

LA NUEVA SERIE DE LOS ACTINIDOS

por el
Ing. G. E. VILLAR

Resumen

Las analogías que se observan en la distribución de los elementos en el Cuadro Periódico, así como el estudio de la sucesión constituida por los números atómicos de los gases nobles, nos llevaron a defender desde 1938 la hipótesis sobre la existencia de una segunda serie de "tierras raras" en el período 7 del Cuadro, la que se iniciaría con el actinio. Esta hipótesis ha sido confirmada con el descubrimiento de los elementos transuranianos, cuyas propiedades químicas condujeron a Seaborg en 1945 a denominar "actínidos" a los elementos que formarían la segunda serie de "tierras raras".

En el presente trabajo se hace un resumen sobre las consideraciones teóricas que conducen a afirmar la existencia de la serie de los actínidos y se hace un estudio comparativo de las propiedades químicas de los elementos constituyentes de esta serie, con la de los respectivos homólogos de la serie de los lantánidos.

LA SEGUNDA SERIE DE "TIERRAS RARAS"

Las analogías que se observan en la distribución de los elementos en el Cuadro Periódico, así como el estudio de la sucesión constituida por los números atómicos de los gases nobles, nos llevaron en 1938 a admitir y desarrollar la hipótesis de J. Perrin (1) relativa a la probable existencia en el período 7 del Cuadro, de una nueva pléyada de elementos similar a la de las tierras raras, cuya ubicación se encontraría en el lugar ocupado hasta hoy solamente por el actinio (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10).

En la disposición generalmente admitida para el Cuadro Periódico, los elementos Z 87, Ra (Z 88), Ac (Z 89), Th (Z 90), Pa (Z 91) y U (Z 92), que constituyen el período 7, han sido colocados en forma sucesiva y ocupando los sub-grupos (a) de los grupos I, II, III, IV, V y VI.

La ubicación de los tres primeros elementos es inobjetable; en cambio, es dudosa la posición que ocupan los elementos siguientes.

En primer lugar, la similitud de los pares de períodos 2 y 3, 4 y 5, sugiere la analogía de los períodos 6 y 7. Esta analogía se encuentra por otra parte afirmada al considerar la sucesión de los números atómicos de los gases nobles en la que la diferencia entre

dos valores consecutivos corresponde al número de elementos que forman el período por ellos limitado.

Dicha sucesión está constituida por los números:

$$2, 10, 18, 36, 54, 86, \dots Z_p$$

Siendo Z_p el número atómico del gas noble en que termina el período p .

$$Z_p = 2p(2 \times 1-1) + 2(p-1)(2 \times 2-1) + 2(p-3)(2 \times 3-1) + 2(p-5)(2 \times 4-1) + \dots + (p-2n+3)(2n-1) \quad (1)$$

Esta expresión, de la que sólo deben considerarse los términos positivos, corresponde a la ley de formación de las envolturas electrónicas extranucleares de los gases nobles de acuerdo con la teoría de Bohr: correspondiendo los números 1, 2, 3, 4, ... a los términos s, p, d, f, ...

El período 5, por ejemplo, se completaría con el elemento de número atómico Z_5 igual a:

$$Z_5 = 10s + 24p + 20d = 54$$

Desarrollando la expresión anterior según el principio de exclusión de Pauli, se tendría para dicho elemento la siguiente configuración electrónica, que corresponde a la establecida por Bohr para el xenón:

$$10s + 24p + 20d = Ks^2 + Ls^2 + Ms^2 + Ns^2 + Os^2 + Lp^6 + Mp^8 + Np^6 + Op^6 + Md^{10} + Nd^{10}$$

Calculando por medio de la fórmula (1) el número atómico del elemento que completaría el período 7, se obtiene:

$$Z = 118$$

valor que coincide con el previsto por Bohr para la carga nuclear del séptimo gas noble.

Esta conclusión, basada en la estrecha similitud que caracteriza a los gases nobles, conduce a admitir que el período 7 se complete con 32 elementos como el período 6.

Si los períodos 6 y 7 se encuentran formados por el mismo número de elementos, deberán tener además idéntica configuración y por lo tanto existirá en el período 7 una pléyada de 15 elementos similar a la de las tierras raras, la que por razones de analogía se iniciaría con el actinio y ocuparía el lugar reservado para este elemento en el Cuadro Periódico.

RESULTADOS DE LA OBTENCIÓN DE LOS PRIMEROS ELEMENTOS TRANSURANIANOS

Nuestras investigaciones sobre la existencia de la segunda serie de "tierras raras", de índole completamente teórica, se vieron en cierto modo confirmadas por los resultados obtenidos en los primeros trabajos referentes a la obtención de elementos transuranianos.

En 1940, E. M. McMillan y P. H. Abelson, de la Universidad

de California, descubrieron el neptunio, irradiando el uranio por neutrones.

Las propiedades del neptunio, muy similares a las del uranio, sugirieron a E. M. McMillan y P. H. Abelson, la existencia de una segunda serie de "tierras raras" en la parte final del Cuadro Periódico, en la cual el uranio y el neptunio se encontrarían asociados (17).

Esta hipótesis fué más tarde desarrollada teóricamente por G. Mayer (18), quien en 1941, llegó a la conclusión de que la segunda serie de "tierras raras" predicha por McMillan y Abelson se encontraría en las proximidades de número atómico 92.

Al referirnos en 1942 a estas investigaciones que venían a confirmar la hipótesis de la segunda serie de "tierras raras", destacamos que de acuerdo con nuestra opinión la serie debería iniciarse con el actinio, de número atómico 89 (7), (8), (9).

En 1942, A. C. Wahl y G. T. Seaborg, de la Universidad de California, obtenían el isótopo ${}_{93}^{237}\text{Np}$ del neptunio, como producto de la desintegración del uranio ${}_{92}^{238}\text{U}$, obtenido a su vez irradiando con neutrones al uranio ${}_{92}^{235}\text{U}$ (19).

Este isótopo del neptunio ha sido de gran interés científico, pues como tiene una vida media de 2.25×10^6 años fué posible estudiar en él con detalle las propiedades químicas del neptunio, tan pronto como se obtuvieron las cantidades mínimas de dicho isótopo imprescindibles para las investigaciones químicas.

J. C. Hindman, L. R. Magnusson y T. J. Lachapelle, del Laboratorio Metaúrgico de la Universidad de Chicago, realizaron el estudio de las propiedades químicas del neptunio, empleando algunos miligramos del ${}_{93}^{237}\text{Np}$. Estos investigadores demostraron que el neptunio es tri, tetra, penta y hexavalente, presentando una tendencia mayor hacia la estabilidad las combinaciones de valencia menor, que la de las correspondientes combinaciones del uranio (19).

En 1940, G. T. Seaborg, M. McMillan, A. C. Wahl y J. W. Kennedy, de la Universidad de Berkeley, obtenían el isótopo ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ del plutonio, bombardeando el uranio por deuterones de gran energía.

El isótopo más importante del plutonio es el ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, que experi-

neut-
 235
 menta la bipartición en forma similar al ^{235}U y que por ello ha sido
 92
 o, su-
 una objeto de estudios importantísimos relacionados con la bomba ató-
 y Pe- mica.
 iados 239
 El plutonio Pu se obtiene, lo mismo que el neptunio, irradiando
 94
 r G. do al uranio con neutrones. Se forma en primer lugar el uranio
 unda 239
 reon- ^{239}U que luego se desintegra con emisión de rayos β transformán-
 con- 92
 taca- lose en el neptunio Np .
 con- 239
 Ca- El neptunio Np se desintegra a su vez con emisión de rayos
 le la 93
 239
 β , transformándose en plutonio Pu .
 neu- 94
 Este isótopo del plutonio es un radioelemento emisor de rayos α ,
 cuya vida media es de unos 24000 años.
 La excepcional trascendencia de este isótopo del plutonio así co-
 mo su larga vida media, han hecho que se haya realizado un estudio
 muy detenido de sus propiedades químicas; habiéndose preparado un
 gran número de sus compuestos, a pesar del breve tiempo transcurri-
 do desde su descubrimiento.
 Como resultado de estas investigaciones se ha llegado a la con-
 clusión de que el plutonio es tri, tetra, penta y hexavalente; siendo los
 compuestos correspondientes a las valencias inferiores, más estables
 que los correlativos derivados del neptunio (19).
 El neptunio y plutonio tendrían por consiguiente propiedades
 químicas similares a las del uranio, lo que justificaría que se agru-
 paran con este elemento en el Cuadro Periódico; en cambio no exis-
 ten semejanzas químicas entre el neptunio y el plutonio, y el osmio
 y renio, respectivamente (19).

LA NUEVA SERIE DE LOS ACTÍNIDOS

J.
 po
 an
 Si fuera correcta la ubicación de los elementos que siguen al ac-
 tinio en el Cuadro Periódico, el neptunio debería situarse en la mis-
 ma columna en que actualmente se encuentran el manganeso, masurio
 y renio; mientras que el plutonio completaría la columna formada
 por el hierro, rutenio y osmio.
 ri- Las investigaciones realizadas sobre dichos elementos transura-
 nianos han puesto en evidencia características químicas diferentes de

las de los elementos con quienes deberían agruparse en el Cuadro Periódico y ello a llevado a Seaborg, en Diciembre de 1945, a "adelantar la atractiva hipótesis de la existencia de una serie de elementos similares a la de las tierras raras, que se iniciaría con el actinio, del mismo modo que la serie de los lantánidos se inicia con el lantano. De acuerdo con esta hipótesis, la nueva serie de elementos podría denominarse serie de los "actínidos" y el primer electrón del nivel 5f aparecería en el torio" (19).

La autorizada opinión de Seaborg, basada en el resultado de importantes investigaciones experimentales vinculadas con el proyecto de la bomba atómica, viene a confirmar en todos sus puntos nuestras anteriores consideraciones sobre la existencia de una segunda pléyada de "tierras raras".

En febrero de 1938, escribíamos en el Boletín de la Facultad de Ingeniería de Montevideo: "el lugar reservado en el Sistema Periódico para el actinio, debería contener una pléyada de quince elementos radioactivos de números atómicos comprendidos entre el 89 (actinio) y el 103; es decir que el torio (90), el protoactinio (91), el uranio (92) y los 11 elementos desconocidos siguientes, deberían ocupar en el Sistema Periódico el lugar reservado hasta ahora para el actinio" (2). Es ésta la serie de los actínidos a que se refiere Seaborg.

En el mismo artículo mencionado (2) y al considerar la estructura atómica que deberían tener los elementos que siguen al actinio en el Sistema Periódico, habíamos indicado para ellos las siguientes configuraciones electrónicas:

Actinio . .	$Ks^2 Ls^2 Lp^6$	$Ms^2 Mp^6 Md^{10} Ns^2 Np^6 Nd^{10} Nf^{14}$
		$Os^2 Op^6 Od^{10} Ps^2 Pp^6 Pd^1 Qs^2$
Torio . . .	(Igual Ac)	$Os^2 Op^6 Od^{10} Of^1 Ps^2 Pp^6 Pd^1 Qs^2$
Protoactino.	(Igual Ac)	$Os^2 Op^6 Od^{10} Of^2 Ps^2 Pp^6 Pd^1 Qs^2$
Uranio . . .	(Igual Ac)	$Os^2 Op^6 Od^{10} Of^3 Ps^2 Pp^6 Pd^1 Qs^2$

En nuestra hipótesis sobre la configuración electrónica de los elementos constituyentes de la segunda pléyada de "tierras raras", aparecía, tal como lo sugiere Seaborg, el primer electrón del nivel 5f (Of) en torio.

LOS ELEMENTOS HOMÓLOGOS DE LA SERIE DE LOS ACTÍNIDOS

Admitiendo la constitución de la serie de los "actínidos" en la forma sugerida por Seaborg y adelantada por nosotros, se tendrían las siguientes sucesiones de elementos homólogos:

Serie de los lantánidosLa Ce Pr Nd Il Sm Eu Gd
Serie de los actínidosAc Th Pa U Np Pu Am Cm

Los conocimientos escasos que todavía se tienen de las combinaciones del actinio, permiten señalar sin embargo la semejanza de

este elemento con su homólogo, el lantano, siendo ambos trivalentes. El cerio y el torio tienen una gran similitud, la que ha sido posible poner de manifiesto bajo diferentes aspectos, debido a las numerosas combinaciones que de ambos elementos se conocen. No sólo tienen una semejanza grande desde el punto de su tetravalencia predominante, sino porque también sus compuestos presentan entre sí mucho parecido (7).

El praseodimio y el protoactinio constituyen otro par de elementos homólogos en las series de los lantánidos y actínidos. El praseodimio es trivalente y en algunas combinaciones se manifiesta también como tetravalente (20); en cambio, el protoactinio, en su combinación más conocida, el óxido (Pr_2O_3), se comporta como pentavalente.

Desde este punto de vista se presenta una dificultad para justificar el cambio de ubicación del protoactinio, colocado actualmente en el grupo del vanadio, colombio (niobio) y tántalo, que se manifiestan también como pentavalentes en sus combinaciones oxigenadas; sin embargo, hay una diferencia, el pentóxido del protoactinio es básico, mientras que los pentóxidos de vanadio, colombio y tántalo son ácidos.

El carácter básico del pentóxido de protoactinio, significa una similitud con el torio y las tierras raras, cuyos óxidos son básicos.

Las investigaciones realizadas sobre las valencias del uranio han permitido establecer en forma definitiva las valencias 3, 4, 5 y 6; no estando suficientemente confirmada la valencia 2, que se justificaría con la existencia todavía muy discutida del difluoruro, monóxido y monosulfuro de uranio (21).

El neodimio, homólogo del uranio en la serie de los lantánidos, es trivalente, lo que constituiría una similitud de orden químico entre ambos elementos; similitud muy escasa, dado que las valencias predominantes del uranio son las 4 y 6.

Respecto a la hexavalencia del uranio, conviene hacer notar que la única combinación no oxigenada conocida en que el uranio se comporta como hexavalente es el hexafluoruro; compuesto que ha tenido una importancia trascendental en los trabajos relativos al proyecto de la bomba atómica (22).

El grupo más importante de las combinaciones del uranio lo forman los uranatos y compuestos de uranio, comportándose en ellas el uranio como hexavalente; mientras que en sus combinaciones binarias (exceptuando el hexafluoruro) el uranio se manifiesta como tetravalente.

En otro trabajo, hemos hecho notar con detalle, que las fórmulas de constitución de los óxidos, uranatos y los compuestos de uranio podrían estructurarse de modo que el uranio apareciera en ellas como tetravalente.

Si se admite que la tetravalencia sea predominante en el uranio, ofrecería entonces dicho elemento una similitud mayor con el torio, cuerpo simple que le acompaña en la serie de los actínidos.

El ilinio y el neptunio forman otro par de elementos homólogos en las series que se están considerando. El ilinio es un elemento muy poco conocido al que se atribuye valencia 3; mientras que el neptunio a pesar de haber sido descubierto en los últimos años, ha sido objeto de minuciosos estudios por parte de los investigadores que han participado en el proyecto de la bomba atómica. El neptunio es triteta, penta y hexavalente; siendo predominantes sus valencias inferiores (23).

El samario, que sería el homólogo del plutonio en la serie de las tierras raras, se comporta como trivalente, siendo el plutonio triteta, penta y hexavalente.

Las investigaciones realizadas con motivo del proyecto de la bomba atómica, han permitido un estudio a fondo de las propiedades químicas del plutonio, demostrando que este elemento tiene una tendencia a formar combinaciones trivalentes, mucho mayor que el uranio y neptunio (23). La trivalencia predominante en el plutonio, pondría de manifiesto su similitud con el samario.

Tanto el samario como el ilinio son mucho menos conocidos que el plutonio y neptunio, cuya química ha avanzado prodigiosamente en los últimos años.

A fines de 1944 y comienzos de 1945, Seaborg, James y Morgan (24) descubrieron el cuarto elemento transuraniano, el americio

Am, irradiando el uranio con heliones de gran energía. Se produce

241

en primer término el plutonio ^{241}Pu , que luego se desintegra con emisión de rayos β , transformándose en americio.

94

Seaborg propuso para este elemento el nombre de americio, por analogía con el nombre de su elemento homólogo en la serie de las tierras raras, el europio.

241

El isótopo ^{241}Am del americio tiene una vida media de 500 años y se desintegra con emisión de partículas α .

95

B. B. Cunningham, del Laboratorio Metaúrgico de Chicago, ha aislado recientemente el americio bajo la forma de un compuesto puro, en el que ha sido posible estudiar sus propiedades químicas, poniéndose de manifiesto su trivalencia en las soluciones acuosas.

La trivalencia predominante en el americio, pone de manifiesto su similitud con el europio, que es tri y bivalente; así como su semejanza química con los elementos de la serie de los actínidos.

El estudio de la génesis y desintegración del americio, han puesto de manifiesto que constituyen etapas intermedias del siguiente proceso de desintegración radioactiva:

241

P

94

La
Estado
Ghiors
mers,
miento
para l

L

forma

233

U-

92

Seab

Hon

eue

hon

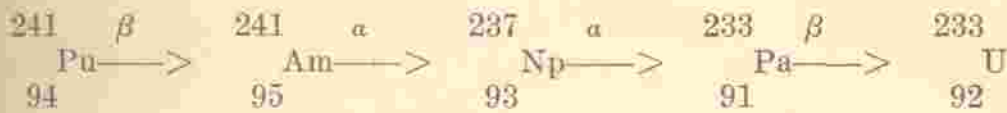
vest

ame

lne

242

96

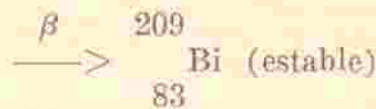
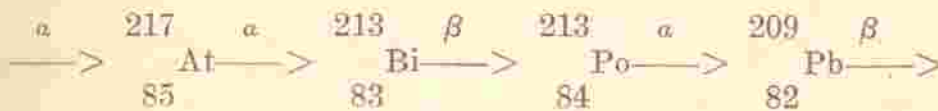
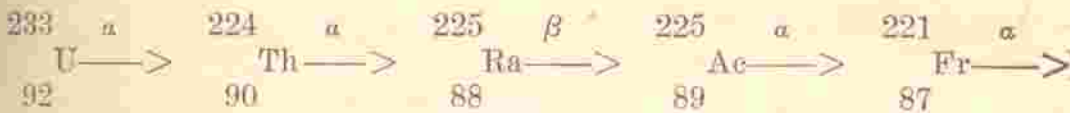


Las investigaciones simultáneas realizadas sobre este proceso en Estados Unidos y Canadá, condujeron a Hagemann, Katzin, Studier, Ghiorso y Seaborg (23), por un lado; y a English, Cranshaw, Demers, Harvey, Hincks, Jelley y May (25), por otro, al descubrimiento de una nueva serie de elementos radioactivos, la serie (4n + 1), para la que se ha propuesto el nombre de "serie del neptunio".

233

La desintegración del uranio U se prosigue en la siguiente

forma:



El curio fué el tercer elemento transuraniano descubierto.

242

El primer isótopo del curio Cm , fué descubierto en 1944 por

96

239

Seaborg, James y Ghiorso (23), irradiando el plutonio Pu con he-

94

liones de gran energía.

Seaborg propuso para este elemento el nombre de curio, en recuerdo de Pierre y de Marie Curie, en forma semejante a como su homólogo, el gadolínico, recuerda la memoria de Gadolin, el gran investigador de las tierras raras.

Se ha obtenido también este isótopo del curio, irradiando al

241

242

americio Am con neutrones. Se forma así el americio Am , que

95

95

luego se desintegra con emisión de rayos β , transformándose en curio

242

Cu .

96

240

Se conoce también el isótopo ^{96}Cu , obtenido irradiando al pl

239

tonio ^{94}Pu , con heliones de 44 Mev de energía.

94

El curio es el único de los elementos transuránicos conocido que todavía no ha sido aislado al estado puro.

Las investigaciones realizadas sobre las propiedades químicas del curio, por el método de las trazas, parecen conducir a la conclusión de que en medio acuoso se comportaría exclusivamente como trivalente.

En las reacciones de precipitación, el curio es arrastrado cuantitativamente por los fluoruros de las tierras raras, siendo muy difícil separarlo de éstos (23).

Desde el punto de vista de la valencia, habría por lo tanto una similitud estrecha entre el curio y el gadolínico, así como entre el curio y los elementos que le acompañan en la serie de los actínidos, en los que predominan la tri y la tetravalencia.

El estudio comparativo de las propiedades químicas de los elementos homólogos de la serie de las tierras raras y de los actínidos, pone de manifiesto una similitud bastante marcada; siendo posible que algunas de las diferencias que se observan actualmente, como en el caso del protoactinio, se aclaren en el futuro con un conocimiento más a fondo del comportamiento químico de algunos elementos.

Es interesante hacer notar que la similitud observada, ha sido suficientemente notable como para sugerir a Seaborg la idea de denominar al americio y al curio, en forma de destacar la homología existente entre estas dos series de elementos.

LAS ANOMALÍAS DE LA PARTE FINAL DEL CUADRO PERIÓDICO

La estrecha coincidencia entre las deducciones teóricas y los resultados experimentales, viene a confirmar la existencia de la segunda pléyada de "tierras raras", que obligará a corregir la ubicación de los elementos que siguen al actinio en el Cuadro Periódico.

Dicha corrección eliminará las anomalías que se observan en las relaciones entre las masas atómicas de los elementos situados en la parte final del Cuadro (7) y que se deben a la errónea ubicación que hasta ahora se ha dado al torio, protoactinio, uranio, etc.

Si se comparan los valores correspondientes a las masas atómicas de los elementos de determinado grupo del Cuadro Periódico, se observa una regla general; la masa atómica de un elemento intermedio es menor que el promedio de las masas atómicas de los elementos vecinos.

Así, por ejemplo, se tiene:

$$A(\text{Cl}) = 35.457 < \frac{A(\text{F}) + A(\text{Br})}{2} = \frac{19.00 + 79.916}{2} = 49.458$$

$$A(\text{Ba}) = 137.36 < \frac{A(\text{Sr}) + A(\text{Ra})}{2} = \frac{87.63 + 226.05}{2} = 156.84$$

$$A(\text{Zr}) = 91.22 < \frac{A(\text{Ti}) + A(\text{Hf})}{2} = \frac{47.90 + 178.6}{2} = 113.25$$

Las únicas excepciones a esta regla se presentan con las masas atómicas del hafnio, tántalo y tungsteno:

$$A(\text{Hf}) = 178.6 > \frac{A(\text{Zr}) + A(\text{Th})}{2} = \frac{91.22 + 232.12}{2} = 161.67$$

$$A(\text{Ta}) = 180.88 > \frac{A(\text{Cb}) + A(\text{Pa})}{2} = \frac{92.91 + 231}{2} = 161.99$$

$$A(\text{W}) = 183.92 > \frac{A(\text{Mo}) + A(\text{U})}{2} = \frac{95.95 + 238.07}{2} = 167.01$$

Estas tres únicas excepciones a regla de carácter tan general, se deberían a la ubicación inexacta del torio, del protoactinio, y del uranio, en los subgrupos (a) de los grupos IV, V y VI.

Es interesante hacer notar que si se admite para la masa atómica del actinio el valor 229, la masa atómica del lantano cumple con la regla anteriormente anunciada:

$$A(\text{La}) = 138.92 < \frac{A(\text{Y}) + A(\text{Ac})}{2} = \frac{88.92 + 229}{2} = 158.96$$

lo que justifica la posición correcta del radioelemento últimamente citado.

Conclusiones.

Teniendo en cuenta que las consideraciones teóricas y los resultados experimentales, coinciden exactamente en lo que respecta a la existencia en el lugar del actinio de una nueva serie de elementos, en la que se encontrarían comprendidos el torio, protoactinio, uranio, etc.,

resulta evidente la necesidad de modificar la parte final del Cuadro Periódico, trasladando estos elementos al lugar del actinio.

Esta modificación del Cuadro Periódico, eliminará las anomalías que se observan en las relaciones entre las masas atómicas de los elementos situados en la parte final del Cuadro; anomalías, que se deben a la inexacta ubicación del torio, protoactinio y uranio.

Bibliografía

- (1) J. Perrin. — Grains de Matière et de Lumière. Hermann et Cie., París (1935).
- (2) G. E. Villar. — Bol. Fac. Ingeniería Montevideo, 5, 233, (1938).
- (3) G. E. Villar. — Bol. Fac. Ingeniería Montevideo, 6, 339, (1938).
- (4) G. E. Villar. — An. As. Quím. Argentina, 26, 126, (1938).
- (5) G. E. Villar. — Ann. Acad. Brasil. Sci., 12, 51, (1940).
- (6) G. E. Villar. — J. Chem. Education, 19, 286, (1942).
- (7) G. E. Villar. — J. Chem. Education, 19, 329, (1942).
- (8) G. E. Villar. — Bol. Fac. Ingeniería Montevideo, II, 3, 191, (1942).
- (9) G. E. Villar. — An. As. Quím. Argentina, 31, 213, (1942).
- (10) G. E. Villar. — Bol. Fac. Ingeniería Montevideo, II, 7, 721, (1944).
- (11) G. E. Villar. — Chemical Abstracts, 2003 — 4, (1939).
- (12) G. E. Villar. — Chemical Abstracts, 3550 — 2, (1940).
- (13) G. E. Villar. — Chemical Abstracts, 5067 — 2, (1942).
- (14) G. E. Villar. — Chemical Abstracts, 5397 — 2, (1942).
- (15) G. E. Villar. — Chemical Abstracts, 5291 — 3, (1943).
- (16) G. E. Villar. — Chemical Abstracts, 2016 — 7, (1945).
- (17) McMillan y Abelson. — Phys. Rev. 57, 1185, (1940).
- (18) G. Mayer. — Phys. Rev. 60, 184, (1941).
- (19) G. T. Seaborg. — Chem. Eng. News, 23, 2190, (1945).
- (20) E. H. Riesenfeld. — Tratado de Química — Manuel Marín, Barcelona, (1942).
- (21) J. de Ment y H. C. Dake. — Uranium and Atomic Power — Chemical Pub. Co. Inc. Broocklyn, N. Y., (1941).
- (22) P. C. Keith. — Chem. and Met. Engineering, 112, febrero, (1946).
- (23) G. T. Seaborg. — Chem. Eng. News. 25, 358, (1947).
- (24) F. Hageman, L. I. Katzin, M. H. Studier, A. Ghiorso y G. T. Seaborg. — Phys. Rev. 72, 252, (1947).
- (25) A. C. English, T. N. Cranshaw, P. Derrers, J. A. Harvey, E. P. Hincks, J. V. Jelley y A. N. May. — Phys. Rev. 72, 253, (1947).