiento del ^{238}U se esquematiza a continuación por la siguiente serie de reacciones



El producto final de esta serie de procesos es el isótopo estable ^{206}Pb del plomo. Es interesante

comparar el decaimiento del ^{238}U con el correspondiente al isótopo

^{232}Th , cuya vida media es de 14 mil millones de años.



La cadena termina con el isótopo estable 208 del plomo.

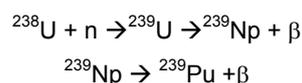
PRODUCCION DE URANIO EN ARGENTINA

La producción anual de uranio recuperado es del orden de las 40000 toneladas. En la Argentina existen importantes reservas de uranio en La Rioja, Mendoza y Chubut, así como también en Salta y Catamarca. El potencial asegurado a partir de minerales de uranio es de 8800 toneladas a lo que se le suman otras 4400 toneladas a partir de otras fuentes. La producción de uranio recuperado cayó de 65 toneladas en 1995 a cero en 2006.

Mediante el proyecto del Complejo Tecnológico Pilcaniyeu de la CNEA (ubicado a 60 km. de Bariloche Provincia de Río Negro con una superficie cubierta de 30.000 m² dedicados a las Plantas de Procesos) se producirá el uranio enriquecido para los reactores nucleares de potencia [11]. El proyecto Pilcaniyeu permitirá enriquecer el uranio a través del método de difusión gaseosa, aumentando la concentración de ²³⁵U respecto de su porcentual en la naturaleza [12]. Actualmente se importan del orden de 100 toneladas anuales de este material.

Los transuránicos, son los elementos químicos que se encuentran a continuación del uranio en la tabla periódica. Si bien la mayoría se sintetiza en reactores nucleares, algunos de ellos se han encontrado en minerales en muy bajas concentraciones. Así, tanto el neptunio como el plutonio se han hallado en la naturaleza. El isótopo ²³⁷Np posee una vida media de 2 millones de años, mientras que el isótopo ²⁴⁴Pu posee una vida media de 80 millones de años, razón por la cual se han detectado en cantidades de traza en minerales de uranio [2][8][14]. El isótopo de plutonio ²⁴⁴Pu fue descubierto en minerales del período precámbrico empleando cromatografía de masas. La presencia de estos elementos en minerales de uranio se origina en reacciones de captura de neutrones emitidos naturalmente por el decaimiento de uranio.

El neptunio fue sintetizado en 1940 al bombardear uranio-238 con neutrones en reactores nucleares.



El plutonio se produjo por vez primera en 1940, bombardeando ²³⁸U con deuterio, conduciendo a la producción del isótopo ²³⁸Pu, cuya vida media es de 87,7 años. En 1944, a partir del isótopo ²³⁹Pu con neutrones, se sintetizó el elemento americio. El producto final por esta vía es el ²⁴¹Am, cuya vida media es de 432 años. En ese mismo año, mediante la reacción nuclear entre ²³⁹Pu y partículas alfa, se sintetizó el elemento curio, ²⁴²Cm, cuya vida media es de 163 días.

El berkelium-243 (²⁴³Bk) se sintetizó en 1949 a partir de la reacción entre ²⁴¹Am y partículas alfa. Un año después, se sintetizó el californio-245 (²⁴⁵Cf) a partir de la reacción entre el curio-242 y partículas alfa. Las vidas medias

del ²⁴¹Bk y del ²⁴⁵Cf son respectivamente de 4,5 h y de 45 minutos.

Los elementos einstenio-253 y fermio-255 se observaron como resultado de los experimentos con bombas nucleares en 1952. El ²⁵³Es tiene una vida media de 20,5 días, mientras que el ²⁵⁵Fm es de 1,3 h.

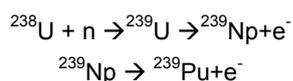
En 1955, el mendelevio-256, con una vida media de 1,3 h, se obtuvo a partir del einstenio-253 bombardeándolo con partículas alfa. Por su parte, el nobelio-254 se sintetizó entre 1958 y 1964, mediante la reacción entre el curio-246 e iones de carbono-12. Este elemento posee una vida media de 55 segundos.

El lawrencio (Lr) se puede sintetizar por dos vías a partir ²⁵⁰Cf por reacción con boro-10 o a partir de ²³¹Am por reacción con oxígeno-18. Por la primera vía se obtiene ²⁵⁸Lr y por la segunda ²⁵⁶Lr con vidas medias de 3,9 y 8 segundos respectivamente. Estas síntesis se realizaron entre 1961

y 1965. Este elemento lleva el nombre en honor a Ernest O. Lawrence (EE.UU., 1901-1958) quien inventó el ciclotrón a principio de la década de 1930.

ALGUNOS USOS Y APLICACIONES DE LOS ACTÍNIDOS

Las mayores aplicaciones de estos elementos, sin fines militares, está vinculado con la producción de energía en reactores nucleares [8][11][12][14], pudiéndose emplear como combustibles de los denominados "reactores de reproducción rápida" o "breeder reactors", que producen más combustibles de los que consume. Este tipo de reactores emplean neutrones rápidos y como refrigerante sodio líquido. Así, el isótopo ^{238}U absorbe neutrones y reacciona según el esquema



Sin embargo, es el ^{235}U el isótopo el que se emplea en procesos convencionales de fisión, tanto para la producción de energía como para la fabricación de armas nucleares. Con este fin el uranio debe enriquecerse en este isótopo, el que se alcanza mediante los procesos de difusión. Este isótopo genera más protones que los que absorbe, generando una reacción en cadena autosustentable. La reacción en cuestión es $^{235}\text{U} + ^1_0\text{n}$

$\rightarrow ^{115}\text{Rh} + ^{118}\text{Ag} + 3 ^1_0\text{n}$. Los neutrones así producidos vuelven al ciclo de fisión de ^{235}U .

El plutonio ^{239}Pu es fisionable generando energía, pero su uso ha sido objeto de numerosas críticas y en algunos países, este tipo de reactores fueron cerrados o nunca terminados de construir por las presiones de los habitantes donde debían instalarse.

El isótopo ^{232}Th se emplea también en reactores "breeder" como combustible nuclear formándose ^{233}U . En años recientes, India se ha convertido en el país que más ha invertido en el desarrollo de estos reactores a base de Th [8][14].

Estas consideraciones previas muestran algunos aspectos de la importancia que tienen los distintos actínidos y sus isótopos en la producción de energía en reactores nucleares.

En el desarrollo de la investigación espacial, se ha recurrido al empleo de elementos de esta familia como fuente de energía. El isótopo ^{238}Pu se emplea para proporcionar energía a sondas espaciales [15].

En el caso del Th, además de su empleo en ingeniería nuclear, se lo emplea para fabricar componentes de lámparas eléctricas, en cerámicos para su empleo a alta temperatura, como componente de aleaciones, catalizador de reacciones orgánicas, en la fabricación de lentes para instrumentos de alta precisión, aprovechando la

capacidad del óxido de torio sobre las propiedades de difracción, como detector de oxígeno en la industria electrónica.

El neptunio no tiene usos comerciales pero es la fuente del isótopo ^{238}Pu . El isótopo ^{237}Np se emplea en la detección de neutrones de alta energía. No posee actividad biológica, pero cuando se incorpora en animales superiores tiende a acumularse en los huesos, con un tiempo de residencia importante, ya que se elimina muy lentamente.

El isótopo ^{238}Pu no es fisionable, razón por la cual es aplicado con fines distintos a los militares. Es empleado como fuente de energía en equipamiento científico como los instalados en la superficie lunar y en satélites. La NASA dispone de 35 kg de este isótopo para proveer energía a las misiones espaciales en el llamado espacio profundo, pero es insuficiente para las programadas para el futuro próximo [15]. Este isótopo se emplea como fuente de energía de marcapasos implantados en el cuerpo humano, con la ventaja que las mismas pueden durar sin reemplazo hasta unos 10 años de funcionamiento continuo.

El americio se emplea como fuente de ionización en detectores de humo en instalaciones industriales y caseras. El ^{241}Am emite partículas alfas, poco penetrantes, que ionizan el aire en la cámara de ionización. Los iones facilitan el

pasaje de corriente eléctrica entre electrodos cargados. La presencia de partículas presentes en el humo disminuyen la intensidad de la corriente, permitiendo que se disparen las alarmas controladas electrónicamente. La EPA ha definido criterios de control periódico de este tipo de alarmas, y en la Unión Europea se ha recomendado fuertemente su reducción en instalaciones hogareñas.

ASPECTOS TOXICOLÓGICOS Y AMBIENTALES

La actividad antrópica es la causa de la presencia de isótopos radiactivos en el ambiente. Estas especies producen daños en la salud humana, sea por contaminación sobre la piel, por la ingesta de isótopos radiactivos o por sobreexposición a la radiación beta y gama.

El actinio, que es un emisor alfa, es uno de los venenos más potentes por su capacidad para acumularse en los huesos. Su tiempo de vida corto tiene efectos muy severos en el hígado, pues como emite partículas alfa produce ionizaciones en los tejidos circundantes.

El plutonio es una de las sustancias conocidas de mayor toxicidad, se incorpora en los huesos y en el hígado. El ^{239}Pu en el ambiente tiene su origen en los experimentos nucleares a la

atmósfera entre 1945 y la década de 1960. Además, el volumen de residuos nucleares ha crecido desde 1945 con el incremento de las usinas nucleares. También ha contribuido el fin de la llamada guerra fría que debe ir acompañada con el desmantelamiento de las armas atómicas. En efecto, durante la guerra fría tanto EE.UU como la ex-URSS podían producir más de 100 y 200 toneladas de plutonio-239 de alta pureza, por lo que la cantidad de este isótopo estimado es motivo de preocupación permanente.

El plutonio se oxida en la atmósfera para dar PuO_2 , que al sedimentar sobre la superficie, reacciona fácilmente con especies aniónicas presentes en suelos para dar complejos que le dotan de una mayor movilidad en el ambiente.

Robert Oppenheimer (EE.UU, 1904-1967) fue el reconocido científico que estuvo a cargo del Proyecto Manhattan, en cuyo marco se construyeron las primeras bombas atómicas por parte de las fuerzas aliadas en la segunda guerra mundial. El ^{235}U es fisionable, generando neutrones para hacerlos inestable. Cuando alcanza la masa crítica de unos pocos gramos, se produce una *reacción en cadena* que da lugar a una explosión violenta que liberación de cantidades considerables de energía. Estas primeras bombas

se construyeron con uranio y plutonio.

Como consecuencia de los bombardeos sobre Hiroshima y Nagasaki, Japón, se tomó conocimiento público del poder atómico. Sin embargo, este resultado no se incorporó como un tema de preocupación en la sociedad de esos años. En la década de 1950, las explosiones atómicas realizadas en la región de las Vegas a nivel del suelo, supo ser un espectáculo incluido en los programas de turismo. Una descripción de esta etapa de la historia puede consultarse en el libro de Peter Pringle et al. [16]. Las primeras consecuencias y preocupaciones reales frente al creciente incremento de la carrera armamentista de base nuclear, fueron creciendo a partir de la mediados de la década de 1950 hasta constituir un tema de inquietud generalizada y de la toma de conciencia sobre los riesgos que implicaba el incremento del arsenal nuclear en distintos países (EE.UU, China, Rusia y los países integrantes de la exURRS, India, Israel, Corea, etc) y de la necesidad de realizar esfuerzos conjuntos para disminuir la cantidad de ojivas nucleares.

Además de las fuentes ya mencionadas, el plutonio en el ambiente provienen de baterías de uso en el espacio así como de accidentes nucleares, como el caso de Chernóbil (1986) o el de

Fukushima (2011). En el accidente de Chernóbil, la cantidad de material radiactivo emitido a la atmósfera fue unas 500 veces superior a la generada en la explosión de Hiroshima [17][18]. El accidente de Fukushima, a consecuencia del maremoto (tsunami) generado por un terremoto de magnitud 9 en la escala de Richter se encuadra, junto al de Chernóbil[19], en accidentes nucleares de nivel 7 en la escala internacional de Accidentes Nucleares. Ambos han constituido dos de los mayores desastres sobre el medioambiente en los últimos 30 años.

Este tipo de accidentes ha despertado un mayor interés en el empleo del Th en reactores nucleares, ya que su mayor punto de fusión reduce los potenciales efectos de la fusión de núcleo (meltdown), mejorando las perspectivas del uso de la energía nuclear en la sociedad moderna.

ELEMENTOS MÁS ALLÁ DE LOS ACTÍNIDOS: LOS ELEMENTOS SUPERPESADOS.

Estos elementos poseen tiempos de vida media cortos, de manera que, si bien pudieron originarse en los procesos nucleares en las primeras etapas del universo rápidamente se desintegraron en otras especies más estables en escalas históricas.

Recientemente se ha completado el período 7 de elementos que se

Tabla 2: Elementos supermasivos sintetizados hasta la fecha.

104 (267)	105 (268)	106 (271)	107 (272)	108 (277)	109 (276)	110 (281)	111 (280)	112 (285)	113 (...)	114 (287)	115 (...)	116 (291)	117 (...)	118 (...)
Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
RUTHERFORDIO	DUBNIO	SEABORGIO	BOHRIO	HASSIO	MEITNERIO	DARMSTADTIO	ROENTGENIO	COPERNICIO	UNANTRIO	FLEROVIO	UNAFENITIO	LIVERMORIO	UNANSEPTIO	UNANOCIO
<p>Rutherfordio (Rf, Z=104, configuración electrónica propuesta $[Rn]5f^{14}6d^27s^2$). Fue sintetizado en 1964 en la URSS y la IUPAC lo nombró en 1997 en honor a E. Rutherford. El isótopo ^{261}Rf de este elemento posee un tiempo de vida medio de 13 h, razón por la cual es posible estudiar distintos aspectos de su química y compararla con los elementos Ti, Zr y Hf, que se hallan del grupo 4.</p>														
<p>Dubnio (Db, Z=105, configuración electrónica propuesta $[Rn]5f^{14}6d^37s^2$). Su nombre recuerda a la ciudad de Dubnia, Rusia, donde fue sintetizado por vez primera en 1967. El isótopo ^{268}Db posee un tiempo de vida media de 28 h, y el estudio de la química muestra analogías con el elemento Tántalo. Este elemento pertenece al grupo 5, junto con V, Nb y el ya mencionado Ta.</p>														
<p>Seaborgio (Sg, Z=106, configuración electrónica propuesta $[Rn]5f^{14}6d^47s^2$). Se le designa con este nombre en honor a Glenn T. Seaborg (1912-1999), investigador norteamericano que contribuyó de manera notable al desarrollo de la química y física nuclear de los elementos transuránicos, habiendo descubierto 10 elementos de esta familia. Fue Premio Nobel de Química en 1951. En 1974 fue sintetizado en el Lawrence Radiation Laboratory de la Universidad de California, siendo su isótopo ^{271}Sg el más estable con una vida media de 2,4 minutos. Su comportamiento químico puede compararse a la del wolframio. Posee más de 10 isótopos, siendo el ^{268}Sg el que posee un tiempo de vida de 2,9 ms. Se encuentra ubicado en el mismo grupo que el Cr, Mo y W.</p>														
<p>Bohrio (Bh, Z= 107, configuración electrónica propuesta $[Rn]5f^{14}6d^57s^2$). Este nombre honra a Niels Bohr por su enorme contribución al desarrollo de la teoría atómica. Fue sintetizado en 1981 en Alemania. Por su ubicación en la Tabla Periódica debería poseer propiedades análogas al renio. Su tiempo de vida media depende del isótopo siendo menor a los pocos segundos. Se ubica en el grupo 7 al que pertenecen Mn, Tc y Re.</p>														
<p>Hassio (Hs, Z=108, configuración electrónica propuesta $[Rn]5f^{14}6d^67s^2$). Lleva el nombre en honor al estado de Hesse, Alemania, donde este elemento se sintetizó en 1984. Su tiempo de vida media es de 9,7 s. El conocimiento de la química de este elemento está restringido al hecho de que sólo muy pocos átomos han sido sintetizados. Se ubica en el grupo 8, al que pertenecen los elementos Fe, Ru y Os.</p>														
<p>Meitnerio (Mt, Z=109, configuración electrónica propuesta $[Rn]5f^{14}6d^77s^2$). Lleva el nombre en honor a Lise Meitner. El tiempo de vida media del isótopo más estable ^{250}Mt es de 10 años. Fue sintetizado en 1982 en Alemania. Pertenecen al mismo grupo que los elementos de transición Co, Rh e Ir.</p>														
<p>Darmstadtio (Ds, Z=110, configuración electrónica propuesta $[Rn]5f^{14}6d^87s^2$). Su nombre deriva de la ciudad de Darmstadt, se sintetizaron varios elementos de esta familia. El tiempo de vida media es de pocos microsegundos, aunque los isótopos ^{279}Ds y ^{281}Ds poseen vidas medias de unos 180 y 11 milisegundos respectivamente. Fue sintetizado en 1994. La IUPAC reconoce el nombre de este elemento como Dasmstadtio. Pertenecen al mismo grupo que Ni, Pd y Pt.</p>														
<p>Roentgenio (Rg, Z=111, configuración electrónica propuesta $[Rn]5f^{14}6d^{10}7s^1$). Este elemento pertenece al grupo 11, junto con los metales Cu, Ag y Au. Su isótopo representativo es ^{280}Rg. En 1999 fue sintetizado en Darmstadt y con su nombre se recuerda a W. C. Roentgen, quien descubriera los rayos X.</p>														
<p>Copernicio (Cn, Z=112, configuración electrónica propuesta $[Rn]5f^{14}6d^{10}7s^2$). Pertenecen al grupo 12, junto con Zn, Cd y Hg. Su isótopo representativo es el ^{285}Cn, con un tiempo medio de vida de ~ 29 s. Su nombre, en honor a Nicolás Copérnico, y símbolo fueron propuestos por la IUPAC en 2010.</p>														

inicia en el Francio (Fr, Z=87). Los modelos teóricos surgieron la existencia de una región o isla de estabilidad para este grupo de elementos en regiones de Z=114, razón por la cual se mantiene un interés constante la investigación y síntesis de nuevos elementos mediante reacciones nucleares controladas.

Químicamente se encuadran entre los metales de transición, caracterizados por el llenado de los estados 6d [21]. En la siguiente Tabla se muestran los elementos sintetizados con los nombres aceptados.

ELEMENTOS PESADOS Y SU NOMENCLATURA

La IUPAC ha propuesto una nomenclatura sistemática para designar a los elementos para los cuales no existe una denominación aceptada por la comunidad científica, aún cuando no hayan sido descubiertos. En esta nomenclatura se hace uso del latín para expresar su nombre de manera transitoria. Para ello se escribe el número atómico del elemento y se separan sus dígitos, luego cada dígito se reemplaza por el nombre latino sistemático de dichos números. Así, el elemento 113, que en la tabla se le indica con el símbolo Uut tiene el nombre ununtrio, designación que surge de separar estos dígitos como 1-1-3. Para cada dígito se usa la siguiente tabla de conversión

0	1	2	3	4
nil	un	bi	tri	quad
5	6	7	8	9
pent	hex	sept	oct	enn

Los elementos con Z entre 113 y 118 han sido sintetizados en distintos experimentos. Se les puede llamar elementos del grupo p, ya que se completa el llenado de los estados 6p. Todos ellos pertenecen al nivel 7. La IUPAC, para designar a los nuevos elementos mantiene el criterio tradicional basado en nombres mitológicos, astronómicos, minerales, una región o el nombre

de un científico relevante en este campo.

En 2003 se confirmó la síntesis del Uut (Z=113) realizada por científicos del Instituto de Investigaciones de Física y Química (RIKEN) de Japón. La IUPAC ha propuesto provisoriamente el nombre de Nihonio (que significa *la tierra del sol naciente*, nombre de Japón.), siendo este el primer elemento preparado en ese país. El símbolo propuesto es Nh. Su configuración electrónica sugerida es $[\text{Rn}]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^1$. El isótopo relevante es ^{284}Uut con un tiempo medio de 0,48 s. Sin embargo el de mayor estabilidad es el isótopo ^{286}Uut , con 19,6 s de tiempo de vida media y su desintegración conduce al ^{284}Uut .

Los elementos Z=114 (Uuq) y Z=116 (Uuh) han sido ya denominados con los nombres de Flerovio (Fl) y Livermorio (Lv).

El **Flerovio** fue sintetizado en Dubnia en 1994. Lleva el nombre del Director de ese instituto hasta 1989, el Dr. Gueorgui Filórov (Rusia, 1913-1990) y que contribuyera al descubrimiento de varios elementos de este período. Su símbolo es Fl, y la configuración propuesta para este elemento es $[\text{Rn}]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^2$. El isótopo representativo es ^{289}Fl y su tiempo medio es del orden de 2.6 s.

El **Livermorio**, cuyo nombre está asociada con la localidad de Livermore, donde está ubicado el Laboratorio Nacional Lawrence, California, posee un Z=116 y una configuración electrónica $[\text{Rn}]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^4$. Fue sintetizado en 1999. El isótopo representativo es el ^{289}Lv con tiempo de vida media de 2 s.

A excepción de los elementos Fl y Lv, los elementos con nombres provisorios fueron sintetizados en los últimos años

Uup (Z=115, y su $t_{1/2} = 0,17$ s, siendo el ^{288}Uup el isótopo representativo. La configuración electrónica de este elemento que ha sido propuesta es $[\text{Rn}]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^3$. El Uup fue descubierto en 2004. La IUPAC propone el nombre de Moscovio (Mc) en recuerdo a la región donde está inserta la ciudad de Moscú. La síntesis de este elemento se realizó originalmente bombardeando átomos de ^{243}Am con ^{48}Ca , obteniéndose *cuatro átomos* de ununpentio. Este resultado muestra la sensibilidad alcanzada en este tipo de producción de elementos supermasivos.

Uus= (Z=117, y su $t_{1/2} = 0,02$ s para el isótopo ^{295}Uus . La configuración electrónica más probable es $[\text{Rn}]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^5$, y este elemento fue descubierto en 2008. Se ha propuesto el nombre de Tenesino por el estado de Tennessee, EE.UU,

donde está instalado el Laboratorio Nacional de Oak Ridge.

Uuo ($Z=118$, con un $t_{1/2}= 0,9$ s para el isótopo ^{294}Uuo . Su configuración electrónica es $[\text{Rn}]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^6$ y fue descubierto en el año 2006, en un trabajo conjunto de grupos de investigación es ruso y norteamericano. La IUPAC ha propuesto provisoriamente el nombre de Oganeón, con el símbolo Og, en honor al físico ruso Yuri Oganessian quien contribuyera al crecimiento de la física nuclear de esta familia de elementos superpesados.

Los nombres propuestos indicados previamente están actualmente en análisis, esperándose una definición para fines del año 2016.

REFERENCIAS

- [1] F. Albert Cotton & Geoffrey Wilkinson, *Advanced Inorganic Chemistry*, 3rd. Edition, Interscience Publishers, J. Wiley & Sons, 1972.
- [2] Simon Cotton, *Lanthanide and Actinide Chemistry*, John Wiley & Sons Ltd (2006)
- [3] P.W. Atkins T.L. Overton, J.P. Rourke, M.T. Weller and F.A. Armstrong, *Shriver and Atkins' Inorganic Chemistry*, Fifth Edition, Oxford University Press (2010)
- [4] IUPAC, The International Union of Pure and Applied Chemistry, *Periodic Table of the Elements*, June 2016, Atomic weight are reported in *Pure Appl. Chem.* 85, 1047-1078 (2013). Ver: <https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements>
- [5] José M. Sanchez Ron, "*Marie Curie, la Radiactividad y los Premios Nobel*", *Anales de Química* 107 (2011), 84–93; José M. Sanchez Ron, José Manuel Sánchez Ron, *Marie Curie y su tiempo*, Editorial Crítica, Barcelona, 2009.
- [6] Pierre Curie & Henri Becquerel, "*Action physiologique des rayons du radium*", *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 132 (1901) 1289;
- [7] David R. Lide, ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 89th Edition (Internet Version 2009)*, CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL. §4.1 a 4.44; *The elements*, C.R. Hammond,
- [8] Per Enghag, *Encyclopedia of the Elements*, Technical Data, History, Processing and Applications, 2004 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA
- [9] Michael Tidd, *Journal of the Royal Society of Medicine*, 101 (2008) 156-157
- [10] H. Karagueuzian, C. White, J. Sayre & A. Norman, *Nicotine and Tobacco Research*, 14 (2011) 79-90
- [11] www.cnea.gov.ar/proyectos/enriquecimiento_uranio.php;
- [12] <http://www.cab.cnea.gov.ar/index.php/proyectos/enriquecimiento-de-uranio>).
- [13] D. C. Hoffman, F. O. Lawrence, J. L. Mewherter & F. M. Rourke, *Detection of Plutonium-244 in Nature*; *Nature* **234**, (1971) 132 - 134.
- [15] Alexandra Witze, *Nature*, **515** (2014) 484-486)
- [16] Peter Pringle Y James Spigelman, *Los Barones Nucleares*, Editorial Sudamericana
- [17] https://es.wikipedia.org/wiki/Accidente_de_Chernóbil
- [18] Peter Waight (Canada) under the direction of an editing committee chaired by Dr. Henri Métivier (France), *Assessment of Radiological and Health Impacts, 2002 Update of Chernobyl: Ten Years On*, OECD Nuclear Energy Agency
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_Daiichi_nuclear_disaster
- [20] J H Hamilton, Yu Ts Oganessian and V K Utyonkov and the collaboration of Lawrence Berkeley National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory, and the Research Institute of Atomic Reactors, *Discoveries of Elements 113, 115 and 117, Russia Journal of Physics: Conference Series* 403 (2012) 012035
- [21] J. Meija, T.B. Coplen, M. Berglund, W.A. Brand, P. De Bièvre, M. Gröning, N. Holden, J. Irrgeher, R. Loss, T. Walczyk, T. Prohaska, "Atomic weights of the elements 2013" (IUPAC Technical Report), *Pure and Applied Chemistry*. **88** (2016), 265–291.