

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO posgrado en ciencias físicas instituto de física

MEDIDAS DE SECCIÓN EFICAZ PARA LAS REACCIONES NUCLEARES ¹³C(n,γ)¹⁴C Y ¹⁴N(n,p)¹⁴C UTILIZANDO LA TÉCNICA DE ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON ACELERADORES

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA: JORGE GARCÍA RAMÍREZ

Director de Tesis: Dra. Libertad Barrón Palos Instituto de Física

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. Agosto 2017



Universidad Nacional Autónoma de México



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.

Resumen

En este trabajo obtenemos de forma experimental las secciones eficaces de las reacciones nucleares ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C y {}^{14}N(n,p){}^{14}C$ utilizando la técnica de espectrometría de masas con aceleradores. Para llevar a cabo este experimento utilizamos el flujo de neutrones térmicos producidos por el reactor TRIGA Mark III que se encuentra en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). La concentración de {}^{14}C con respecto a la de {}^{12}C en los materiales antes y después de la irradiación con neutrones fue determinado en el Laboratorio de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA) del Instituto de Física de la UNAM. A partir de las mediciones de concentración relativa {}^{14}C/{}^{12}C fue posible determinar las secciones eficaces correspondientes. Con este trabajo se establece un protocolo experimental para la medición de secciones eficaces a energías térmicas.

Los resultados alcanzados con este experimento son alentadores, pues para la reacción ${}^{14}N(n,p){}^{14}C$, se obtuvieron valores de la sección eficaz que concuerdan con los valores reportados anteriormente por otros autores. Por su parte, para la reacción ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$, los valores obtenidos difieren de los anteriormente reportados, lo cual nos impulsa a seguir estudiando esta reacción.

Palabras claves: Nucleosíntesis, neutrones térmicos, AMS, reacciones nucleares, producción de ¹⁴C, sección eficaz.

Abstact

In this work, the cross sections of the nuclear reactions ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ and ${}^{14}N(n,p){}^{14}C$ are experimentally measured using the accelerators mass spectrometry (AMS) technique. To carry out this experiment we use the thermal neutron flux produced by the TRIGA Mark III nuclear reactor located at the National Institute of Nuclear Research (ININ). The concentration of ${}^{14}C$ with respect to that of ${}^{12}C$ in materials before and after neutron irradiation was determined in the Laboratory of Mass Spectrometry with Accelerators (LEMA) of the Institute of Physics of the UNAM. From the relative concentration measurements ${}^{14}C/{}^{12}C$ it was possible to determine the corresponding cross sections. This work establishes an experimental protocol for the measurement of cross sections at thermal energies.

The results obtained for the ${}^{14}N(n,p){}^{14}C$ reaction are in good agreement with the values previously reported by other authors. On the other hand, for the ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ reaction, the obtained values differ from those previously reported, which impels us to continue studying this reaction.

Keywords: Nucleosynthesis, thermal neutrons, AMS, nuclear reactions, ¹⁴C production, cross section.

Contenido

1.	Intro	ducción
	1.1	Veneno de neutrones8
	1.2 ¹³ C(n	Mediciones previas de la sección eficaz de las reacciones nucleares , γ)^{14}C y $^{14}N(n,p)^{14}C$ 9
	1.3	El presente trabajo
2.	Blanc	cos12
	2.1 ¹³ C(n	Determinación del material a irradiar para el estudio de la reacción , γ) ¹⁴ C y el posible enriquecimiento del grafito en ¹³ C12
	2.2	Utilización de grafito natural17
	2.3 ¹⁴ N(n	Determinación del material a irradiar para el estudio de la reacción $(p,p)^{14}C$
	2.3.1	Uracil
	2.3.2	Phyridine24
	2.3.3	Thiamine
	2.3.4	Thymine
	2.4	Selección de los materiales a irradiar, instalaciones y tiempos de irradiación 27
	2.5 irrad	Efecto de los rayos gamma producidos en el reactor en las muestras a iar
3.	Meto	dología
	3.1	Caso 1: ¹³ C(n,γ) ¹⁴ C
	3.2	Caso 2: ¹⁴ N(n,p) ¹⁴ C
	3.3	Procedimiento experimental
	3.3.1	Irradiación de las muestras32
	3.3.2	Espectrometría de masas con aceleradores33
	3.4 reacc	Cálculo de la sección eficaz de absorción para neutrones térmicos de las iones ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ y ${}^{14}N(n,p){}^{14}C$
4.	Expe	rimento
	4.1	Preparación de muestras para irradiar

4.1.1	Cálculo de la actividad de los productos de la reacción	40
4.1.2	Cálculo de la rapidez de exposición	41
4.1.3	Irradiación de las muestras	41
4.2	Medición de la relación N_{14C}/N_{12C}	42
4.2.1 N14c/	Preparación de muestras y determinación de la concentración rel /N _{12C}	lativa 43
Análi	isis de Datos y Resultados4	14
5.1	Datos obtenidos en LEMA	44
5.2	Resultados	51
Conc	lusiones5	55
liograf	fía5	56
ndice	A5	58
	4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.2 4.2.1 N14c/ Anál 5.1 5.2 Conce liograf	 4.1.1 Cálculo de la actividad de los productos de la reacción

1. Introducción

Uno de los grandes misterios de la humanidad es el origen del universo, cómo vino a existir cada cosa que observamos tanto dentro de nuestro entorno, en el que vivimos día a día, como en el espacio exterior que nos circunda. Incluso cabe preguntarse de dónde surgimos y cómo está constituida la materia que nos rodea e incluso que nos constituye. Para lograr entender de qué estamos constituidos es necesario trasladarnos miles de millones de años atrás, debemos situarnos en el instante donde creemos que surgió el universo, justo en ese instante de tiempo donde ocurrió la Gran Explosión (Big Bang). Para lograr este entendimiento, la física nuclear tiene un papel muy importante, pues son reacciones nucleares las que rigieron el proceso de formación del universo desde sus propios inicios.

Los datos nucleares proporcionan un ingrediente clave para los cálculos de nucleosíntesis y para la comprensión de la evolución de nuestro universo. La nucleosíntesis es el proceso de creación de nuevos núcleos atómicos a partir de los nucleones preexistentes (protones y neutrones) para llegar a generar el resto de los elementos de la tabla periódica al unirse entre sí. Los nucleones primigenios se formaron a partir del plasma de quarks-gluones de la Gran Explosión, cuando el universo se enfrió por debajo de los diez millones de grados Kelvin; este proceso se puede llamar nucleogénesis, la generación de nucleones en el Universo temprano. La consecuente nucleosíntesis de los elementos ocurre principalmente en el interior de las estrellas por fusión y otros procesos nucleares.

Existen varios procesos astrofísicos que se piensa que son los responsables de la nucleosíntesis en el Universo. La mayoría de éstos ocurren en la materia caliente dentro de las estrellas. Estos procesos pueden crear elementos como el hierro o el níquel en la región en que los isótopos tienen la energía de enlace por nucleón más alta. Los elementos más pesados se pueden formar dentro de las estrellas por el proceso de captura lenta de neutrones conocido como el proceso s (por *slow*), o en un entorno explosivo, como el de las supernovas, mediante el proceso r (por *rapid*), donde también se capturan neutrones, entre otros.

La captura de neutrones es una reacción nuclear donde un neutrón libre colisiona con un núcleo atómico, siendo este absorbido para crear un núcleo más pesado. Cuando el neutrón es capturado por el núcleo suele liberar el exceso de energía mediante un evento de decaimiento gamma; además, el nuevo núcleo puede sufrir una desintegración beta para conseguir mayor estabilidad [1]–[4].

La captura de neutrones ocurre mediante los dos procesos antes mencionados, los procesos s y r. El proceso s se refiere a la captura lenta de neutrones, pues este implica

la captura de un solo neutrón que produce un núcleo estable o que decae mediante desintegración beta en un núcleo estable antes de que pueda producirse otra captura neutrónica. Es un tipo de nucleosíntesis que requiere condiciones de menor densidad neutrónica y menor temperatura en las estrellas que el proceso r. En esas condiciones el índice de captura neutrónica por los núcleos es lento si lo comparamos con la velocidad de la desintegración beta. Se obtienen isótopos a lo largo de la línea de estabilidad dentro de la tabla nuclear. El proceso s produce aproximadamente la mitad de los elementos más pesados que el hierro y, por lo tanto, desempeña un papel importante dentro de la evolución galáctica.

Por su parte el proceso r se da en condiciones de alta temperatura y alta densidad neutrónica. En este proceso los núcleos son bombardeados por un elevado flujo de neutrones para crear núcleos muy inestables con gran cantidad de neutrones que, a su vez, decaen muy rápidamente mediante una serie de desintegraciones beta hasta llegar a un isótopo estable pero siempre muy rico en neutrones. La diferencia de este proceso respecto al proceso s es que se producen capturas neutrónicas de forma muy rápida por lo que el núcleo inestable formado no alcanza la estabilidad antes de que se produzca la próxima captura. Este proceso es relevante en la nucleosíntesis estelar debido al gran flujo de neutrones libres presentes [5].

Se conocen cuatro tipos de nucleosíntesis. La primera de ellas es la nucleosíntesis del Big Bang, esta ocurrió en los primeros tres minutos del Universo y es responsable de la producción de gran parte del ¹H, ²H, ³He, ⁴He y ⁷Li, en el Universo, aunque el ⁴He continúa siendo producido por otros mecanismos (como la fusión estelar y el decaimiento alfa) y ciertas cantidades de ¹H se siguen produciendo por espalación y ciertos tipos de descomposición radiactiva (emisión de protones y neutrones). Debido al periodo tan corto en que ocurrió la nucleosíntesis del Big Bang antes de ser parada por la expansión y el enfriamiento, no se pudo formar ningún elemento más pesado que el litio. Los elementos formados durante este periodo estaban en estado de plasma y no se pudieron enfriar al estado de átomos neutros hasta mucho después.

Otro tipo de nucleosíntesis es la nucleosíntesis estelar, la cual ocurre en las estrellas durante el proceso de evolución estelar. Esta es responsable de la generación de la mayor parte de los elementos ligeros y medianos, y de una minoría de los elementos pesados por procesos de fusión nuclear a partir del H y del He. De particular importancia es el carbono, porque su formación a partir de la fusión triple de ⁴He permite a la nucleosíntesis librar el obstáculo de la inestabilidad del ⁸Be producido a partir de la fusión de dos ⁴He. El carbono es también el elemento principal utilizado en la producción de neutrones libres en las estrellas, dando pie al proceso s que provoca la absorción lenta de neutrones para producir elementos más pesados que el hierro y

el níquel (⁵⁷Fe y ⁶²Ni). El carbono y otros elementos formados por este proceso son también fundamentales para la vida. Los productos de la nucleosíntesis estelar se distribuyen generalmente en el Universo como nebulosas planetarias o a través del viento solar.

La tercera forma en que se produce la nucleosíntesis se conoce como nucleosíntesis explosiva, esta incluye la nucleosíntesis de supernovas y produce los elementos más pesados que el hierro mediante una intensa ráfaga de reacciones nucleares que típicamente duran apenas unos segundos durante la explosión del corazón de la supernova. En entornos explosivos de supernovas, los elementos entre el silicio y el níquel se sintetizan por fusión rápida. También dentro las supernovas pueden ocurrir procesos de nucleosíntesis, como el proceso r, en el que se producen muchos isótopos ricos en neutrones de elementos más pesados que el níquel por absorción rápida de neutrones libres lanzados durante las explosiones. Es responsable de nuestra abundancia natural de elementos radiactivos, como el uranio y el torio, así como de muchos de los isótopos ricos en neutrones de cada elemento pesado.

El cuarto y último tipo de nucleosíntesis es la espalación de rayos cósmicos. En este proceso se producen algunos de los elementos más ligeros presentes en el Universo (aunque no una cantidad significativa de deuterio). Se cree que la espalación es responsable de la generación de todo o casi todo el ³He y los elementos Li, Be y B. Este proceso resulta del impacto de los rayos cósmicos contra la materia interestelar, la cual fragmenta los núcleos de carbono, nitrógeno y oxígeno presentes en los rayos cósmicos [1]–[4].

Evidentemente la nucleosíntesis es un proceso clave que debemos comprender muy bien para poder lograr un mejor entendimiento de la formación del universo y la evolución del mismo. El neutrón es una partícula inestable que decae en aproximadamente 15 minutos, por lo que pudiéramos preguntarnos: ¿de dónde vinieron los neutrones que garantizaron la continuidad de la nucleosíntesis (procesos s y r) y así la formación del universo y su evolución? Evidentemente deben existir fuentes de neutrones que garantizaron y garantizan la continuidad de este proceso, o dicho de otra forma, deben tener lugar reacciones nucleares que los producen. Existen diversas reacciones de producción de neutrones que constituyen las principales fuentes activas de neutrones, tales como ${}^{22}Ne(\alpha,n){}^{25}Mg y {}^{13}C(\alpha,n){}^{16}O$ [6].

1.1 Veneno de neutrones

Se consideran veneno de neutrones aquellos elementos que tienen una sección eficaz de absorción grande lo cual provoca la fácil absorción de neutrones. La sección eficaz de captura en los elementos ligeros es usualmente muy pequeña. El ¹³C y el ¹⁴N son núcleos primarios los cuales son producidos en reacciones nucleares dentro de las

estrellas. A pesar de que las secciones eficaces de captura neutrónica de estos elementos son pequeñas, su abundancia es muy alta, por lo que las reacciones de estos elementos con neutrones deben ser consideradas como un veneno potencial de neutrones para el proceso s de la nucleosíntesis, siendo la reacción ¹³C(α ,n)¹⁶O la fuente de neutrones más importante para dicho proceso.

A partir de la captura neutrónica en ¹²C, ¹²C(n, γ)¹³C, se produce ¹³C el cual servirá como núcleo para la reacción ¹³C(α ,n)¹⁶O y el neutrón consumido en el proceso ¹²C(n, γ)¹³C será restituido. Por otra parte, simultáneamente se producirá la captura neutrónica en ¹³C, ¹³C(n, γ)¹⁴C, a través de esta reacción de captura de neutrones, se eliminan dos ingredientes para el proceso s de la nucleosíntesis: (1) el isótopo primario ¹³C, que constituye el principal nucleido para la producción de neutrones a través de ¹³C(α ,n)¹⁶O, dado que se transforma a ¹⁴C, y (2) un neutrón también se consume, por lo que contaremos con un neutrón menos para el proceso s de la nucleosíntesis.

Para el ¹⁴N se produce la reacción ¹⁴N(n,p)¹⁴C; esta reacción tiene una sección eficaz aproximadamente 100 veces más grande que la reacción ¹³C(n, γ)¹⁴C. Además, ¹⁴N(n,p)¹⁴C produce protones que posteriormente destruyen el ¹³C a través de ¹³C(p, γ)¹⁴N y forman un ciclo con el nuevo producto de reacción ¹⁴N. Como tal, esta reacción representa el veneno de neutrones más importante en el proceso s de la nucleosíntesis [6].

Este trabajo de tesis busca determinar la sección eficaz de captura (para neutrones térmicos) de las reacciones ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ y ${}^{14}N(n,p){}^{14}C$.

1.2 Mediciones previas de la sección eficaz de las reacciones nucleares ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ y ${}^{14}N(n,p){}^{14}C$

Debido a la importancia de conocer datos de las reacciones nucleares involucradas en el proceso de nucleosíntesis para lograr un mejor entendimiento del origen y la evolución del Universo, se han realizado varios experimentos en los que se estudian estas dos reacciones nucleares [6]–[15]. Sin embargo la mayoría de estos trabajos se han enfocado en energías del orden de los keV y hasta los MeV, donde existen regiones de resonancias para la absorción de neutrones en ¹³C y ¹⁴N así como un comportamiento diferente de la sección eficaz con respecto a la de los neutrones térmicos.

Los neutrones producidos en un reactor nuclear y moderados en el estanque de agua a temperatura ambiente que rodea al núcleo, como es el caso del reactor TRIGA Mark III, tienen una distribución de energía tipo Maxwell-Boltzmann, con el máximo de la distribución a una energía de 25 meV para una temperatura de 290 K, y una velocidad de 2200 m/s; a estos neutrones se les conoce como neutrones térmicos. Para neutrones térmicos o de energía menor (llamados coloquialmente neutrones lentos) la sección

eficaz tiene una dependencia con la energía, y por ende de la velocidad, que va como 1/v; esto se puede observar en la Figura 1.1.



Figura 1.1: Dependencia de la sección eficaz de absorción con la energía para la reacción ¹³C(n,γ)¹⁴C [16].

1.3 El presente trabajo

Debido a la importancia del conocimiento de datos nucleares, como la sección eficaz de las reacciones ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ y ${}^{14}N(n,p){}^{14}C$ a bajas energías, hemos llevado a cabo, a través de la utilización de neutrones térmicos provenientes de un reactor nuclear TRIGA Mark III, mediciones de las secciones eficaces para las reacciones antes mencionadas. En este proceso se utiliza la técnica de espectrometría de masas con aceleradores (AMS por sus siglas en inglés) para la cuantificación del isótopo producido en la reacción, ${}^{14}C$ en ambos casos. Al ser AMS una técnica que no sufre de interferencias isobáricas moleculares debido a la utilización de aceleradores de tipo tándem, nos posibilita el desarrollo de este tipo de experimentos, pues ofrece una herramienta complementaria para medir secciones eficaces de las reacciones nucleares que conducen ciertos nucleidos medibles con esta técnica, independientemente de sus tiempos de decaimiento o esquemas. Este trabajo se desarrolló en varias etapas, las cuales serán descritas en los capítulos siguientes. Durante este proceso se estableció un protocolo experimental para este tipo de estudios que posibilitan el posterior estudio de otras

reacciones que producen isótopos de larga vida (5730 años para el ¹⁴C). La mayor parte del trabajo estuvo enfocada en seleccionar el material a irradiar idóneo para llevar a cabo la reacción, así como optimizar tiempos de irradiación, para finalmente, obtener los resultados que se presentan en este trabajo de tesis.

2. Blancos

Para llevar a cabo nuestro experimento, en primera instancia debemos seleccionar los materiales que contienen los blancos que queremos irradiar; para este estudio se utiliza el flujo de neutrones térmicos del reactor TRIGA Mark III del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares que corresponde a 3.3×10^{13} n/s·cm² en el dedal central.

2.1 Determinación del material a irradiar para el estudio de la reacción ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ y el posible enriquecimiento del grafito en ${}^{13}C$

En el caso de la reacción ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$, nuestra primera opción es el grafito enriquecido en ${}^{13}C$, sin embargo su costo en el mercado es muy alto. Por otro lado el grafito natural tiene un bajo porcentaje de ${}^{13}C$ (98.9% de ${}^{12}C$ y solo un 1.1 % de ${}^{13}C$), pero tiene un costo mucho más accesible. Analizamos la posibilidad de enriquecer en ${}^{13}C$ una muestra de grafito natural por irradiación neutrónica en el mismo reactor, para lograr un mayor grado de la reacción que queremos estudiar.

En la captura neutrónica en ¹²C existen varios posibles canales de reacción los cuales se listan a continuación:

 $^{12}C(n,\gamma)^{13}C$ $^{12}C(n,p)^{12}B$ $^{12}C(n,n)^{12}C$ $^{12}C(n,d)^{11}B$ $^{12}C(n,d)^{10}B$ $^{12}C(n,\alpha)^{9}Be$

Nuestro primer paso es determinar cuán posible es la ocurrencia de cada una de las reacciones anteriores, pues cada una de ellas, en principio, podrá afectar el comportamiento de las concentraciones de ${}^{12}Cy {}^{13}C$.

Podemos determinar qué reacciones son energéticamente posibles y cuáles no, a partir del valor Q para cada una de las reacciones; el valor Q es la diferencia de energía entre los reaccionantes y los productos en una reacción nuclear, esto implica que si el valor Q de una reacción es negativo será necesario suministrarle energía al sistema para que pueda producirse esta reacción, mientras que para valores positivos de Q esta reacción ocurrirá [17]. Como se observa en la Tabla 2.1 en todos los casos la energía necesaria para que pueda llevarse a cabo la reacción es negativa excepto para la reacción ${}^{12}C(n,\gamma){}^{13}C$, así que en principio podemos admitir que esta es la reacción con mayor probabilidad de ocurrir cuando el ${}^{12}C$ sea irradiado con neutrones. Si suponemos que el neutrón incidente es el proyectil y que el blanco es un núcleo en reposo, entonces la energía cinética inicial en el centro de masa (k_{cm}) viene dada como:

$$k_{cm} = k_{lab} \left(\frac{m_n}{m_n + m_t} \right) \tag{1}$$

Donde k_{lab} es la energía cinética inicial en el sistema de laboratorio, m_n la masa de neutrón y m_t la masa del blanco. Por otro lado tenemos la energía umbral E_{th} , que es la energía mínima que debe tener el neutrón incidente para que pueda producirse la reacción, esta se define como sigue.

$$E_{th} = -Q\left(1 + \frac{m_n}{m_t}\right) \tag{2}$$

Como ya hemos mencionado anteriormente, los neutrones que utilizamos son neutrones térmicos con energía promedio de 25 meV; partiendo de este dato y de la masa del neutrón que es conocida al igual que la masa del ¹²C, entonces podemos determinar la k_{cm} la cual tiene un valor de 1.94×10^{-9} MeV, y de ahí que podamos obtener la E_{th} para cada una de las reacciones. Estos valores se muestran en la tabla 3.1.

Reacción	Q (keV)	Eth (MeV)
$^{12}C(n,\gamma)^{13}C$	4946.3086	-5.36E+03
${}^{12}C(n,p){}^{12}B$	-12587.07	1.36E+04
¹² C(n,n) ¹² C	0	0.00E+00
${}^{12}C(n,d){}^{11}B$	-13732.287	1.49E+04
¹² C(n,t) ¹⁰ B	-18929.18	2.05E+04
$^{12}C(n,\alpha)^{9}Be$	-5702.0513	6.18E+03

Tabla 2.1. Valor Q y Eth de las reacciones de absorción neutrónica en ¹²C

Tal y como habíamos previsto desde el valor Q, podemos determinar a partir de la energía mínima que solamente es posible que se produzca la reacción ${}^{12}C(n,\gamma){}^{13}C$, esto se puede observar con mayor facilidad en la Figura 2.1, la cual muestra un diagrama de energía donde se ubica cada uno de los posibles productos de reacción. Hacia la parte inferior del canal de entrada aparece sombreado en color gris, el área que representa la región donde aparecen los canales de salida que son energéticamente posibles.



Figura 2.1: Niveles de energía de cada uno de los posibles canales de salida.

Tomando en cuenta que solo se va a producir la reacción ${}^{12}C(n,\gamma){}^{13}C$ a partir de la captura neutrónica en ${}^{12}C$ a energías térmica podemos proceder al estudio de la posibilidad de enriquecer el grafito en ${}^{13}C$.

Para enriquecer la muestra en ¹³C podemos bombardear el grafito con neutrones y mediante la reacción ¹²C(n, γ) obtener un mayor porcentaje de ¹³C en la muestra. Pero al mismo tiempo que irradiamos la muestra de grafito a fin de enriquecerlo en ¹³C también ocurrirá la reacción ¹³C(n, γ) con la cual estaremos perdiendo núcleos de ¹³C; la ventaja en este caso está en que debido al bajo porcentaje de ¹³C en el grafito natural esta última ocurrirá en menor grado.

Para neutrones con energías de 25 meV (v=2200 m/s) tenemos las siguientes secciones eficaces [18].

${}^{12}_{6}C + n \rightarrow {}^{13}_{6}C + \gamma$	$\sigma_1(v=2200 \text{ m/s}) = 0.00353 \text{ barn}$	reacción 1
${}^{13}_{6}C + n \rightarrow {}^{14}_{6}C + \gamma$	$\sigma_2(v=2200 \text{ m/s}) = 0.00137 \text{ barn}$	reacción 2

Como se observa, además del mayor porcentaje de ¹²C en el grafito, esta reacción tiene una sección eficaz mayor que la del ¹³C, por lo que la primera reacción tiene mayor probabilidad de ocurrir que la segunda.

Ahora introducimos el concepto de tasa de reacción (R), que no es más que la cantidad de interacciones por unidad de tiempo producidas en un medio, esta se define matemáticamente como:

 $R = N \cdot \sigma \cdot \varphi \tag{3}$

Siendo N la cantidad de núcleos blancos en la muestra para la reacción nuclear con sección eficaz σ (barn) y φ (n/cm·s) el flujo de proyectiles (neutrones) incidentes.

Definamos ω como la fracción de un elemento o isótopo en una muestra, entonces ω_1 será la fracción de ¹²C en el grafito y ω_2 la de ¹³C para el caso en cuestión. De modo que nominalmente (como se describirá más adelante, las fracciones precisas de ¹²C y ¹³C en el grafito que utilizamos son determinadas mediante espectrometría de masas con aceleradores):

$$\omega_1 = 0.989$$

 $\omega_2=0.011$

Ahora definamos además a α , la cual representará el número de átomos de un elemento o isótopo en una muestra si esta fuera en su totalidad de este elemento o isótopo. Para el cálculo de α podemos usar la siguiente expresión.

$$\alpha = \frac{m \cdot N_A}{PM} \tag{4}$$

Siendo m el peso de la muestra en gramos, PM el peso molecular y N_A el número de Avogadro. De aquí que:

$$\alpha_1 = \frac{m \cdot N_A}{12} \quad \text{y} \quad \alpha_2 = \frac{m \cdot N_A}{13}$$

Entonces la cantidad inicial de núcleos N₀ de cada elemento o isótopo en la muestra la podemos obtener a partir del producto del número de átomos α y la fracción ω de cada isótopo o elemento en específico.

$$N(0) = \alpha \cdot \omega \tag{5}$$

Podemos definir entonces $N_{12C}(0)$ como el número inicial de núcleos de ${}^{12}C$ y $N_{13C}(0)$ como el número inicial de núcleos de ${}^{13}C$.

Para estudiar el comportamiento de las concentraciones de ¹²C y ¹³C en el tiempo podemos plantear el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dN_{12C}}{dt} = -N_{12C}\sigma_1\varphi \qquad (6)$$
$$\frac{dN_{13C}}{dt} = N_{12C}\sigma_1\varphi - N_{13C}\sigma_2\varphi \qquad (7)$$

La primera ecuación expresa la variación de ¹²C con el tiempo. Como se puede apreciar en el miembro derecho aparece un signo negativo, el cual representa la disminución de esta concentración, pues en este caso, los núcleos de ¹²C pasan a ser núcleos de ¹³C a partir de la absorción neutrónica en ¹²C, cuya sección eficaz de absorción es como ya se dijo $\sigma_1 = 0.00353$ barn para neutrones térmicos. Para la segunda ecuación tenemos una resta, esta no es más que la cantidad de ¹³C producido a partir de ¹²C, a la cual le sustraemos el ¹³C que pasa a ser ¹⁴C a partir de la absorción neutrónica en ¹³C, cuya sección eficaz de absorción es como ya se dijo $\sigma_2 = 0.00137$ barn para neutrones térmicos.

La primera ecuación tiene una solución simple la cual podemos obtener en pocos pasos. A partir de la solución de la primera ecuación y utilizando el método de factor integrante podemos obtener la solución de la segunda ecuación diferencial, las soluciones de ambas ecuaciones diferenciales, las cuales describen la concentración de ¹²C y ¹³C como función del tiempo, se muestran a continuación:

$$N_{12C}(t) = N_{12C}(0)e^{-\sigma_1\varphi t}$$
(8)

$$N_{13C}(t) = \frac{N_{12C}(0)\sigma_1 e^{-\sigma_1\varphi t}}{\sigma_2 - \sigma_1} [e^{-\sigma_1\varphi t} - e^{-\sigma_2\varphi t}] + N_{13C}(0)e^{-\sigma_2\varphi t}$$
(9)

A partir de estas ecuaciones se obtuvieron las concentraciones relativas de N_{13C}/N_{12C} para diferentes tiempos de irradiación, los resultados aparecen en la Figura 2.2.



Figura 2.2: Relación N₁₃c/N₁₂c para un tiempo de irradiación con neutrones de hasta 50 horas.

Como se puede observar en la Figura 2.2, la variación en la concentración de ¹³C es prácticamente despreciable, pues esta luego de 50 horas de irradiación permanece prácticamente constante, por lo que serían necesarios tiempos de irradiación bastante prolongados para alcanzar niveles de enriquecimiento significativos, lo cual en la práctica no es factible.

2.2 Utilización de grafito natural

Una vez conocido, que para enriquecer nuestra muestra en ¹³C se requieren prolongados tiempos de irradiación bajo un flujo de neutrones térmicos, podemos entonces valorar la posibilidad de irradiar el grafito natural, pues a pesar de ser un poco menos probable la ocurrencia de la reacción ¹³C(n, γ)¹⁴C dada la baja concentración de ¹³C, también se produce al exponer el grafito a un flujo de neutrones térmicos. Veamos ahora como varía la concentración de ¹⁴C en grafito natural.

Antes de comenzar a estudiar el comportamiento de la concentración de ¹⁴C veamos cuales son los posibles canales de salida para la absorción neutrónica en ¹³C, y si efectivamente es más probable que se produzca la reacción que queremos estudiar. A continuación se listan los posibles canales de salida para la absorción neutrónica en ¹³C.

 $^{13}C(n,\gamma)^{14}C$ $^{13}C(n,p)^{13}B$ $^{13}C(n,n)^{13}C$ $^{13}C(n,d)^{12}B$ $^{13}C(n,t)^{11}B$ $^{13}C(n,\alpha)^{10}Be$

Al igual que en el caso anterior, podemos determinar que reacciones son energéticamente posibles y cuáles no, en la Tabla 2.2 se muestra el valor Q para cada una de las posibles reacciones, al igual que la E_{th} , estas se obtuvieron siguiendo el procedimiento explicado anteriormente, en este caso la k_{cm} tiene un valor de 1.8×10^{-9} MeV.

Tabla 2.2. Valor Q y Eth de las reacciones de absorción neutrónica en ¹³C

Reacción	Q (keV)	Eth (MeV)
$^{13}C(n,\gamma)^{14}C$	8176.4336	-8.86E+03
${}^{13}C(n,p){}^{13}B$	-12655.76	1.37E+04
¹³ C(n,n) ¹³ C	0	0.00E+00
${}^{13}C(n,d){}^{12}B$	-15309.81	1.66E+04
¹³ C(n,t) ¹¹ B	-12421.362	1.35E+04
$^{13}C(n,\alpha)^{10}Be$	-3836.0776	4.16E+03

Como se observa en la Tabla 2.2, para el proceso de captura neutrónica en ¹³C el único canal de salida posible es ¹³C(n, γ)¹⁴C, esto se puede observar con mayor claridad en el diagrama de energía que se muestra en la Figura 2.3.



Figura 2.3: Niveles de energía de cada uno de los posibles canales de salida.

De esta forma podemos proceder a estudiar el comportamiento de la concentración de ¹⁴C al exponer el grafito natural a un flujo de neutrones térmicos.

Similar a como se describió en la sección anterior para el caso del 12 C y el 13 C, la variación de la concentración de 14 C como función del tiempo está dada por:

$$\frac{dN_{14C}}{dt} = N_{13C}\sigma_2\varphi \tag{10}$$

A partir de la solución de esta ecuación diferencial podemos obtener una ecuación que describe el comportamiento del número de núcleos de ¹⁴C conforme transcurre el tiempo.

$$N_{14C}(t) = \frac{N_{12C}(0)}{\sigma_2 - \sigma_1} \left[-\sigma_2 e^{-\sigma_1 \varphi t} + \sigma_1 e^{-\sigma_2 \varphi t} - \sigma_1 + \sigma_2 \right] - N_{13C}(0) \left[e^{-\sigma_2 \varphi t} - 1 \right]$$
(11)

Pudimos determinar el comportamiento de la concentración relativa N_{14C}/N_{12C} , la cual se muestra a continuación.



Figura 2.4: Relación N_{14C}/N_{12C} *a partir de la irradiación de grafito natural con neutrones.*

Como se puede observar en la Figura 2.4 luego de 10 horas de irradiación la concentración relativa N_{14C}/N_{12C} es del orden de 10^{-11} , lo cual es una cantidad significativa para nuestro estudio (la técnica de espectrometría de masas con aceleradores permite determinar concentraciones relativas N_{14C}/N_{12C} del orden de 10^{-15}). Esto nos conduce a pensar en la posibilidad de utilizar grafito natural como blanco para el estudio de la reacción ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$.

2.3 Determinación del material a irradiar para el estudio de la reacción ¹⁴N(n,p)¹⁴C

El nitrógeno tiene dos isótopos estables, ¹⁴N y ¹⁵N, de los cuales el 99.6 % es ¹⁴N y solamente un 0.4 % de ¹⁵N. Para neutrones con energías de 25 meV tenemos las siguientes secciones eficaces microscópicas [18].

${}^{14}_{7}N + n \rightarrow {}^{14}_{6}C + p$	$\sigma_1(v=2200 \text{ m/s}) = 1.91 \text{ barn}$	reacción 1
${}^{15}_{7}N + n \rightarrow {}^{16}_{7}N \rightarrow {}^{16}_{8}O + \gamma$	$\sigma_2(v=2200 \text{ m/s}) = 0.000024 \text{ barn}$	reacción 2

Como se puede observar debido al bajo porcentaje presente de ¹⁵N y a la sección eficaz tan baja que este presenta para la absorción de neutrones térmicos la segunda reacción puede despreciarse.

Al igual que en los casos anteriores veamos cuales son lo posibles canales de salida para la absorción neutrónica en ¹⁴N y si efectivamente es más probable que se produzca la reacción que queremos estudiar. A continuación se listan los posibles canales de salida para la absorción neutrónica en ¹⁴N:

 $^{14}N(n,\gamma)^{15}N$

¹⁴N(n,p)¹⁴C
 ¹⁴N(n,n)¹⁴N
 ¹⁴N(n,d)¹³C
 ¹⁴N(n,t)¹²C
 ¹⁴N(n,α)¹¹B

Como se hizo anteriormente, aquí también podemos determinar que reacciones son energéticamente posibles y cuáles no; el valor Q para cada una de las posibles reacciones se muestra en la Tabla 2.3 al igual que el valor de la E_{th} , en este caso k_{cm} tiene un valor de 1.68×10^{-9} MeV.

Tabla 2.3. Valor Q y Eth de las reacciones de absorción neutrónica en 14N

Reacción	Q (keV)	E _{min} (MeV)
$^{14}N(n,\gamma)^{15}N$	10833.3	-1.16E+04
$^{14}N(n,p)^{14}C$	625.871	-6.71E+02
$^{14}N(n,n)^{14}N$	0	0.00E+00
$^{14}N(n,d)^{13}C$	-5325.994	5.71E+03
$^{14}N(n,t)^{12}C$	-4015.075	4.30E+03
$^{14}N(n,\alpha)^{11}B$	-158.06	1.69E+02

A diferencia de los casos anteriores ahora tenemos dos posibles canales de salida para el proceso de captura neutrónica en ¹⁴N, los cuáles son ¹⁴N(n,γ)¹⁵N y ¹⁴N(n,p)¹⁴C, esto se puede observar con más detalles en el diagrama de energía que se muestra en la Figura 2.5.



Figura 2.5: Niveles de energía de cada uno de los posibles canales de salida.

La sección eficaz de absorción de la reacción ¹⁴N(n,p)¹⁴C para neutrones térmicos (25 meV) es de 1.91 barn [6]. Por su parte ¹⁴N(n, γ)¹⁵N para neutrones de esa misma energía tiene una sección eficaz de 0.07 barn [19], es decir, 25 veces más pequeña, esto nos conduce a despreciar los efectos de esta reacción sobre la ocurrencia de la reacción ¹⁴N(n,p)¹⁴C.

Ahora podemos proceder a estudiar el comportamiento de la concentración de ¹⁴C en un material que contenga ¹⁴N, donde consideraremos que la única reacción que se produce en ¹⁴N es ¹⁴N(n,p)¹⁴C. Para el estudio de esta reacción se tomaron en cuenta diferentes compuestos que pudieran ser utilizados como blanco los cuales aparecen en la Tabla 2.5.

Compuesto	Fórmula	Peso molecular (UMA)
uracil	C4H4N2O2	112.09
pyridine	C ₅ H ₅ N	79.10
thiamine	C ₁₂ H ₁₇ ClN ₄ OS.HCl	337.17
thymine	C5H6N2O2	126.11

Tabla 2.5: Posibles materiales a irradiar para llevar a cabo la reacción ¹⁴N(n,p)¹⁴C

Como vimos anteriormente las secciones eficaces para el carbono están tres órdenes de magnitud por debajo de la sección eficaz para el nitrógeno, por lo que el carbono presente en el compuesto puede despreciarse en el estudio de esta reacción. Analicemos cada uno de los compuestos por separado siguiendo el procedimiento utilizado para el análisis de las reacciones del caso 1. En estos cálculos, la variación del número de núcleos de ¹⁴N y ¹⁴C viene dada por las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dN_{14N}}{dt} = -N_{14N}\sigma_1\varphi \qquad (12)$$
$$\frac{dN_{14C}}{dt} = N_{14N}\sigma_1\varphi \qquad (13)$$

En estas ecuaciones podemos observar que la concentración de ¹⁴C va a aumentar producto de la absorción neutrónica en ¹⁴N, por lo que la solución de estas ecuaciones nos permite determinar el comportamiento de la concentración del ¹⁴C con el tiempo.

$$N_{14N}(t) = N_{14N}(0)e^{-\sigma_1\varphi t}$$
(14)
$$N_{14C}(t) = N_{14N}(0)(1 - e^{-\sigma_1\varphi t})$$
(15)

Siendo $N_{14N}(0)$ el número inicial de núcleos de ¹⁴N.

2.3.1 Uracil

Este material se encuentra en estado sólido. Debido a que el uracil es un compuesto molecular pueden además producirse otras reacciones con neutrones de los otros elementos que lo conforman, tales como H y O.

El hidrógeno está constituido por un 99.9 % de 1 H y un 0.01 % de 2 H; para neutrones térmicos tienen las siguientes secciones eficaces:

 ${}^{1}_{1}H + n \rightarrow {}^{2}_{1}H \qquad \qquad \sigma_{1}(v=2200 \text{ m/s}) = 0.3326 \text{ barn}$ ${}^{2}_{1}H + n \rightarrow {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He \qquad \qquad \sigma_{2}(v=2200 \text{ m/s}) = 0.000519 \text{ barn}$

El tritio producido en la segunda reacción para el hidrógeno es inestable y decae por desintegración β ⁻ en 12.33 años a ³He que es estable. Vale aclarar que esta reacción es muy poco probable por el bajo porcentaje que hay de ²H en el hidrógeno y por su pequeña sección eficaz que está 4 órdenes de magnitud por debajo de la del ¹⁴N.

El oxígeno está constituido por 99.76 % de ¹⁶O, 0.04 % de ¹⁷O y 0.2 % de ¹⁸O; las secciones eficaces de estos isótopos para neutrones térmicos son las siguientes:

${}^{16}_{8}0 + n \rightarrow {}^{17}_{8}0$	$\sigma_1(v=2200 \text{ m/s}) = 0.0001 \text{ barn}$
${}^{17}_{8}0 + n \rightarrow {}^{18}_{8}0$	$\sigma_2(v=2200 \text{ m/s}) = 0.236 \text{ barn}$
${}^{18}_{8}O + n \rightarrow {}^{19}_{8}O \rightarrow {}^{19}_{9}F$	$\sigma_3(v=2200 \text{ m/s}) = 0.00016 \text{ barn}$

El ¹⁹O producido en la tercera reacción es inestable y decae por desintegración β ⁻ en 26.91 segundos a ¹⁹F que es estable. Similar al caso anterior esta reacción es muy poco probable debido al bajo porcentaje del ¹⁸O y a la baja sección eficaz que es 4 órdenes de magnitud más pequeña que la del ¹⁴N.

Vale señalar que en todos los casos la sección eficaz del ¹⁴N es mayor que la de los isótopos presente tanto en el hidrógeno como en el oxígeno, por lo que la absorción de neutrones en ¹⁴N no se verá afectada por la presencia de estos elementos en el compuesto molecular.

A continuación se muestran las fracciones de cada uno de los componentes del uracil:

$\omega_1 = 0.33$	(fracción de carbono en la muestra)

- $\omega_2 = 0.33$ (fracción de hidrógeno en la muestra)
- $\omega_3 = 0.17$ (fracción de nitrógeno en la muestra)
- $\omega_4 = 0.17$ (fracción de oxígeno en la muestra)

En este caso solo nos interesan ω_1 y ω_3 . Tomando en cuenta el peso molecular del compuesto entonces:

 $\alpha = \frac{m}{_{112.09 \cdot N_A}}$

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2.6.



Figura 2.6: Relación N14c/N12c a partir de la irradiación de uracil con neutrones.

Como se observa en la Figura 2.6 para tiempos de 1 segundo de irradiación ya se alcanzan valores considerables en la concentración relativa N_{14C}/N_{12C} , alcanzándose concentraciones dentro del orden de 10^{-11} para 3 segundos de irradiación.

Siguiendo el mismo procedimiento podemos estudiar el comportamiento de la phyridine, la thiamina y la thymine.

2.3.2 Phyridine

Este compuesto se encuentra en estado líquido y la fracción de cada uno de sus componentes se muestra a continuación:

- $\omega_1 = 0.45$ (fracción de carbono en la muestra)
- $\omega_2 = 0.45$ (fracción de hidrógeno en la muestra)
- $\omega_3 = 0.1$ (fracción de nitrógeno en la muestra)

En este caso solo nos interesan ω_1 y ω_3 . Tomando en cuenta el peso molecular del compuesto entonces:



Figura 2.7: Relación N14c/N12c a partir de la irradiación de pyridine con neutrones.

Como se observa en la Figura 2.7, tras 1 segundo de irradiación ya se alcanzan niveles del orden de 10⁻¹¹, alcanzándose el mayor valor dentro del orden de 10⁻¹¹ a los 7 segundos.

2.3.3 Thiamine

Este compuesto se encuentra en estado sólido y la fracción de cada uno de los elementos que lo constituyen se muestra a continuación.

$\omega_1 = 0.33$	(fracción de carbono en la muestra)
-------------------	-------------------------------------

 $\omega_2 = 0.46$ (fracción de hidrógeno en la muestra)

 $\omega_3 = 0.05$ (fracción de cloro en la muestra)

 $\omega_4 = 0.1$ (fracción de nitrógeno en la muestra)

 $\omega_5 = 0.03$ (fracción de oxígeno en la muestra)

 $\omega_6 = 0.03$ (fracción de azufre en la muestra)

En este caso solo nos interesan ω_1 y ω_4 . Tomando en cuenta el peso molecular del compuesto entonces:

$$\alpha = \frac{m}{337.17 \cdot N_A}$$

En este caso ocurren dos reacciones adicionales por la aparición de nuevos elementos en la composición del material, azufre (S) y cloro (Cl). El S tiene cuatro isótopos estables, el 32 S en una abundancia del 95.02 %, tenemos de 33 S un 0.75 %, de 34 S un 4.21 % y de 36 S un 0.02 %. Las reacciones de captura neutrónica se listan a continuación con su respectiva sección eficaz:

$^{32}_{16}S + n \rightarrow$	³³ ₁₆ S	$\sigma_1(v=2200 \text{ m/s}) = 0.54 \text{ barn}$
$^{33}_{16}S + n \rightarrow$	³⁴ ₁₆ S	$\sigma_2(v=2200 \text{ m/s}) = 0.54 \text{ barn}$
$^{34}_{16}S + n \rightarrow$	$^{35}_{16}S \rightarrow ^{35}_{17}Cl$	$\sigma_3(v=2200 \text{ m/s}) = 0.227 \text{ barn}$
$^{36}_{16}S + n \rightarrow$	$^{37}_{16}S \rightarrow ^{37}_{17}Cl$	$\sigma_4(v=2200 \text{ m/s}) = 0.15 \text{ barn}$

Como se observa las únicas reacciones que producen isótopos inestables son las dos últimas, el ³⁵S que decae en 87.51 días a ³⁵Cl por desintegración β : este pudiera llegar a ser un inconveniente para el uso de este material aunque la sección eficaz para esta reacción es aproximadamente 8 veces menor que para el nitrógeno. Por otro lado tenemos el ³⁷S que decae a en 5.05 minutos a ³⁷Cl también por desintegración β ⁻.

El cloro tiene dos isótopos estables, el ³⁵Cl en una abundancia del 75.77 % y el ³⁷Cl en una abundancia de 24.23 %. La absorción de neutrones de estos se producen con las siguientes secciones eficaces.

 $\begin{array}{ll} {}^{35}_{17}Cl + n \ \to \ {}^{36}_{17}Cl \ \to \ {}^{36}_{18}Ar & \sigma_1(v{=}2200 \ {\rm m/s}) = 44.1 \ {\rm barn} \\ {}^{35}_{17}Cl + n \ \to \ {}^{36}_{17}Cl \ \to \ {}^{36}_{16}S \end{array}$

 $^{37}_{17}Cl + n \rightarrow ^{38}_{17}Cl \rightarrow ^{38}_{18}Ar$ $\sigma_2(v=2200 \text{ m/s}) = 0.433 \text{ barn}$

En ambos casos se producen isótopos inestables, en la primera reacción ³⁶Cl que decae en 3.01×10^5 años a través de decaimiento β · a ³⁶Ar o por captura electrónica a ³⁶S; esta reacción de captura neutrónica representa un gran inconveniente para la utilización de este compuesto debido a que su sección eficaz es mucho mayor que para el nitrógeno y a que la mayor parte del cloro es ³⁵Cl. El otro isótopo que se produce es el ³⁷Cl el cual tiene una vida media de 37.24 minutos, este decae a ³⁸Ar a través de la desintegración β ·.

Pese a las inconveniencias de este material se calculó la variación en la concentración relativa N_{14C}/N_{12C} a partir de la irradiación con neutrones, estas se muestran en la Figura 2.8, observándose valores del orden de 10^{-11} luego de 1 segundo de irradiación y alcanzándose la mayor concentración dentro del orden de 10^{-11} a los 4 segundos.



Figura 2.8: Relación N_{14C}/N_{12C} a partir de la irradiación de thiamine con neutrones.

2.3.4 Thymine

Al igual que el uracil y la phyridine se encuentra en estado sólido, su composición se encuentra distribuida como se describe a continuación:

- $\omega_1 = 0.33$ (fracción de carbono en la muestra)
- $\omega_2 = 0.4$ (fracción de hidrógeno en la muestra)
- $\omega_3 = 0.13$ (fracción de nitrógeno en la muestra)
- $\omega_4 = 0.13$ (fracción de oxígeno en la muestra)

En este caso solo nos interesan ω_1 y ω_3 . Tomando en cuenta el peso molecular del compuesto entonces:



Figura 2.9: Relación N14c/N12c a partir de la irradiación de thymine con neutrones.

La composición de este material es similar a la del uracil y se observa un comportamiento similar, transcurrido 1 segundo de irradiación se alcanzan valores de la concentración relativa N_{14C}/N_{12C} en el orden 10^{-11} , alcanzándose el mayor valor dentro de este orden en 3 segundos.

2.4 Selección de los materiales a irradiar, instalaciones y tiempos de irradiación

A partir de los estudios realizados para ambas reacciones se determinó el uso de grafito natural para la reacción¹³C(n, γ)¹⁴C y de uracil para la reacción ¹⁴N(n,p)¹⁴C. Esto se debe en el primer caso a que se determinó que no era necesario enriquecer el grafito en ¹³C para alcanzar las concentraciones de ¹⁴C de nuestro interés y en el segundo caso, dado que la pyridine se encuentra en estado líquido y la thiamine presenta, inconvenientes anteriormente argumentados, nos inclinamos hacia el uracil y la thymine, seleccionándose el uracil por los resultados que obtuvimos en los cálculos para este material y por la facilidad para adquirirlo comercialmente.

Nuestra propuesta fue irradiar el grafito en la posición de irradiación B-1, donde el flujo de neutrones térmicos es de 2.3×10^{13} n/s·cm² y el uracil en el Sistema de Irradiación Neumático de Cápsulas (SINCA) donde el flujo de neutrones térmicos es de 4.42×10^{12} n/s·cm², pues este último cuenta con un sistema neumático que nos permite introducir

y extraer la muestra desde la terminal del laboratorio mientras el reactor se encuentra operando, por lo que es idóneo para muestras que serán expuestas por cortos periodos de tiempo.

Veamos ahora cómo se comporta la concentración de ¹⁴C en el tiempo para los flujos dados en cada uno de las posiciones de irradiación en las cuáles proponemos irradiar las muestras. Este comportamiento se expone en las Figuras 2.10 y 2.11.



*Figura 2.10: Cálculo de la relación N*_{14C}/N_{12C} a partir de la irradiación de grafito natural con neutrones en la posición de irradiación B1.



*Figura 2.11: Cálculo de la relación N*_{14C}/*N*_{12C} *a partir de la irradiación de uracil con neutrones en el SINCA.*

Como se puede observar, en el caso del grafito basta con irradiar 10 horas la muestra para alcanzar concentraciones del orden de 10⁻¹¹, mientras que en principio el uracil se alcanzan estos niveles entre 3 y 23 segundos de irradiación. En el caso del uracil irradiamos la muestra durante 20 segundos, pues dado que la concentración de ¹⁴C varía considerablemente en 1 segundo no es conveniente irradiar por un período de tiempo muy pequeño pues sería una exposición menos precisa que para un tiempo mayor, en tanto, 23 segundos está en el límite del orden de 10⁻¹¹, por lo que consideramos que el tiempo óptimo sería 20 segundos donde podremos tener un tiempo de exposición más preciso y es menos probable que se salga de los valores del número de núcleos de ¹⁴C que esperamos que se produzcan.

2.5 Efecto de los rayos gamma producidos en el reactor en las muestras a irradiar

Durante el proceso de irradiación de las muestras en el reactor, además de los neutrones presentes existen rayos gamma que se producen de las diversas reacciones que ocurren en el núcleo del reactor y su entorno. En principio podrían ocurrir reacciones de fotodesintegración en el ¹³C, ¹⁴Cy el ¹⁴N debido a su interacción de estos rayos gamma. Esto, eventualmente, afectaría las concentraciones de ¹⁴C producidas durante la irradiación de las muestras con neutrones, y, por tanto, mediríamos concentraciones relativas ¹⁴C/¹²C que no corresponden a la que realmente se produjeron a partir de las reacciones ¹²C(n, γ)¹³C, ¹³C(n, γ)¹⁴C y ¹⁴N(n, p)¹⁴C, lo cual trae como consecuencia que determinemos una sección eficaz errónea para estas reacciones. Veamos entonces cómo se comporta la sección eficaz para las reacciones ¹³C(γ , n)¹²C, ¹⁴C(γ , n)¹³C, y ¹⁴N(γ , n)¹³N.



Figura 2.12. Comportamiento de la sección eficaz para la reacción ¹³C(γ, n)¹²C.



Figura 2.13. Comportamiento de la sección eficaz para la reacción ¹⁴C(γ, n)¹³C.



Figura 2.14. Comportamiento de la sección eficaz para la reacción ¹⁴N(γ, n)¹³N.

Como se puede observar en las Figuras 2.12, 2.13 y 2.14, se necesitan rayos gamma con energías muy altas (del orden de 5 a 20 MeV según sea el caso) para que puedan producirse las reacciones inversas. Debido a que en el Reactor Nuclear del ININ no se producen rayos gamma con esas energías, podemos entonces descartar la ocurrencia de las reacciones ${}^{13}C(\gamma, n){}^{12}C$, ${}^{14}C(\gamma, n){}^{13}C$ y ${}^{14}N(\gamma, n){}^{13}N$.

3. Metodología

Con el presente trabajo lo que se quiere es poder determinar de forma experimental las secciones eficaces de las reacciones nucleares ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ y ${}^{14}N(n,p){}^{14}C$. Para este estudio se utilizan neutrones térmicos (con energía promedio de 25 meV) provenientes del reactor TRIGA Mark III del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares; el flujo máximo de neutrones térmicos es de 3.3×10^{13} n/s·cm² en el dedal central, otras posiciones de interés son la posición de irradiación B-1 donde el flujo es de 2.3×10^{13} n/s·cm² y el sistema de irradiación SINCA donde el flujo es de 4.42×10^{12} n/s·cm². Para un estudio más detallado analizaremos ambas reacciones por separado.

3.1 Caso 1: ¹³C(n,γ)¹⁴C

Esta reacción está dada por la captura radiativa de un neutrón en el núcleo de ¹³C, el cual da lugar a un núcleo de ¹⁴C en un estado excitado, emitiendo radiación gamma y decae a ¹⁴N por desintegración β .

 ${}^{13}_{6}C + n \rightarrow {}^{14}_{6}C + \gamma \qquad \sigma_2(v=2200 \text{ m/s}) = 0.00137 \text{ barn}$

Como se puede observar la sección eficaz de absorción de neutrones térmicos en ¹³C es bastante baja pero como su abundancia en las estrellas es muy grande, como mencionamos anteriormente, éste representa un veneno potencial para los neutrones que podrían ser promotores del proceso s de la nucleosíntesis. Dado que el tiempo de vida media del ¹⁴C es de 5730 años, prácticamente puede considerarse estable.

3.2 Caso 2: ¹⁴N(n,p)¹⁴C

Esta reacción, inducida por un neutrón sobre un blanco de ¹⁴N, da como resultado un núcleo de ¹⁴C y un protón.

$$^{14}_{7}N + n \rightarrow ^{14}_{6}C + p$$
 $\sigma_1(v=2200 \text{ m/s}) = 1.91 \text{ barn}$

Como se puede observar, esta reacción tiene una sección eficaz mayor que la anterior en tres órdenes de magnitud, y aunque sigue siendo baja, debido a la gran abundancia de ¹⁴N en las estrellas, este representa el principal veneno potencial para los neutrones del proceso s de la nucleosíntesis.

3.3 Procedimiento experimental

Una vez que fueron determinados los blancos a irradiar pasamos a la primera fase experimental, esta etapa se desarrolló en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

3.3.1 Irradiación de las muestras

En el ININ se cuenta con un reactor TRIGA Mark III, este es un reactor de investigación tipo alberca con núcleo movible enfriado y moderado con agua ligera. La potencia máxima nominal del reactor es de 1 MW en operación en modo estacionario y puede ser pulsado a una potencia máxima de 2,000 MW por aproximadamente 10 milisegundos. El núcleo del reactor es un arreglo circular de elementos combustibles, barras de control, elementos de grafito e instalaciones experimentales donde se alcanzan flujos térmicos de hasta 3.3×10^{13} n/cm²·s en modo estacionario. Los combustibles están distribuidos en 5 círculos concéntricos conocidos como anillos, alrededor de una posición experimental central, llamada también Dedal Central. El sexto anillo, está ocupado por los elementos de grafito (reflectores) y dos espacios de irradiación (uno ocupado por la Cámara de Ionización Gamma y otro por el Sistema Neumático de Irradiación de Muestras).

Como se muestra en la Figura 3.1, cada uno de los anillos está denominado con una letra y cada uno de las posiciones de ese mismo anillo con números secuenciales, de modo que cada posición dentro del núcleo tiene una identificación única.



Figura 3.1. Distribución del núcleo del reactor [20].

Para iniciar la reacción en cadena se utiliza una fuente de americio-berilio con una actividad nominal de 2.78 Ci; el decaimiento del americio produce partículas alfa, las cuales, son absorbidas por el berilio suministrando el nivel necesario de neutrones para iniciar la operación del reactor.

El reactor TRIGA Mark III está diseñado para operar enfriándose por convección natural de agua desmineralizada de la alberca del reactor que contiene aproximadamente 150 m³ de agua.

Uno de las posiciones que utilizaremos para irradiar nuestras muestras es el puerto de irradiación B-1, este está ubicado muy cerca al centro del núcleo del reactor por lo que en esta posición encontramos uno de los flujos de neutrones más elevados en el reactor. Esta instalación se extiende desde el puente del reactor por la placa superior del núcleo, por lo que las muestras se colocan y se retiran desde el puente de forma manual.

Por otro lado se encuentra el Sistema de Irradiación Neumático de Cápsulas (SINCA), este es un sistema de transferencia neumática de alta velocidad que está colocado en el anillo de los elementos de grafito del núcleo del reactor, en la posición G7. Con el SINCA, se envían muestras al núcleo del reactor y se recuperan después de la irradiación en tres estaciones de envío localizadas en igual número de laboratorios. Su operación puede ser automática o manual; en el primer caso, se fija el tiempo de irradiación y al concluir éste, el sistema regresa la muestra a la estación de envío [20][21].

La posición de irradiación B1 se utiliza para irradiaciones largas, llegando a alcanzar tiempos de irradiación de hasta 20 horas de forma rutinaria, aunque no existe límite de tiempo de irradiación en esta posición. Por su parte, el sistema neumático se utiliza para irradiaciones cortas, donde el máximo de tiempo de irradiación es de 15 minutos pues esta terminal se encuentra en un espacio muy limitado, y el manejo de la muestra representa un riesgo radiológico.

3.3.2 Espectrometría de masas con aceleradores

La espectrometría de masas con aceleradores (AMS) es una técnica ultrasensible para el análisis isotópico en el cual los átomos extraídos de una muestra son ionizados; acelerados a altas energías; separados según su momento, carga y energía; y contados individualmente después de ser identificados, teniendo en cuenta el número atómico correspondiente y la masa. La diferencia principal entre AMS y la espectrometría de masa convencional (MS) radica en las energías a las que se aceleran los iones. En MS, la energía es de miles de electrones voltios (1 keV = $1,6 \times 10^{-16}$ J), mientras que en AMS son millones de electrones voltios (MeV), obtenidos mediante el uso de aceleradores de iones diseñados originalmente para la investigación en física nuclear. La consecuencia práctica de tener energías superiores es que se eliminan las ambigüedades en la identificación de iones atómicos y moleculares con la misma masa. Esto ha permitido que los sistemas AMS se utilicen para medir las relaciones isotópicas para elementos específicos a un nivel de 1 en 10¹⁵, un factor de 10⁵ más bajo que en la mayoría de los sistemas MS. Además, esta sensibilidad puede alcanzarse para tamaños de muestra de 1 mg o menos (que contienen sólo unos 10⁶ átomos del isótopo de interés), en un tiempo de medición de 1 hora. Sólo el costo y la complejidad técnica establecen un límite para el uso generalizado de los sistemas AMS.

La técnica AMS es ahora una herramienta analítica poderosa y sofisticada con aplicaciones de gran alcance descritas en artículos de revisión (Litherland, 1980, Brown, 1984, Elmore, 1987a, Kutschera, 1990, Suter, 1990, Finkel y Suter, 1993, Paul, 1993) y actas de congresos (Gove, 1978, Henning et al., 1981a, Wolfli et al., 1984, Gove et al., 1987, Litherland et al., 1987, Yiou y Raisbeck, 1990, Fifiled et al., 1994, Jull et al. Al., 1997).

Sin lugar a dudas, el principal logro de la AMS ha sido la medición de una serie de radioisótopos que pueden medirse de forma rutinaria (¹⁰Be, ¹⁴C, ²⁶Al, ³⁶Cl, ⁴¹Ca y ¹²⁹I); entre estos radionúclidos el ¹⁴C ocupa el puesto de honor. Fue el primero en ser medido por técnicas de conteo a finales de los años cuarenta, el ¹⁴C ha encontrado continuamente nuevas aplicaciones en disciplinas tan diversas como la arqueología, la geología, las ciencias ambientales y la biomedicina. La importancia de la AMS en el estudio del ¹⁴C puede ser apenas exagerada. Solo por citar un ejemplo, podemos mencionar la datación por radiocarbono [22]–[24].

La datación por radiocarbono es una técnica basada precisamente en el conteo de núcleos de ¹⁴C en una muestra. La abundancia natural del ¹⁴C es de 1×10⁻¹⁰ %, tiene un periodo de semidesintegración de 5730±40 años y podría haber desaparecido de la Tierra hace mucho tiempo si no fuera por los constantes impactos de rayos cósmicos sobre el dinitrógeno (N₂) presente en la atmósfera. Este proceso se inicia cuando los rayos cósmicos inciden sobre la atmósfera terrestre, provocando varias reacciones nucleares, algunas de las cuales producen neutrones, los cuales reaccionan con algunos átomos de las moléculas de N₂ en la atmósfera: ¹⁴N(n,p)¹⁴C. El ¹⁴C se distribuye uniformemente sobre la atmósfera y reacciona con el dioxígeno para formar dióxido de carbono (CO₂). Este CO₂ también es absorbido por los océanos, disolviéndose en el agua. El proceso de fotosíntesis incorpora el átomo radiactivo de carbono a las plantas de manera que la proporción ¹⁴C/¹²C en éstas es similar a la atmosférica. Los animales incorporan, por ingestión, el carbono de las plantas, por lo que la proporción también es similar. Sin embargo, tras la muerte de un organismo vivo no se incorporan nuevos átomos de ¹⁴C a los tejidos y la concentración del isótopo ¹⁴C va decreciendo conforme se transforma en ¹⁴N a través de decaimiento β . Dado que este decaimiento es de forma exponencial, es decir, que la tasa de decaimiento disminuye de forma proporcional al número de átomos restantes, siendo esta constante de proporcionalidad la constante de desintegración radiactiva, entonces podemos conocer la edad radiológica (medida en años de radiocarbono) de una muestra, de aquí que posteriormente podemos obtener la edad cronológica, corrigiendo los valores obtenidos previamente mediante las correspondientes curvas de calibración. Esta última corrección se debe a que en un principio se había considerado de forma aproximada que el flujo de rayos cósmicos era constante durante largos períodos y, por tanto, que el ¹⁴C se producía a un ritmo constante. Pero en 1958, Hessel de Vries, demostró que la concentración de ¹⁴C en la atmósfera varía con el tiempo y de forma local. Así, para dataciones más precisas, estas variaciones deben ser consideradas mediante curvas de calibración.

Debido a las facilidades que ofrece la técnica AMS, esta constituye una técnica muy convincente para desarrollar la segunda fase de nuestro experimento, ya que, esta consiste en determinar relaciones N_{14C}/N_{12C} .

Una vez que las muestras son irradiadas entonces nos disponemos a desarrollar la segunda etapa de la fase experimental, como se mencionó anteriormente esta consiste en determinar las concentraciones relativas N_{14C}/N_{12C} de las muestras irradiadas, para ello utilizaremos la técnica de espectrometría de masa con aceleradores, esta etapa se desarrolla en el Laboratorio de Espectrometría de Masa con Aceleradores (LEMA) situado en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM).

LEMA está equipado con un separador isotópico el cual está compuesto por tres partes principales, zona de baja energía, acelerador tipo tándem y zona de alta energía, tal y como se muestra en la Figura 3.2. La entrada de las muestras al sistema se lleva a cabo a través de un carrusel el cual tiene 50 posiciones donde se colocan los cátodos (que contienen el material a analizar) que posteriormente son empujados mediante una bayoneta para ingresarlos a la fuente de iones.



Figura 3.2. Separador isotópico [22].

Una vez que los cátodos son ingresados en la fuente de iones comienza el proceso en la zona de baja energía, aquí se encuentra la fuente de cesio (Cs) que produce la ionización del haz. En este punto el Cs es calentado, ionizando y posteriormente enfocado hacia el cátodo a través de un ionizador parabólico, al producirse la erosión catódica los átomos de carbono y otras partículas que conforman la muestra son arrancadas de esta y ionizados nuevamente, los iones negativos son atraídos por el cono de atracción formando el haz de interés.

Posteriormente el haz pasa a través de una lente tipo Einzel para ser focalizado sin variar su energía, luego es sometido a un deflector electrostático lo que garantiza la focalización horizontal y vertical. Posteriormente el haz es focalizado nuevamente por una lente tipo Einzel y un tubo de dirección, desviándose el haz del plano vertical y de esta forma haciendo coincidir la trayectoria del haz con el centro del tubo de conducción.

Justo antes de entrar al acelerador, el haz es sometido a un sistema de inyección secuencial, cuya función es aplicar un potencial electrostático por medio de dos placas planas para así seleccionar diferentes isótopos que serán inyectados al acelerador en diferentes intervalos de tiempo. Junto al sistema de inyección está localizado un deflector magnético, el cual aplica un campo magnético con el objetivo de hacer rotar los iones cambiando su trayectoria (rigidez magnética $R = B \cdot \rho$, siendo B el campo magnético y ρ el radio de curvatura).

Una vez dentro del acelerador, el haz es acelerado y dirigido a la terminal de alto voltaje, donde los iones negativos son despojados de electrones mediante colisiones con argón, sufriendo un cambio en el signo de su carga eléctrica y por ende experimentando una segunda aceleración. Por otro lado, en esta etapa las moléculas que lograron pasar el primer filtro ubicado en la zona de baja energía se disocian.

Luego de que el haz es acelerado, éste entra en la zona de alta energía, aquí atraviesa una lente cuadrupolar, la cual lo enfoca en una dirección ya sea vertical u horizontal sin alterar su energía. Luego, para conseguir un efecto donde el haz esté totalmente focalizado, se le hace pasar por una segunda lente cuadrupolar que tenga los gradientes inversos.

Una vez que el haz es totalmente focalizado se hace pasar por un segundo deflector magnético, en el que se seleccionan los valores de EM/q^2 , específicos al estado de carga q=+2, M=14 y la energía E, provista por la diferencia de potencial del acelerador.

A continuación el haz pasa al sistema de detección, el cual está constituido por dos cajas Faraday para medir la corriente de ¹²C y ¹³C.

Para medir el número de átomos de ¹⁴C, el haz se somete a un segundo deflector electrostático, el cual sirve como filtro para homogeneizar el valor E/q, con el valor q=+2 y la energía E. Posteriormente el haz es dirigido hacia una cámara de ionización llena de gas isobutano, el cual frena las partículas al mismo tiempo que se ioniza y se colectan los iones en dos electrodos en el interior de la cámara [22].

3.4 Cálculo de la sección eficaz de absorción para neutrones térmicos de las reacciones ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C y {}^{14}N(n,p){}^{14}C$

Una vez obtenida las relaciones de N_{14C}/N_{12C} y N_{13C}/N_{12C} en la muestra de grafito, la sección eficaz experimental de absorción para neutrones térmicos para la reacción ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ puede obtenerse a partir de las siguientes ecuaciones (derivadas a partir de las ecuaciones presentadas en la sección 2.1):

$$\frac{N_{14C}}{N_{12C}} = \left[\frac{\sigma_1}{\sigma_2 - \sigma_1} - \frac{N_{13C}^0}{N_{12C}^0}\right] \left[e^{(\sigma_1 - \sigma_2)\varphi t} - e^{\sigma_1 \varphi t}\right] + \frac{\sigma_2}{\sigma_2 - \sigma_1} \left[e^{\sigma_1 \varphi t} - 1\right]$$
(16)

$$\frac{N_{13C}}{N_{12C}} = \frac{N_{13C}^0}{N_{12C}^0} e^{(\sigma_1 - \sigma_2)\varphi t} - \frac{\sigma_1}{\sigma_2 - \sigma_1} e^{(\sigma_1 - \sigma_2)\varphi t} + \frac{\sigma_1}{\sigma_2 - \sigma_1}$$
(17)

Como se observa las secciones eficaces σ_1 y σ_2 , ambas están implícitas en las ecuaciones, por lo que se requerirá calcular primero σ_1 para luego obtener σ_2 ; estas dos secciones eficaces corresponden a las reacciones ${}^{12}C(n,\gamma){}^{13}Cy$ ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ respectivamente.

Por otro lado necesitamos calcular la sección eficaz de la reacción ¹⁴N(n,p)¹⁴C, esta la podemos obtener a partir de la ecuación siguiente, donde σ_3 representa la sección eficaz de dicha reacción:

$$\sigma_{3} = -\frac{1}{\varphi t} Ln \left(1 - \frac{N_{14C}/N_{12C}}{N_{14N}^{0}/N_{12C}^{0}} \right)$$
(18)

Para poder obtener la relación N_{14N}^0/N_{12C}^0 que aparece en la ecuación (18) y proceder al cálculo de la sección eficaz de la reacción ¹⁴N(n,p)¹⁴C, partiremos de la composición molecular del uracil. La fórmula química del uracil es C₄H₄N₂O₂, de aquí podemos deducir que hay dos átomos de C por cada uno de N. Si tomamos en cuenta que las proporciones de ¹²C en el C y de ¹⁴N en el N son: 98.9% y 99.34 % respectivamente, entonces podemos llegar a la relación N_{14N}^0/N_{12C}^0 .

$$\frac{N}{C} = \frac{1}{2} = \frac{0.9934N_{14N}^0}{0.989N_{12C}^0}$$

De donde: $\frac{N_{14N}^0}{N_{12C}^0} = 0.4978$

1

4. Experimento

La fase inicial del experimento se desarrolló en el reactor nuclear TRIGA Mark III del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, utilizando de este los neutrones producidos para inducir las reacciones que queremos estudiar. En este punto el primer paso fue preparar las muestras a irradiar.

4.1 Preparación de muestras para irradiar

Este proceso comenzó con la preparación de las muestras para ser introducidas en los respectivos puertos de irradiación del reactor. En ambos casos utilizamos doble contención. Para el uracil utilizamos un primer contenedor de polietileno el cual tiene forma cilíndrica y un segundo contenedor del mismo material y forma pero con mayores dimensiones, en este caso fue posible utilizar contenedores de polietileno debido al corto tiempo de irradiación y a que se utilizó el SINCA.

En este caso procedemos a la preparación de muestras, primeramente se pesaron las cantidades que se iban a irradiar (100 mg) y luego se introdujo el uracil dentro del primer contenedor, este se selló al calor quedando herméticamente cerrado, luego se introdujo dentro del segundo contenedor el cual posee cierre con rosca.

En el caso del grafito, debido a que requiere un mayor tiempo de irradiación utilizamos contenedores de otros materiales, pues los contenedores de polietileno se utilizan para irradiaciones de no más de 3 horas. El primer contenedor es una ampolleta de cuarzo, igualmente se pesó (100 mg) y se introdujo el material a irradiar dentro de la ampolleta y se selló al calor quedando herméticamente cerrado, el segundo contenedor es de aluminio, el cual cierra con rosca. En este caso se introdujo un pequeño cilindro de plomo para evitar que la muestra flotara una vez dentro del reactor.



Figura 4.1: Contenedores que se utilizan para introducir las muestras a irradiar.

En ambos casos tenemos nuevos materiales los cuales se activan al ser irradiados con neutrones. En el caso del cuarzo se trata de SiO₂, la reacción con el oxígeno fue analizada sección 2.3.1, veamos cómo se comporta el silicio. El silicio aparece en la naturaleza en

tres isótopos estables, ²⁸Si un 92.23 %, ²⁹Si un 4.67 % y ³⁰Si un 3.1 %, las reacciones que podemos esperar con neutrones son las siguientes:

${}^{28}_{14}Si + n \rightarrow {}^{29}_{14}Si$	$\sigma_1(v=2200 \text{ m/s}) = 0.177 \text{ barn}$
$^{29}_{14}Si + n \rightarrow ^{30}_{14}Si$	$\sigma_2(v=2200 \text{ m/s}) = 0.101 \text{ barn}$
$^{30}_{14}Si + n \rightarrow ^{31}_{14}Si \rightarrow ^{31}_{15}P$	$\sigma_3(v=2200 \text{ m/s}) = 0.107 \text{ barn}$

Como se puede observar en las dos primeras reacciones aparecen elementos estables como producto de la irradiación del cuarzo. En la tercera ya aparece el ³¹Si que es inestable con un tiempo de vida media de 157.3 minutos decayendo por emisión β ⁻ a ³¹P que es estable. Debido a su rápido decaimiento este no representa un problema.

Para el caso del contenedor de aluminio tenemos que este aparece de forma natural como ²⁷Al en un 100 % y la reacción con neutrones viene dada como:

$$^{27}_{13}Al + n \rightarrow ^{28}_{13}Al \rightarrow ^{28}_{14}Si$$
 $\sigma_1(v=2200 \text{ m/s}) = 0.231 \text{ barm}$

En este caso se forma ²⁸Al que es inestable y este a su vez decae por emisión β - a ²⁸Si en 2.24 minutos por lo que tampoco representa un problema.

Como ya habíamos mencionado anteriormente en este contenedor se introducirá un pequeño cilindro de plomo para evitar que el contenedor del material a irradiar flote. El plomo aparece de forma natural como ²⁰⁴Pb en un 1.4 %, ²⁰⁶Pb en un 21.4 %, ²⁰⁷Pb en un 22.1 % y ²⁰⁸Pb en un 52.4 %. Las posibles reacciones con neutrones son las siguientes.

${}^{204}_{82}Pb + n \rightarrow {}^{205}_{82}Pb \rightarrow {}^{205}_{81}Tl$	$\sigma_1(v=2200 \text{ m/s}) = 0.65 \text{ barn}$
$^{206}_{82}Pb + n \rightarrow ~^{207}_{82}Pb$	$\sigma_2(v=2200 \text{ m/s}) = 0.03 \text{ barn}$
$^{207}_{82}Pb + n \rightarrow ^{208}_{82}Pb$	$\sigma_3(v=2200 \text{ m/s}) = 0.699 \text{ barn}$
${}^{208}_{82}Pb + n \rightarrow {}^{209}_{82}Pb \rightarrow {}^{209}_{83}Bi$	$\sigma_4(v=2200 \text{ m/s}) = 0.00048 \text{ barn}$

En la primera reacción se forma ²⁰⁵Pb que es inestable y tiene un tiempo de vida media de 15300000 años, este pasa a ser ²⁰⁵Tl por captura electrónica el cual es estable. En la segunda y tercera reacción se obtienen ²⁰⁷Pb y ²⁰⁸Pb y ambos son estables. Por su parte en la cuarta reacción aparece otro isótopo inestable, el ²⁰⁹Pb con un tiempo de vida media de 3.25 horas decayendo por emisión β - a ²⁰⁹Bi que es estable.

Por último analizamos los contenedores de polietileno, este material está constituido por hidrógeno y carbono, las reacciones de estos dos núcleos con neutrones ya fueron estudiadas anteriormente y no representan problema alguno pues en ambos casos los isótopos inestables que se forman son ¹⁴C con un tiempo de vida media de 5730 años y cantidades despreciables de ³H con un tiempo de vida media de 12.33 años.

En ambos casos solo transportaremos hacia el Instituto de Física UNAM los contenedores internos, los cuales están constituidos por cuarzo y polietileno por lo que en lo adelante solo tomaremos en cuenta los materiales de estos contenedores.

4.1.1 Cálculo de la actividad de los productos de la reacción

Conocemos que la actividad (A) es el número de desintegraciones por unidad de tiempo, esto, matemáticamente puede expresarse como sigue:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \tag{19}$$

Siendo λ la constante de desintegración radiactiva y N el número de núcleos.

Sabiendo que la constante de desintegración radiactiva va como el inverso del tiempo de la vida media $t_{1/2}$, entonces podemos plantear lo siguiente:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \tag{20}$$

y por tanto:

$$A = \frac{N \cdot ln2}{t_{1/2}} \tag{21}$$

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Isótopos radiactivos producidos en las reacciones de grafito y uracil con neutrones térmicos.

Blanco	+ n	Ν	t _{1/2} (s)	A ₀ (Ci)	Producto	t _d (s)	A (Ci)
¹³ C	¹⁴ C	5.78E+11	1.81E+11	8.65E-11	^{14}N	6.05E+05	8.65E-11
² H	зH	1.24E+10	3.89E+08	8.32E-10	³ He	6.05E+05	8.63E-10
¹⁵ N	16 N	9.38E+03	7.13	3.42E-08	¹⁶ 0	6.05E+05	0.00E+00
¹⁸ 0	¹⁹ 0	1.20E+08	26.91	1.16E-04	¹⁹ F	6.05E+05	0.00E+00
³⁰ Si	³¹ Si	5.51E+13	9438	1.58E-01	³¹ P	6.05E+05	8.09E-21

Aquí podemos observar de izquierda a derecha, el núcleo blanco, el núcleo inestable que se produce luego de que ocurre la captura neutrónica con su respectivo tiempo de vida media, su actividad y el producto estable al que decae el núcleo radiactivo. Luego de la irradiación esperamos (td, tiempo de espera para recolectar las muestras una vez que sean irradiadas) una semana antes de recolectar las muestras para que decaigan los núcleos radiactivos (¹⁵N, ¹⁹O y ³¹Si) y al final de la tabla podemos observar la actividad de cada uno de los isótopos remanentes.

4.1.2 Cálculo de la rapidez de exposición

Un importante factor a tomar en cuenta para la manipulación de las muestras una vez irradiadas es la rapidez de exposición debida a la actividad de los diferentes radioisótopos formados. Para este cálculo utilizaremos la siguiente ecuación.

$$X = \frac{\Gamma \cdot A}{r^2} \tag{22}$$

Donde Γ es la gamma específica para la energía de la radiación gamma emitida, A la actividad y r la distancia a la fuente en metros[25]–[27].

Este cálculo se hace con el propósito de determinar cuando la exposición será menor de 100 mr/h a contacto del blindaje y 10 mr/h a 1 m para que el personal de seguridad radiológica del reactor pueda entregar la muestra y se pueda transportar. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.2.

Isótopo	Г (rm2/hCi)	A (kBq)	X a 10 cm (mr/h)	X a 1 m (mr/h)
¹⁴ C	Νογ	2.34E-21	0.00E+00	0.00E+00
³ H	Νογ	2.33E-20	0.00E+00	0.00E+00
¹⁶ N	1.47E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
¹⁹ 0	6.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
³¹ Si	4.83E-04	2.19E-31	1.06E-35	1.06E-37

Tabla 4.2. Rapidez de exposición de los productos de reacción.

Como podemos observar en la Tabla 4.2, luego de una semana de espera, en todos los casos la rapidez de exposición es cero a excepción del ³¹Si aunque se puede considerar prácticamente cero. Esto nos da la certeza de que no existe inconveniente alguno de transportar las muestras luego de una semana después de que se irradiaron.

4.1.3 Irradiación de las muestras

Para la irradiación de la muestras lo primero que hicimos es colocar los contenedores en posición para ser introducidos en la posición de irradiación seleccionada en cada caso. El grafito como ya hemos mencionado se irradió por diez horas en la posición de irradiación B-1 la cual se encuentra en el anillo B del núcleo del reactor. En este caso la muestra se introdujo al núcleo del reactor antes de proceder a encender el reactor, pues el sistema que este posee para introducir la muestra en su interior se accede desde el puente del núcleo del reactor y por tal razón se introduce antes del arrancado para evitar la exposición del personal a elevados niveles de radiación. En el caso del uracil este se introduce desde el Laboratorio de Irradiación de Análisis por Activación en el cual se encuentra ubicado el sistema neumático donde los niveles de radiación son tan bajos que se puede maniobrar mientras el reactor está operando y como además la exposición de esta muestra es de un período de tiempo pequeño es preferible esperar que el reactor haya alcanzado la criticidad a 1 MW de potencia donde tenemos un flujo de neutrones térmicos más estable, esto último se hace para evitar que la muestra se active mientras el reactor sube de potencia.

El encendido del reactor comenzó con la extracción de las barras de control, hecho que permite al reactor obtener una reactividad positiva y comenzar la reacción en cadena. Una vez que el reactor alcanzó la criticidad a 1 MW de potencia y tuvimos un flujo de neutrones térmicos estable nos dirigimos a maniobrar el sistema neumático para irradiar la muestra de uracil. La muestra fue ubicada en el sistema e iniciado el proceso de irradiación, es conocido que este sistema tiene un recorrido de 6 segundos antes de que la muestra llegue al núcleo del reactor e igual tiempo de recorrido al regreso. Midiendo el tiempo con un cronómetro determinamos que la muestra estuvo 31.55 s en el proceso. Si restamos a este tiempo el tiempo de recorrido total que son 12 s vemos que la muestra estuvo en el núcleo del reactor 19.55 s, cercano a los 20 s que habíamos previsto para la irradiación de esta muestra.

Una vez que ambas muestras fueron irradiadas se esperó una semana en el caso del uracil para que decayeran todos los productos de reacción (¹⁵N, ¹⁹O y ³¹Si) y poder transportar la muestra hacia el Instituto de Física de la UNAM donde se desarrolla la segunda parte del experimento. Para el caso del grafito, como fue introducido un pequeño cilindro de plomo dentro del contenedor para evitar que este flotara, fue necesario esperar dos semanas para que disminuyera lo suficiente la actividad del mismo (su tiempo de vida media es de 3.25 horas como habíamos mencionado) y poder manipular la muestra para retirar el contenedor de cuarzo con el grafito y poderlo trasladar hacia el IFUNAM.

4.2 Medición de la relación N14c/N12c

La segunda parte del experimento se desarrolló en el Laboratorio de Espectrometría de Masa con Aceleradores del Instituto de Física de la UNAM. En esta parte del experimento al igual que en la anterior nos disponemos primeramente a preparar las muestras, 8 en total. Las primeras 3 muestras corresponden al material sin irradiar, de éstas 1 es de grafito y dos de uracil; el objetivo de esta medición es determinar las concentraciones iniciales de cada uno de los núcleos existentes en el material a irradiar. Las otras 5 muestras corresponden a material irradiado, de estas muestras son 2 de grafito y 3 de uracil.

4.2.1 Preparación de muestras y determinación de la concentración relativa N14C/N12C

Una vez que tuvimos listo todo el material para preparar las muestras nos dispusimos a la preparación de los cátodos. En este proceso utilizamos una balanza en la cual podemos medir la cantidad de material que vamos a poner en los cátodos; en cada uno de los cátodos que preparamos pusimos 1 mg de material con 5 mg de Fe; el objetivo de colocar hierro en los cátodos es aumentar la corriente para obtener una mejor precisión de la medición. Una vez que los cátodos estuvieron listos los pusimos en el porta cátodos, el cual nos permite colocar las muestras en el carrusel para proceder a la medición. En la Figura 4.2 podemos observar el cátodo colocado en el porta cátodos antes de ser introducido en el separador isotópico.

Posteriormente se desarrolló el procedimiento para la medición y obtención de las concentraciones relativas N_{14C}/N_{12C} , tal y como se describió en la sección 2.3.2.



Figura 4.2: Contenedores que se utilizan para introducir las muestras a irradiar.

5. Análisis de Datos y Resultados

5.1 Datos obtenidos en LEMA

Antes de irradiar las muestras, se tomaron mediciones de cada uno de los materiales sin irradiar, fueron analizados exactamente tres cátodos sin irradiar, uno de grafito *(Grafito-ni1)* y dos de uracil *(Uracil-ni1 y Uracil-ni2)*, esto nos permitió conocer exactamente cuáles eran las concentraciones reales de cada isótopo en el material a irradiar. En las Figuras 5.1 y 5.2 muestran los espectros E Δ E, los cuales permiten la identificación de los distintos isótopos e incluso su separación de isóbaros que podrían llegar al detector junto con los núcleos de interés. En la región del contorno amarillo es donde se espera observar el ¹⁴C presente en cada uno de los materiales sin irradiar.



Figura 5.1. Cantidad de ¹⁴C presente en el grafito sin irradiar (cátodo Grafito-ni1).



Figura 5.2. Cantidad de ¹⁴C presente en el uracil sin irradiar (cátodo Uracil-ni1).

Para la obtención de concentraciones relativas N_{14C}/N_{12C}, N_{13C}/N_{12C} y N_{14C}/N_{13C}, en el separador isotópico de LEMA se hace varias pasadas, una pasada comprende el análisis de la muestra por capas, y en el análisis de cada una de estas capas se toman datos durante 30 segundo por 10 o 15 ocasiones en dependencia del protocolo que se utilice, y a partir de estas 10 o 15 mediciones se reporta un valor de concentración relativa con su respectiva desviación estándar. La medición de concentraciones relativas de un cátodo típicamente comprende entre 15 y 20 pasadas. Las concentraciones relativas N_{14C}/N_{12C}, N_{13C}/N_{12C} y N_{14C}/N_{13C} medidas previa a la irradiación de los materiales se muestran en las tablas A.1, A.2 y A.3 que aparecen en el Apéndice, donde la columna izquierda muestra el número de pasadas realizadas durante las mediciones, siendo s la desviación estándar.

En las siguientes gráficas podemos observar cómo se comportan las concentraciones relativas por pasadas para los cátodos Grafito-ni1 y Uracil-ni1 con respecto al promedio, pues esto nos puede ayudar a identificar posibles fluctuaciones en los datos debidas a inestabilidades en el sistema. Este análisis viene al caso dado que para nuestros cálculos trabajamos con los promedios de todos los datos obtenidos en LEMA.



Figura 5.3. Comportamiento de la concentración relativa respecto a su promedio en el grafito sin irradiar (cátodo Grafito-ni1).



Figura 5.4. Comportamiento de la concentración relativa respecto a su promedio en el uracil sin irradiar (cátodo Uracil-ni1).

De igual forma se llevó a cabo en LEMA el conteo de isótopos de C presente en el material irradiado, en este caso fueron 2 cátodos de grafito *(Grafito-i2 y Grafito-i3)* y 3 cátodos de uracil *(Uracil-i3, Uracil-i4 y Uracil-i5)*. En las Figuras 5.3 y 5.4 se puede observar en la región del contorno amarillo donde se espera observar el ¹⁴C presente en cada uno de los materiales irradiados, en las cuales se ve claramente un incremento en la presencia de ¹⁴C con respecto a aquella observada en las Figuras 5.1 y 5.2. Las concentraciones relativas N_{14C}/N_{12C}, N_{13C}/N_{12C} y N_{14C}/N_{13C} medidas posterior a la irradiación de los materiales se muestran en las tablas A.4, A.5, A.6 y A.7 que aparecen en el Apéndice.



Figura 5.5. Cantidad de ¹⁴C presente en el grafito irradiado (cátodo Grafito-i2).



Figura 5.6. Cantidad de ¹⁴C presente en el uracil irradiado (cátodo Uracil-i3).

En las Figuras 5.7 y 5.8 podemos observar el comportamiento de la concentración relativa respecto a su promedio, de las muestras Grafito-i2 y Uracil-i3, que corresponden a muestras irradiadas.



Figura 5.7. Comportamiento de la concentración relativa respecto a su promedio en el grafito irradiado (cátodo Grafito-i2).



Figura 5.8. Comportamiento de la concentración relativa respecto a su promedio en el uracil irradiado (cátodo Uracil-i3).

Para determinar las incertidumbres de estas mediciones, tomamos las desviaciones estándar de cada una de las relaciones de concentración relativa, y utilizamos la siguiente ecuación:

$$s_{tot} = \frac{1}{n} \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \cdots}$$
(23)

Luego se sumó cuadráticamente a la desviación estándar de las pasadas con respecto al promedio de las mismas, para así completar el proceso de determinar la incertidumbre de la concentración relativa. Una vez analizados estos datos obtuvimos los valores de las concentraciones relativas N_{14C}/N_{12C} y N_{13C}/N_{12C} con sus respectivas incertidumbres, estos se muestran en las Tablas 5.5 y 5.6.

Tabla 5.5. Concentraciones relativas de las muestras sin irradiar.

Cátodo	N14c/N12c	Stot(N14C/N12C)	N13c/N12c	stot(N13c/N12c)
Grafito-ni1	8.723E-15	6.314E-15	0.011	1.403E-05
Uracil-ni1	1.031E-14	2.047E-15	0.010	7.091E-06

Tabla 5.6. Concentraciones relativas de las muestras irradiadas.

Cátodo	N14c/N12c	Stot(N14C/N12C)	N13c/N12c	Stot(N13C/N12C)
Grafito-i2	1.463E-09	3.886E-12	0.010	4.367E-06
Uracil-i3	1.168E-10	5.832E-13	0.011	1.974E-05

A partir de la relación N_{14N}^0/N_{12C}^0 y los datos obtenidos en LEMA podemos calcular la sección eficaz experimental para las reacciones ${}^{14}N(n,p){}^{14}C y {}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$. Para el cálculo de incertidumbres se tomaron en cuenta los parámetros de temperatura, flujo neutrónico y las desviaciones estándar asociadas a cada una de las mediciones de LEMA, ya que estos son los parámetros a partir de los cuales se obtuvo la sección eficaz experimental. Las incertidumbres de los parámetros antes mencionados se muestran en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Incertidumbres de los diferentes parámetros sobre los cuáles se obtuvo la sección eficaz experimental

Reacción	Δt (s)	Δφ (n/s·cm²)	ΔN14c/N12c	ΔN13c/N12c
${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$	± 600	2.3E-12	3.886E-12	1.403E-05
¹⁴ N(n,p) ¹⁴ C	<u>+</u> 3	4.4E-11	5.832E-13	7.091E-06

Para el cálculo de incertidumbre se hizo una propagación de errores. Si tomamos en cuenta que la sección eficaz es una función de concentración relativa, tiempo y flujo neutrónico, tal y como se expresa en la ecuación (24), entonces podemos derivar la ecuación (25) a partir de la cual podemos obtener la incertidumbre asociada a cada una de las secciones eficaces obtenidas para cada una de las reacciones estudiadas:

$$\sigma = f\left(\frac{N_{14C}}{N_{12C}}, \frac{N_{13C}^{0}}{N_{12C}^{0}}, t, \varphi\right)$$

$$\Delta \sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \Delta t\right)^{2} + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varphi} \Delta \varphi\right)^{2} + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial^{N_{14C}}/N_{12C}} \Delta^{N_{14C}}/N_{12C}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial^{N_{13C}^{0}}/N_{12C}^{0}} \Delta^{N_{13C}^{0}}/N_{12C}^{0}\right)^{2}}$$
(24)
(25)

Para el caso del uracil, el cálculo de la sección eficaz no depende de la relación N_{13N}^0/N_{12C}^0 por lo que la ecuación para el cálculo de la incertidumbre se expresa de la forma siguiente:

$$\Delta\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial\sigma}{\partial t}\Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial\varphi}\Delta\varphi\right)^2 + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial^{N_{14C}}/N_{12C}}\Delta^{N_{14C}}/N_{12C}\right)^2}$$
(26)

Los valores de sección eficaz obtenidos con este experimento se muestran en la Tabla 5.8 con su respectiva incertidumbre.

Reacción	IFUNAM	Incertidumbre IFUNAM	NIST	JEFF
$^{13}C(n,\gamma)^{14}C$	0.169	± 0.02	0.00137	0.00137
¹⁴ N(n,p) ¹⁴ C	2.076	± 0.32	1.970	1.829

Tabla 5.8. Secciones eficaces experimentales σ_{exp} *(barns).*

El valor obtenido para la sección eficaz de la reacción ${}^{14}N(n,p){}^{14}C$ tiene un valor que se encuentra en el orden del valor reportado por el NIST[18] y JEFF-3.2[19]. Por otro lado,

el valor obtenido para la sección eficaz de la reacción ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ difiere considerablemente del valor reportado por el NIST y JEFF-3.2, ya que la sección eficaz determinada con nuestro experimento es de dos órdenes de magnitud mayor.

5.2 Resultados

Uno de los aspectos a destacar en este trabajo, es que se logró implementar un protocolo para el desarrollo de este tipo de experimentos, por lo que, se abre una nueva directriz al desarrollo de la física nuclear experimental, específicamente en la determinación de las secciones eficaces para neutrones de reacciones nucleares de interés astrofísico, específicamente a energías térmicas. En el Esquema 5.1 podemos observar la metodología, o dicho de otra forma, los pasos a seguir para desarrollar este tipo de experimentos. Tal y como aparece en el Esquema 5.1, el primer paso es determinar que reacción queremos estudiar, y en base a esto, y tomando en cuenta las instalaciones de las que podemos disponer, entonces podemos determinar dónde irradiaremos las muestras. El siguiente paso es determinar los posibles materiales a irradiar, para esto, en principio, cualquier material que contenga el núcleo blanco es un posible material a irradiar. Una vez sabiendo que flujos de neutrones térmicos tenemos disponibles en la instalación seleccionada para la irradiación de las muestras, entonces podemos proceder a estudiar el comportamiento de la concentración relativa del isótopo de larga vida media producido, esto nos da una idea de que tiempo debemos irradiar la muestra para alcanzar ciertas concentraciones, esto está muy relacionado con los niveles de concentración relativa que sea capaz de medir con precisión el espectrómetro de masas que utilizaremos después. Un paso importante para este estudio, es determinar qué productos radiactivos estarán presente en el material una vez que sea irradiado, en este paso, es necesario calcular la actividad y el tiempo de decaimiento para saber qué tiempo debemos esperar antes de recolectar las muestras una vez que sean irradiadas, esto y la estimación del tiempo de irradiación, son los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de seleccionar que material vamos a irradiar, también debemos tomar en cuenta la facilidad de adquisición en el mercado de este producto y que no se produzcan elementos radiactivos en grandes cantidades. Una vez que hemos seleccionado el material que irradiaremos, entonces procedemos a determinar el tiempo de irradiación, ya utilizando el flujo real en el lugar exacto donde irradiaremos. En este punto, ya estamos listos para llevar a cabo el experimento, entonces procedemos a iniciar la fase experimental. El próximo paso, es preparar las muestras para ser introducidas en el lugar donde serán irradiadas y procedemos posteriormente a la irradiación de las mismas.



Esquema 5.1. Protocolo experimental para la medición de secciones eficaces utilizando neutrones térmicos como proyectil.

Durante la planeación del experimento, tuvimos que calcular que tiempo era necesario esperar para que decayeran los productos radiactivos, entonces, transcurrido este tiempo posterior a la irradiación, podemos recolectar las muestras para llevarlas al laboratorio donde se encuentra el espectrómetro de masas para llevar a cabo la segunda parte del experimento. El siguiente paso es preparar las muestras para ser introducidas al espectrómetro de masas, y posteriormente proceder al conteo de los isótopos de interés producidos durante la irradiación de las muestras. Finalmente, con los datos obtenidos en el espectrómetro de masas podemos calcular la sección eficaz para la reacción que estamos estudiando.

En este trabajo se logró medir específicamente las secciones eficaces de las reacciones ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C y {}^{14}N(n,p){}^{14}C$, obteniéndose resultados relevantes, en el caso de la primera, resultados que difieren de los anteriormente reportados por otros autores, lo cual despierta un gran interés en el estudio de esta reacción, y en el caso de la segunda, se obtuvieron resultados consistentes con los reportados anteriormente por otros autores.

Las grandes concentraciones de ¹⁴C producidas en la reacción ¹³C(n,γ)¹⁴C, lo cual trajo como consecuencia que la sección eficaz experimental obtenida para esta reacción esté dos órdenes por encima de la reportada por NIST y JEFF-3.2, puede que sea un efecto de la componente de neutrones rápidos en el flujo neutrónico, la cual habíamos asumido que no era importante. En la Figura 5.9, puede verse claramente que para la

energía de 152 keV, existe un pico de resonancia, donde la sección eficaz tiene un valor ligeramente mayor que la sección eficaz para neutrones de 25 meV. Para filtrar este resultado, es recomendable irradiar una segunda muestra de grafito en un puerto más alejado del centro del núcleo del reactor, donde la componente rápida debe ser mucho menor, y por tanto, contribuir en menor escala a esta reacción. Para llevar a cabo esta segunda irradiación será necesario, primeramente lograr una caracterización del flujo neutrónico en las diferentes posiciones de irradiación disponibles, garantizando que las incertidumbres con las que fueron caracterizados estos flujos sean mínimas. Vale destacar que dado que esta resonancia se produce a una energía muy específica, tal vez sea conveniente tomar en cuenta otras resonancias que existen en el rango de energías de los neutrones rápidos que aunque sean menos significativas también pueden estar influyendo en el resultado, esto se puede hacer a través de la integral de resonancia. Otra forma de filtrar la posible influencia de la componente rápida de neutrones, es irradiar una muestra blindada con Cd (cadmio) y otra no; el Cd solo será atravesado por los neutrones rápidos, de ahí que al medir las concentraciones relativas producidas en cada una de las muestras, una de estas nos dará la cantidad producida por todo el flujo de neutrones y la otra solamente la producida por neutrones rápidos, luego restamos a la concentración relativa producida por todo el flujo de neutrones, la producida por el flujo de neutrones rápidos y entonces tendremos las concentraciones relativas producidas por los neutrones térmicos.



Figura 5.9. Resonancia de la sección eficaz para la reacción ¹³*C*(*n*,γ)¹⁴*C en 152 keV.*

Podemos mencionar además, que quizás sean otros factores los que pueden estar influyendo en este resultado. Uno de ellos es la posible contaminación de la muestra con N, que por muy pequeña que sea la cantidad presente de este núcleo en el material irradiado, por tener la sección eficaz tres órdenes de magnitud mayor que la del C, puede haber provocado un aumento de la concentración relativa N_{14C}/N_{12C} . Otro factor a tener en cuenta, es la presencia del N en el aire presente dentro del contenedor de la muestra de grafito, que, aunque por estar en estado gaseoso, lo cual implica una menor densidad, hace que sea poco probable que haya afectado esta reacción, siendo además, también poco probable, que en caso de que se haya producido la reacción de captura de neutrones en el N presente en el aire, el ¹⁴C producido se haya depositado en la muestra en estado sólido. Finalmente, no es posible destacar que la sección eficaz para la reacción ¹³C(n, γ)¹⁴C sea mayor a lo previamente reportado.

Un estudio más profundo de la reacción ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$, debe ser llevado a cabo analizando cada uno de los factores antes mencionados, y quizás tomando en cuenta otros factores que pudieran derivar de este análisis.

Un aspecto a destacar, que aunque no era objetivo de este trabajo pero si es un aporte del mismo, es que ahora contamos con una técnica que nos permite enriquecer ya sea grafito natural o uracil en ¹⁴C, esto nos posibilita el desarrollo de otros experimentos de física nuclear experimental. Dadas las concentraciones tan elevadas de ¹⁴C que se alcanzaron en este experimento, ahora podemos obtener blancos capaces de producir haces de ¹⁴C de alta intensidad. Finalmente cabe mencionar, que hasta donde tenemos conocimiento, esta es la primera vez que se utiliza la combinación Reactor Nuclear + AMS para la medición de secciones eficaces de reacciones nucleares.

6. Conclusiones

Parte importante de este trabajo se desarrolló en el Instituto de Nacional de Investigaciones Nucleares, donde se utilizó el flujo de neutrones térmicos producidos por el reactor TRIGA Mark III que se encuentra en dicho Instituto. Esto nos dio la posibilidad de desarrollar una primera fase experimental que consistía en llevar a cabo las reacciones nucleares ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C y {}^{14}N(n,p){}^{14}C$, para luego, utilizando la técnica de AMS, en el Instituto de Física de la UNAM, donde contamos con el Laboratorio de Espectrometría de Masas con Aceleradores, obtener las concentraciones relativas de ${}^{14}C y {}^{13}C$ producido en cada una de las reacciones. Esto nos permitió, obtener de forma experimental las secciones eficaces para neutrones con energías de 25 meV.

Los resultados alcanzados con este experimento son alentadores, pues para la reacción ${}^{14}N(n,p){}^{14}C$, se obtuvieron valores de la sección eficaz que concuerdan con los valores reportados por otros autores anteriormente. Por su parte, para la reacción ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$, los valores obtenidos difieren de los anteriormente reportados, esto, puede verse de forma positiva, pues, nos crea expectativas que nos impulsan a seguir estudiando esta reacción.

Aunque los resultados obtenidos representan un aspecto muy positivo, el mayor mérito de este trabajo, es precisamente, que se desarrolló un protocolo experimental para la medición de secciones eficaces de reacciones nucleares inducidas por neutrones a energías térmicas. Además, nos provee de una técnica para lograr obtener blancos capaces de producir haces de ¹⁴C de alta intensidad, debido a las altas concentraciones de ¹⁴C que alcanzamos a producir, lo cual nos posibilita el desarrollo de otros experimentos de interés para la física nuclear experimental y la astrofísica.

Bibliografía

- [1] D. D. Clayton and L. R. Nittler, "Astrophysics with Presolar Stardust," *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 42, pp. 39–78, 2004.
- [2] D. D. Clayton, S. A. Colgate, and G. J. Fishman, "Gamma ray lines from young supernova remnants," *Astrophys. J.*, vol. 155, pp. 75–82, 1969.
- [3] S. Merrill and W. Paul, "Spectroscopic Observations of Stars of Class," *Astrophys. J.*, vol. 116, p. 21, 1952.
- [4] E. M. Burbidge, "Synthesis of the Elements in Stars"," *Rev. Mod. Phys.*, no. 29, 1957.
- [5] R. Reifarth, C. Lederer, and F. Käppeler, "Neutron Reactions in Astrophysics," Mar. 2014.
- [6] A. Wallner *et al.*, "Accelerator mass spectrometry measurements of the ¹³C(n, γ)¹⁴C and ¹⁴N(n, p)¹⁴C cross sections," *Phys. Rev. C*, vol. 93, no. 4, p. 45803, Apr. 2016.
- [7] A. Wallner *et al.*, "Production of Long-lived Radionuclides ¹⁰Be, ¹⁴C, ⁵³Mn, ⁵⁵Fe, ⁵⁹Ni and ^{202g}Pb in a Fusion Environment," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 59, no. 23, p. 1378, Aug. 2011.
- [8] G. R. Hennig, "Thermal Neutron Capture Cross Section of Carbon-13," *Phys. Rev.*, vol. 95, no. 1, pp. 92–95, Jul. 1954.
- [9] R. Reifarth *et al.*, "The ¹⁴C(n, γ) cross section between 10 keV and 1 MeV," *Phys. Rev. C*, vol. 77, no. 1, p. 15804, Jan. 2008.
- [10] H. Herndl, R. Hofinger, and H. Oberhummer, "The cross section of the neutron capture reaction," in *Tours symposium on nuclear physics III*, 1998, pp. 428–435.
- [11] T. Kii, T. Shima, H. Sato, T. Baba, and Y. Nagai, "Cross section of the ¹⁴N(n, p)¹⁴C reaction from 10 to 100 keV measured by a gas scintillation drift chamber," *Phys. Rev. C*, vol. 59, no. 6, pp. 3397–3401, Jun. 1999.
- [12] T. Shima *et al.*, "Measurement of the ${}^{13}C(n,\gamma){}^{14}C$ cross section at stellar energies," *Nucl. Phys. A*, vol. 621, no. 1–2, pp. 231–234, Aug. 1997.
- Y. M. Gledenov, V. I. Salatski, and P. V. Sedyshev, "The ¹⁴N(n, p)¹⁴C reaction cross section for thermal neutrons," *Zeitschrift fer Phys. A Hadron. Nucl.*, vol. 346, no. 4, pp. 307–308, Dec. 1993.
- [14] P. E. Koehler, "¹⁴N(n, p)¹⁴C cross section near thermal energy," *Phys. Rev. C*, vol. 48, no. 1, pp. 439–440, Jul. 1993.
- [15] P. E. Koehler and H. A. O'Brien, "¹⁴N(n, p)¹⁴C cross section from 61 meV to 34.6 keV and its astrophysical implications," *Phys. Rev. C*, vol. 39, no. 4, pp. 1655–1657, Apr. 1989.
- [16] "¹³C(n,g)¹⁴C cross section". Available: https://wwwnds.iaea.org/exfor/servlet/E4sMakeE4.

- [17] "SECTION 15: Nuclear Reactions."
- [18] "Neutron scattering lengths and cross sections". Available: https://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths/.
- [19] "JANIS Renderer". Available: http://www.oecdnea.org/janisweb/renderer/2373.
- [20] J. Galicia Aragón and Juan, "Estimación de la Fluencia de Neutrones Rápidos en Probetas de Acero Tipo Laguna Verde en el Reactor TRIGA Mark III," 2015.
- [21] ININ, "Informe de seguridad del reactor TRIGA Mark III del Centro Nuclear Dr. Nabor Carrillo Flores," 2002.
- [22] D. A. García and C. Solís, "Producción de blancos de grafito a partir de muestras CO2 para análisis radiocarbono por espectrometría de masas con aceleradores," 2016.
- [23] M. Paredes, "FECHAMIENTO POR RADIOCARBONO," *Memorias Sección Química Nucl.*, 2011.
- [24] F. J. Santos, I. Gómez-Martínez, and M. García-León, "Datación mediante radiocarbono de manuscritos medievales de la Universidad de Sevilla."
- [25] "Table 6.1 Specific Gamma Ray Dose Constants for Selected Nuclides Important to Radiological Assessment and Protection."
- [26] M. E. Hernández, "Cálculo del equivalente de dosis y rapidez de exposición en actividades a realizar en la inmovilización de resinas contaminadas con radioisótopos."
- [27] Bureau of Radiological Health and Training Institute Environmental Control Administration, "Radiological Healt Handbook.pdf." 1970.

Apéndice A

Las tablas de datos presentadas en este apéndice corresponden a los resultados obtenidos mediante AMS para las concentraciones relativas de ¹³C y ¹⁴C. Grafito-ni1 es una muestra de grafito no irradiado, mientras que Uracil-ni1 y Uracil-ni2 son muestras de uracil no irradiado. Grafito-i1 y Grafito-i2, corresponden a muestras de grafito irradiado, por su parte las muestras Uracil-i1, Uracil-i2 y Uracil-i3, corresponden a las muestras de uracil irradiado.

La primera columna de las tablas es el número de pasada (ver sección 5.1 para más detalles), la segunda columna corresponde a la concentración relativa de ¹⁴C con respecto al ¹²C y la siguiente columna muestra la desviación estándar de la medición de esta concentración relativa para cada una de las pasadas. En la cuarta columna se muestra la concentración relativa de ¹³C con respecto al ¹²C y la columna siguiente muestra la desviación estándar correspondiente a la medición de esta concentración relativa para cadas. La sexta columna muestra la concentración relativa de ¹³C y la última columna muestra la desviación estándar de las pasadas. La sexta columna muestra la desviación estándar de las pasadas.

En la tabla A.7, los datos obtenidos fueron tomados en un solo intervalo de tiempo en cada pasada, y como tenemos un solo valor por cada pasada, entonces no es posible obtener la desviación estándar. Vale aclarar que esta tabla solo es informativa, no se utilizaron estos datos para el cálculo de la sección eficaz experimental de la reacción $^{14}N(n,p)^{14}C$.

Grafito-ni1	N14c/N12c	SN14C/N12C	N13c/N12c	SN13C/N12C	N14c/N13c	SN14C/N13C
1	8.035e-015	3.728e-015	1.033e-002	5.758e-005	7.776e-013	3.602e-013
2	1.589e-014	1.724e-014	1.063e-002	5.991e-005	1.495e-012	1.644e-012
3	3.653e-015	9.948e-016	1.056e-002	1.638e-005	3.458e-013	9.469e-014
4	1.042e-014	9.277e-015	1.068e-002	7.660e-005	9.757e-013	8.670e-013
5	1.982e-014	4.552e-014	1.082e-002	1.671e-005	1.831e-012	4.209e-012
6	7.487e-015	6.132e-015	1.110e-002	1.659e-004	6.746e-013	5.553e-013
7	4.756e-015	3.930e-015	1.145e-002	4.979e-005	4.152e-013	3.431e-013
8	4.204e-014	1.220e-013	1.134e-002	4.855e-005	3.707e-012	1.079e-011
9	3.479e-015	1.557e-015	1.103e-002	1.123e-004	3.153e-013	1.413e-013
10	4.712e-015	1.771e-015	1.088e-002	1.103e-005	4.332e-013	1.627e-013
11	7.688e-015	5.720e-015	1.098e-002	2.949e-005	7.002e-013	5.246e-013
12	5.015e-015	1.737e-015	1.090e-002	7.093e-005	4.600e-013	1.607e-013
13	5.159e-015	2.361e-015	1.076e-002	1.143e-005	4.796e-013	2.193e-013
14	6.267e-015	3.262e-015	1.085e-002	2.099e-005	5.776e-013	3.015e-013
15	5.706e-015	1.512e-015	1.091e-002	5.233e-005	5.232e-013	1.378e-013
16	7.089e-015	4.501e-015	1.113e-002	2.410e-005	6.368e-013	4.063e-013
17	7.693e-015	8.942e-015	1.100e-002	5.615e-005	6.991e-013	8.175e-013
18	4.256e-015	2.207e-015	1.089e-002	1.525e-005	3.908e-013	2.028e-013
19	3.986e-015	1.318e-015	1.082e-002	3.072e-005	3.684e-013	1.214e-013
20	5.322e-015	3.238e-015	1.094e-002	1.188e-004	4.865e-013	2.982e-013
21	4.707e-015	1.457e-015	1.121e-002	1.194e-005	4.198e-013	1.299e-013

	Tabla A.1. Concentraciones re	elativas del grafito	sin irradiar	(cátodo G	rafito-ni1).
--	-------------------------------	----------------------	--------------	-----------	--------------

Uracil-ni1	N14c/N12c	SN14C/N12C	N13c/N12c	SN13C/N12C	N14c/N13c	SN14C/N13C
1	1.295e-014	9.173e-015	1.024e-002	4.866e-005	1.265e-012	8.927e-013
2	1.062e-014	4.258e-015	1.023e-002	1.223e-005	1.038e-012	4.154e-013
3	1.066e-014	5.882e-015	1.027e-002	3.745e-006	1.038e-012	5.724e-013
4	5.864e-015	4.535e-015	1.029e-002	1.741e-005	5.699e-013	4.404e-013
5	7.284e-015	4.584e-015	1.031e-002	6.138e-006	7.066e-013	4.447e-013
6	8.136e-015	5.146e-015	1.033e-002	1.140e-005	7.875e-013	4.978e-013
7	5.703e-015	3.118e-015	1.032e-002	1.373e-005	5.524e-013	3.018e-013
8	1.982e-014	2.841e-014	1.031e-002	1.378e-005	1.922e-012	2.753e-012
9	1.012e-014	3.218e-015	1.031e-002	1.053e-005	9.812e-013	3.118e-013
10	1.196e-014	1.218e-014	1.031e-002	3.708e-005	1.160e-012	1.183e-012
11	6.111e-015	2.836e-015	1.031e-002	1.795e-005	5.925e-013	2.749e-013
12	8.432e-015	3.214e-015	1.034e-002	1.602e-005	8.158e-013	3.114e-013
13	9.580e-015	3.195e-015	1.035e-002	2.831e-005	9.259e-013	3.098e-013
14	1.843e-014	2.020e-014	1.039e-002	2.810e-005	1.773e-012	1.934e-012
15	7.528e-015	2.046e-015	1.038e-002	8.307e-006	7.252e-013	1.972e-013
16	1.616e-014	8.200e-015	1.040e-002	9.374e-006	1.553e-012	7.884e-013
17	1.112e-014	4.407e-015	1.042e-002	5.060e-006	1.067e-012	4.225e-013
18	1.007e-014	3.343e-015	1.048e-002	2.458e-005	9.614e-013	3.195e-013
19	1.035e-014	4.318e-015	1.070e-002	1.073e-004	9.675e-013	3.997e-013
20	9.573e-015	8.448e-015	1.101e-002	4.632e-005	8.692e-013	7.679e-013
21	5.983e-015	6.225e-015	1.122e-002	2.640e-005	5.331e-013	5.553e-013

Tabla A.2. Concentraciones	relativas del	' uracil sin	irradiar ((cátodo	Uracil-ni1).
				1		/

Uracil-ni2	N14c/N12c	SN14C/N12C	N13c/N12c	SN13C/N12C	N14c/N13c	SN14C/N13C
1	4.808e-014	3.916e-014	1.031e-002	6.935e-005	4.663e-012	3.800e-012
2	1.243e-014	6.293e-015	1.034e-002	9.890e-006	1.202e-012	6.088e-013
3	1.160e-014	5.680e-015	1.041e-002	2.861e-005	1.115e-012	5.461e-013
4	9.437e-015	4.367e-015	1.049e-002	1.317e-005	9.000e-013	4.158e-013
5	1.173e-014	6.463e-015	1.045e-002	1.667e-005	1.123e-012	6.173e-013
6	1.585e-014	4.421e-015	1.045e-002	7.750e-006	1.517e-012	4.231e-013
7	9.702e-015	3.654e-015	1.041e-002	2.103e-005	9.324e-013	3.500e-013
8	7.727e-015	4.398e-015	1.037e-002	7.626e-006	7.449e-013	4.243e-013
9	1.527e-014	1.405e-014	1.037e-002	1.607e-005	1.473e-012	1.353e-012
10	1.145e-014	4.740e-015	1.036e-002	9.162e-006	1.106e-012	4.574e-013
11	1.044e-014	4.191e-015	1.036e-002	8.646e-006	1.007e-012	4.047e-013
12	7.228e-015	3.941e-015	1.035e-002	3.292e-005	6.983e-013	3.794e-013
13	2.194e-014	2.493e-014	1.033e-002	2.335e-005	2.123e-012	2.420e-012
14	9.094e-015	5.812e-015	1.033e-002	1.596e-005	8.800e-013	5.628e-013
15	7.843e-015	4.920e-015	1.039e-002	2.498e-005	7.550e-013	4.732e-013
16	1.293e-014	4.383e-015	1.044e-002	4.780e-005	1.239e-012	4.227e-013
17	5.339e-015	3.002e-015	1.042e-002	1.853e-005	5.125e-013	2.878e-013
18	8.881e-015	3.492e-015	1.035e-002	1.512e-005	8.580e-013	3.370e-013
19	6.890e-015	2.724e-015	1.039e-002	9.242e-006	6.632e-013	2.622e-013
20	8.874e-015	6.300e-015	1.042e-002	2.784e-005	8.513e-013	6.033e-013
21	1.999e-014	1.272e-014	1.059e-002	6.896e-005	1.887e-012	1.205e-012

Tabla A.3: Concentraciones relativas del uracil sin irradiar	(cátodo Uracil-ni2).
--	----------------------

Grafito-i2	N14c/N12c	SN14C/N12C	N13c/N12c	SN13C/N12C	N14c/N13c	SN14C/N13C
1	1.305e-009	6.939e-012	1.013e-002	5.926e-006	1.287e-007	7.358e-010
2	1.362e-009	1.242e-011	1.021e-002	1.605e-005	1.334e-007	1.021e-009
3	1.402e-009	2.135e-011	1.032e-002	2.267e-005	1.359e-007	1.820e-009
4	1.452e-009	1.442e-011	1.032e-002	1.774e-005	1.407e-007	1.237e-009
5	1.455e-009	9.985e-012	1.035e-002	1.792e-005	1.406e-007	8.993e-010
6	1.510e-009	2.246e-011	1.043e-002	1.621e-005	1.448e-007	2.165e-009
7	1.463e-009	9.038e-012	1.044e-002	1.491e-005	1.401e-007	7.723e-010
8	1.462e-009	1.009e-011	1.046e-002	1.690e-005	1.398e-007	9.145e-010
9	1.477e-009	8.863e-012	1.048e-002	1.892e-005	1.410e-007	6.332e-010
10	1.492e-009	1.103e-011	1.048e-002	1.302e-005	1.423e-007	9.053e-010
11	1.486e-009	9.366e-012	1.051e-002	1.884e-005	1.414e-007	1.082e-009
12	1.474e-009	1.833e-011	1.047e-002	2.009e-005	1.408e-007	1.578e-009
13	1.497e-009	1.800e-011	1.049e-002	2.082e-005	1.428e-007	1.699e-009
14	1.536e-009	1.134e-011	1.051e-002	1.909e-005	1.462e-007	8.591e-010
15	1.530e-009	1.133e-011	1.057e-002	9.552e-006	1.447e-007	1.179e-009
16	1.506e-009	2.852e-011	1.053e-002	1.490e-005	1.431e-007	2.590e-009

Tabla A.4. Concentraciones relativas del grafito irradiado (cátodo Grafito-i2).

Grafito-i3	N14c/N12c	SN14C/N12C	N13c/N12c	SN13C/N12C	N14c/N13c	SN14C/N13C
1	1.331e-009	1.208e-011	1.012e-002	1.460e-005	1.316e-007	1.166e-009
2	1.430e-009	1.769e-011	1.027e-002	1.704e-005	1.391e-007	1.505e-009
3	1.433e-009	1.950e-011	1.032e-002	2.218e-005	1.388e-007	2.023e-009
4	1.402e-009	1.162e-011	1.033e-002	2.991e-005	1.357e-007	7.712e-010
5	1.448e-009	1.738e-011	1.036e-002	3.336e-005	1.398e-007	1.435e-009
6	1.443e-009	9.268e-012	1.041e-002	2.776e-005	1.386e-007	9.249e-010
7	1.447e-009	1.694e-011	1.043e-002	2.444e-005	1.388e-007	1.436e-009
8	1.468e-009	2.273e-011	1.045e-002	2.537e-005	1.405e-007	1.921e-009
9	1.443e-009	1.296e-011	1.046e-002	2.527e-005	1.380e-007	1.207e-009
10	1.434e-009	1.075e-011	1.046e-002	2.718e-005	1.371e-007	6.890e-010
11	1.455e-009	1.702e-011	1.050e-002	2.713e-005	1.386e-007	1.280e-009
12	1.451e-009	9.759e-012	1.047e-002	3.090e-005	1.386e-007	7.502e-010
13	1.464e-009	6.241e-012	1.055e-002	1.420e-005	1.388e-007	4.896e-010
14	1.494e-009	1.816e-011	1.055e-002	1.253e-005	1.415e-007	1.565e-009
15	1.519e-009	8.128e-012	1.053e-002	2.762e-005	1.443e-007	8.492e-010
16	1.492e-009	7.870e-012	1.056e-002	3.651e-005	1.413e-007	1.042e-009

Tabla A.4. Concentraciones relativas del grafito irradiado (cátodo Grafito-i3).

Uracil-i3	N14c/N12c	SN14C/N12C	N13c/N12c	SN13C/N12C	N14c/N13c	SN14C/N13C
1	1.136e-010	3.992e-012	1.063e-002	2.225e-005	1.069e-008	3.603e-010
2	1.138e-010	1.999e-012	1.097e-002	4.515e-005	1.037e-008	1.701e-010
3	1.144e-010	2.314e-012	1.098e-002	1.604e-004	1.042e-008	1.780e-010
4	1.135e-010	2.580e-012	1.093e-002	5.865e-005	1.038e-008	2.236e-010
5	1.133e-010	1.805e-012	1.090e-002	6.997e-005	1.040e-008	1.668e-010
6	1.148e-010	1.501e-012	1.088e-002	2.765e-005	1.055e-008	1.299e-010
7	1.161e-010	2.636e-012	1.107e-002	5.190e-005	1.050e-008	2.302e-010
8	1.185e-010	1.722e-012	1.122e-002	6.059e-005	1.056e-008	1.532e-010
9	1.192e-010	2.023e-012	1.137e-002	5.591e-005	1.048e-008	1.743e-010
10	1.198e-010	2.081e-012	1.140e-002	8.145e-005	1.051e-008	1.744e-010
11	1.186e-010	1.871e-012	1.135e-002	7.356e-005	1.045e-008	1.775e-010
12	1.187e-010	2.513e-012	1.133e-002	7.681e-005	1.047e-008	2.322e-010
13	1.202e-010	2.195e-012	1.138e-002	4.627e-005	1.056e-008	2.041e-010
14	1.182e-010	2.004e-012	1.137e-002	1.388e-004	1.040e-008	1.612e-010
15	1.187e-010	1.852e-012	1.132e-002	5.741e-005	1.049e-008	1.690e-010
16	1.176e-010	2.090e-012	1.131e-002	7.459e-005	1.040e-008	1.752e-010

Tabla A.5. Concentraciones relativas del uracil irradiado (cátodo Uracil-i3).

Uracil-i4	N14c/N12c	SN14C/N12C	N13c/N12c	SN13C/N12C	N14c/N13c	SN14C/N13C
1	1.117e-010	8.765e-013	1.066e-002	1.073e-005	1.048e-008	8.581e-011
2	1.169e-010	1.815e-012	1.108e-002	5.989e-005	1.055e-008	1.526e-010
3	1.179e-010	2.124e-012	1.122e-002	2.423e-005	1.051e-008	1.785e-010
4	1.227e-010	2.790e-012	1.160e-002	3.913e-005	1.058e-008	2.258e-010
5	1.234e-010	2.141e-012	1.172e-002	8.071e-005	1.052e-008	1.602e-010
6	1.218e-010	2.661e-012	1.157e-002	7.978e-005	1.053e-008	2.506e-010
7	1.211e-010	2.292e-012	1.144e-002	1.136e-004	1.058e-008	1.867e-010
8	1.195e-010	2.110e-012	1.137e-002	1.068e-004	1.051e-008	1.866e-010
9	1.202e-010	1.512e-012	1.130e-002	4.216e-005	1.064e-008	1.440e-010
10	1.215e-010	2.554e-012	1.140e-002	3.136e-005	1.066e-008	2.164e-010
11	1.213e-010	1.910e-012	1.156e-002	3.895e-005	1.050e-008	1.657e-010
12	1.241e-010	2.280e-012	1.176e-002	1.566e-005	1.055e-008	1.913e-010
13	1.247e-010	1.821e-012	1.182e-002	6.344e-005	1.055e-008	1.494e-010
14	1.238e-010	2.229e-012	1.178e-002	2.271e-005	1.051e-008	1.864e-010
15	1.198e-010	1.911e-012	1.145e-002	9.287e-005	1.047e-008	1.697e-010
16	1.207e-010	1.645e-012	1.155e-002	2.019e-005	1.045e-008	1.377e-010

Tabla A.6. Concentraciones relativas del uracil irradiado (cátodo Uracil-i4).

Uracil-i5	N14c/N12c	SN14C/N12C	N13c/N12c	SN13C/N12C	N14c/N13c	SN14C/N13C
1	1.103e-010	0.000e+000	1.028e-002	0.000e+000	1.073e-008	0.000e+000
2	1.139e-010	0.000e+000	1.015e-002	0.000e+000	1.122e-008	0.000e+000
3	1.185e-010	0.000e+000	1.012e-002	0.000e+000	1.171e-008	0.000e+000
4	1.134e-010	0.000e+000	1.009e-002	0.000e+000	1.124e-008	0.000e+000
5	1.118e-010	0.000e+000	1.009e-002	0.000e+000	1.109e-008	0.000e+000
6	1.131e-010	0.000e+000	1.011e-002	0.000e+000	1.118e-008	0.000e+000
7	1.119e-010	0.000e+000	1.013e-002	0.000e+000	1.105e-008	0.000e+000
8	1.140e-010	0.000e+000	1.014e-002	0.000e+000	1.125e-008	0.000e+000
9	1.099e-010	0.000e+000	1.016e-002	0.000e+000	1.082e-008	0.000e+000
10	1.116e-010	0.000e+000	1.018e-002	0.000e+000	1.096e-008	0.000e+000
11	1.124e-010	0.000e+000	1.020e-002	0.000e+000	1.103e-008	0.000e+000
12	1.147e-010	0.000e+000	1.023e-002	0.000e+000	1.121e-008	0.000e+000
13	1.131e-010	0.000e+000	1.025e-002	0.000e+000	1.104e-008	0.000e+000
14	1.140e-010	0.000e+000	1.026e-002	0.000e+000	1.112e-008	0.000e+000
15	1.151e-010	0.000e+000	1.026e-002	0.000e+000	1.122e-008	0.000e+000
16	1.110e-010	0.000e+000	1.026e-002	0.000e+000	1.082e-008	0.000e+000
17	1.089e-010	0.000e+000	1.026e-002	0.000e+000	1.061e-008	0.000e+000
18	1.078e-010	0.000e+000	1.026e-002	0.000e+000	1.051e-008	0.000e+000
19	1.120e-010	0.000e+000	1.025e-002	0.000e+000	1.092e-008	0.000e+000
20	1.127e-010	0.000e+000	1.025e-002	0.000e+000	1.099e-008	0.000e+000
21	1.139e-010	0.000e+000	1.026e-002	0.000e+000	1.110e-008	0.000e+000

Tabla A.7. Concentraciones relativas del uracil irradiado (cátodo Uracil-i5).