

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
Facultad de Química

**"ESTUDIO DE LAS TRANSFORMACIONES NUCLEARES
EN RADIOISOTOPOS DEL SELENIO"**

276

T E S I S

Que para obtener el título de

Q U I M I C O

p r e s e n t a

BEATRIZ EUGENIA LOPEZ MUÑOZ

México, D. F.

1976



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CLAS STOSI
ABQ 1970
PCMA 1970
PRGC 14

271



UNM

PRESIDENTE LUIS GALVEZ CRUZ.

V O C A L MANUEL NAVARRETE TEJERO.

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE. SECRETARIO GUILLERMINA BURILLO AMEZCUA.

1er. SUPLENTE JUAN LARTIGUE GORDILLO.

2o. SUPLENTE RUBEN ORTEGA CARMONA.

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA: CENTRO NUCLEAR DE MEXICO. SALAZAR, EDO.

DE MEXICO.

NOMBRE DEL SUSTENTANTE: BEATRIZ EUGENIA LOPEZ MUÑOZ.

NOMBRE DEL ASESOR DEL TEMA: GUILLERMINA BURILLO AMEZCUA.

NOMBRE DEL SUPERVISOR TECNICO: SILVIA BULBULIAN GARABEDIAN.

AGRADEZCO AL INSTITUTO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
LA AYUDA ECONOMICA PROPORCIONADA PARA LA REALIZA _
CION E IMPRESION DE ESTE TRABAJO QUE SE DESARROLLO
EN LA SECCION DE QUIMICA NUCLEAR, NORMAS RADIAC _
TIVAS Y ANALISIS POR ACTIVACION DEL CENTRO NUCLEAR -
DE SALAZAR, EDO. DE MEXICO.

CON AMOR A MIS PADRES

AMADOR LOPEZ ZARATE.

ELISA MUÑOZ DE LOPEZ.

AGRADECIENDO PROFUNDAMENTE
EL CARINO, AYUDA Y COMPREN
SION QUE SIEMPRE ME HAN -
BRINDADO.

A MIS QUERIDOS HERMANOS

ELISA

MANUEL ANGEL

LETTY

PATTY

CON PROFUNDO CARÍÑO, ADMIRACION Y
RESPECTO A SILVIA BULBULIAN AGRA _
DECIENDO SU VALIOSA ASESORIA PARA
LA ELABORACION DE ESTE TRABAJO.

AL PERSONAL DE QUIMICA NUCLEAR.

AL PERSONAL DEL REACTOR.

A S.J.T.

INDICE.

	INTRODUCCION.....	1-2
CAPITULO I.	CONCEPTOS Y TERMINOS EMPLEADOS.....	3-10
CAPITULO II.	PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL SELENIO.....	11-13
CAPITULO III.	PROPIEDADES NUCLEARES DEL SELENIO.....	14-15
CAPITULO IV.	ADSORCION.....	16-17
CAPITULO V.	EFECTOS QUIMICOS DEL DECAIMIENTO BETA.....	18-20
CAPITULO VI.	EFECTOS QUIMICOS DE LAS REACCIONES (n, γ).....	21-22
CAPITULO VII.	EFECTOS QUIMICOS DE LA TRANSICION ISOMERICA.....	23-24
CAPITULO VIII.	DETECCION Y ANALISIS DE LA RADIACION GAMMA.....	25-28
CAPITULO IX.	PARTE EXPERIMENTAL.	
	A) SEPARACION DE ^{81b}Se Y ^{81m}Se , POR ADSORCION EN CARBON ACTIVADO.....	29
	B) PREPARACION DE LOS CRISTALES DE SELENATO - DE POTASIO MARCADOS CON SELENIO RADIACI VO.....	29-33
	C) DETERMINACION DE LA RADIATIVIDAD DE LAS - MUESTRAS.....	34
	D) CALCULOS.....	34
CAPITULO X.	RESULTADOS.....	36-39
	BIBLIOGRAFIA.....	47-49

APENDICE.

TABLAS.

I. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL SELENIO.....	40
II. PROPIEDADES NUCLEARES DEL SELENIO.....	41
III. REACCIONES DE FORMACION DE RADIOISOTOPOS DEL SELENIO.....	42

ESQUEMAS.

I. ESQUEMA DE DECAIMIENTO DEL ^{75}Se	43
II. ESQUEMA DE DECAIMIENTO DEL ^{79}Se	44
III. ESQUEMA DE DECAIMIENTO DEL $^{81\text{m}}\text{Se}$	45
IV. ESQUEMA DE DECAIMIENTO DEL $^{83\text{m}}\text{Se}$	46

INTRODUCCION.

Los primeros estudios sobre los efectos químicos originados por procesos nucleares, fueron realizados por Szilard y Chalmers en 1934, bombardearon yoduro de etilo ($C_2H_5 - ^{127}I$) con neutrones y observaron que, una gran parte del ^{128}I formado por la captura de un neutrón por el ^{127}I del yoduro de etilo, se encontraba en forma de yodo libre; esto muestra que la captura del neutrón por un átomo de yodo, provoca un cambio químico de la molécula de yoduro de etilo. Otros procesos como el decaimiento por emisión de una partícula beta y la transición isomérica, producen también cambios químicos en las moléculas de los átomos afectados.

Los efectos químicos que produce el decaimiento beta, han sido ampliamente estudiados en el radioisótopo ^{83}Se por Edwards y colaboradores¹, -- Appelman² y muy recientemente por D. Tenorio y colaboradores³. El ^{83}Se -- por emisión de partículas beta decae a ^{83}Br . Estos últimos autores analizaron químicamente las formas producidas por este decaimiento radiactivo y midieron el bromo en forma de iones bromuro, bromato y perbromato.

Los efectos químicos producidos por la captura de neutrones térmicos -- han sido ampliamente estudiados en sales formados por iones selenitos y selenatos, debido a la considerable sección transversal de activación de los isótopos del selenio, como en el caso del ^{75}Se , cuya sección transversal de activación es de 0.26b.

En el presente trabajo se hace la recopilación de los efectos químicos producidos por las transformaciones nucleares, como son efectos químicos del decaimiento beta y efectos químicos de la reacción (n, γ) en los radioisótopos del selenio; como caso particular se estudia experimentalmen

te el efecto químico de la transición isomérica del $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$ en cristales de selenato de potasio marcados con selenio radiactivo y se aplica el método de adsorción en carbón activado para la separación analítica de las trazas del isómero nuclear tetravalente ($^{81b}\text{Se}^{\text{IV}}$) de una fracción que contiene la mezcla de radioisótopos del selenio.

C A P I T U L O I .

CONCEPTOS Y TÉRMINOS EMPLEADOS.

ISÓTOPOS .- Núclidos que con el mismo número atómico difieren en su número de masa, esto se debe a que en el núcleo de estos átomos, un mismo número de protones se encuentra combinado con un número diferente de neutrones.

ISOMEROS .- Núclidos que teniendo el mismo número atómico y la misma masa atómica, difieren en el estado de excitación, lo que trae como consecuencia una diferencia en sus propiedades radiactivas, como son el tiempo y el espectro de decaimiento radiactivo. En el caso del presente trabajo se estudia particularmente el $^{81}_{34}\text{Se}$, que posee dos especies radiactivas, cuyas vidas medias son de 13.6 minutos para el ^{81b}Se y 56.8 minutos para el ^{81m}Se . Se acostumbra representar el estado metaestable, colocando la letra minúscula "m", precedida de la masa atómica del núclido en la esquina superior del símbolo y la letra minúscula "b" para el estado base.

VIDA MEDIA .- Cada elemento radiactivo tiene una vida media característica, diferente a la de otros radioisótopos y se define como el tiempo que tardan en decaer la mitad de los núcleos excitados y se representa de la siguiente forma $T^{1/2}$.

TIPOS DE REACCIONES .- La disminución de la actividad de los elementos radiactivos se debe a la inestabilidad de los núcleos, lo que origina su desintegración, mediante la emisión de diversas partículas o radiaciones, como son las partículas alfa (α) que son núcleos de helio, las partículas beta (β), que son electrones de origen nuclear, los rayos gamma (γ)

son radiaciones electromagnéticas de origen nuclear y los rayos "X" que -
son también radiaciones electromagnéticas de origen extranuclear.

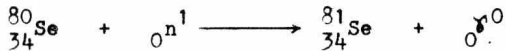
UNIDADES DE RADIATIVIDAD .- Las unidades más empleadas en la medición de
la actividad son el Curie (Ci) y sus submúltiplos: el milicurie (mCi) y -
el microcurie (μ Ci).

El Curie se define como la unidad de radiactividad y es igual a 3.7×10^{10}
desintegraciones por segundo (dps).

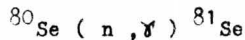
UNIDADES DE ENERGIA .- Las unidades de energía son el Electrón-volt (ev),
y sus múltiplos, como son el Kiloelectrón-volt representado como (Kev) y
el megaelectrón-volt (Mev), que son las unidades empleadas en el presente
trabajo.

El electrón-volt se define como la energía equivalente que adquiere un
electrón al pasar a través de una diferencia de potencial de 1 volt.

REACCIONES NUCLEARES .- Una reacción nuclear es un proceso en el que un -
núcleo reacciona con otro núcleo, partícula elemental o fotón para produ-
cir otro núcleo y posiblemente otra partícula. Ejemplo:



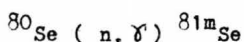
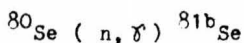
Esta reacción se acostumbra representar de la siguiente manera:



Son importantes las reacciones nucleares en las que un núcleo reaccio_

na tanto con partículas ligeras, como con neutrones, protones, deuterones etc, los productos de estas reacciones en ocasiones son núcleos de especies distintas.

De las reacciones con partículas elementales, la captura de neutrones por núcleos es mucho más probable que la de las partículas cargadas, debido a que los neutrones no tienen carga, por lo que penetran fácilmente al núcleo. Los neutrones lentos, son particularmente eficaces e inducen la reacción (n, γ) que produce un isótopo del elemento irradiado y deja al núcleo en estado excitado que después se elimina en forma de radiación electromagnética. Como ejemplo de la reacción (n, γ) se puede citar la que se realiza con el isótopo de peso atómico 80 del selenio, que produce el isómero nuclear 81 en estado base y en estado metaestable, pudiéndose representar en la siguiente forma:



TRANSICION ISOMERICA (TI) .- Proceso mediante el cual un isómero nuclear-metaestable decae a un isómero nuclear de energía de excitación menor.

Este decaimiento se lleva al cabo por medio de emisión gamma.

Un ejemplo de este tipo de proceso lo tenemos en la desexcitación del isómero nuclear metaestable del ${}^{81}\text{Se}$ para pasar al estado base, emitiendo radiación gamma.

DECAIMIENTO RADIATIVO .- Es un proceso en el cual la velocidad de decaimiento es directamente proporcional al número de átomos activos presentes esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$A = \lambda N \quad \text{Donde: } A = \text{Actividad/minuto} \quad (1)$$

N = No. de átomos radiactivos

λ = Constante de desintegración radiactivo

$[\lambda]$ = No. desintegraciones/unidad de tiempo

La constante de desintegración radiactiva, se expresa a menudo de la forma siguiente:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T^{1/2}} = \frac{0.693}{T^{1/2}} \quad (2)$$

La actividad también se puede considerar como la rapidez de cambio del número de núcleos con respecto al tiempo; o sea $-dN/dt$, el signo nos está indicando que N es una función decreciente con respecto al tiempo, por tanto:

$$-dN/dt = \lambda N \quad (3)$$

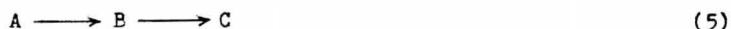
Resolviendo la ecuación nos queda:

$$A = \lambda N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

En donde N_0 es el número de átomos radiactivos cuando $t = 0$. Esta es -

la ley del decaimiento exponencial para la actividad de las sustancias radiactivas. Se puede aplicar para cualquier núcleo radiactivo, variando en cada caso la constante de desintegración, la cual es específica para cada sustancia.

CRECIMIENTO RADIATIVO .- En muchos casos un núcleo radiactivo es el resultado del decaimiento de otro. Para la reacción:



B es una sustancia radiactiva que se forma a una velocidad constante P a partir del núcleo de A, la velocidad de acumulación de la sustancia B esta dada por:

$$dN_B / dt = P - \lambda_B N_B \quad (6)$$

Donde λ es la constante de desintegración de los núcleos B, y N_B es el número de átomos formados en un tiempo t, N puede ser evaluado resolviendo la ecuación (6).

$$N_B = \frac{P}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B t}) + (N_B)_0 e^{-\lambda_B t} \quad (7)$$

Donde $(N_B)_0$ es el número inicial de átomos presentes cuando $t = 0$.

En el caso de que no haya átomos presentes, la ecuación (7) queda simplificada de la siguiente manera:

$$N_B = \frac{P}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (8)$$

Si la sustancia B es producida por el decaimiento radiactivo de la sustancia A, a una velocidad P que es igual a $\lambda_A N_A$ o $\lambda_A (N_A)_0 e^{-\lambda_A t}$, la ecuación (6) puede ser reemplazada por:

$$dN/dt = \lambda_A (N_A)_0 e^{-\lambda_A t} - \lambda_B N_B \quad (9)$$

la solución de esta ecuación es :

$$N_B = \frac{\lambda_A (N_A)_0}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + (N_B)_0 e^{-\lambda_B t} \quad (10)$$

Cuando $\lambda_A \ll \lambda_B$ y después de un tiempo muy largo, la expresión anterior se puede simplificar de la siguiente manera:

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B \quad (11)$$

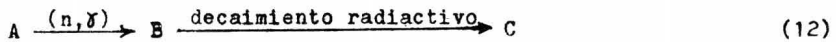
Este caso límite se conoce como equilibrio secular, también puede suceder que $\lambda_A < \lambda_B$ y entonces se presenta el caso de equilibrio transitorio o transiente.

DIFERENCIA ENTRE UNA REACCION QUIMICA Y UNA REACCION NUCLEAR .-

1. En una reacción química intervienen las cargas, mientras que en una reacción nuclear intervienen los núcleos.
2. En una reacción química intervienen energías del orden de calorías y en una reacción nuclear interviene energía de millones de electron-volt (Mev).

PRODUCCION DE RADIOISOTOPOS .- Los isótopos radiactivos pueden ser producidos por las reacciones nucleares (n, γ) antes mencionadas, que se llevan al cabo sometiendo un blanco a un flujo de neutrones térmicos.

Consideremos que un isótopo A de un elemento forma, por reacción (n, γ) un radioisótopo B, el cual decae a un isótopo C como se indica en el siguiente esquema:



Aplicando la ecuación (8) se puede observar que el número de partículas N_B obtenidas por la reacción (n, γ) está dado por la expresión (12), si se reemplaza P por $N_A \phi \sigma$, queda :

$$N_B = \frac{\sigma N_A \phi}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (13)$$

Donde N = No. de átomos del material

σ = sección transversal eficaz para la captura de neutrones por-

el núcleo del átomo.

\dot{Q} = flujo de neutrones en el blanco A.

SECCION TRANSVERSAL DE ACTIVACION .- En cualquier interacción entre el núcleo y otra partícula incidente, frecuentemente es necesario evaluar una "sección transversal" (σ) para ese proceso, σ es la medida de la probabilidad de que suceda el proceso que nos interesa.

Se sabe que el valor de σ se localiza entre los límites de 10^{-20} a 10^{-32} cm^2 y se considera, como la probabilidad de una reacción nuclear entre dos partículas dadas. Así una reacción para la cual σ es 10^{-24} cm^2 es cien veces más probable que una para la cual σ es 10^{-26} cm^2 .

La unidad σ ha sido establecida arbitrariamente en 10^{-24} cm^2 y se denomina barn.

RETENCION .- Se denomina retención al porcentaje de material radiactivo en forma del compuesto original.

C A P I T U L O I I I .

PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL SELENIO.

El selenio es un elemento que pertenece al grupo VIA de la tabla periódica, en la naturaleza existe un gran número de isótopos de este elemento distribuidos en la siguiente forma: ^{74}Se 0.87%; ^{76}Se 9.02%; ^{77}Se 7.58%; - ^{78}Se 23.52%; ^{80}Se 49.82% y ^{82}Se 9.19%. Este elemento fue aislado por primera vez por J.J. Berzelius en 1817. Su peso atómico dado por la Tabla Internacional de Pesos Atómicos es de 78.96 uam. Su número atómico es de 34 y su configuración en el estado base es $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3d^{10} 4s^2 4p^4$, como se puede apreciar, la estructura atómica del selenio se aproxima a la configuración del gas inerte que le sigue, y en consecuencia sus propiedades químicas son no metálicas, pero su posición en la tabla periódica le hace tener tendencia a carácter metálico.

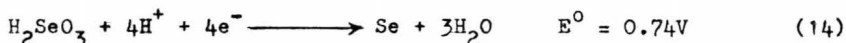
El selenio es un elemento bastante raro y se recupera como subproducto de los minerales del azufre.

E s t a d o N a t u r a l . -

El selenio forma el $10^{-8}\%$ de las rocas ígneas de la tierra. Se presenta en estado nativo en Japón, México, Estados Unidos de Norteamérica, y en forma de seleniuro en Argentina, Alemania, Japón, Chile y Honduras. Los minerales más importantes son la Berzelianita, Cu_2Se , Tiemanita, HgSe y Nauminita, Ag_2Se . Otros minerales son la Crookesita $(\text{Cu}, \text{Tl}, \text{Ag})_2\text{Se}$; la Eucarita $(\text{Ag}, \text{Cu})_2\text{Se}$ y la Zorgita, en el seleniuro doble de cobre y plomo que contiene hierro y plata en pequeñas cantidades. Su forma estable a temperaturas ordinarias es de aspecto metálico y de color gris. El sele _

no puede formar compuestos con estado de oxidación de -2 (seleniuros), - +4 (selenitos) y +6 (selenatos).

Los compuestos de selenio que se utilizaron en el presente trabajo fue ron: dióxido de selenio (SeO_2) y selenato de potasio (K_2SeO_4). El dióxido de selenio es un compuesto blanco brillante, soluble en agua para formar- soluciones que contienen ácido selenioso, el cual es fácilmente reducido- a selenio:



En la tabla I se observan los estados de oxidación del selenio y se -- comparan con los elementos de su familia, punto de fusión dado en $^{\circ}\text{C}$ y -- punto de ebullición en $^{\circ}\text{C}$.

Una de las propiedades más importantes del Se^{IV} que se aprovechó para- lograr la separación analítica del isómero nuclear tetravalente, producto de la transición isomérica del isómero nuclear hexavalente, fue la de su capacidad de ser reducido a selenio metálico (Se^0) por la adición de áci- do ascórbico, mientras que el Se^{VI} no se reduce con este reductor como se muestra en la figura (1). Aprovechando esta propiedad del isómero nuclear tetravalente, así como la capacidad del carbón activado de adsorber prefe- rentemente no electrolitos de soluciones, se hizo la separación del Se^{IV} del Se^{VI} .



FIGURA (1). MUESTRA LA CAPACIDAD DEL Se^{IV} DE SER REDUCIDO A Se^{0} CON EL ACIDO ASCORBICO MIENTRAS QUE EL Se^{VI} NO SE REDUCE CON ESTE REDUCTOR.

C A P I T U L O I I I .

PROPIEDADES NUCLEARES DEL SELENIO.

Las propiedades nucleares del selenio, se muestran condensadas en las tablas II y III, los símbolos representan lo siguiente:

TIEMPO	MODOS DE DECAIMIENTO
A (años)	β^- emisión de electrones.
M (meses)	β^+ emisión de positrones.
d (días)	γ rayos gamma.
h (horas)	CE captura electrónica.
s (segundos)	TI transición isomérica.

En la tabla II se muestra la vida media ($T^{1/2}$) de los radioisótopos - del selenio, masa isotópica y el porcentaje de abundancia en la naturaleza. De esta tabla se puede observar que el selenio tiene seis isótopos estables, que son: ^{74}Se , ^{76}Se , ^{77}Se , ^{78}Se , ^{80}Se y ^{82}Se , por lo que al irradiar este elemento en un reactor nuclear con neutrones térmicos se obtiene un gran número de radioisótopos, como son: ^{75}Se , $^{77\text{m}}\text{Se}$, $^{79\text{m}}\text{Se}$, $^{81\text{m}}\text{Se}$ y $^{83\text{m}}\text{Se}$.

En la tabla III se muestran las diferentes reacciones de formación de radioisótopos del selenio por la captura de neutrones, así como su modo de decaimiento.

En el esquema I podemos observar que el ^{75}Se tiene una vida media de 120.4 días y que por captura electrónica decae a $^{75}_{33}\text{As}$ estable.

En el esquema II se muestra el decaimiento radiactivo del ^{79}Se que por emisión de partículas β^- decae a $^{79}_{35}\text{Br}$ estable.

El esquema III muestra el tipo de decaimiento radiactivo del $^{81\text{m}}\text{Se}$ con una vida media de 56.8 minutos, que por transición isomérica decae a $^{81\text{b}}\text{Se}$ con una vida media de 18.6 minutos, el que por emisión de partículas β^- decae a $^{81\text{m}}\text{Br}$ con una vida media de 37.4 segundos y posteriormente por transición isomérica decae a ^{81}Br estable.

En el esquema IV se muestra el decaimiento radiactivo del $^{83\text{m}}\text{Se}$ con una vida media de 70 segundos y del $^{83\text{b}}\text{Se}$ con una vida media de 25 minutos, ambos por emisión de partículas β^- decaen a $^{83}_{35}\text{Br}$ con una vida media de 2.41 horas, el que por emisión de partículas β^- decae a $^{83}_{36}\text{Kr}$ estable.

C A P I T U L O I V .

ADSORCION.

En la superficie de un sólido, las moléculas o iones no tienen satisfecitas todas sus fuerzas de unión con otras partículas, por lo que atraen hacia sí reteniéndolas en su superficie, a las de los gases o a otras -- substancias que se ponen en contacto. Este fenómeno de concentración de -- una substancia sobre la superficie de un sólido o de un líquido se denomina adsorción y la substancia atraída se denomina fase adsorbida, mientras que la substancia sobre cuya superficie tiene lugar la adsorción se denomina adsorbente.

A continuación se menciona con más detalle la adsorción en sólidos ya que es el caso que se empleó en este trabajo para la separación del isótopo nuclear tetravalente del selenio (Se^{IV}), producto de la transición isomérica del $^{81\text{m}}\text{Se}$ de una fracción que contiene la mezcla de radioisótopos del selenio. El adsorbente empleado para este propósito fué el carbón activado.

A d s o r c i ó n d e s o l u t o s e n s ó l i d o s .

El carbón de madera es el adsorbente más ampliamente usado para separar substancias de soluciones. Se emplea en muchos procesos de fabricación para eliminar materias colorantes indeseables. En general la adsorción a partir de una solución es altamente selectiva, ya sea que el solvente o el soluto sean adsorbidos, pero rara vez ambos. Si está presente más de una substancia disuelta, una será probablemente mejor adsorbida.

La cantidad de material adsorbido por un peso determinado de adsorben-

te a una temperatura dada, depende de la concentración de la substancia disuelta.

En el presente trabajo se empleó como adsorbente carbón activado, el que presenta una marcada preferencia de adsorber no electrolitos de soluciones. Aprovechando esta propiedad del carbón activado, así como la capacidad del Se(IV) de ser reducido por la adición de ácido ascórbico a Se⁰, mientras que el Se(VI) no se reduce con este reductor, se separó el selenio tetravalente del hexavalente.

C A P I T U L O V .

EFFECTOS QUIMICOS DEL DECAIMIENTO BETA.

Edwards y colaboradores¹ estudiaron los efectos químicos que produce el decaimiento beta del ^{83}Se en selenato de potasio, este ^{83}Se al emitir una partícula beta decae a ^{83}Br . Analizaron químicamente el bromo radiactivo obtenido en una solución acuosa que contiene iones SeO_3^{--} y SeO_4^{--} marcados con selenio radiactivo. Encontraron que la tercera parte del bromo radiactivo obtenido por el decaimiento del selenio, se encuentra en forma de BrO_3^- y el resto del bromo se encuentra en otras formas reducidas del bromo. En la siguiente expresión se muestra el decaimiento del ^{83}Se .



Encontraron el ^{83}Br en la forma química de bromuro de plata y bromato de plata.

Appelman² también estudió los efectos químicos que produce el decaimiento beta del ^{83}Se , encontró que este decaimiento nuclear produce también un compuesto de bromo desconocido hasta entonces, el ión perbromato el cual separó después de disolver los cristales en forma de perbromato de rubidio.

D.Tenorio y colaboradores³ cuantificaron la presencia del ión perbromato, encontrando un rendimiento muy alto de este ión (24%), debido probablemente a que el ^{83}Se en el selenato de potasio comparte seis de sus electrones de valencia con los oxígenos que forman su molécula y al de-

caer ^{83}Se a ^{83}Br , aumenta en una unidad su número atómico, por lo que aumenta también sus electrones periféricos en una unidad y es de esperarse que este electrón periférico adicional lo comparta con los oxígenos ya -- presentes en la molécula formando perbromato. La presencia de los iones -- bromato y bromuro indica que la excitación electrónica producida por el -- decaimiento beta es capaz de producir las reducciones en la valencia del -- bromo como se encuentra experimentalmente en el trabajo.

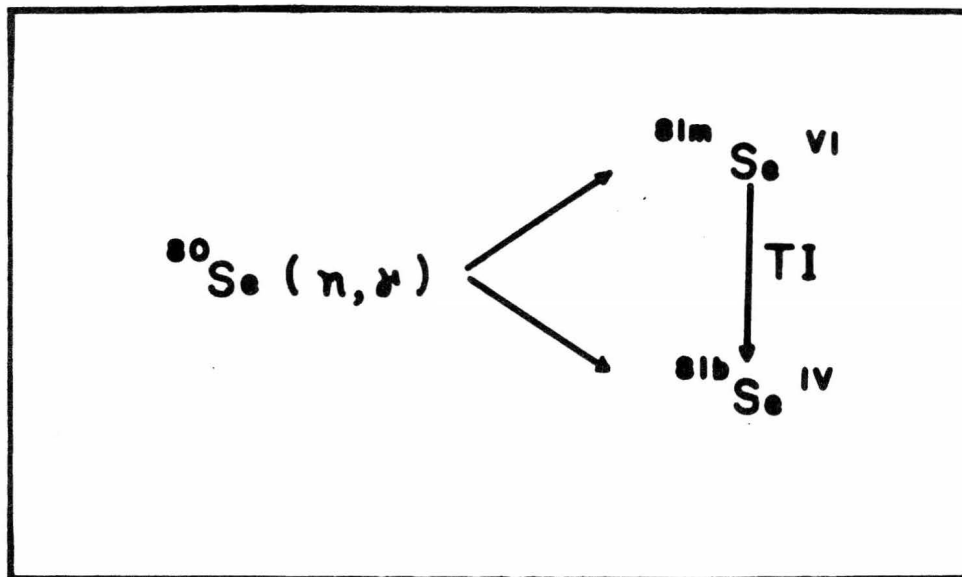


FIGURA (3). MUESTRA LA FORMACION DE LOS ISOMEROS NUCLEARES DEL ^{81}Se Y EL CAMBIO QUIMICO PRODUCIDO POR LA TRANSICION ISOMERICA.

C A P I T U L O V I .

EFECTOS QUÍMICOS DE LAS REACCIONES (n, γ).

Los efectos químicos de la captura de neutrones térmicos han sido ampliamente estudiados en selenatos y selenitos, debido a su considerable sección transversal de activación (σ), como en el caso del ^{75}Se cuya sección transversal de activación es de 0.26b y su vida media es de 120.4 días.

Langsdorf y Segre⁴ midieron la separación isotópica después de la transición isomérica del $^{81\text{m}}\text{Se}$ del ácido selénico en ácido clorhídrico. El estado base isomérico fué separado después de añadir un selenito portador y reduciendo el selenio a selenio elemental con ácido sulfuroso.

Apers y colaboradores⁵ realizaron experimentos irradiando muestras de dióxido de selenio en estado sólido y en soluciones acuosas, indican un comportamiento químico diferente de los dos isómeros $^{81\text{m}}\text{Se}$ y $^{81\text{b}}\text{Se}$, como una función del estado físico de las muestras irradiadas y la energía del neutrón. La diferencia se mostró en las variaciones de actividad de los dos isómeros en el filtrado y en el residuo. Determinan la vida media de los dos isómeros y dan 13.6 ± 0.1 minutos para el $^{81\text{b}}\text{Se}$ y 62.0 ± 1.0 minutos para el $^{81\text{m}}\text{Se}$.

Cogneau y colaboradores⁶ estudiaron las formas químicas del ^{75}Se generadas por la irradiación con neutrones en cristales de selenato de potasio. Detectaron solamente Se^{IV} (68%) y Se^{VI} (32%) en las muestras irradiadas. Compararon los resultados de selenato de potasio y sodio con observaciones hechas en otros sistemas. Los núcleos del ^{74}Se , ^{80}Se y ^{82}Se , condu

cen respectivamente a ^{75}Se , $^{81\text{m}}\text{Se}$, $^{81\text{b}}\text{Se}$ y $^{83\text{b}}\text{Se}$. Estudiaron las consecuencias químicas de la captura de neutrones térmicos por el ^{74}Se en selenato de sodio y potasio. Observaron una retención inicial mínima de 32% en cristales de selenato de potasio.

Constantinescu y colaboradores⁷ estudiaron los efectos de la captura de neutrones en selenatos de sodio hidratados y en selenatos de amonio.

Al-Siddique y colaboradores⁸ estudiaron los efectos químicos de la reacción (n, γ) en selenatos de sodio hidratados y anhídros.

C A P I T U L O V I I .

EFFECTOS QUIMICOS DE LA TRANSICION ISOMERICA.

Los efectos químicos de la transición isomérica del $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$ en cristales de selenato de potasio, se detectan como un cambio químico de la forma hexavalente del selenio (Se^{VI}) a la forma tetravalente (Se^{IV}). En la figura (2) se muestra la formación de estos isómeros nucleares y el cambio químico que sufre la molécula marcada con ^{81m}Se debido a la transición isomérica. El selenio tetravalente contiene principalmente al isómero nuclear en el estado base.

En el presente trabajo se expone una técnica que permite la separación analítica de las trazas del $^{81b}\text{Se}^{\text{IV}}$ de una fracción que contiene la mezcla de radioisótopos, como resultado de irradiar muestras de selenio natural; de ello se hablará detalladamente más adelante. A continuación se citan los trabajos realizados sobre los efectos químicos de la transición isomérica, así como la referencia del método de adsorción en carbón activado¹⁰.

Los efectos químicos que ocurren en la reducción del Se^{VI} a Se^{IV} fueron observados después de la transición isomérica del $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$ en ácido selenioso, por Langsdorf y Segre⁴ en 1940. La interpretación de este cambio fue primero sugerida por Segre y colaboradores en 1939. Ellos partieron del principio de que el cambio químico que ocurre es una consecuencia del alto estado de excitación electrónica, el cual resulta de una vacancia en la capa K o en la capa L, por la emisión de un electrón. No se observan cambios químicos cuando la transición isomérica no está convertida inter-

namente. El coeficiente de conversión interna del $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$ es bastante alto para la radiación gamma de 103 Kev ($\alpha_K = 7.1 \pm 0.3$) y ($\alpha_L = 1.6 \pm 0.3$) y es de esperarse un efecto químico grande como consecuencia de la transición isomérica.

M. Fernández y S. Bulbulian⁹ muy recientemente estudiaron las consecuencias químicas de la transición isomérica del $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$ en selenato de potasio y propusieron un método para obtener $^{81b}\text{Se}^{\text{IV}}$ radioquímicamente puro. Se basaron en la reducción que sufre el isómero nuclear hexavalente a la forma tetravalente, como resultado de la transición isomérica $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}} \rightarrow ^{81b}\text{Se}^{\text{IV}}$ en soluciones de selenato de potasio. El método de separación empleado fué el de extracción por solventes. Encontraron que la retención del $^{81b}\text{Se}^{\text{IV}}$ de selenato de potasio en solución buffer es menor que el 25% y tienen fluctuaciones en sus resultados de $\pm 10\%$.

C A P I T U L O V I I I .

DETECCION Y ANALISIS DE LA RADIACION GAMMA.

Todos los métodos de detección de partículas cargadas o radiaciones - electromagnéticas, se basan en sus interacciones con la materia. En los - estudios de los efectos químicos de las transformaciones nucleares de los radioisótopos del selenio, las técnicas de medición se basan en la detec_ ción de la radiación gamma que emiten estos radioisótopos, ya que por te_ ner una mezcla de ellos solamente esta técnica permite distinguir unos de otros.

Las interacciones de la radiación gamma con la materia según sea su -- energía ocurren principalmente en tres formas:

1. Efecto Fotoeléctrico .- En este caso la radiación gamma incidente - cede toda su energía al electrón orbital. Este efecto predomina a - bajas energías y en materiales de número atómico (Z) alto.
2. Efecto Compton .- La energía del fotón gamma es compartida con un - electrón resultando una radiación gamma de menor energía, cuya di _ rección es diferente a la primera. Este rayo gamma secundario puede sufrir otro proceso Compton y así sucesivamente hasta perder tanta- energía como para ser absorbido en un proceso fotoeléctrico. El --- efecto Compton predomina a energías medianas.
3. Producción de pares .- Si el fotón gamma tiene suficiente energía y se halla cerca del núcleo, puede crear un par positrón-electrón. El exceso de energía es comunicado en forma de energía cinética al par

positrón-electrón. La producción de pares predomina a altas energías y en absorbentes de Z elevados; por lo cual según sea el efecto de la interacción de la radiación con la materia, dependerá el tipo de detector a usar; en este caso se usó un detector semiconductor de Ge-Li, el cual ha de manejarse con sumo cuidado, ya que es necesario mantenerlo a la temperatura del nitrógeno líquido. El detector se encuentra conectado a dos electrodos, los cuales colectan los pulsos provenientes de la interacción de la radiación con el detector; estos pulsos necesitan de una inmediata amplificación, para hacerlos adecuados a su medición. Dichos pulsos se llevan a un analizador multicanal, el cual posee discriminadores cuya función es analizar la altura de los pulsos mediante niveles de disparo diferentes y variables a conveniencia del usuario.

La información proveniente del analizador multicanal se traduce como un espectro de energías, el cual se forma debido a los pulsos que cada canal haya acumulado; la energía de la radiación gamma se miden en Kev o en Mev.

En la figura (3) se muestra el espectro de radiación electromagnética de una fracción que contiene la mezcla de radioisótopos del selenio, en ella se pueden distinguir claramente los picos de energía gamma del ^{81m}Se cuyas energías correspondientes son 103 Kev y 260 Kev; el ^{75}Se cuyos picos de energía aparecen en 121 Kev, 136 Kev y 400 Kev; ^{81b}Se cuyas energías son 276 Kev, 290 Kev, 538 Kev, 552 Kev, 566 Kev, 650 Kev y 828 Kev.

Se aprecian también los picos de energía correspondientes al ^{83}Se que son de 356 Kev, 512 Kev, 720 Kev y 801 Kev.

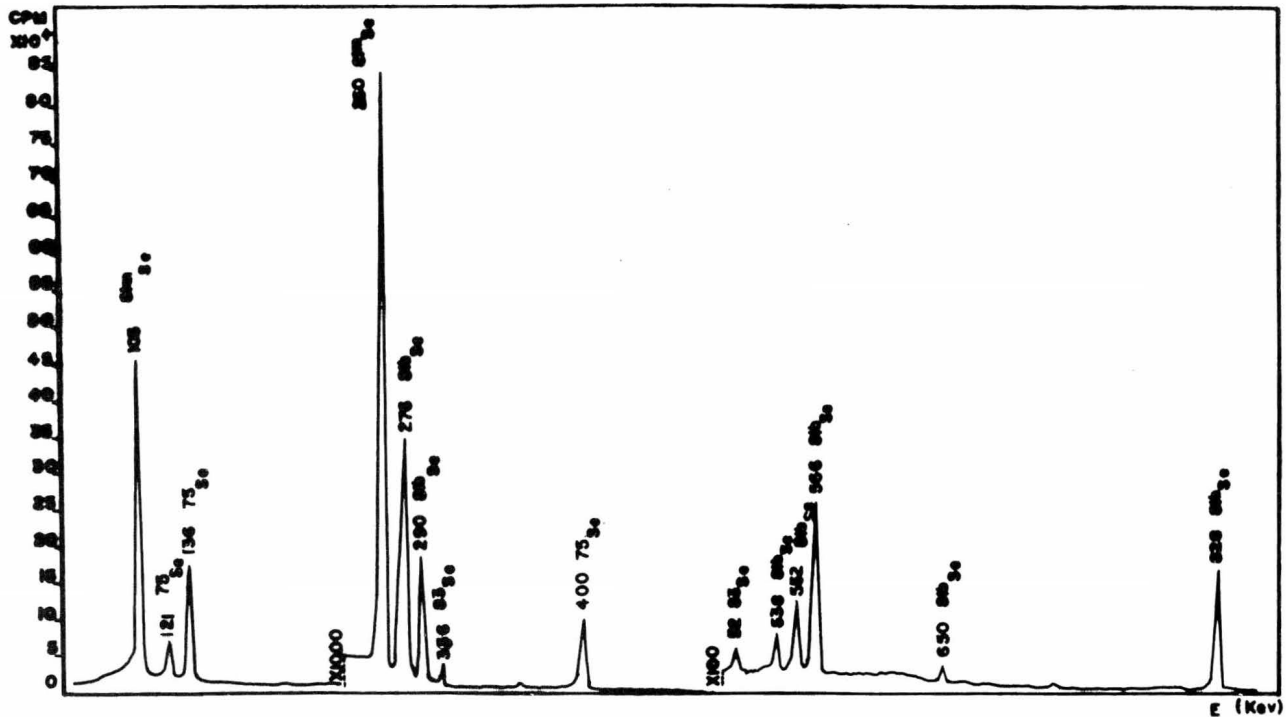


FIGURA (3). ESPECTRO DE RADIACION ELECTROMAGNETICA DE UNA FRACCION QUE CONTIENE LA MEZCLA DE
 VARIOS TIPOS DEL SELENIO.

C A P I T U L O I X .

PARTE EXPERIMENTAL.

A) SEPARACION DEL ^{81b}Se , POR EL METODO DE ADSORCION EN CARBON ACTIVADO.

En esta parte se expone una técnica que permite la separación analítica de las trazas del ^{81b}Se producto de la transición isomérica del ^{81m}Se , de una fracción que contiene la mezcla de radioisótopos del selenio en cristales de selenato de potasio. Este método es el de adsorción en carbón activado y se basa en la preferencia del carbón activado de adsorber no electrolitos de soluciones y la capacidad del $^{81b}\text{Se}^{\text{IV}}$ de ser reducido por el ácido ascórbico a Se^{O} , mientras que el Se^{VI} no se reduce.

B) PREPARACION DE LOS CRISTALES DE SELENATO DE POTASIO, MARCADOS CON SELENIO RADIOACTIVO.

En este inciso se describen los métodos experimentales empleados en la preparación de cristales de selenato de potasio, marcados con selenio radiactivo.

MATERIAL: Muestras de dióxido de selenio se irradiaron en el tubo neumático del Reactor Triga Mark III de Salazar, Edo. de México, durante 30 minutos con un flujo aproximado de 7×10^{12} neutrones/cm²s. Posteriormente el selenio fué purificado y convertido a selenato de potasio. Los reactivos químicos usados son: dióxido de selenio, ácido clorhídrico 4N, sulfito de sodio, ácido nítrico, permanganato de potasio, solución de hidróxido de potasio al 25%, solución de ácido sulfúrico al 1%, rojo de metilo, alcohol etílico absoluto, solución de dióxido de selenio ($50 \mu\text{g SeO}_2/1$ de agua destilada), ácido oxálico, ácido ascórbico y carbón activado. En el

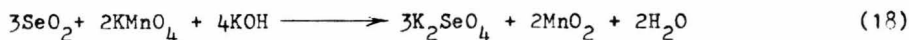
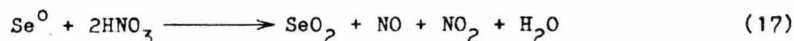
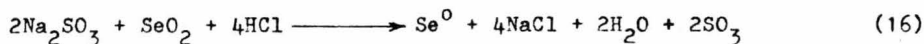
laboratorio se prepararon los cristales de selenato de potasio como se mencionará más adelante. Se utilizó material ordinario de laboratorio.

El equipo de conteo consistió de un analizador multicanal de 1024 canales acoplado a un detector de Ge-Li.

PURIFICACION DEL SELENIO IRRADIADO: Después de la irradiación, las muestras se disolvieron en ácido clorhídrico 4N y el metal selenio se precipitó por la adición de sulfito de sodio (16). Se filtró el precipitado y se disolvió en ácido nítrico concentrado y caliente, para producir nuevamente dióxido de selenio (17), pero en esta ocasión purificado. El exceso de ácido nítrico se eliminó evaporando a sequedad.

PREPARACION DE SELENATO DE POTASIO: El dióxido de selenio radiactivo químicamente purificado se disolvió en agua destilada y se oxidó a selenato de potasio calentando con permanganato de potasio en solución alcalina (19). El exceso de permanganato de potasio se redujo a MnO_2 añadiendo ácido oxálico y se separó de la solución por filtración. Después de neutralizar y concentrar la solución el selenato de potasio se cristalizó por adición de etanol absoluto.

Las reacciones que se verifican durante la preparación de los cristales de selenato de potasio son las siguientes:



SEPARACION DE SELENIO (IV) DEL SELENIO (VI): Los cristales de selenato de potasio marcados con selenio radiactivo se disolvieron en la solución portadora, una vez disueltos los cristales se dejó transcurrir 1.5 horas --- para que se alcance el equilibrio radiactivo entre el par de isómeros nucleares. Es importante hacer notar que además de la formación del $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$ por efecto de la reacción (n, γ) del ^{80}Se también se produce $^{81b}\text{Se}^{\text{VI}}$ con una vida media de 18.6 minutos, el que por emisión de partículas (β^- decae a ^{81m}Br con una vida media de 37.4 segundos y posteriormente por efecto de la transición isomérica decae a ^{81}Br estable como se muestra en la figura (4). Por esta razón se deja transcurrir 1.5 horas con el objeto de que el cambio químico que ocurre sea una consecuencia de la transición isomérica del $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$. Transcurridas las 1.5 horas se agregó ácido ascórbico, con el fin de reducir el Se^{IV} a Se^{O} , se ajustó el pH a 3 con ácido clorhídrico e hidróxido de amonio. El $\text{Se}(\text{IV})$ se separó agitando la solución con carbón activado durante un minuto, se filtró el carbón y se puso a contar. Se hicieron dos extracciones sucesivas con carbón activado, -- agregando en cada ocasión ácido ascórbico para reducir el Se^{IV} que pudiera estar presente aún en la solución y se ajustó el pH a 3 en cada extracción con el objeto de comprobar de que el Se^{IV} se había extraído casi en su totalidad. En la figura (5) se muestra el esquema de la separación del $^{81b}\text{Se}^{\text{IV}}$ por el método de adsorción en carbón activado y se observa que en el carbón activado queda adsorbido principalmente el Se^{IV} , mientras que en la fase acuosa queda la mezcla de radioisótopos del selenio incluyendo el $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$ y el $^{81b}\text{Se}^{\text{VI}}$.

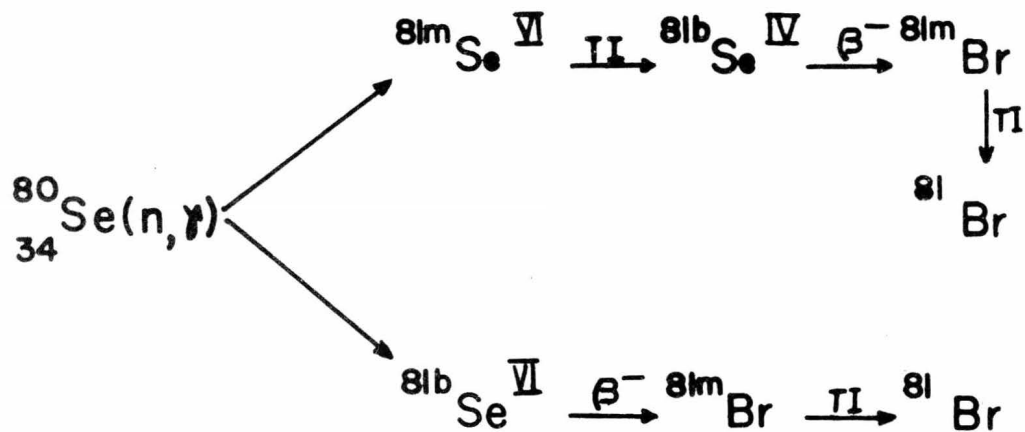


FIGURA (4). REACCION DE FORMACION DE LOS ISOMEROS NUCLEARES ${}^{81m}_{34}\text{Se}$ VI ${}^{81b}_{34}\text{Se}$ VI Y TIPO DE DECAIMIENTO.

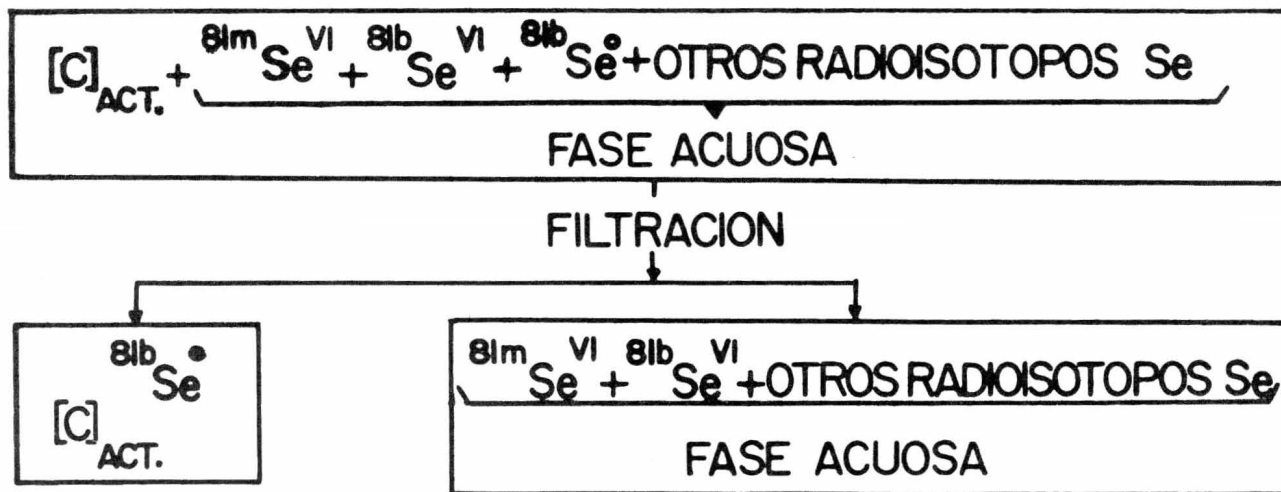


FIGURA (5). MUESTRA EL ESQUEMA DE SEPARACION DEL ^{81b} IV Se POR EL METODO DE ADSORCION EN CARBON ACTIVADO.

C) DETERMINACION DE LA RADIATIVIDAD DE LAS MUESTRAS: El espectro de --- rayos gamma se obtuvo con un detector de Ge-Li conectado a un analizador-multicanal. Se contó una alícuota de la solución original de selenato de potasio, la cual contiene la mezcla de radioisótopos del selenio y que -- sirvió como solución patrón para hacer los cálculos necesarios, así mismo se contó la solución remanente después de agitar con carbón activado y -- comprobar que se había extraído casi en su totalidad el Se(IV) por el -- carbón activado, encontrándose que éste contenía principalmente el Se(IV). Comparando los conteos de la solución patrón y el carbón se hicieron los cálculos de rendimiento del Se(IV). En la figura (6) se muestra esquemáticamente los pasos requeridos experimentales para el análisis de las trazas del ^{81b}Se .

D) CALCULOS: En los cálculos se introdujo un factor geométrico de corrección debido a las diferentes geometrías de las muestras contadas. Para -- este cálculo el área de los picos de la radiación gamma del ^{81b}Se se --- corrigió por los decaimientos del ^{81b}Se separado en el carbón activado y del ^{81m}Se presente en la solución patrón; así mismo se corrigió el valor de la radiactividad dada por el área de los picos de energía por el decaimiento del ^{81b}Se en el carbón activado y por su crecimiento en la fase -- acuosa.

FIGURA (6). MUESTRA ESQUEMATICAMENTE LOS PASOS REQUERIDOS EXPERIMENTALES PARA EL ANALISIS DE LAS TRAZAS DEL Se .



C A P I T U L O X .

RESULTADOS.

Los experimentos efectuados con cristales de selenato de potasio marcados con selenio radiactivo, muestran que el $^{81b}\text{Se}^{\text{IV}}$ formado por efecto de la transición isomérica del $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$, puede ser separado en cantidades pequeñas del resto de los radioisótopos del selenio, usando la técnica de adsorción en carbón activado.

En los resultados experimentales se encontró en la fase acuosa la mezcla de radioisótopos del selenio incluyendo el $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$ y $^{81b}\text{Se}^{\text{VI}}$. Mientras que en el carbón activado se encontró principalmente el $^{81b}\text{Se}^{\text{IV}}$ cuya separación analítica era el interés principal de este trabajo.

En los espectros de rayos gamma de los radioisótopos del selenio que se muestran en las figuras (7) y (8) se nota la notable disminución de los picos de energía correspondientes al $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$ en el carbón (figura 8), comparándolo con el espectro gamma de la solución patrón (figura 7) donde se encuentra presente la mezcla de radioisótopos del selenio. Las energías correspondientes del $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$ son de 103 y 260 Kev y su presencia en el espectro gamma del carbón activado corresponden a contaminaciones menores al 1%. Las energías correspondientes del $^{81b}\text{Se}^{\text{IV}}$ son 276, 290, 538, 552, 566, 650 y 828 Kev.

Podemos concluir que los experimentos efectuados con cristales de selenato de potasio marcados con selenio radiactivo, muestran que los efectos químicos de la transición isomérica del $^{81m}\text{Se}^{\text{VI}}$ se detectan como un cambio químico de la forma hexavalente a la forma tetravalente del selenio.

Así mismo el $^{137}\text{Se}^{\text{IV}}$ puede ser extraído casi en su totalidad por el método de adsorción en carbón activado, aprovechando la propiedad del carbón activado de adsorber preferentemente no electrolitos de soluciones -- así como la capacidad del Se^{IV} de ser reducido a Se^{O} por la adición de -- ácido ascórbico, mientras que el Se^{VI} no se reduce con este reductor.

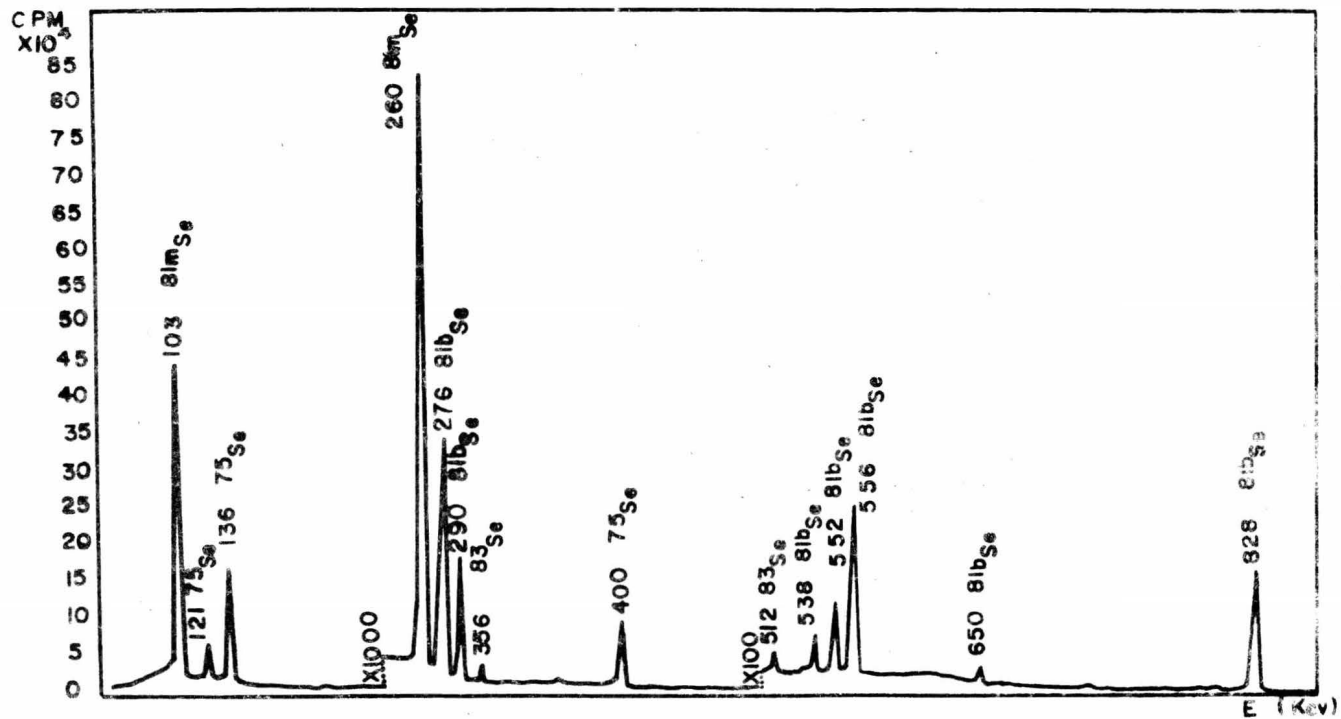


FIGURA (7). ESPECTRO DE RADIACION GAMMA DE LA SOLUCION PATRON DONDE SE ENCUENTRA PRESENTE LA MEZCLA DE RADIOISOTOPOS DEL Se.

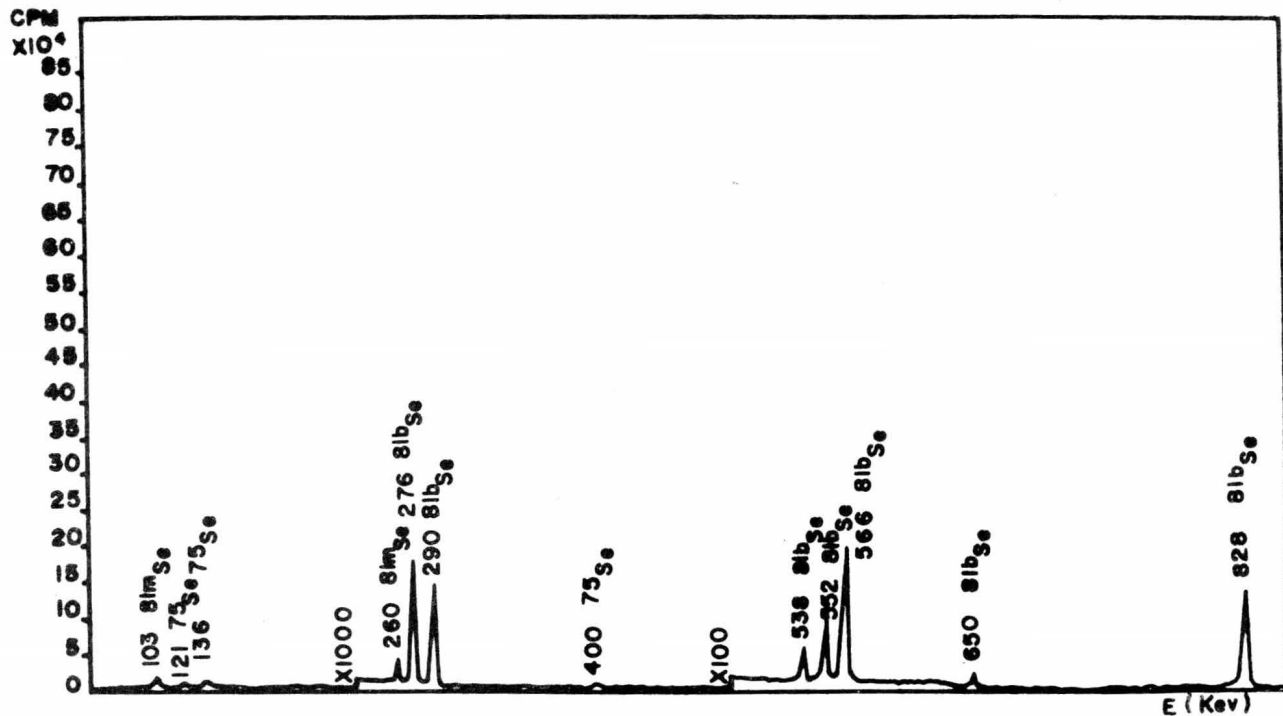


FIGURA (8). ESPECTRO DE RADIACION GAMMA DEL CARBON ACTIVADO CON EL ISÓMERO ^{81b}Se PRINCIPALMENTE.

TABLA I. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL SELENIO.

	O	S	Se	Te
Estados de oxidación-común.	+2,0,-2	-2,0,+2,+4,+6	-2,0,+4,+6	-2,0,+4,+6
Estados -- también ob servados.	-1	-1,+7,+8,+9		+9
Punto de - fusión en- °C	-219	119	220	450
Punto de - ebullición °C	-183	445	688	1390
Número -- atómico.	8	16	34	52

TABLA II. PROPIEDADES NUCLEARES DEL SELENIO.

NUCLIDO	VIDA MEDIA	TIPO DE DECAIMIENTO	% ABUNDANCIA
$^{74}_{34}\text{Se}$			0.87
^{75}Se	120.4 d 120 d 127 d	CE	
^{76}Se			9.02
$^{77\text{m}}\text{Se}$	17.5 s 17.4 s 17.7 s 17.8 s	TI	
^{77}Se			7.58
$^{79\text{m}}\text{Se}$	3.91 m 3.88 m	TI	
^{79}Se		β^-	
^{78}Se			23.52
^{80}Se			4.92
$^{81\text{m}}\text{Se}$	56.8 m 56.5 m 62 m 57 m 61 m	TI	
^{81}Se	18.6 m 18.2 m	β^-	
^{82}Se			9.19
$^{83\text{m}}\text{Se}$	70 s 69 s 67 s	β^-	
^{83}Se	25 m 26 m	β^-	

TABLA III. REACCIONES DE FORMACION DE RADIOISOTOPOS DEL SELENIO.

ISOTOPOS ESTABLES

ISOTOPOS FORMADOS Y SU ESQUEMA DE DECAIMIENTO.

$^{74}_{34}\text{Se}$

^{75}Se (120.4d) $\xrightarrow{\text{CE}}$ $^{75}_{33}\text{As}$ (estable).

^{76}Se

$^{77\text{m}}\text{Se}$ (17.5s) $\xrightarrow{\text{TI}}$ ^{77}Se (estable).

^{77}Se

$^{79\text{m}}\text{Se}$ (3.9m) $\xrightarrow{\text{TI}}$ ^{79}Se
 $\downarrow \beta^-$
 $^{79}_{35}\text{Br}$ (estable).

^{78}Se

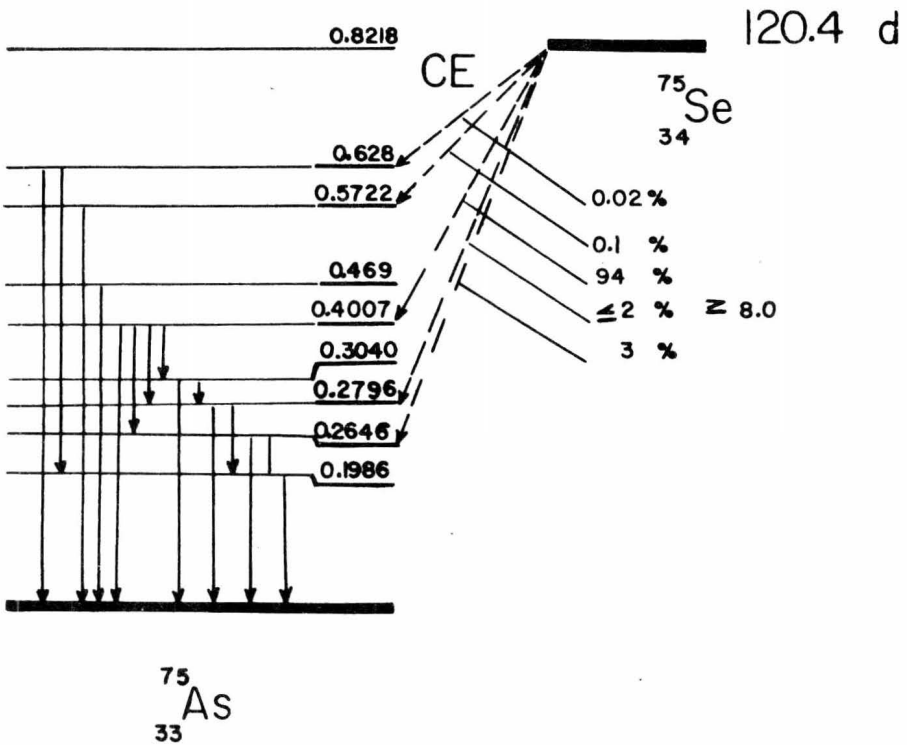
$^{79\text{m}}\text{Se}$ (3.9m) $\xrightarrow{\text{TI}}$ ^{79}Se
 $\downarrow \beta^-$
 $^{79}_{35}\text{Br}$ (estable).

^{80}Se

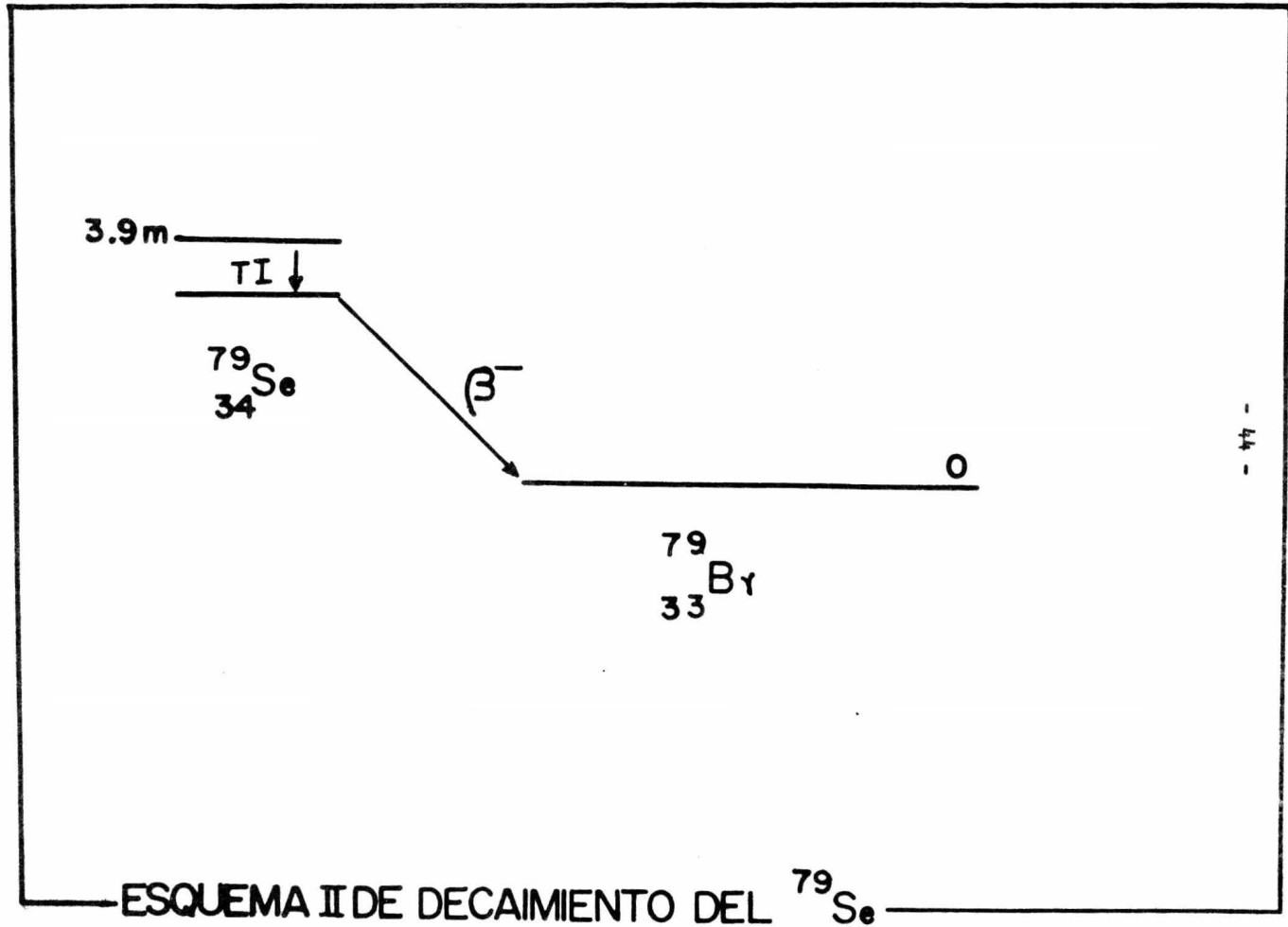
$^{81\text{m}}\text{Se}$ (56.8m) $\xrightarrow{\text{TI}}$ $^{81\text{b}}\text{Se}$ (18.2m)
 $\downarrow \beta^-$
 $^{81\text{m}}\text{Br}$ (37.4s)
 $\downarrow \text{TI}$
 ^{81}Br (estable).

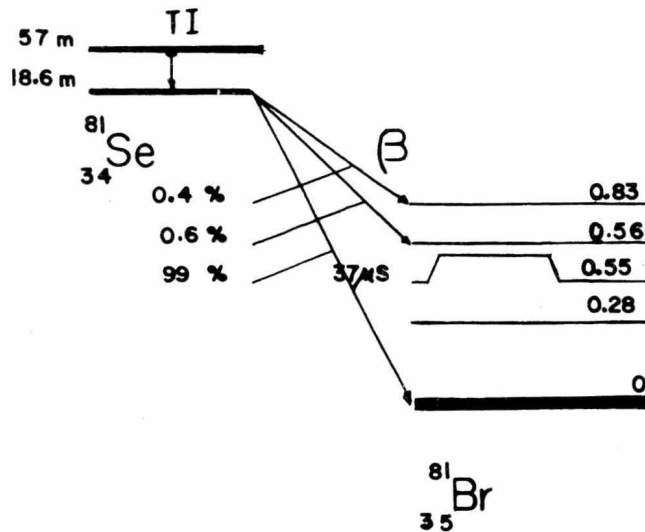
^{82}Se

$^{83\text{m}}\text{Se}$ (6.95m) $\xrightarrow{\beta^-}$ ^{83}Br (2.4h)
 ^{83}Se (25m) $\xrightarrow{\beta^-}$ ^{83}Br (2.4h)
 $\downarrow \beta^-$
 ^{83}Kr (estable)

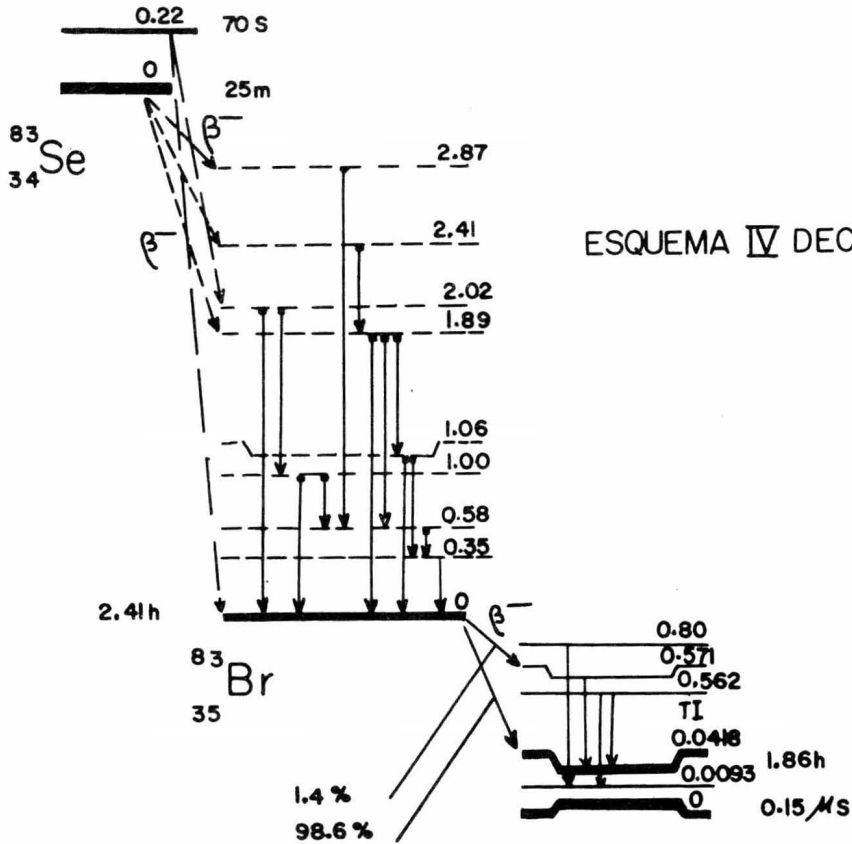


ESQUEMA I DECAIMIENTO DEL ^{75}Se





ESQUEMA III DECAIMIENTO DEL ^{81}Se



ESQUEMA IV DECAIMIENTO DEL ^{83}Se

BIBLIOGRAFIA.

1. Edwards, R.R., Gest, H. and Davies, T.H. Report CM-3390 (1966); ---
Radiochem. Studies: The Fission Product, Comjel, C.D. and Sugamar N
Ed., Mc. Graw Hill (1951), Book 1, p.237.
2. Appelman, H.E. J. of Chem. Education (1968).
3. Tenorio, D., Bulbulian, S. and Adloff, J.P. Por publicarse en ---
Radiochem. Radioanal. Letters.
4. Langsdorf, A. and Segrè, E. Phys. Rev. 57, 105 (1940).
5. Apers, D.J., Capron, P.C. and Gilly, L.J. J. Inorg. Nucl. Chem. 5, -
27-30 (1957).
6. Cogneau, M., Duplatre, G. and Vargas, J.I. J. Inorg. Nucl. Chem. 34
3021 (1972).
7. Constantinescu, M., Constantinescu, O., Pascaru, I. and Gird, E. --
Rev. Roum. Phys. 11-3, 249 (1966).
8. Al-Siddique and Maddock, A.G. J. Inorg. Nucl. Chem. 34, 3007-14 ---
(1972).
9. Fernández, M. and Bulbulian, S. Radiochem Radioanal. Letters 21 1-2
79-86 (1975).
10. Das, H. et al. Por publicarse en J. Radioanal. Chem.
11. Andrews, H.D. and Kokes, J.E.
Fundamental Chemistry. John Wiley & Sons, Inc. N.Y. (1965).
12. Cotton, F.A. y Wilkinson, G.
Química Inorgánica Avanzada. Ed. Limusa-Wiley, S.A. México (1973).

13. Crockford, H.D. y Knigh, S.P.
Fundamentos de Fisicoquímica. Compañía Editorial Continental, S.A.
México (1966).
14. Curso Básico Sobre Radioisótopos e Instrumentación Nuclear. INEN -
1972.
15. Friedlander, G., Kennedy, J.W. and Miller, J.M.
Nuclear and Radiochemistry. John Wiley & Sons, Inc. N.Y. (1964).
16. Garret, B.A., Richardson, J.S. and Montague, J.E.
Chemistry. Ginn & Company. Boston (1966).
17. Lederer, M.C., Hollander, J.M. and Perlman, I.
Table of Isotopes. John Wiley & Sons, Inc. N.Y. (1967).
18. Leddicote, G.W.
The Radiochemistry of Selenium. Nuclear Science Series. U.S. Atomic
Energy Commission (1961).
19. Mahan, H.B.
Curso de Química Universitaria. Fondo Educativo Interamericano, S.A.
Bogotá (1968).
20. Maron, S.H. y Prutton, C.F.
Fundamentos de Fisicoquímica. Editorial Limusa Wiley, S.A. México -
(1970).

21. Whitehouse, W.J. and Putman, J.L.

Radioactive Isotopes. Oxford at the Clarendon Press. Glasgow (1958).