

Vida Científica

EFEMÉRIDES

BICENTENARIO DEL YODO (1811-2011)

Todavía tenemos en la retina las trágicas imágenes del accidente nuclear de Fukushima en Japón este año 2011. Parte de ellas mostraban a ejemplares ciudadanos de ese país milenario guardando colas para adquirir pastillas de sales de yodo con las que saturar con este elemento químico sus glándulas tiroideas. El cuerpo humano no distingue entre los isótopos de un mismo elemento químico, pues las reacciones bioquímicas están gobernadas por la capa de valencia de estos elementos que es común a dichos isótopos. De esta manera los japoneses esperaban poder evitar la acumulación descontrolada de los isótopos radiactivos del yodo, que tienden a fijarse en la citada glándula, y sus posteriores emisiones energéticas producto de las desintegraciones correspondientes que podrían ocasionar daños irreparables en los tejidos orgánicos de sus cuerpos. Aunque el yodo y sus isótopos radiactivos han sido los responsables de hacer de este elemento uno de los tristemente famosos “protagonistas” del desastre mencionado, justamente 200 años después de su descubrimiento, no se debe olvidar que es un elemento químico de gran trascendencia en la vida humana y animal y que presenta un gran número de aplicaciones médicas beneficiosas.

EL DESCUBRIMIENTO

El descubridor del yodo en 1811 fue BERNARD CURTOIS, francés, hijo de un fabricante de salitre (NO_3K), un polvo blanco de múltiples utilidades en la época, que iban desde la conservación de alimentos, pasando por la fabricación de cerillas, hasta llegar a la de la pólvora. En la obtención del salitre se utilizaban las cenizas de las algas marinas que se recolectaban en Bretaña y Normandía (*va-rech*) y que resultaban ser una fuente de sodio y de potasio. Al disolver estas cenizas en agua acidulada con ácido sulfúrico concentrado, Curtois observó nubes de vapor púrpura que emanaban de la disolución. Los vapores eran irritantes, con un olor similar al del cloro (DAVY; 1808) y condensaban sobre objetos fríos en forma de cristales oscuros que presentaban un lustre metálico.

Curtois que había sido aprendiz de farmacia, que había asistido a la Escuela Politécnica y estudiado bajo la dirección de GUYTON DE MORVEAU, director de la Escuela (alumno de FOURCROY que a su vez lo había sido de LAVOISIER), no carecía de conocimientos químicos ni de interés por estos asuntos, como lo prueban sus actividades posteriores ligadas a la práctica farmacéutica. Su experiencia le llevó a sospechar que aquellos vapores violeta contenían un nuevo elemento químico, pero desafortunadas circunstancias se interpusieron en su camino para identificarlo completamente. Así, carecía del laboratorio y de los medios necesarios para llevar a cabo la identificación y, por otra parte, ciertos problemas financieros en la empresa familiar del salitre le obligaron a abandonar sus estudios farmacéuticos y a colaborar activamente en el negocio. Aunque aquí primaron por encima de todo los motivos personales, este ejemplo de Curtois nos indica dos requisitos necesarios para el trabajo investigador: *tiempo y medios*, los cuales conviene tener asegurados para que el buen fin de tal tarea pueda producirse (obviamente, no son suficientes). Curtois acabó pasando sus muestras de cristales a dos amigos químicos que sí disponían de estos requisitos necesarios, CHARLES-NICOLAS DESORMES y NICOLAS CLEMENT, y en 1813 comunicaron el descubrimiento de una nueva sustancia: yodo, del griego “violeta”. Posteriormente, la identificación del yodo como elemento químico, más allá de toda duda, fue establecida por HUMPHREY DAVY e independientemente por JOSEPH-LOUIS GAY-LUSSAC. Algunas fuentes atribuyen a GAY-LUSSAC (1813) el término “yodo”. Su símbolo químico es I.

ALGO DE SU QUÍMICA

El yodo forma parte de los elementos denominados halógenos: flúor (MOISSAN; 1886), cloro (DAVY; 1808), bromo (VON LIEBIG, BALLARD, y otros; mitad de los 1820), yodo (CURTOIS; 1811); y astato (CORSON, MACKENZIE y SEGRÉ; 1940). Se trata de un elemento no metálico, con número atómico $Z=53$, peso atómico 126,90447, y una gran cantidad de isótopos. Su estado ordinario estándar es en forma de sólido ortorrómbico (298 K, 1 atm), aunque sublima a temperatura ambiente

produciendo un gas violeta corrosivo de olor picante (forma molecular I_2). Su abundancia en la corteza terrestre es de unas 0,14 ppm (partes por millón), en tanto que en el agua del mar es de 0,052 ppm. La capa de valencia del átomo de yodo está incompleta en los orbitales p ($5s^2p^5$), lo que origina los posibles estados de oxidación que se denotan convencionalmente por las “valencias” -1, +1, +3, +5 y +7, y que van aparejadas con los diferentes tipos de compuestos que el yodo da en combinación con otros elementos químicos (desde los yoduros hasta los peryodatos). El lector que desee consultar en detalle sus propiedades químico-físicas puede hacerlo en un texto de Química Inorgánica o en la web webelements.com.

El método de obtención tradicional del yodo por calcinación de algas (*Laminaria* y *Fucus*) se utilizó profusamente hasta la década de los 1960, pero otras fuentes de yodo habían sido ya identificadas: como mineral en forma de AgI (1825, México), y como impureza en el famoso abono conocido como Nitrato de Chile. Existen hoy, sin embargo, otros métodos basados en la explotación de los depósitos terrestres de aguas mineralizadas saladas, bien aislados (como en Japón), bien como asociados a los pozos de explotaciones petrolíferas (como en los EE.UU.), y que presentan riquezas de contenido en yodo elevadas (100 ppm en Japón ó 30–40 ppm en EE.UU.). El mayor productor mundial de yodo es Japón, con alrededor de la mitad de la producción mundial, seguido por otros países como Chile, EE.UU. y Rusia, que presentan producciones comparables y prácticamente completan el cuadro de países productores.

Entre los métodos de obtención merece la pena señalar el fundamento del método clásico de extracción a partir de aguas mineralizadas en el que, una vez clarificada, tal agua se la trata con $AgNO_3$ obteniéndose un precipitado de Ag metálica, que se trata a su vez con Fe para obtener una disolución de FeI_2 con un precipitado de la sal AgI . El paso de cloro gaseoso (Cl_2) a través de dicha disolución libera I_2 , pues el yodo es desplazado de la sal ferrosa por el cloro, que es más electronegativo.

Como todos los elementos químicos, el yodo tiene su historia y anécdotas relacionadas con su posición en la Tabla Periódica. Por ejemplo, el famoso químico JÖNS J. BERZELIUS no aceptó que Cl , Br y I eran nuevos elementos químicos hasta los años 1820, pues hasta entonces para él sólo eran óxidos de elementos desconocidos. *Item* más, inicialmente la ordenación de la Tabla se realizaba de acuerdo a los pesos atómicos. Uno de estos intentos eran las tríadas de DOBERËINER (1817, 1829), en las que

se correlacionaban las actividades químicas con los pesos atómicos, y mostraban que los comportamientos eran similares en este respecto en $Ca-Sr-Ba$, $S-Se-Te$, $Fe-Co-Ni$, $Cl-Br-I$. El yodo contribuyó así a dar más fundamento a estas ordenaciones. Posteriormente, hacia 1870, al yodo, que por entonces se le denotaba con la letra J , se le había asignado el peso atómico 127 y DIMITRII MENDELEEV lo colocó en el entonces denominado Grupo VII con F , Cl , y Br . El “éxito” fue colocarlo con los halógenos y no con el oxígeno y similares, de manera que tuvo que situar erróneamente al telurio para evitar una inversión en los pesos atómicos...

APLICACIONES GENERALES

Las utilidades del yodo son muy variadas, encontrando aplicaciones, algunas ciertamente alejadas en el tiempo, como: colorante (eritrosina $C_{20}H_{8}I_4O$ para la industria alimentaria o las tintas de impresión); en fotografía (sal AgI , por ejemplo, ya en los daguerrotipos de 1835-1839); en el análisis químico, volumétrico o de marcación de grasas no saturadas (índice de yodo); en la síntesis de compuestos orgánicos (éteres -1851-, alquilación de aminas -1850-, etc.); y, quizá, más fundamentalmente en la medicina. Al margen de su conocido uso como componente de desinfectantes de heridas (básicamente $KI+I_2$ en alcohol), es fundamental tener en cuenta que el yodo es un *oligoelemento*, es decir, una sustancia que necesita el cuerpo humano (también el de los animales) para su saludable funcionamiento y que debe ser adquirida por ingesta de éste. La dosis diaria recomendada para humanos es de 150 g/día y puede adquirirse, entre otros alimentos, de las algas (pardas) o de determinados pescados como el bacalao o la lubina.

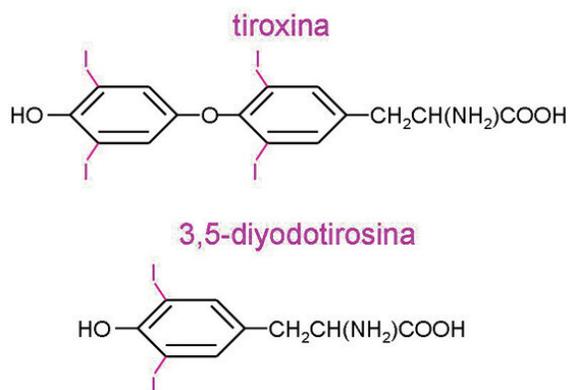


Figura 1. Moléculas yodadas biológicamente activas en la glándula tiroidea.

Tanto su ausencia como su exceso originan problemas orgánicos graves. Mucho antes de su descubrimiento se utilizaban extractos de algas para tratar el *bocio*, una inflamación de la glándula tiroides, y ya en 1819 J.F. COINDET y otros utilizaron como tratamiento sal KI pura. La cuestión está en que el funcionamiento de la glándula *tiroides* está estrechamente ligado a la presencia de yodo en ella. Se trata de una glándula de pequeño tamaño, pero que está profusamente regada por el flujo sanguíneo (unos 5 litros por hora) y que contiene un alto contenido en yodo, normalmente entre 10 y 15 mg, lo que representa 2 mg de yodo por gramo de glándula en seco. Esta glándula regula el metabolismo basal, el crecimiento, etc., y su función endocrina está presente en el feto humano ya en la semana 12^a. La hipofunción de la glándula tiroides se corresponde con un bajo contenido en la concentración de yodo y puede reducir hasta la mitad el metabolismo basal, en tanto que la hiperfunción se corresponde con una acumulación excesiva de yodo pudiendo elevar al doble de lo normal el metabolismo basal. Así la ausencia de yodo conduce al mencionado bocio, en un intento del organismo por compensar vía hipertrofia de la glándula la escasez en la absorción de yodo, o a la conocida como *mixedemia* (acumulaciones de líquido), y en casos extremos a alteraciones del crecimiento que en infantes pueden desembocar en retraso mental (*cretinismo*). Por el contrario, el exceso de yodo lleva a padecer temblores, alteraciones hepáticas, hiperglucemia, problemas cardíacos, etc. En fin, el equilibrio funcional de esta glándula tiroides es un delicado balance que se manifiesta con la producción de hormo-

nas: la tiroxina (hormona del crecimiento), la triyodotironina, etc. En la composición de ellas, naturalmente, está el yodo. Muy justificada pues la acción que los bravos japoneses emprendieron para contrarrestar los posibles efectos nocivos de los isótopos radiactivos de este importante elemento químico. Pero, como ya hemos advertido antes, no todo en ellos es tan malo como parece.

ISÓTOPOS RADIATIVOS DEL YODO

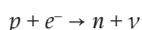
Como hemos comentado anteriormente, el yodo es un elemento químico de número atómico $Z = 53$, lo que indica que tiene 53 protones en el núcleo. En la actualidad se conocen 37 isótopos de este elemento químico de los que el único estable es el I^{127} , de número másico¹ $A = 127$, por lo que en el núcleo tiene además de los 53 protones 74 neutrones. Los otros 36 isótopos restantes son todos radiactivos, desde $A = 108$ hasta $A = 144$ y con periodos de semidesintegración² ($T_{1/2}$) que van desde unos pocos microsegundos a millones de años. Todos ellos tendrán las mismas propiedades químicas, marcadas por el número atómico, pero con propiedades nucleares (radiactivas) diferentes. El comportamiento radiactivo de un nucleido está relacionado con su número másico, con el balance de fuerzas determinado por el número de protones y neutrones que lo desvían de la estabilidad.

Los isótopos con $A < 127$ se desintegrarán por captura electrónica y/o serán emisores β^+ , lo que manifiesta que son núcleos con exceso de protones³, y los que tienen $A > 127$ serán emisores β^- , que indica que en este caso tienen exceso de neutrones⁴. Además en estas des-

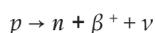
¹ El *número másico* es el número de nucleones que tiene el núcleo de un isótopo. La denominación nucleón se usa indistintamente para protones y neutrones, por lo que el número másico será la suma de los protones y los neutrones de un núcleo. Los isótopos de un elemento químico se diferencian en el número de neutrones que tienen.

² El *periodo de semidesintegración* es el tiempo necesario para que se desintegre a la mitad una población de núcleos radiactivos.

³ La captura electrónica es un tipo de desintegración beta que consiste en una transformación en el núcleo del tipo:

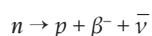


La emisión β^+ consiste en la emisión de positrones por el isótopo, se produce porque hay una transformación en el núcleo del tipo:



En ambos casos el núcleo hijo será el elemento químico con $Z-1$.

⁴ La emisión β^- consiste en la emisión de electrones por el isótopo, se produce porque hay una transformación en el núcleo del tipo:



En este caso el núcleo hijo es el elemento químico con $Z+1$.

⁵ En el número 3 del año 2000 de esta revista se publicó un artículo describiendo las distintas aplicaciones de las radiaciones ionizantes en medicina.

integraciones se producirá emisión gamma, radiación electromagnética, que en algunos casos es la que se utiliza para la obtención de la imagen en medicina nuclear.

De todos los isótopos radiactivos del Yodo, los más conocidos son I^{123} , I^{124} , I^{125} y I^{131} por sus aplicaciones en medicina, todos ellos con periodo de semidesintegración menor que 60 días, y el I^{129} con periodo de 16 millones de años, relacionado con la actividad nuclear humana (tanto industrial como militar).

USOS EN MEDICINA DE LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS DEL YODO

Desde el descubrimiento de la radiactividad a finales del siglo XIX, algunas de las aplicaciones más extendidas y que más han evolucionado han sido las realizadas en el campo de la medicina, tanto en diagnóstico como en terapia⁵, usándose isótopos radiactivos entre ellos algunos del yodo.

Gracias a la capacidad para absorber yodo que tiene la glándula tiroidea, los isótopos radiactivos del yodo son muy útiles para diagnosticar y tratar problemas en esa glándula. Además las propiedades químicas del yodo hacen que fácilmente se agregue a distintas moléculas formando radiofármacos, lo que permite realizar estudios de diagnóstico por imagen (por ejemplo en gammagrafías) y terapias en algunos tipos de cáncer. Los isótopos del Yodo usados en medicina tienen el periodo de semidesintegración corto lo que hace que la eliminación por el organismo sea rápida, además hay que tener en cuenta no sólo el periodo radiactivo ($T_{1/2}$) si no que también el periodo biológico (T_b) o capacidad de eliminación por medio de procesos biológicos del radiofármaco, por lo que el periodo efectivo (T_e) es siempre menor que el radiactivo y se obtendrá de la siguiente expresión:

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_b}$$

Los más utilizados son:

- El I^{123} ($T_{1/2} = 13,2$ horas), emite gammas de hasta 528 keV, se usa principalmente en imagen médica, para evaluar anatómicamente y fisiológicamente el tiroides.

- El I^{124} ($T_{1/2} = 4,18$ días), al ser emisor de positrones se usa en pruebas de PET (positron emisión tomography), obteniéndose la imagen con la radiación de aniquilación producida en el interior del organismo por los positrones emitidos por el radiofármaco inyectado al paciente.

- El I^{125} ($T_{1/2} = 60,2$ días), emite gammas de baja energía (35,5 keV), también se usa para la obtención de imágenes médicas, aunque estas son de peor calidad que las obtenidas con I^{123} , pero al tener el periodo mayor se utiliza cuando la prueba se tiene que hacer durante varios días. Otra aplicación de este radioisótopo es el tratamiento de tumores de próstata, con braquiterapia⁶ de baja dosis, en este caso el radioisótopo esté encapsulado en unas semillas de titanio o plata que son las que se implantan a los pacientes en las proximidades del tumor. En la Figura 2 se puede observar el espectro de una de estas semillas, este espectro ha sido obtenido en el laboratorio de Física Nuclear de nuestra Facultad, se pueden observar junto las emisiones gamma del I^{125} y X de su hijo el Teluro, emisiones X de la vaina de plata que lo recubre.

El I^{125} también es usado en ensayos de radioinmunología para mostrar la presencia de hormonas en pequeñas cantidades.

- El I^{131} ($T_{1/2} = 8,04$ días), al ser un emisor beta (en este caso de electrones de energías de hasta 600 keV) tiene un uso muy extendido para el tratamiento del cáncer de tiroides y también para la obtención de imágenes del tiroides, estudios funcionales del hígado, estudio del flujo renal y del tracto urinario.

ISÓTOPOS RADIATIVOS DEL YODO CONTAMINANTES

Dentro de los residuos radiactivos y los contaminantes producidos debidos a la actividad humana relacionada con la industria nuclear y pruebas de armas nucleares, hay dos isótopos del yodo, el I^{131} y el I^{129} .

El I^{131} además de su utilización positiva en aplicaciones médicas descrita previamente, tiene una gran importancia por su contribución, en este caso negativa,

⁶ Del griego *braqui*, que quiere decir corto. Los tratamientos se llevan a cabo con fuentes radiactivas encapsuladas en contacto o dentro del tejido u órgano a tratar. También se denomina Curiterapia.

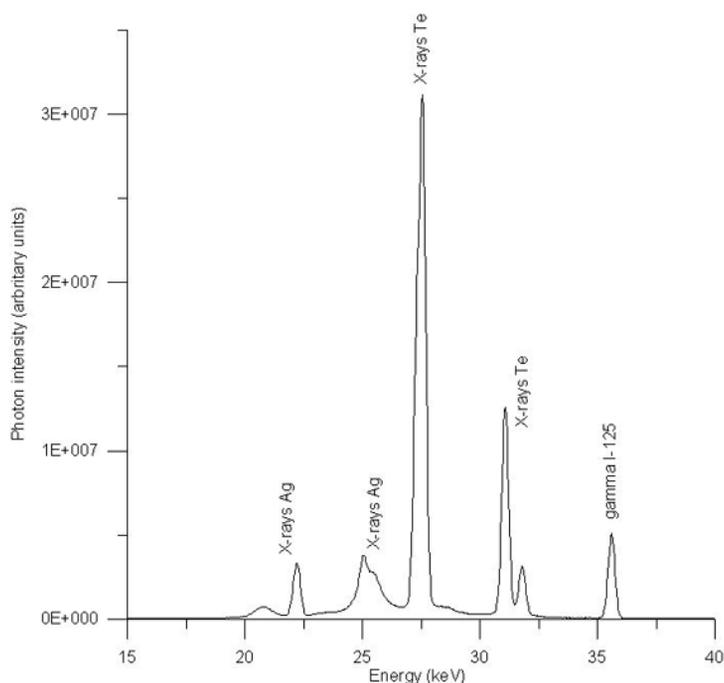


Figura 2. Espectro gamma de una semilla de I^{125} .

en los contaminantes producidos por accidentes nucleares. Es uno de los principales productos gaseosos de fisión que se producen en los reactores nucleares, se origina en grandes cantidades y en caso de un accidente nuclear (como el ocurrido en Chernobyl y más recientemente en Fukushima), la emisión a la atmósfera es bastante alta ya que se trata de un gas, lo que puede contribuir al aumento del número de cáncer de tiroides en la población que se encuentre cercana a la zona del accidente. Al tener un periodo de semidesintegración corto su influencia se elimina más rápidamente que otro tipo de contaminantes, lo que también es una ventaja en el tratamiento de este tipo de isótopo como residuo radiactivo.

El I^{129} es un radionucleido con un periodo muy largo (16 millones de años), este periodo es menor que la edad de la Tierra por lo que aunque hay pruebas de que hay I^{129} en el Universo producido en explosiones de Supernovas y que en el Sistema Solar hubo hace tiempo ciertas cantidades de I^{129} , en la actualidad el que se

encuentra en la naturaleza tiene origen cosmogénico⁷ en una pequeña proporción y en una mayor medida debido a la actividad humana en pruebas nucleares y residuos radiactivos, su largo periodo hace que una vez lanzado al ambiente permanezca en él durante mucho tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- N.N. Greenwood y A. Earnshaw, *Chemistry of the Elements*, Pergamon Press, Londres (1987).
- E. Browne and R.B. Firestone, *Table of Radioactive Isotopes*, Wiley-Inter-science Publication, EE.UU. (1986).
- webelements.com

Amalia Willart Torres
Dpto. de Física de los Materiales

Luis M. Sesé Sánchez
Dpto. de Ciencias y Técnicas Físicoquímicas

⁷ Los radionucleidos de origen cosmogénico se forman por la acción de la radiación cósmica en núcleos estables de nuestra atmósfera.