



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS
PRODUCTOS DE LA REACCIÓN NUCLEAR
(NEUTRÓN, ALFA) CON BORO (B10) MEDIANTE LA
METODOLOGÍA DE TRAZAS NUCLEARES EN
SÓLIDOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

P R E S E N T A:

ALINA GONZÁLEZ TORRES



DIRECTOR DE TESIS:
DR. GUILLERMO CIRANO ESPINOSA GARCÍA
CIUDAD DE MÉXICO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Hoja de datos del jurado

<p>1.- Datos de alumno Apellido paterno Apellido materno Nombre Teléfono Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Carrera Número de cuenta</p>	<p>1.- Datos del alumno González Torres Alina 5545219984 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Física 408055996</p>
<p>2.- Datos del tutor Grado Nombre Apellido paterno Apellido materno</p>	<p>2.- Datos del tutor Dr. Guillermo C. Espinosa García</p>
<p>3.- Datos del sinodal 1 Grado Nombre Apellido paterno Apellido materno</p>	<p>3.- Datos del sinodal 1 Dr. Fermín Castillo Mejía</p>
<p>4.- Datos del sinodal 2 Grado Nombre Apellido paterno Apellido materno</p>	<p>4.- Datos del sinodal 2 M. en C Jesús Armando Lara Velázquez</p>
<p>5.- Datos del sinodal 3 Grado Nombre Apellido paterno Apellido materno</p>	<p>5.- Datos del sinodal 3 Dra. María Dolores Maravilla Meza</p>
<p>6.- Datos del sinodal 4 Grado Nombre Apellido paterno Apellido materno</p>	<p>6.- Datos del sinodal 4 M. en C. Manuel René de Jesús Garduño López</p>
<p>7.- Datos del trabajo escrito Título Numero de paginas Año</p>	<p>7.- Datos del trabajo escrito Estudio y caracterización de los productos de la reacción nuclear (neutrón,alfa) con Boro (B10) mediante la metodología de Trazas Nucleares en Sólidos. 50 2018</p>

Índice

	Página
Agradecimientos	4
Dedicatoria	5
Objetivo	5
Introducción	6
Capítulo I. Aspectos Fundamentales.	7
I.I Neutrones: descubrimiento y características físicas	8
I.II Neutrón Libre y Vida Media asociada	8
I.III Clasificación de los neutrones	8
I.IV Generación y fuentes de neutrones	9
I.V Fuente ²⁴¹ Am-Be	10
I.VI Sección eficaz (σ) para neutrones	11
I.VII El protón	11
I.VIII Partícula Alfa	12
I.IX Interacción de los neutrones con la materia como método de detección	12
I.X Detección de neutrones por núcleos en retroceso	13
I.XI Detección de neutrones por Activación de Laminillas de Oro	13
I.XII Detección de neutrones por esferas de Bonner	13
I.XIII Método de Trazas Nucleares en Sólidos (TNS)	14
I.XIV Eficiencia de detección	15
I.XV Modelos de formación de trazas nucleares	15
I.XVI Modelo de Punta de Explosión Iónica	16
I.XVII Detección de neutrones rápidos por trazas nucleares	17
I.XVIII Alil diglicol como material sensible	17
I.XIX Convertidores	19
I.XX Método de grabado químico	20
I.XXI Conteo, caracterización y análisis de la traza nuclear formada	20
Capítulo II .Metodología	21
II.I Selección del método de detección de neutrones	21
II.II Selección de materiales	21
II.III Material sensible (detector)	21
II.IV Convertidor	22
II.V Selección de la fuente de neutrones	22
II.VI Grabado Químico	22
II.VII Selección del método de lectura	23
II.VIII Dispositivo experimental	23
II.IX Dispositivo de detección de neutrones sin convertidor	23
II.X Dispositivo de detección de neutrones con convertidor ¹⁰ B (espesor fijo)	24

II.XI Dispositivo de detección de neutrones con convertidor ^{10}B (espesor variable)	24
II.XII Irradiación	25
II.XIII Exposición de los detectores sin convertidor y con convertidor (espesor fijo)	25
II.XIV Exposición de los detectores con diferentes espesores de convertidor	25
II.XV Grabado Químico	26
II.XVI Lavado	26
II.XVII Lectura de trazas nucleares	26
Capítulo III. Instrumentación	28
III.I Dispositivo de detección	28
III.II Material sensible	29
III.III Portadetectores	29
III.IV Fuente de neutrones	30
III.V Dispositivo de irradiación	30
III.VI Convertidor	31
III.VII Dispositivo y materiales de grabado químico	31
III.VIII Compuesto químico KOH	31
III.IX Dispositivo de baño térmico controlado	31
III.X Portadetectores de acrílico	31
III.XI Sistema de lectura	32
Capítulo IV. Resultados y Discusión	33
IV.I Respuesta del dispositivo para detección de neutrones sin recubrimiento de ^{10}B	33
IV.II Respuesta del dispositivo para detección de neutrones con ^{10}B (convertidor)	35
IV.III Respuesta del dispositivo para detección con convertidor de espesor variable.	37
IV.IV Aplicaciones	38
Conclusiones	40
Apéndice	41
Anexo I. Definiciones	41
Anexo II. Tabla de constantes físicas	43
Anexo III. Reacciones nucleares para detector CR-39	45
Anexo IV. Procedimiento para la lectura de trazas	46
Referencias	47

Agradecimientos

A mi familia, amigos y profesores.

A la Facultad de Ciencias, UNAM.

A mi tutor de tesis Guillermo Cirano Espinosa García por su asesoría, paciencia, ayuda, por compartir su conocimiento. A José Ignacio Golzarri por su apoyo y comprensión, por su alegría, sus consejos y por sus palabras de aliento.

Este trabajo fue realizado en laboratorio del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría (PAD) del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM), con apoyo económico parcial del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT IN103316.

OBJETIVO:

El objetivo fundamental de esta tesis es el estudio de la metodología de detección de neutrones rápidos y su cuantificación a través del análisis y caracterización de trazas nucleares en sólidos, utilizando como material sensible el policarbonato alil diglicol CR-39 ($C_{12}H_{18}O_7$) y el incremento en su eficiencia de detección por el uso del convertidor ^{10}B oro como material precursor de la reacción nuclear (n,α) , así como sus posibles aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

El estudio, detección y análisis de neutrones constituye uno de los temas de mayor importancia para la física nuclear y de radiaciones, debido a la gran cantidad de aplicaciones actuales y significativas aportaciones al crecimiento del conocimiento científico.

Existen varios métodos tradicionales de detección de estas partículas, entre los que destacan el de esferas de Bonner y el de Análisis por Activación de oro. En el presente trabajo, se realiza la detección de neutrones rápidos mediante el estudio de los productos de la reacción nuclear $B^{10}(n,\alpha)$, utilizando el Método de Trazas Nucleares en Sólidos, el cual se basa en la formación y análisis de huellas conocidas como “trazas latentes”, producidas por la interacción de la radiación ionizante sobre materiales sensibles como el plástico policarbonato alil diglicol (CR-39).

Estas huellas o “trazas latentes” requieren de un proceso de desgaste o “grabado químico” mediante el cual se exalta el daño causado por la radiación incidente en el material detector, revelándose como pequeños surcos cónicos denominados “trazas grabadas”, las cuales pueden ser estudiadas y analizadas mediante microscopía óptica. Esto último constituye una de las principales ventajas del método, pues al no requerir de instrumentos de mayor complejidad, permite su desarrollo en pequeños laboratorios a bajos costos. Al proceso de irradiación, grabado químico y análisis de las trazas se le conoce como método de Trazas Nucleares en Sólidos (TNS).

En este estudio se utiliza una fuente isotópica de Americio-Berilio, la cual emite neutrones en un amplio espectro de energías (1-15 MeVs). Los neutrones al carecer de carga eléctrica, no interaccionan eléctricamente con la materia, pero sí mediante su masa y velocidad. En este caso, los neutrones colisionan con el polímero orgánico CR-39, constituido por átomos de hidrógeno, carbono y oxígeno ($C_{12}H_{18}O_7$). Las colisiones entre los neutrones y los átomos que conforman el material sensible provocan la ruptura de cadenas moleculares, dando lugar a la formación de trazas latentes, que para ser analizadas deben ser sometidas a un proceso de grabado químico que las revele. A partir del análisis de las características cualitativas y cuantitativas del conjunto de trazas observadas, es posible obtener información acerca de la radiación a la cual fue expuesto el material detector, como lo es el tipo (n , p , y α), energía característica, masa involucrada, carga y tiempo de exposición.

La respuesta de detección en polímeros como el CR-39, se ve favorecida por el uso de materiales denominados convertidores, los cuales al ser precursores de la reacción nuclear (n,α), incrementan el número de trazas observadas y por tanto, la eficiencia de detección.

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Detectar neutrones rápidos emitidos por la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ con el método de trazas nucleares en sólidos, utilizando como detector el material plástico policarbonato alil diglicol (CR-39).
- Aumentar la eficiencia en la detección de neutrones rápidos emitidos por la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$, utilizando un recubrimiento de $^{10}\text{Boro}$ como material convertidor sobre el detector plástico (CR-39).

Esta tesis se estructura de la siguiente manera:

+Capítulo I. Aspectos fundamentales. Se analizan los aspectos básicos de la física de neutrones como son: descubrimiento, origen, propiedades, clasificación, reacciones nucleares, producción y detección.

+Capítulo II. Metodología. Se presenta la selección de los materiales y procedimientos experimentales que se utilizan en el estudio.

+Capítulo III. Instrumentación. Se dan las especificaciones y características del procedimiento de preparación de los detectores, la irradiación, el grabado químico, la descripción del sistema de lectura y el análisis de trazas.

+Capítulo IV. Resultados y aplicaciones. Se presentan y analizan los resultados obtenidos en la detección de neutrones (densidad de trazas nucleares) con y sin el uso de $^{10}\text{Boro}$ como convertidor. Finalmente se dan algunas aplicaciones.

+Conclusiones.

+Apéndices: Anexo I. Definiciones. Anexo II. Tabla de constantes físicas. Anexo III. Reacciones nucleares para detector CR-39. Anexo IV. Procedimiento para la lectura de trazas. Referencias.

CAPÍTULO I: Aspectos fundamentales

Neutrones: descubrimiento y características físicas

El neutrón es una partícula subatómica cuya existencia fue sugerida por Rutherford en 1920 y demostrada por Chadwick en 1932. Al exponer diferentes materiales, entre los que incluyó hidrógeno, helio, oxígeno y argón a la radiación producida por Berilio y Boro, bombardeados por partículas α provenientes de una fuente de Polonio y comparar con sus cálculos de conservación de energía y momento asociados al modelo de efecto Compton, Chadwick confirmó la hipótesis de la existencia de una partícula de masa 1.6749×10^{-27} kg. (939.565 MeV/c²), similar a la del protón y carente de carga eléctrica, explicando así por qué muchos núcleos se transformaban también en radiactivos al ser blanco de partículas α provenientes de fuentes de Polonio y dando finalmente una solución a varios de los problemas fundamentales de estructura nuclear.

El neutrón al igual que el protón se encuentra dentro del núcleo de los átomos, por lo que a ambas partículas se les conoce como nucleones. (Beiser. 2003)

Neutrón Libre y Vida Media asociada

Los neutrones son estables sólo cuando se encuentran sujetos la interacción de un núcleo atómico, sin embargo, fuera de la región de alcance efectivo de las fuerzas nucleares, se caracterizan por tener un proceso de decaimiento beta inverso (β^-), debido a la fuerza nuclear débil, en el cual el neutrón pasa a protón, un electrón y un antineutrino electrónico, teniendo una vida media de 887 ± 0.8 segundos (15 minutos aprox). (Eisberg, 1997-Tipler, 1980)



Clasificación de los neutrones

Los neutrones suelen clasificarse en función de su energía cinética, temperatura o longitud de onda, al ser éstas características específicas de las reacciones nucleares que los generan, esquematizándose de la siguiente forma:

Clasificación	Temperatura (K)	Rango de Energías (eV)	Velocidad (m/s)	Longitud de onda (m)
Ultra fríos	$0 - 2.3 \times 10^{-3}$	$0 - 2 \times 10^{-7}$	$0 - 6.2$	$0 - 6.4 \times 10^{-8}$
Muy fríos	$2.3 \times 10^{-3} - 0.6$	$2 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-5}$	$6.2 - 97.8$	$6.4 \times 10^{-8} - 4.0 \times 10^{-9}$
Fríos	$0.6 - 293.15$	$5 \times 10^{-5} - 0.025$	$97.8 - 2186.9$	$4.0 \times 10^{-9} - 1.8 \times 10^{-10}$
Térmicos	293.15	~ 0.025	2186.9	1.8×10^{-10}
Epitérmicos	$293.15 - 1.2 \times 10^4$	$0.025 - 1$	$2186.9 - 13831.6$	$1.8 \times 10^{-10} - 2.9 \times 10^{-11}$
Intermedios	$1.2 \times 10^4 - 1.2 \times 10^{10}$	$1 - 10^6$	$1.4 \times 10^4 - 1.4 \times 10^7$	$2.9 \times 10^{-11} - 2.9 \times 10^{-14}$
De resonancia	$1.2 \times 10^4 - 1.2 \times 10^6$	$1 - 100$	$1.4 \times 10^4 - 1.4 \times 10^5$	$2.9 \times 10^{-11} - 2.9 \times 10^{-12}$
Lentos	1.2×10^{10}	$\sim 10^6$	1.4×10^7	2.9×10^{-14}
Rápidos	$1.2 \times 10^{10} - 1.2 \times 10^{11}$	$10^6 - 10^7$	$1.4 \times 10^7 - 4.4 \times 10^7$	$2.9 \times 10^{-14} - 9.0 \times 10^{-15}$
Muy rápidos	$1.2 \times 10^{11} - 5.8 \times 10^{11}$	$10^7 - 5 \times 10^7$	$4.4 \times 10^7 - 9.8 \times 10^7$	$9.0 \times 10^{-15} - 4.0 \times 10^{-15}$
Ultra rápidos	$5.8 \times 10^{11} - 1.2 \times 10^{14}$	$5 \times 10^7 - 10^{10}$	$9.8 \times 10^7 - 2.9 \times 10^8$	$4.0 \times 10^{-15} - 1.3 \times 10^{-15}$
Relativistas	$1.2 \times 10^{14} <$	$10^{10} <$	$< 2.9 \times 10^8$	1.3×10^{-15}

Tabla 1.1 Clasificación de los neutrones en función de su temperatura, energía cinética, velocidad y longitud de onda. (Dostal y Elson, 1980)

La distribución de energías para los neutrones, se asocia con la distribución molecular de velocidades moleculares de Maxwell-Boltzmann para gases nobles.

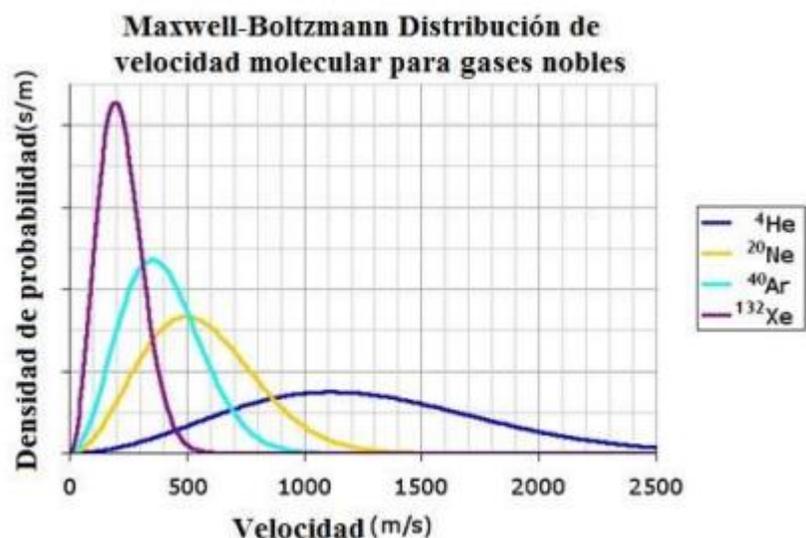


Figura 1.1 Función de probabilidad de la velocidad de los gases nobles a una temperatura de 293.15 K (20°C). (Vallejo, 1989).

En este caso, se trabaja con neutrones rápidos, con un intervalo de energía de 0.5 a 15 MeV.

Generación de neutrones

Existen diversos tipos de fuentes de neutrones, que reciben su nombre dependiendo de las densidades de flujo de neutrones que emiten: reactores nucleares (10^{12} a 10^{15} n/cm²s), aceleradores (10^6 a 5×10^{11} n/cm²s) y fuentes isotópicas cerradas (10^4 a 10^7 n/cm²s).

***Reactores Nucleares:** Están basados en la fisión de núcleos de Uranio o Plutonio, de las que se obtienen en promedio 2.5 neutrones emitidos instantáneamente y tras un breve periodo de dos a tres núcleos más pequeños por cada evento. En particular, los neutrones generados a partir de la fisión del uranio poseen energías del orden de 2 MeV a 11 MeV.

***Aceleradores de Partículas:** estos se utilizan como fuentes de neutrones, mediante el uso de blancos reacciones de “spallation” o (γ, n). Estas fuentes pueden funcionar en modo pulsado o continuo y sus neutrones se caracterizan por tener energías muy altas, por lo que se requiere el uso de moderadores.

***Fuentes isotópicas o cerradas:** consisten en la utilización de materiales que emiten neutrones por procesos de fisión espontánea como el ²⁵²Cf (transuránico) o isótopos emisores de partículas α , como las fuentes ²⁴¹Am-Be y ²⁴¹Am-Pu. Típicamente se utiliza ²⁴¹Am como emisor de estas partículas, ya que posee una vida media de 456 años, lo que permite una emisión casi constante de neutrones. Sin embargo la limitación de este tipo de fuentes es la actividad específica y la necesidad de mantenerlos bajo blindaje debido a su emisión continua. (Garduño, 2008).

En la tabla 1.2 se muestran algunas fuentes de neutrones, en donde la notación es la siguiente: neutrón n, protón p y partícula alfa α . *Un curie (Ci) es 37×10^9 Bq i.e. 37000MBq

Fuentes de Neutrones Radioisótopos (Shani,1990).				
Fuente de Neutrones	Producción de Neutrones (n / s / Ci *)	Tipo de Fuente	Vida Media	Reacción
$^{239}\text{Pu-Be}$	1.7×10^6	α / n	24360 años	$^9\text{Be} + \alpha \rightarrow ^{12}\text{C} + n + 5.71 \text{ MeV}$
$^{241}\text{Am-Be}$	2.2×10^6	α / n	433 años	$^9\text{Be} + \gamma \rightarrow 2\alpha + n - 1.67 \text{ MeV}$
$^{124}\text{Sb-Bc-D}_2\text{O}$		γ / n	60.2 días	$^2\text{H} + \gamma \rightarrow ^1\text{H} + n - 2.23 \text{ MeV}$
$^{252}_{92}\text{Cf}$	4.4×10^9	Fisión Espontánea (FE)	2.65 años	$^{252}_{92}\text{Cf (FE)} \rightarrow 2f + 3.8n + 200 \text{ MeV}$

Tabla 1.2 Fuentes de Neutrones (Radioisótopos). (Shani, 1990)

Fuente $^{241}\text{Am-Be}$

La fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ es de las más utilizadas debido a su larga vida media de 433 años y a la baja emisión de radiación gamma, en comparación con otras fuentes, garantizando un flujo de neutrones constante.

Esta fuente se produce a partir de la mezcla compacta de óxido de americio y de polvo de berilio metálico. El americio decae por la emisión de fotones de 59.5 keV y partículas alfa, las cuales interactúan con el berilio generando neutrones. En este caso, para los experimentos se utiliza una fuente de $^{241}\text{Am-Be}$, por el número de neutrones producidos o flujo, el intervalo de energía de los neutrones emitidos y su vida media. El espectro energético de la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ (Figura 1.2) comprende neutrones con energías entre 100 KeV y 10 MeV, con un flujo de $(1.13 \pm 0.03) \times 10^6 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 4\pi$.

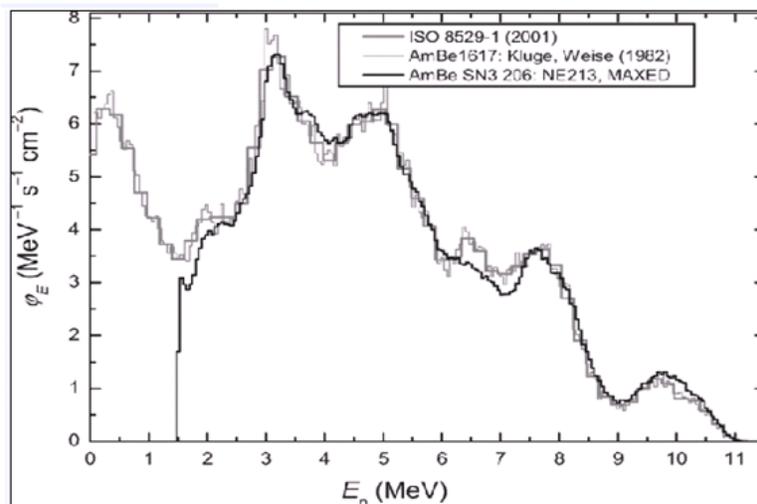


Figura 1.2. Espectro de energía de una fuente de $^{241}\text{Am-Be}$, (IAEA, 1993).

Sección eficaz (σ) para neutrones

La sección eficaz es una magnitud escalar que representa la sección transversal efectiva de interacción entre partículas proyectiles y partículas blanco en una reacción nuclear.

La sección eficaz (para cada tipo de interacción) por núcleo, se expresa en unidades de área y usualmente se da en barn (10^{-28}m^2). La sección eficaz macroscópica Σ se obtiene al multiplicar la sección eficaz σ (microscópica) por el número del núcleo N por unidad de volumen, obteniendo así dimensiones de $1/\text{longitud}$.

$$\Sigma = N\sigma \quad (1.2)$$

En su interpretación física Σ es la probabilidad por unidad de longitud para que un proceso en específico ocurra; al sumar todos los procesos que se combinan para cada interacción, obtenemos Σ_{total} que es la probabilidad por unidad de longitud para cualquier tipo de interacción que ocurra.

$$\Sigma_{total} = \Sigma_{captura} + \Sigma_{dispersión} + \dots \quad (1.3)$$

El camino libre medio ($L = \text{unidades de longitud}$) del neutrón está dado por:

$$L = 1/\Sigma_{total} \quad (1.4)$$

teniendo así L unidades de longitud. En materiales sólidos, L puede ser del orden de 1cm o menos para neutrones lentos y para neutrones rápidos es del orden de 10 cm.

Al considerar neutrones con una velocidad fija v (una energía en particular), podemos describir la frecuencia de interacción como el producto de $v\Sigma$. A las reacciones por unidad de tiempo y volumen, se le conocen como densidad de velocidad de reacciones y está dada por $n(r)v\Sigma$, donde $n(r)$ es la densidad de del número de neutrones en el vector posición r , y $n(r)v$ es el flujo de neutrones $\phi(r)$ con dimensiones de $\text{tiempo}^{-1} \text{ longitud}^{-2}$.

De esta manera, el coeficiente de densidad de la reacción está dado por el flujo de neutrones y la sección eficaz macroscópica:

$$\text{Coeficiente de densidad de la reacción} = \phi(r)\Sigma \quad (1.5)$$

El protón

En 1886 Eugene Goldstein tras realizar una serie de experimentos con tubos de descarga, observó un tipo de radiación que estaba constituida por cargas positivas (iones). En 1918 Rutherford a quien generalmente se le da el crédito por el descubrimiento del protón, sugiere que se le considere a los núcleos de hidrógeno como partículas elementales, tras darse cuenta

que cuando las partículas α son disparadas dentro de un gas de nitrógeno, los detectores muestran la traza del núcleo de hidrógeno.

El protón del griego protón=primero, es una partícula subatómica con carga eléctrica positiva (1.602×10^{-19} coulomb), una masa de $938.272 \text{ MeV}/c^2$ ($1.6727 \times 10^{-27} \text{ Kg}$), 1.00727646688 una, o cerca de 1836 veces la masa del electrón, con un diámetro de aproximadamente $1.5 \times 10^{-15} \text{ m}$. El protón se ha observado como estable, aunque puede ocurrir el decaimiento β^+ . La vida media del protón es ≈ 1035 años (*Ferrer S. A. et al 2006*).

Partícula alfa

Las partículas alfa (α) fueron identificadas por Ernest Rutherford como la menos penetrante de las radiaciones emitidas por materiales de manera natural. Estas partículas alfa están compuestas por dos protones y dos neutrones, son núcleos completamente ionizados, ya que al carecer de electrones, su carga eléctrica es positiva ($+2q_e$).

Interacción de los neutrones con la materia como método de detección

Dado que los neutrones carecen de carga coulombiana, estos no interactúan eléctricamente con la materia, sino únicamente a través de su masa. Por lo tanto, su detección se lleva a cabo mediante procesos indirectos que involucran la producción de partículas cargadas.

Los neutrones son clasificados por su energía y dependiendo de estos intervalos de energía se determinan los equipos adecuados para su detección (*L'Annunziata, 1998*).

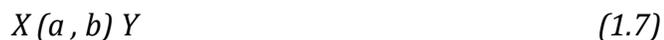
Específicamente, la detección de neutrones se realiza mediante la medición de la excitación, ionización y/o el desplazamiento de electrones producidos por las reacciones nucleares (n,p), (n,γ) o (n,α) al interactuar con los materiales.

Las reacciones nucleares suceden cuando un núcleo blanco es bombardeado con partículas nucleares y generalmente se denotan de la siguiente forma:

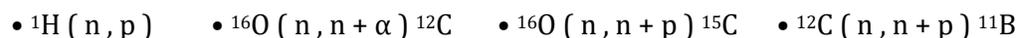


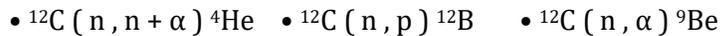
En la reacción nuclear, el núcleo blanco X es bombardeado por la partícula a, y el núcleo producto es Y como resultado de la partícula despedida b. La energía de la reacción nuclear, es la diferencia entre las masas de los reactivos y los productos, a la cual denominamos Q.

Otra manera de escribir la reacción nuclear, se muestra en la ecuación siguiente:



El material detector seleccionado para este trabajo es el CR-39 (policarbonato alil diglicol), tiene una composición de ^1H , ^{12}C y ^{16}O , por lo que las reacciones nucleares que tienen lugar son las siguientes:





Para más reacciones de neutrones con un intervalo de energía de 0.5-10MeV, de la fuente de $^{241}\text{Am-B}$, véase Anexo III** (*NNDC-BNL,2006*).

Detección de neutrones por núcleos en retroceso

El método más común para detectar neutrones rápidos, está basado en la dispersión elástica de neutrones con núcleos ligeros. La dispersión transfiere energía cinética del neutrón al núcleo blanco, al cual se le conoce como núcleo en retroceso, y siempre es un núcleo ligero, siendo la interacción con el hidrógeno el caso más estudiado por su simplicidad. Al núcleo en retroceso que resulta de la dispersión elástica, generalmente con hidrógeno, se le conoce como protón en retroceso. Los detectores de protones en retroceso, son aquellos dispositivos basados en esta interacción. El valor Q para la dispersión elástica es cero, ya que la energía cinética resultante de la reacción, por definición es la misma que energía cinética antes de la reacción. El núcleo blanco se encuentra en reposo antes de la reacción, y por lo tanto las energías cinéticas totales de productos de la reacción (núcleo en retroceso y el neutrón dispersado), deben ser igual a la energía del neutrón incidente.

Detección por Activación de Laminillas de Oro.

La determinación del flujo neutrónico a partir de laminillas de activación se basa en el hecho de que ciertos isótopos, pueden ser transformados en isótopos radiactivos cuando son expuestos a un campo de neutrones. Los factores principales que influyen en la activación del isótopo son el flujo de neutrones en el área de irradiación, la sección eficaz de activación y el tamaño de la muestra, entre otros. Conociendo la sección eficaz de activación de la muestra, su masa, el tiempo de exposición al flujo de neutrones, su vida media y algunos otros parámetros tanto de la muestra como del sistema de conteo, es posible calcular la actividad de la misma y a partir de esta determinarse el flujo neutrónico en la posición de la muestra.

Detección de neutrones por esferas de Bonner

Los detectores denominados esferas de Bonner, consisten en un arreglo de esferas homogéneas de polietileno, en las cuales colisionan los neutrones generando una reacción nuclear ya sea (n,p) o (n,α). En el centro del conjunto de esferas se encuentra un detector (Geiger o similar), el cual es sensible a partículas cargadas y a radiación γ. Los diámetros de las esferas, tradicionalmente son fabricadas en valores enteros desde 1 a 18 pulgadas de diámetro, cada una de las esferas tiene una respuesta diferente en función de la energía de los neutrones incidentes, así las medidas obtenidas del conjunto de estas esferas proporcionan información sobre el espectro neutrónico. Aunque las esferas de Bonner son un método efectivo para reconstruir el espectro de neutrones, el peso de las esferas, los largos periodos de tiempo empleados para realizar las mediciones, la necesidad de un código para realizar la reconstrucción del espectro, y un usuario experimentado para la manipulación del código, son algunas desventajas que este sistema presenta (*Valencia, 2015*).

Trazas Nucleares en Sólidos (TNS) como detector de neutrones

El método de detección por Trazas Nucleares en Sólidos o TNS, se basa en el análisis de las huellas dejadas por las radiaciones ionizantes en los materiales, principalmente en sólidos (plásticos).

Este proceso puede resumirse en tres pasos:



Diagrama 1.1 .Se muestran los pasos del método de detección por Trazas Nucleares en Sólidos.

Una de las características de la metodología de Trazas Nucleares en Sólidos, es que el material detector es sensible sólo a partículas cargadas como son α , protones, iones y fragmentos de fisión; en el caso de los neutrones al no poseer carga, es necesario tener una reacción nuclear (n,p) o (n,α) , para poder detectarlos.

El primer paso del método consiste en exponer el material detector a la radiación ionizante produciendo la traza latente, sin embargo, ésta solo puede ser observada con microscopía electrónica de transmisión o con microscopía de fuerza atómica. Para hacer visibles las trazas latentes, se requiere de un proceso de ataque químico, produciéndose un desgaste en el detector, preferencialmente en la zona de impacto de las partículas cargadas, a lo que se denomina como “traza grabada”, la cual tienen forma cónica y puede ser observada mediante microscopio óptico o método digital.

Para el conteo y análisis de las trazas grabadas, se requiere contar el número de trazas presentes por unidad de área (número de trazas / cm^2), ya que es proporcional al flujo de la fuente de neutrones. Por otro lado, el tamaño del diámetro de la traza medido en la superficie del material, indica la energía de la partícula incidente y a partir de esta, es posible determinar el isótopo, masa y número atómico. De igual modo, también se pueden caracterizar parámetros del material detector como: movilidad electrónica, homogeneidad en las diferentes capas del espesor y porosidad, (Espinosa et al. 1994).

Algunas de las principales ventajas de este método y por las cuales se selecciona para este trabajo, son:

- Los detectores por TNS, no son sensibles a radiación γ , β o χ , por lo que en el estudio de campos mixtos es una buena alternativa.

- Es posible caracterizar los parámetros de las partículas ionizantes incidentes como: tipo (p y α), energía característica, masa involucrada, carga y tiempo de exposición.
- La forma y el tamaño del detector, se pueden ajustar al área de medición.
- No se requiere de instrumentación sofisticada y compleja. El método de TNS es simple, fácil de manipular y de bajo costo.

Eficiencia de detección

La eficiencia de detección de un dispositivo basado en núcleos en retroceso, como es el caso, puede ser calculada por la sección eficaz de dispersión σ_s . Cuando solo hay un tipo de núcleo en el detector, la eficiencia intrínseca es:

$$\varepsilon = 1 - e^{(-N\sigma_s d)} \quad (1.8)$$

donde N es el número de densidad del núcleo blanco, σ_s es la sección eficaz de dispersión para el núcleo, y d es la longitud de la trayectoria de los neutrones incidentes a través del detector (Durrani y Bull, 1987).

Es común que los detectores de protones de retroceso, estén compuestos por una combinación de carbono con hidrógeno. La dispersión del carbono presenta varios efectos que tomaremos en cuenta. La eficiencia de detección (ε), sin considerar efectos de dispersión múltiple, es:

$$\varepsilon = \frac{N_H \sigma_{SH}}{N_H \sigma_{SH} + N_C \sigma_{SC}} \left\{ 1 - e^{[-d(N_H \sigma_{SH} + N_C \sigma_{SC})]} \right\} \quad (1.9)$$

donde N_H la densidad para el hidrógeno, σ_{SH} es la sección eficaz de dispersión del hidrógeno, N_C es la densidad para el carbono y σ_{SC} es la sección eficaz del carbono.

Formación de trazas nucleares

Para explicar el daño que causa la radiación en los materiales, se han desarrollado diferentes modelos de los cuales algunos pueden funcionar para ciertos materiales, en ciertos intervalos de energía o con condiciones muy específicas, como se muestra en tabla 1.3:

MODELO	CONSIDERACIONES
Colisión atómica	No se aplica en lo general, solo para $E = 1\text{KeV/amu}$
Energía depositada en la producción de rayos delta	Falta información para el modelo en general
Perdida de energía restringida	Convincente, pero no demostrado experimentalmente
Punta iónica	No aceptable
Pérdida total de energía	No aceptable
Ionización primaria y excitación (Punta de explosión iónica).	Válida para inorgánicos. Faltan consideraciones para efectos de rayos delta.

Tabla 1.3 Relación de modelos existentes, que predicen la formación de trazas nucleares. (*Fleischer et al. 1965*)

Modelo de Punta de Explosión Iónica

De todos los modelos teóricos que se han propuesto hasta el momento, el modelo de ionización primaria y excitación (Punta de Explosión iónica) ha sido el más aceptado, el cual consiste en entender la formación de huellas nucleares en sólidos, considerando como efecto fundamental un desplazamiento atómico en el material usado como detector. Para explicar el daño causado por la radiación ionizante en los materiales (*Fleischer et al. 1965*), se propone un modelo considerando como efecto fundamental un desplazamiento atómico en el material usado como detector, esto es similar a una explosión de ionización a lo largo de la trayectoria de la partícula cargada, que genera una orientación inestable electrostática a su paso, provocando una repulsión de los iones desde sus posiciones iniciales hasta sus posiciones intersticiales. Este proceso se muestra en la siguiente figura:

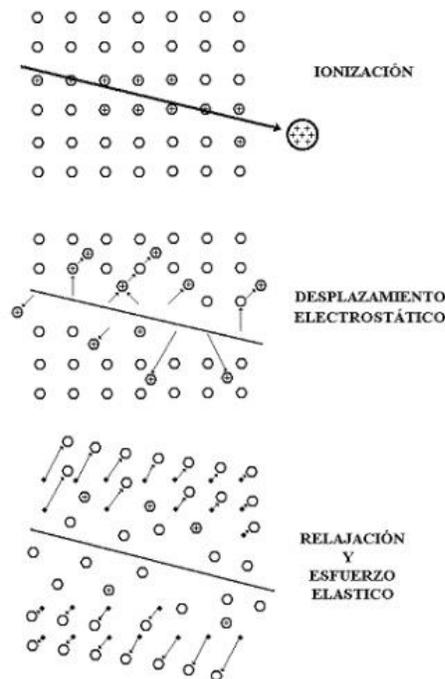


Figura 1.3 Mecanismo de punta de explosión iónica para la formación de trazas en sólidos inorgánicos (Espinosa et al., 1994)

Después de la formación de los iones primarios, se “forman” los iones intersticiales y los sitios vacantes en la red, producto de las fuerzas coulombianas, expandiendo el “esfuerzo” en el material hacia los lados de la trayectoria de la partícula que se representan como daños en el material, estos se pueden observar directamente mediante microscopía electrónica de transmisión, a estos daños se les conoce como “trazas latentes”. Este modelo presenta

básicamente dos restricciones, los materiales detectores deben ser semiconductores de baja conductividad o aislantes.

En el caso de los plásticos, el efecto en el material está dado por el rompimiento de cadenas poliméricas, expulsando algunos de sus átomos por colisiones con las partículas incidentes.

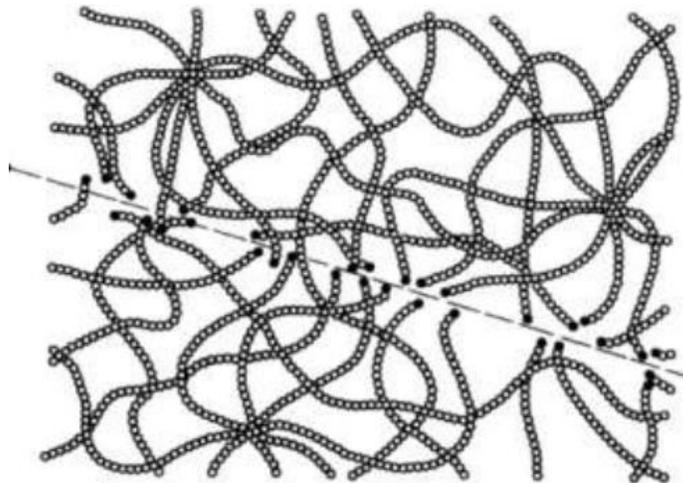


Figura 1.4. Rompimiento de cadenas poliméricas da una dirección preferente de grabado a lo largo del daño en materiales plásticos.

Detección de neutrones rápidos por trazas nucleares.

Las trazas que son producidas por neutrones rápidos son causadas por el retroceso elástico de los núcleos. Generalmente los núcleos ligeros (como partículas alfa) son los más favorables para producir trazas, ya que tienen una alta sección eficaz para dispersión elástica, además de transmitir una gran fracción de energía en la colisión con el neutrón y tener bastante alcance dentro del detector. Muchos grupos de investigación han utilizado el policarbonato, el nitrato de celulosa y el acetato de celulosa como detectores de trazas (*Medveczky y Somogyi, 1966; Becker, 1969; Tuyn y Broerse, 1970; Frank y Benton, 1970; Nishiwaki et al., 1971*).

Alil diglicol como material sensible

El plástico alil diglicol CR-39, tiene una composición de hidrógeno, carbono y oxígeno ($C_{12}H_{18}O_7$) y la detección de neutrones está basada en las reacciones nucleares (n,p) y (n,α) con los núcleos del material. Donde las reacciones (n,p) , son en su mayoría con el hidrógeno y las reacciones (n,α) con los núcleos de C y O, como se menciona anteriormente. En la figura 3.4, se muestra la estructura química, en donde se observa una doble cadena unida por un enlace de oxígeno.

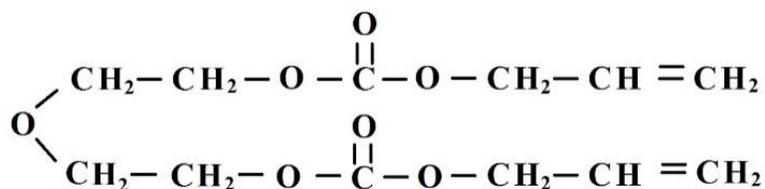


Figura 3.4 Esquema de la estructura química del CR-39. (Becker, K.,1967).

El porcentaje de los elementos por molécula que conforman el material detector CR-39, se muestran en la Tabla 3.1. Donde se observa que aproximadamente el 50% corresponde al elemento ^1H .

Elemento	Porcentaje
^1H	48.648 %
^{12}C	32.432 %
^{16}O	18.918 %

Tabla 3.1 Porcentaje por molécula del detector CR-39.

En la Figura 1.5, se muestra la respuesta de los detectores de neutrones en función de la energía.

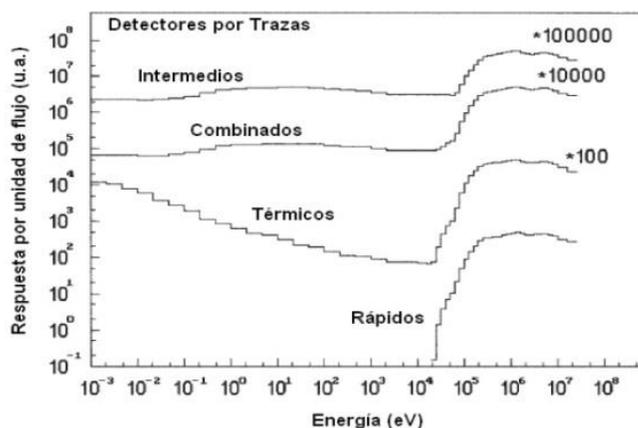


Figura 1.5 Respuesta de detectores por trazas a neutrones de diferentes energías (IAEA,2001).

Convertidores

La baja eficiencia de detección del CR-39 a los neutrones rápidos, se puede mejorar colocando una capa delgada de un material rico en hidrógeno conocido como material convertidor (Boro o Cadmio, entre otros).

El neutrón rápido al incidir sobre el convertidor, pierde una fracción de su energía cinética inicial, termalizando al neutrón y con ello es factible generar una reacción (n,p) o (n,α).

En este caso, se utilizará el $^{10}\text{Boro}$ como material convertidor, favoreciendo la detección.

La sección eficaz de captura de neutrones en ^{10}B se observa en la figura 1.6 y es particularmente alta para neutrones térmicos.

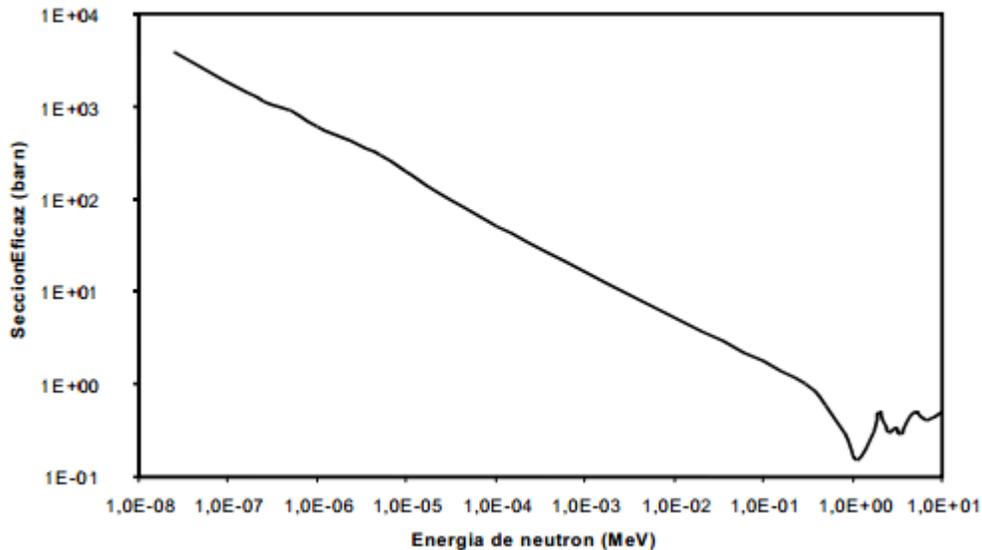
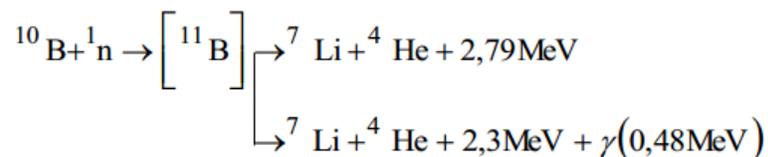


Figura 1.6 Sección eficaz de captura de neutrones en ^{10}B (IAEA,2001).

Al ser irradiado con neutrones de baja energía, el isótopo estable del Boro (^{10}B) atrapa un neutrón, desencadenando una reacción de captura que da lugar a la formación de un átomo de ^{11}B que se escinde en 10^{-12} segundos generando una partícula alfa y un núcleo de ^7Li de alta transferencia lineal de energía (LET), que son emitidas en direcciones opuestas (Coderre JA y Morris GM, 1999; Coderre JA et al., 2003).

Esta reacción de captura tiene dos posibles salidas:



En el 94% de los casos el ^7Li queda en un estado excitado, por lo que regresa a su estado fundamental tras la emisión de radiación gamma (γ), mientras que en el 6% restante, el ^7Li es emitido en su estado fundamental. Las partículas emitidas por la reacción de captura tienen una trayectoria definida, independiente del espesor de la muestra.

Método de grabado

El procedimiento establecido para grabar materiales plásticos utiliza una solución acuosa de KOH o NaOH, con concentraciones que van de 1 a 12 moles y temperaturas de 30° C a 70° C para el revelado de las trazas latentes. En la tabla 1.4 se muestran las especificaciones del ataque químico o grabado para diferentes materiales:

Material	Grabado
Plásticos de policarbonato	Solución NaOH o KOH; 1-12mol. Temperatura: 40- 70°C.
Plásticos de nitrato de celulosa	Solución NaOH; 1-12mol. Temperatura: 40- 70°C.
Plásticos CR-39	Soluciones NaOH o KOH; 1-12mol. Temperatura: 40-70°C.
Orthopyrex y Clinopyrex	6g NaOH + 4g H ₂ O. En punto de ebullición.
Mica	48% HF. Temperatura 20-25°C.
Vidrio	1 - 48 % HF. Temperatura 20-25°C.
Feldespató	1g NaOH +2g H ₂ O. En punto de ebullición.
Apatita	0.1-5% HON ₃ . Temperatura 20-25°C.
Zirconio	11.5g KOH + 8g NaOH. Temperatura: 200-220°C.

Tabla 1.4 Parámetros de grabado más utilizados en el método de TNS.(Durrani y Bull,1987)

Conteo, caracterización y análisis de la traza nuclear formada.

Existen diversos métodos y dispositivos para el conteo de trazas nucleares, entre los que destacan históricamente: contadores de bacterias, lectores de microfichas, microdensitómetros, detectores de barrera superficial y la microscopía de fuerza atómica. Sin embargo, el método comúnmente utilizado para llevar a cabo el conteo y análisis de trazas nucleares es la microscopía óptica. Actualmente debido a las facilidades digitales, los lectores de trazas nucleares se han automatizado.

Para el conteo y análisis de las trazas nucleares en este trabajo, se usó el sistema de análisis de imágenes digitales denominado DIAS (Digital Image Analysis System) por sus siglas en inglés (Espinosa et al., 1996). Para la detección del flujo de neutrones, en este trabajo sólo se consideran las trazas formadas por partículas a 90°, las cuales dejan huellas circulares.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

Selección del método de detección

El método de Detección por Trazas Nucleares es simple en su proceso, sin embargo, su alcance y posibilidades son muy amplias, ya que es posible caracterizar los parámetros de las partículas

ionizantes incidentes como: energía, y a partir de esta, determinar el isótopo, masa y número atómico al analizar la longitud de la trayectoria, el diámetro de la traza en superficie para condiciones específicas de grabado químico ó midiendo la velocidad de grabado por si misma. También se pueden caracterizar parámetros del material detector como: movilidad electrónica, homogeneidad en las diferentes capas del espesor y porosidad, mediante la respuesta al daño.

Otra de las características de los detectores de trazas nucleares es que son sensibles a partículas alfa, protones, iones pesados y fragmentos de fisión, siendo ciegos básicamente a partículas beta, radiación gamma y rayos X. Esta rara discriminación en la detección, constituye una ventaja en la medición de campos de radiación mixtos, ofreciendo una posibilidad alternativa, novedosa, simple y de bajo costo para la detección de neutrones.

Por la simplicidad en su instrumentación, bajo costo, eficiencia y sobre todo por ser accesible tecnológicamente, de entre todos los métodos de detección de neutrones, (como el de las esferas de Bonner, el de Análisis de Activación por Neutrones (NAA), entre otros), se seleccionó la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos, para llevar a cabo la detección de neutrones rápidos (de 0.5 a 10 MeV), mediante la caracterización de los productos de la reacción nuclear $B^{10}(n,\alpha)$.

El proceso experimental se llevó cabo en las siguientes etapas:

- 1) Detección de neutrones sin convertidor.
- 2) Detección de neutrones con convertidor.
- 3) Detección de neutrones con variaciones en el espesor de la capa convertidora.

Selección de Materiales

Enseguida se describen los materiales utilizados en el procedimiento experimental.

Material sensible (Detector)

Los detectores plásticos CR-39 ("Columbia Resine 39" registrado por la marca Pittsburg Plate Glass Company, Pennsylvania, USA) poseen una respuesta al flujo de neutrones que fue establecida como una función de la energía y la dirección de incidencia de radiación, determinándose que los protones de retroceso son el principal trazador de la interacción en la detección de neutrones rápidos, a través de los daños que se manifiestan como trazas nucleares.

La detección de neutrones, se basa en interacciones de tipo (n,p) y (n,α) con los núcleos atómicos del material. En la tabla 2.1, se muestran los intervalos de secciones eficaces para neutrones para los elementos blanco, que componen al CR-39 ($C_{12}H_{18}O_7$):

Elemento	Intervalo de Sección eficaz (barns)
^1H	10^{-4} a 10^4
^{12}C	10^{-4} a 1
^{16}O	10^{-4} a 10^2

Tabla 2.1. Intervalos de las secciones eficaces para los componentes del CR-39.

Dado que el intervalo más grande de sección eficaz es para ^1H , en la mayoría de los casos las reacciones (n,p) se llevan a cabo con el núcleo Hidrógeno, mientras que las (n, α) con los núcleos de Oxígeno, Carbono y Boro, entre otros.

Los polímeros son utilizados como detectores de radiación en la medición de flujos de neutrones en el intervalo de 70 keV hasta 20 MeV, el desarrollo de dosimetría de personal y en la investigación de reactores nucleares, por lo que en este trabajo se utilizó al CR-39 como detector de neutrones en el intervalo de 1 a 10 MeV.

Convertidor

La inherente baja eficiencia en la detección de neutrones rápidos, puede ser mejorada a partir del uso de convertidores sobre la superficie expuesta del detector que contengan hidrógenos en su estructura, con el fin de aumentar el número de productos cuantificables de la reacción. Específicamente, se ha reportado la detección de neutrones mediante reacciones (n, α) a través de la reacción $\text{B}^{10}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$, por lo que en este trabajo se utilizó $^{10}\text{Boro}$ como convertidor sobre la superficie de los detectores.

Selección de la fuente de neutrones

Debido a la larga vida útil (433 años), flujo de neutrones constante y a la baja emisión de radiación gamma, en comparación con otras fuentes, la fuente certificada de $^{241}\text{Am-Be}$ (actividad de $1.13 \pm 0.03 \times 10^6$ n/s en ángulo sólido 4π) ha sido elegida como fuente de neutrones para este estudio.

Grabado Químico

El procedimiento establecido para el revelado de trazas latentes en detectores plásticos requiere el uso de una solución acuosa de NaOH ó KOH en concentración de 1 a 12 moles y temperaturas de entre 30 y 70 grados Celsius durante periodos de tiempo que van desde las 3 a las 6 horas. Dados los trabajos de investigación en la optimización en el revelado de las trazas, se utilizó según el protocolo establecido, una solución de KOH 6 Normal en la cual los detectores fueron atacados durante seis horas.

Selección del método lectura

Dada la eficiencia en el conteo de trazas y procesamiento de datos masivos brindados por softwares especializados, la obtención de la densidad de trazas, se llevó a cabo utilizando un sistema automatizado por computadora, en el cual se analizaron las imágenes fotográficas digitales obtenidas por inspección de microscopía óptica en cada detector.

Procedimiento experimental

En seguida se detalla la preparación de los dispositivos detectores.

Dispositivo de detección de neutrones sin convertidor

Se desarrolló un dispositivo para la detección de neutrones, que consta de un contenedor plástico con dimensiones 3.5cm de diámetro y 1.7 cm de altura (Figura 2.1) como porta detectores, en el cual se colocan dos detectores (CR-39), con la cara lisa ortogonal al flujo de neutrones, (esto debido a que ya el material sensible se encuentra grabado en una de sus caras con el número de serie). Posteriormente se colocó hule espuma de 2cm de espesor, para que al cerrar el contenedor plástico, para que los detectores permanezcan fijos y se conserve la geometría del dispositivo en el proceso de irradiación.

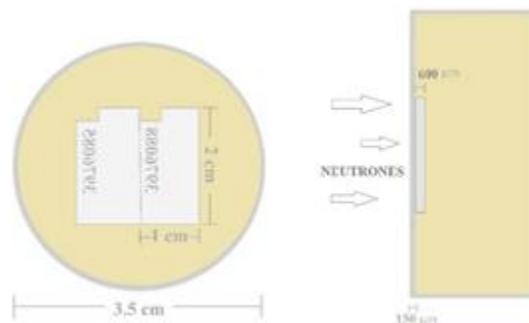


Figura 2.1 Dispositivo de detección (CR-39), vista frontal y lateral. Preparación de los detectores para la detección sin convertidor.

Dispositivo de detección de neutrones con convertidor ^{10}B (espesor fijo).

Se utilizó un pincel de cerdas finas para depositar sobre cinta adhesiva una capa de masa conocida de ^{10}B , sobre 9 pares de detectores CR-39. Estos detectores fueron colocados por pares en dispositivos de acrílico circulares y selladas con cinta adhesiva, conservando la geometría descrita en el dispositivo sin convertidor. En seguida se esquematiza el arreglo:

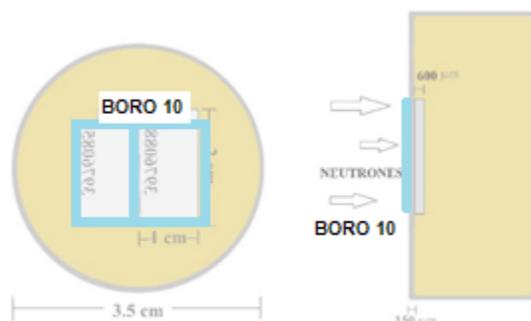


Figura 2.4. Preparación de los detectores para la detección con convertidor de ^{10}B .

Dispositivo de detección de neutrones con convertidor ^{10}B (espesor variable)

Se utilizaron 3 cintas adhesivas con capas de tres espesores distintos de ^{10}B (10, 20 y 30 miligramos) como convertidor sobre 3 detectores CR-39. En seguida introdujeron en cajas de acrílico y se sellaron con cinta adhesiva. Este arreglo experimental, se ilustra en la figura 2.5.

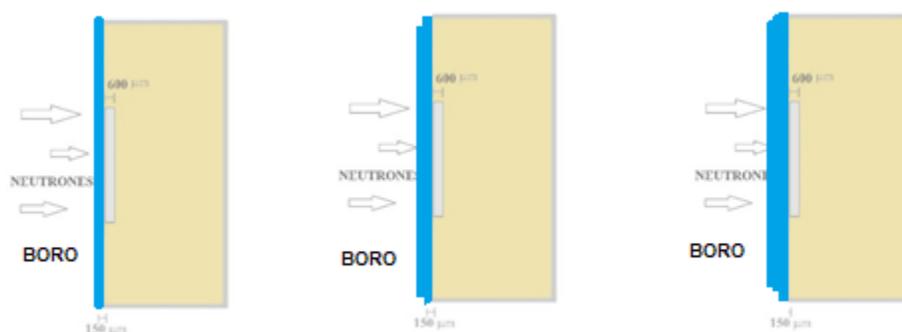


Figura 2.5. Preparación de los detectores para la detección con convertidor de ^{10}B .

Irradiación

En seguida se establecen las condiciones de irradiación de los dispositivos detectores para la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$.

Exposición de los detectores sin convertidor y con convertidor (espesor fijo).

Los detectores sin convertidor y con convertidor de espesor fijo, fueron expuestos simultáneamente a la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$, obteniendo tiempos de irradiación de 1.5, 3, 4.5, 6, 9, 12, 16, 20 y 24 horas.

Exposición de los detectores con diferentes espesores en la capa convertidora

Las cajas con los detectores de diversos espesores de convertidor fueron expuestas durante 9 horas a la fuente de neutrones.

En la figura 2.6 se ilustra el dispositivo experimental para la irradiación:

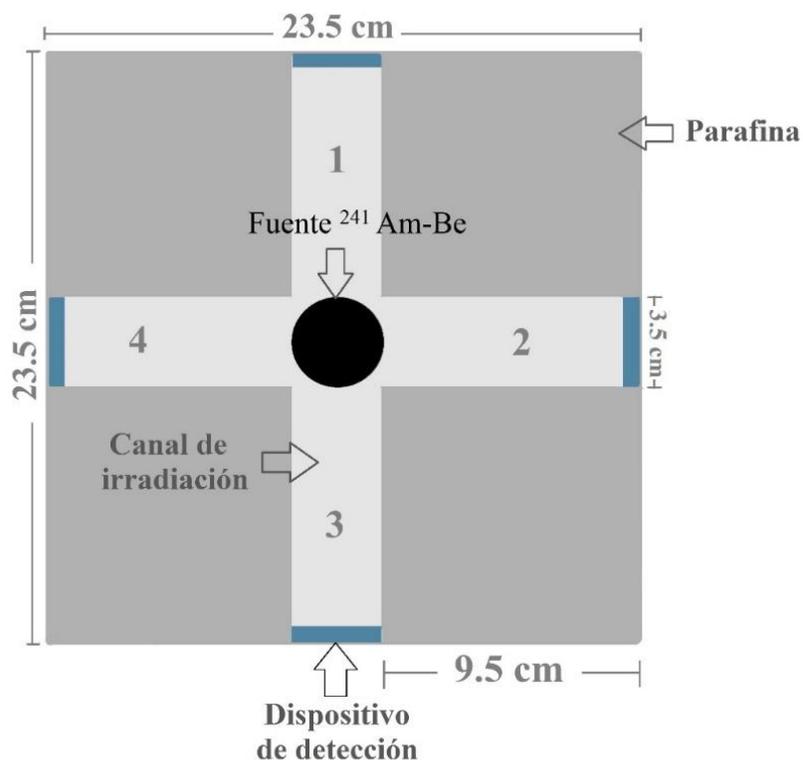


Figura 2.6. Esquema del dispositivo de irradiación de los detectores.

Grabado químico.

Todos los detectores CR-39 irradiados más un testigo se introdujeron en una gradilla plástica que permite un grabado homogéneo en ambas caras de los mismos y se sometieron al mismo proceso de grabado químico, siguiendo los protocolos del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría, PAD del IFUNAM (*Espinosa et al., 1996*).

El grabado químico se realiza con solución KOH al 6.25 N (*Espinosa et al., 1996; Harvey et al. 1998*), en un baño térmico de temperatura controlada, a una temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. De acuerdo a los protocolos los tiempos de grabado pueden variar desde 3 hasta 18 hrs (*Gammage y Espinosa et al., 1997; Harvey et al., 1998; Espinosa et al., 1996*).

Para este trabajo se seleccionó un periodo de 6 horas de grabado, tiempo suficiente para observar las trazas formadas y disminuir el tiempo del proceso.

Lavado

Una vez cumplidas las seis horas de grabado, los detectores fueron cuidadosamente retirados de la solución y lavados con agua destilada a presión de chorro, con el fin de detener el proceso de desgaste.

Lectura de trazas nucleares.

Para la lectura de la densidad de trazas, se utilizó el Sistema de Análisis de Imágenes Digitales DIAS. El cual está compuesto por un microscopio óptico con 3 lentes de 40x, 100x y 200x, acoplado a este se tiene una cámara CCD por sus siglas en inglés (Charge Coupled Device) para procesar la imagen, conectado en paralelo con un monitor para observar la forma de las trazas, como se muestra en la Figura 2.7.

Las imágenes observadas a través del microscopio óptico son registradas por la cámara CCD. Esta información es llevada a una tarjeta digitalizadora, y se analiza con el programa Mocha Image Analysis, para hacer la conversión a densidad de trazas (trazas/cm²), (*Espinosa et al., 1996*). Los datos obtenidos se pueden analizar con cualquier otro programa estadístico OriginPro 8 o Microsoft Excel.

Se dispusieron uno a uno los detectores grabados bajo el microscopio óptico y se obtuvieron imágenes digitalizadas con aumento de 200X de 10 campos aleatorios para cada detector.

En seguida se utilizó un software de procesamiento de imágenes (Mocha) para contar el número de trazas por campo, obteniendo la densidad (trazas por unidad de área) y el flujo de neutrones.

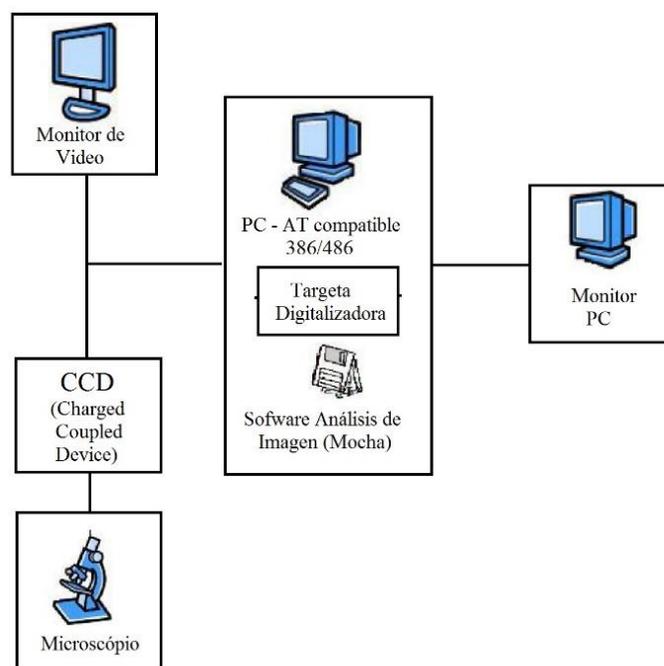


Diagrama 2.1. Diagrama del dispositivo de lectura de Trazas Nucleares en Sólidos (*PAD, IFUNAM*)

Finalmente, se obtuvo el incremento en la respuesta de detección debido al uso de ^{10}B como convertidor.

CAPÍTULO III: INSTRUMENTACIÓN

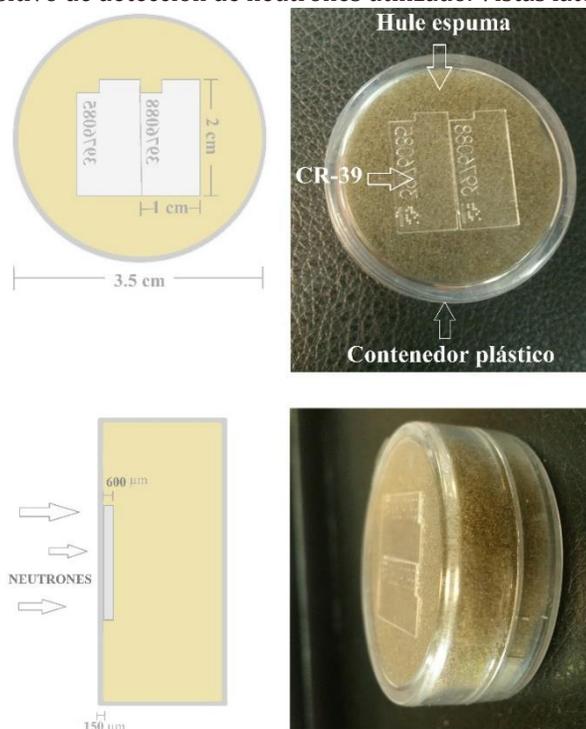
Como se mencionó en el Capítulo II: Metodología, la detección de neutrones será realizada por la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos, la cual puede dividirse en tres pasos: exposición a la radiación, revelado químico de la traza, caracterización y lectura.

En este capítulo, se establecen las especificaciones de la instrumentación empleada en la metodología experimental.

Dispositivo de detección

En la figura 3.1 se muestra el dispositivo de detección de neutrones, el cual consta de una caja de plástico o portadetector y dos detectores CR-39 Lantrack® (materiales sensible).

Figura 3.1. Dispositivo de detección de neutrones utilizado. Vistas lateral y superior.



Material sensible

Para este trabajo se utilizaron los detectores CR-39 Lantrack®, con dimensiones de 1 cm x 2 cm y un espesor de 600 micras, cuentan originalmente con unas protecciones de plástico las cuales fueron retiradas para la experimentación. El CR-39 es producido por el proceso "Columbia Resin-39", (policarbonato alil diglicol).



Figura 3.2. Detectores CR-39 utilizados en el proceso experimental.

Portadetectores

Se utilizó un contenedor plástico con dimensiones 3.5cm de diámetro y 1.7 cm de altura (Figura 3.3) como portadetectores, en el cual se colocan dos detectores (CR-39).



Figura 3.3. Portadetectores de plástico.

Fuente de neutrones

Se utilizó una fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ marca EAMA con actividad de $1.13 \pm 0.03 \times 10^6$ n/s en un ángulo sólido de 4π , con una incertidumbre asociada de $\pm 2.5\%$ y certificada el 11 de septiembre de 1978, la cual se encuentra en el Edificio del Acelerador Van de Graff del IF-UNAM y cuyas dimensiones, se muestra en la figura 3.4:

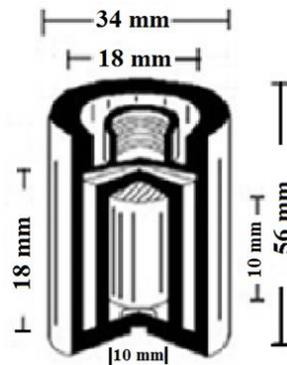


Figura 3.4 Diagrama de la fuente $^{241}\text{Am-Be}$.

Dispositivo de irradiación

El dispositivo de irradiación está elaborado de parafina, con dimensiones: base de 23.5 cm x 23.5 cm y con altura de 34 cm, como se muestra en la Figura 3.5.

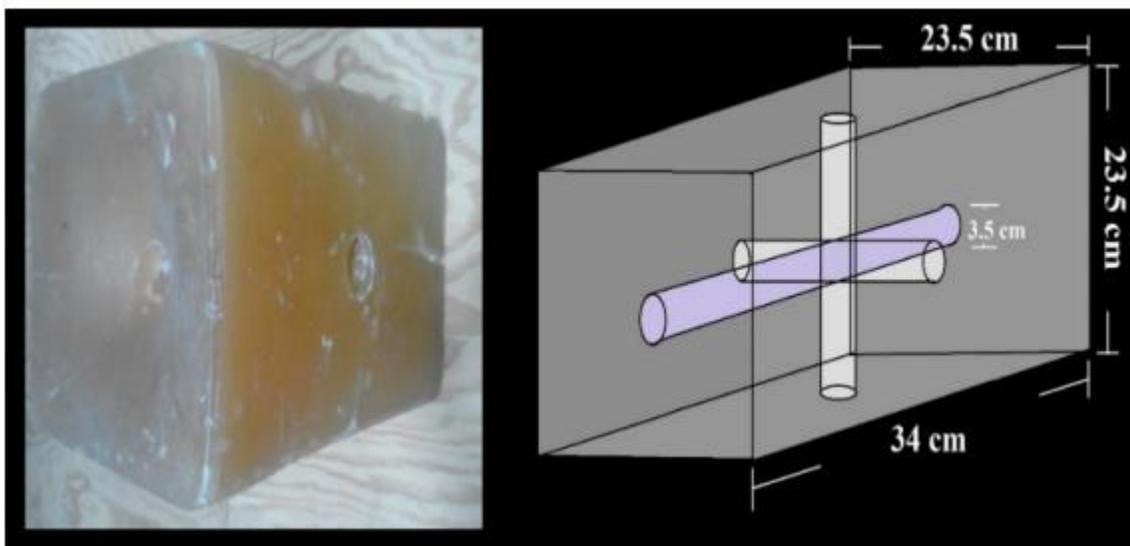


Figura 3.5 Dimensiones e imagen del dispositivo de irradiación.

Convertidor

Se utilizó como material convertidor $^{10}\text{Boro}$ de alta pureza pulverizado.



Figura 3.6. Material convertidor $^{10}\text{Boro}$.

Dispositivo y materiales de Grabado Químico.

En seguida se detallan las características del dispositivo y materiales de grabado utilizados en el desarrollo experimental.

Compuesto químico KOH

Para preparar la solución de KOH al 6.25 M, se utilizaron pellets de hidróxido de potasio de la marca J.T. Baker. El KOH es un compuesto químico de color blanco y no presenta olor. Su peso molecular es 56.11, su densidad es de 2.04 g/cm³, y su punto de ebullición es de 1327 ° C. En contacto con la piel y los ojos puede causar irritación así que hay que manejarlo usando guantes de látex.

Dispositivo de baño térmico controlado

El proceso del baño María nos sirvió para elevar la temperatura de la solución de KOH hasta 60 ± 1 ° C y así poder llevar a cabo el proceso de grabado de los detectores. El dispositivo que utilizamos para el baño María es el equipo Precision Scientific Model 184 Water Bath.

Capacidad máxima:19.5 litros.Rango de temperatura del agua: ambiente hasta 99.9 ° C.
Voltaje:110-120 VAC.

Dimensiones: externas 45.72 × 39.37 × 25.4 cm. Internas de 35.56 × 30.48 × 17.78 cm.

Portadetectores de acrílico

El portadetectores utilizado está hecho de acrílico pues como hemos mencionado con anterioridad este material no se ve afectado por la solución de KOH. El portadetectores presenta varias ranuras para poder colocar los detectores CR-39 en ellos sin que superpongan uno con otro y permitir así un grabado uniforme sobre su superficie. También cuenta con un mango que sirve para sumergirlo y sacarlo de la solución de KOH sin tocar con las manos la solución.

En la figura 3.6 se muestra el montaje del dispositivo y materiales de grabado descritos anteriormente:



Figura 3.6. Materiales y dispositivo de grabado

Sistema de lectura

Se utilizó el sistema de lectura DIAS, que consta de un microscopio óptico Metalux MT- TISI, al cual se encuentra acoplada una cámara CCD RS-17 (Kyowa KMC-100A CCD), en paralelo se conecta un monitor Victor TM-14, la señal de la cámara se envía a una computadora por medio de un aparato Grabber Mylex 33-ZXP (tarjeta de video), como se muestra en la Figura 3.7. La computadora cuenta con un programa de análisis de imágenes conocido como Mocha Image Analysis versión 1.2, 1987-1993 de Jandel Scientific.

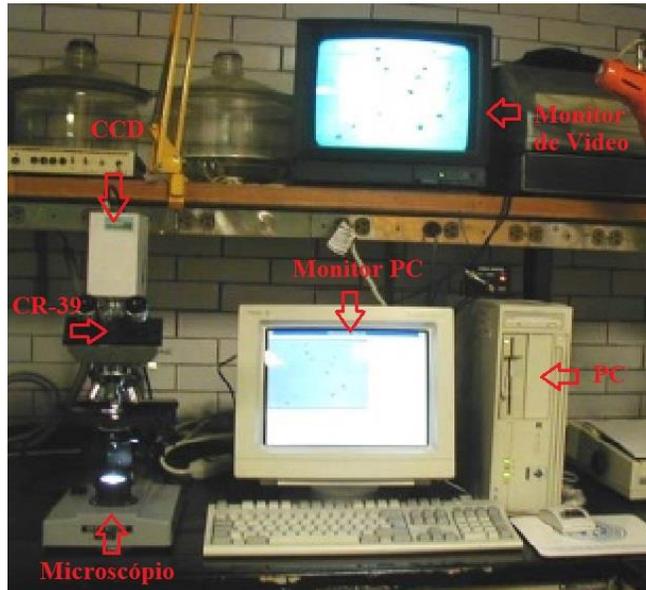


Figura 3.7 Imagen del sistema de lectura DIAS (PAD IFUNAM).

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos al seguir la metodología establecida en el capítulo 2.

A) Respuesta del dispositivo para detección de neutrones usando policarbonato alil diglicol (CR-39) sin recubrimiento de ¹⁰B (sin convertidor).

En las tablas 4.1 y 4.2 se presentan los datos obtenidos en los dos detectores del dispositivo sin recubrimiento de ¹⁰B. Habiendo leído 10 campos para cada uno, se registra el número de trazas por campo (área = .108 mm²) para los diferentes tiempos de exposición y se obtiene el valor promedio, la desviación estándar y finalmente la densidad de trazas promedio por cm².

DETECTOR 1	#Trazas/ campo	#Trazas /campo							
Campo 1	1	3	3	7	9	11	15	20	19
Campo 2	1	3	5	6	12	10	15	17	23
Campo 3	1	4	5	5	11	9	10	18	21
Campo 4	1	5	4	6	7	11	15	19	20
Campo 5	1	2	5	6	11	9	17	14	19
Campo 6	2	3	5	6	10	14	15	16	22
Campo 7	2	3	5	6	10	13	11	15	20
Campo 8	1	5	4	6	9	14	14	21	21
Campo 9	1	6	7	7	8	13	17	19	19
Campo 10	1	4	6	6	7	15	15	15	19
Σ (Suma)	12	38	49	61	94	119	144	174	203
Promedio	1.2	3.8	4.9	6.1	9.4	11.9	14.4	17.4	20.3
Desv. Est.	0.42	1.23	1.10	0.57	1.71	2.18	2.27	2.37	1.42
Desv. Est. %	35.14	32.35	22.46	9.31	18.22	18.35	15.77	13.60	6.99
Exposición (hrs)	1.5 hrs	3 hrs	4.5 hrs	6 hrs	9 hrs	12 hrs	16 hrs	20 hrs	24 hrs
Tr/cm ²	1111	3519	4537	5648	8704	11019	13333	16111	18796

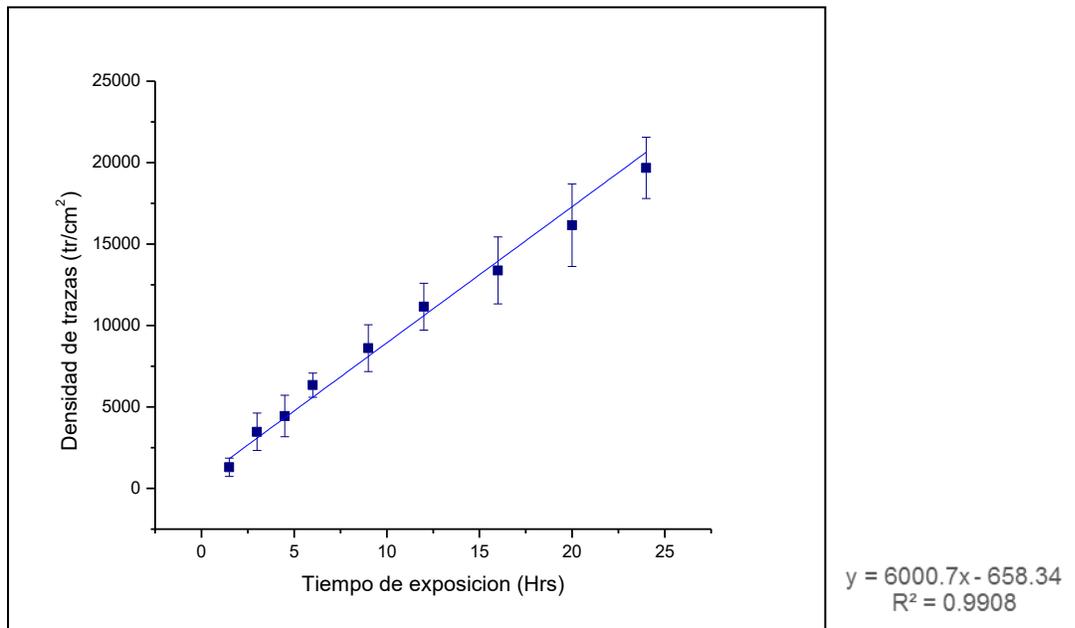
Tabla 4.1. Respuesta de detección (detector 1) sin convertidor para diferentes tiempos de exposición.

DETECTOR 2	#Trazas/ campo	#Trazas /campo							
Campo 1	2	5	3	7	10	13	11	22	24
Campo 2	1	2	2	8	9	12	16	17	19
Campo 3	1	4	4	9	10	12	17	15	22
Campo 4	1	3	7	8	10	11	11	14	25
Campo 5	3	2	6	6	8	13	16	15	19
Campo 6	1	5	3	6	6	13	14	15	19
Campo 7	1	5	6	8	9	11	15	16	22
Campo 8	1	3	6	8	9	11	14	18	25
Campo 9	3	3	5	9	11	13	17	21	26
Campo 10	2	5	5	7	10	13	14	22	21
Σ (Suma)	16	37	47	76	92	122	145	175	222
Promedio	1.6	3.7	4.7	7.6	9.2	12.2	14.5	17.5	22.2
Desv. Est.	0.84	1.25	1.64	1.07	1.40	0.92	2.17	3.10	2.70
Desv. Est. %	52.70	33.83	34.82	14.14	15.20	7.53	14.99	17.72	12.16
Exposición (hrs)	1.5 hrs	3 hrs	4.5 hrs	6 hrs	9 hrs	12 hrs	16 hrs	20 hrs	24 hrs
Tr/cm ²	1481	3426	4352	7037	8519	11296	13426	16204	20556

Tabla 4.2. Respuesta de detección (detector 2) sin convertidor para diferentes tiempos de exposición.

Obteniendo el promedio de los valores de ambos detectores, se obtiene la densidad de trazas por centímetro cuadrado para 1.5, 3, 4.5, 6, 9, 12, 16, 20 y 24 hrs de exposición a la fuente de neutrones Am-Be.

RESPUESTA DE DETECCIÓN SIN CONVERTIDOR



Gráfica 4.1. Respuesta de detección del CR-39 sin convertidor como función del tiempo de exposición.

B) Respuesta del dispositivo para detección de neutrones usando policarbonato alil diglicol (CR-39) de con recubrimiento ^{10}B (convertidor).

En las tablas 4.3 y 4.4 se presentan los datos obtenidos en los dos detectores del dispositivo con recubrimiento de ^{10}B como convertidor. Habiendo leído 10 campos para cada uno, se registra el número de trazas por campo (área = $.108\text{ mm}^2$) para los diferentes tiempos de exposición y se obtiene el valor promedio, la desviación estándar y finalmente la densidad de trazas promedio por cm^2 .

DETECTOR 1	#Trazas/ campo								
Campo 1	10	22	25	48	51	77	117	132	155
Campo 2	13	22	25	38	45	78	118	112	158
Campo 3	11	20	25	62	51	64	114	130	145
Campo 4	14	14	24	46	62	65	100	105	150
Campo 5	10	16	22	38	49	68	120	118	159
Campo 6	12	17	21	55	58	73	124	139	149
Campo 7	9	15	24	39	60	76	105	130	156
Campo 8	10	22	32	20	47	66	90	150	174
Campo 9	13	20	28	29	61	78	126	134	131
Campo 10	12	15	30	36	42	73	91	126	156
Σ (Suma)	114	183	256	411	526	718	1105	1276	1533
Promedio	11.4	18.3	25.6	41.1	52.6	71.8	110.5	127.6	153.3
Desv. Estándar	1.65	3.23	3.44	12.22	7.17	5.57	13.18	13.13	11.04
Desv. Est. %	14.44	17.67	13.43	29.72	13.63	7.76	11.93	10.29	7.20
Exposición (hrs)	1.5 hrs	3 hrs	4.5 hrs	6 hrs	9 hrs	12 hrs	16 hrs	20 hrs	24 hrs
T_r/cm^2	10556	16944	23704	38056	48704	66481	102315	118148	141944

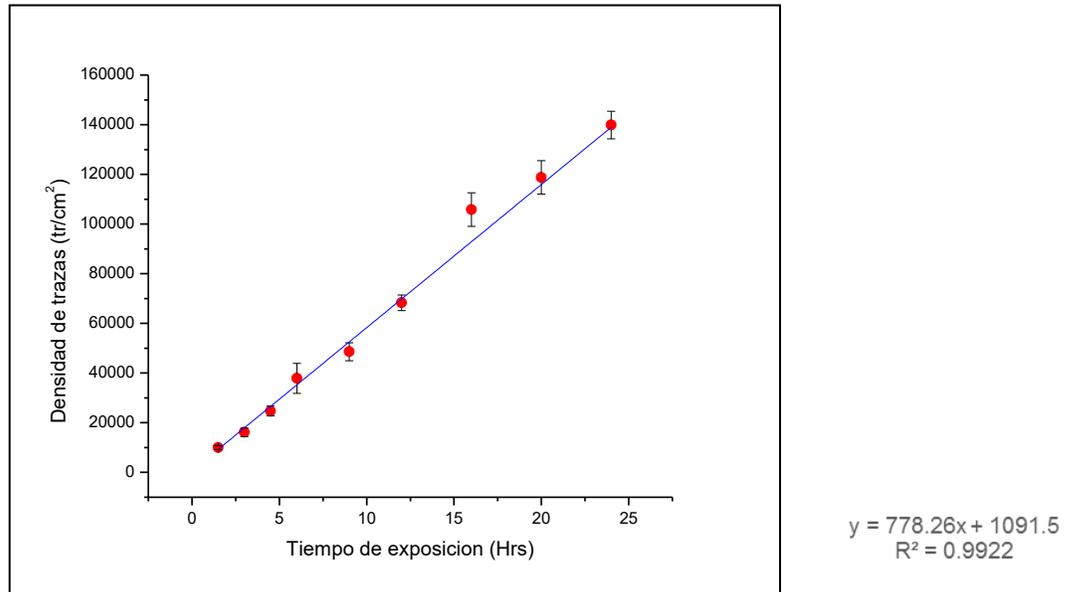
Tabla 4.3. Respuesta de detección del dispositivo con convertidor para diferentes tiempos de

DETECTOR 2	#Trazas/ campo								
Campo 1	11	22	21	42	55	67	96	131	137
Campo 2	9	13	30	45	52	91	127	111	140
Campo 3	10	18	27	41	51	74	116	120	146
Campo 4	10	18	20	59	42	62	111	135	162
Campo 5	11	23	42	41	55	69	134	157	143
Campo 6	10	22	27	35	54	66	118	143	162
Campo 7	10	11	26	45	48	71	118	116	141
Campo 8	7	10	19	27	66	86	126	131	144
Campo 9	12	9	31	34	45	76	113	122	164
Campo 10	12	20	35	38	56	95	122	124	149
Σ (Suma)	102	166	278	407	524	757	1181	1290	1488
Promedio	10.2	16.6	27.8	40.7	52.4	75.7	118.1	129	148.8
Desv. Estándar	1.48	5.38	7.13	8.47	6.65	11.26	10.43	13.63	10.12
Desv. Est. %	1.45	3.24	2.56	2.08	1.27	1.49	0.88	1.06	0.68
Exposición (hrs)	1.5 hrs	3 hrs	4.5 hrs	6 hrs	9 hrs	12 hrs	16 hrs	20 hrs	24 hrs
T_r/cm^2	9444	15370	25741	37685	48518	70093	109352	119444	137778

Tabla 4.4. Respuesta de detección del dispositivo con convertidor para diferentes tiempos de exposición.

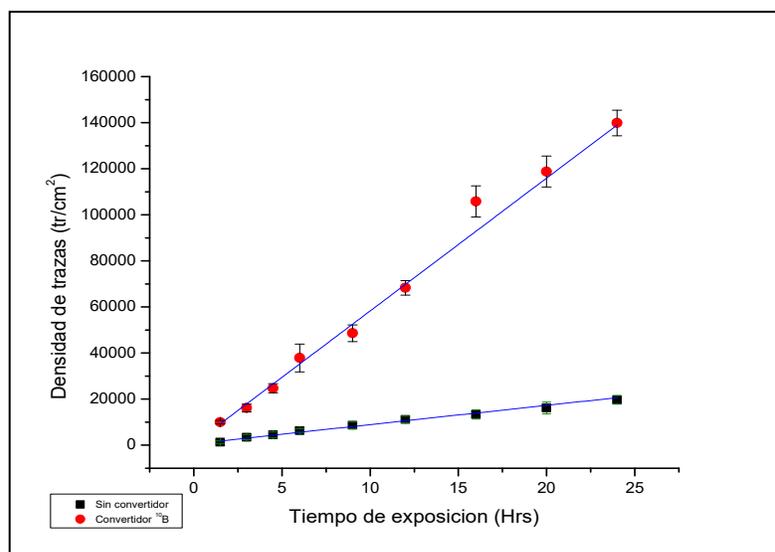
Obteniendo el promedio de los valores de ambos detectores con recubrimiento de $^{10}\text{Boro}$, se obtiene la densidad de trazas por centímetro cuadrado para 1.5, 3,4.5, 6, 9, 12, 16, 20 y 24 horas de exposición a la fuente de neutrones Am-Be.

RESPUESTA DE DETECCIÓN CON CONVERTIDOR ^{10}B



Gráfica 4. 2. Respuesta de detección del CR-39 con convertidor de $^{10}\text{Boro}$.

En la gráfica 4.2, se muestra a modo de comparación, la respuesta de detección con y sin el uso del material convertidor $^{10}\text{Boro}$. Se observa para el caso de 20 hrs de irradiación, una ganancia de en la detección de 87.1%. Lo anterior, se debe a que al emplear $^{10}\text{Boro}$, se favorece la generación de reacciones (n,α) aumentando así el número de trazas formadas en el material detector.



Gráfica 4.3. Comparación de la respuesta de detectores con y sin convertidor.

C) Respuesta del dispositivo para detección de neutrones usando policarbonato alil diglicol (CR-39) con recubrimiento convertidor de espesor variable de (^{10}B).

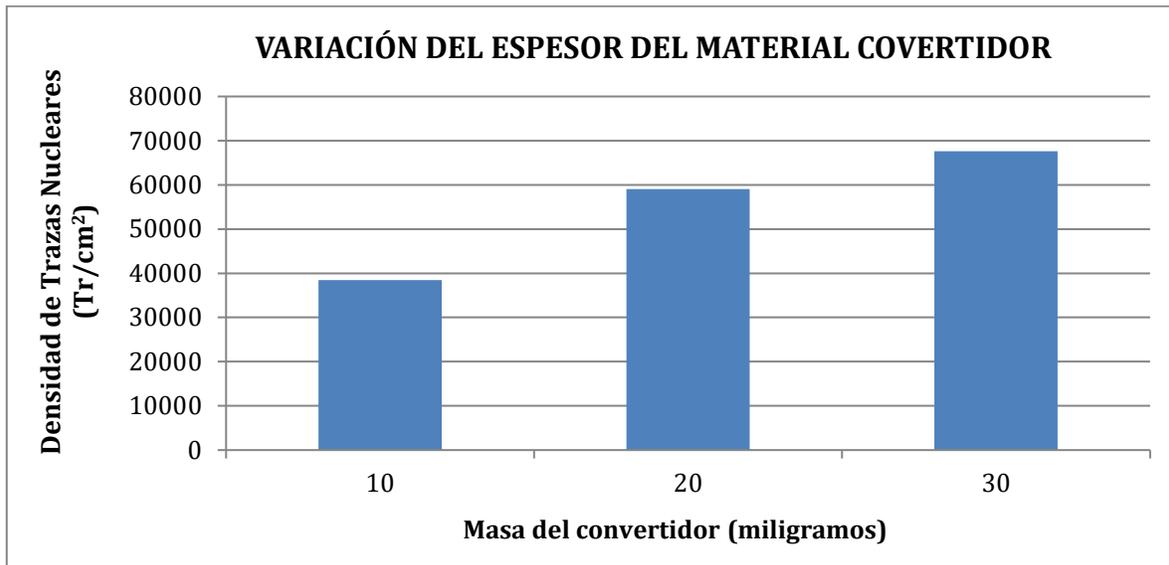
Una vez mostrado el aumento significativo en la detección de los dispositivos debido al uso de $^{10}\text{Boro}$ como material convertidor, se llevó a cabo un estudio en el que se evaluó como función de la variación en el espesor (masa) del material convertidor depositado sobre el CR-39, el número de trazas por unidad de área, para 9 horas de irradiación.

En la tabla 5 se presentan los datos obtenidos. Habiendo leído 10 campos para cada caso, se registra el número de trazas por campo (área = .108 mm²), para los diferentes tiempos de exposición y se obtiene el valor promedio, la desviación estándar y finalmente, la densidad de trazas promedio por cm².

Variación de Boro	B	2B	3B
CAMPO	# de trazas	# de trazas	# de trazas
1	52	63	88
2	52	68	76
3	59	64	79
4	37	64	73
5	42	75	53
6	32	50	71
7	24	59	75
8	33	62	76
9	33	65	80
10	51	68	59
Σ (Suma)	415	638	730
Promedio	41.5	63.8	73
Desv. Estándar	11.44	6.49	10.18
Desv. Est. %	27.57	10.18	13.94
Convertidor (miligramos \pm .5)	10	20	30
T_r/cm^2	38426	59074	67593

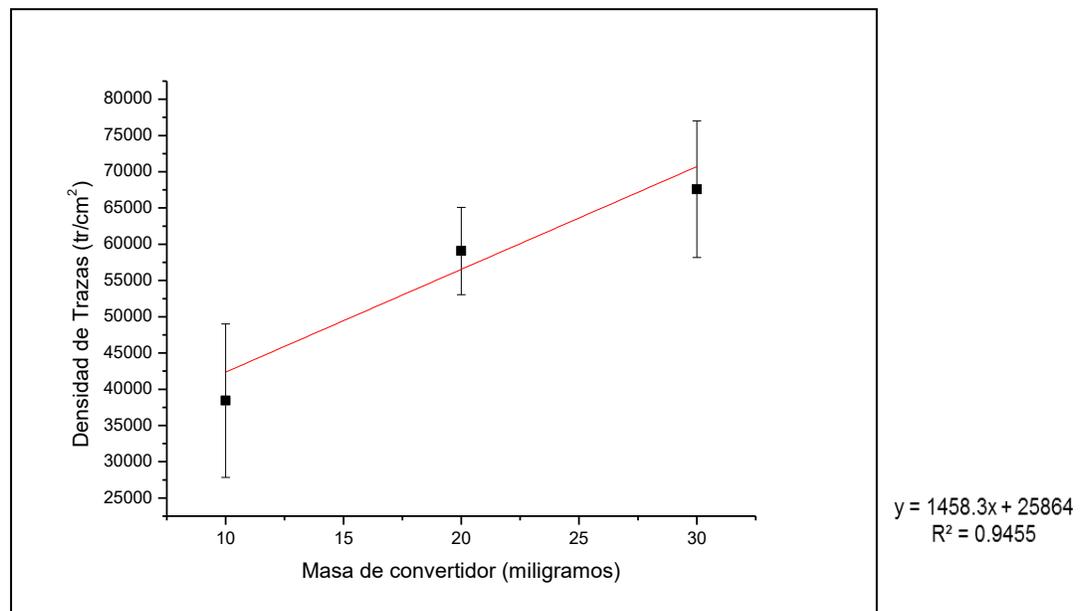
Tabla 4.5. Densidad de trazas nucleares al variar el espesor de la capa de convertidor.

En seguida se grafican los resultados obtenidos en la tabla 5:



Gráfica 4.4. Detección como función del espesor del convertidor.

En la gráfica 5, se observa la nuevamente el aumento en la respuesta de detección debido al uso del convertidor estudiado, siendo esta de carácter lineal.



Gráfica 4.5. Variación del espesor del convertidor.

Cabe mencionar que para las Secciones B) y C) en las que se utilizó el material B¹⁰ como convertidor, se observó saturación en el conteo o traslape de las trazas grabadas para tiempos mayores a 24 horas y para más de 3 capas de material convertidor depositado, por lo que no fue posible continuar ampliando el rango de registro experimental.

Finalmente, se determina que es posible detectar neutrones rápidos con la metodología de Trazas Nucleares en Sólidos. Además, el uso de un recubrimiento de ¹⁰Boro como material convertidor sobre la superficie de impacto de neutrones, provoca un significativo aumento en la eficiencia de detección. Este recubrimiento puede tener diferentes espesores, obteniendo con cada uno de ellos mayor sensibilidad, hasta un límite de saturación o traslape en las trazas registradas.

Aplicaciones

La MTNS tiene múltiples aplicaciones en diversas áreas de la ciencia, por ejemplo:

- Tecnología nuclear: estudio y caracterización (flujo, distribución espacial y espectro de energía) de reactores, aceleradores y fuentes isotópicas. (*Harvey et al., 1998; Espinosa et al 1996*)
- Dosimetría: cuantificación de dosis en personal médico, de investigación e industrial. (*Harvey et al., 1998; Puglesi et al., 2003*).
- + Astrofísica: investigación de partículas solares, búsqueda de elementos súper pesados en rayos cósmicos, búsqueda de partículas elementales y exóticas, entre otras. Ciencias de la tierra: datación de minerales y meteoritos. (*Durani y Bull, 1987; Shavrin et al., 2002*).
- + Monitoreo y dosimetría de radón y torón a bajo costo. (*Fleisher et al. 1998*).
- + Fabricación de microfiltros. (*Fleisher et al. 1998*).

-
- + Se realizó la detección de neutrones rápidos emitidos por la fuente de ^{241}Am -Be a través del método de Trazas Nucleares en Sólidos, en el detector polimérico denominado CR-39.
 - + Se demostró que el uso de $^{10}\text{Boro}$ como material convertidor favorece la respuesta de detección de neutrones rápidos en el CR-39, al ser precursor de la reacción nuclear (n,α) .
 - + Se observó un incremento lineal en la respuesta de detección de neutrones rápidos para el CR-39, al aumentar el espesor del recubrimiento de material convertidor $^{10}\text{Boro}$.
 - + Se corroboró la eficacia, bajo costo y viabilidad técnica en el uso del Método de Trazas Nucleares en Sólidos para la detección de neutrones rápidos, constituyendo una alternativa accesible y precursora de nuevas aportaciones al estudio y conocimiento de la física de radiaciones.

Anexo I: Definiciones

Actividad: número de desintegraciones que se producen por unidad de tiempo.

Antineutrino electrónico: las antipartículas de los neutrinos, son partículas neutras, tienen un spin de $1/2$, y son parte de la familia de partículas de los leptones.

CAS: El número de registro CAS, o simplemente número CAS, es un identificador numérico permanente, inconfundible y único que otorga el Servicio de Resúmenes Químicos (Chemical Abstract Service o CAS) de la Sociedad Química Americana a cada sustancia descrita en la literatura, incluyendo a los plaguicidas.

Decaimiento nuclear: es un proceso en el que un núcleo inestable se transforma en uno más estable, emitiendo partículas y/o fotones y liberando energía durante el proceso.

Fisión nuclear: La fisión ocurre cuando un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos pequeños, además de algunos subproductos como neutrones libres, fotones (generalmente rayos gamma) y otros fragmentos del núcleo como partículas alfa y beta.

Fuerza nuclear débil: es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Esta fuerza es la responsable de fenómenos naturales como la desintegración radiactiva. La palabra "débil" deriva del hecho que un campo de fuerzas es de 10^{13} veces menor que la interacción nuclear fuerte

Ionización: fenómeno mediante el cual se producen iones, estos son átomos o moléculas cargadas eléctricamente debido al exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutra.

Isotrópico: que tiene propiedades que son idénticas en todas direcciones

Mol: es la unidad con que se mide la cantidad de sustancia, una de las siete magnitudes físicas fundamentales del Sistema Internacional de Unidades. $1 \text{ mol} = 6,022\ 141\ 29\ (30) \times 10^{23}$ átomos.

Neutrino electrónico: es una partícula elemental que pertenece al grupo de los leptones. Tiene spin $1/2$, y una masa como mucho un millón de veces menor que la del electrón, pero no nula.

Positrón: es una partícula elemental, antipartícula del electrón. Posee la misma cantidad de masa que el electrón y carga eléctrica; sin embargo, esta es positiva.

Radiación Gamma (γ): es un tipo de radiación electromagnética, y por tanto constituida por fotones, producida por desexcitación de un nucleón de un nivel o estado excitado a otro de menor energía y por desintegración de isótopos radiactivos.

Radiación X: radiación electromagnética, invisible para el ojo humano, La longitud de onda está entre 10 a 0,01nanómetros, correspondiendo a frecuencias en el rango de 30 a 30000 PHz

Sección eficaz (σ): es una medida de la interacción entre proyectiles o partículas lanzadas contra un centro dispersor, es una magnitud escalar que tiene como unidad, unidades de superficie, en ciertos casos representa la sección transversal efectiva vista por los proyectiles al aproximarse al blanco.

Termalización: neutrones libres, estos reducen su velocidad de manera gradual como consecuencia de los choques de con los núcleos de los átomos vecinos. Es un fenómeno típico de los procesos que tienen lugar en los reactores de las centrales nucleares

Vida media: promedio de vida de un núcleo o de una partícula subatómica libre antes de desintegrarse.

Anexo II: Tabla de constantes físicas.

Constantes físicas para el neutrón, protón y partículas α .

<i>Cantidad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Masa del neutrón	m_n	$1.67492716(13) \times 10^{-27}$	kg
en u, $m_n = A_r(n)$		1.00866491578(55)	u
energía equivalente	$m_n c^2$	$1.50534946(12) \times 10^{-10}$	J
en MeV		939.565330(38)	MeV
Neutrón- electrón proporción de masa	m_n / m_e	1838.6836550(40)	
neutrón- muón proporción de masa	m_n / m_μ	8.89248478(27)	
neutrón- tau proporción de masa	m_n / m_τ	0.528722(86)	
neutrón- protón proporción de masa	m_n / m_p	1.00137841887(58)	
neutrón masa molar $N_A m_n$	M_n	$1.00866491578(55) \times 10^{-3}$	kg mol ⁻¹
neutron longitud de onda Compton $h / m_n c$	$\lambda_{c,n}$	$1.319590898(10) \times 10^{-15}$	m
Neutrón momento magnético	μ_n	$-0.96623640(23) \times 10^{-26}$	J T ⁻¹
a proporción con el magnetón de Bohr	μ_n / μ_B	$-1.04187563(25) \times 10^{-3}$	
Proporción con el magnetón nuclear	μ_n / μ_N	-1.91304272(45)	
Neutrón g-factor $2\mu_n / \mu_N$	g_n	-3.82608545(90)	
Neutrón –electrón			
momento magnético proporción	μ_n / μ_e	$1.04066882(25) \times 10^{-3}$	
Neutrón-protón			
momento magnético proporción	μ_n / μ_p	-0.68497934(16)	
Neutrón giromagnético proporción $2 \mu_n /\hbar$	γ_n	$1.83247188(44) \times 10^8$	s ⁻¹ T ⁻¹
Masa del protón	m_p	$1.67262158(13) \times 10^{-27}$	kg
en u, $m_p = A_r(p)$		1.00727646688(13)	u
Energía equivalente	$m_p c^2$	$1.50327731(12) \times 10^{-10}$	J
en MeV		938.271998(38)	MeV
Protón- electrón proporción de masa	m_p / m_e	1836.1526675(39)	
Protón- muón proporción de masa	m_p / m_μ	8.88024408(27)	
Protón- tau proporción de masa	m_p / m_τ	0.527994(86)	
Protón- neutrón proporción de masa	m_p / m_n	0.99862347855(58)	
Protón masa molar $N_A m_p$	M_p	$1.00727646688(13) \times 10^{-3}$	kg mol ⁻¹
Protón longitud de onda Compton $h / m_p c$	$\lambda_{c,p}$	$1.321409847(10) \times 10^{-15}$	m
protón momento magnético	μ_p	$1.410606633(58) \times 10^{-26}$	J T ⁻¹
a proporción con el magnetón de Bohr	μ_p / μ_B	$1.521032203(15) \times 10^{-3}$	
Proporción con el magnetón nuclear	μ_p / μ_N	2.792847337(29)	
protón g-factor $2\mu_p / \mu_N$	g_p	5.585694675(57)	
protón- neutrón			
momento magnético proporción	μ_p / μ_n	-1.45989805(34)	
protón giromagnético proporción $2\mu_p / \hbar$	γ_p	$2.67522212(11) \times 10^8$	s ⁻¹ T ⁻¹

<i>Cantidad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Masa de partícula alfa	M_α	$6.64465598(52) \times 10^{-27}$	kg
en u, $m_\alpha = A_r(\alpha)$		4.0015061747(10)	u
energía equivalente	$M_\alpha c^2$	$5.97191897(47) \times 10^{-10}$	J
en MeV		3727.37904(15)	MeV
partícula alfa-electrón proporción de masa	m_α / m_e	7294.299508(16)	
partícula alfa-protón proporción de masa	m_α / m_p	3.972599684(11)	
partícula alfa masa molar $N_A m_\alpha$	M_α	$4.0015061747(10) \times 10^{-3}$	kg mol ⁻¹
Velocidad de la luz en el vacío	c	299792458	m s ⁻¹
Constante de permeabilidad	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	N A ⁻²
		$=12.56637 \times 10^{-7}$	N A ⁻²
Constante dieléctrica $1 / \mu_0 c^2$	ϵ_0	8.85418×10^{-12}	F m ⁻¹
Impedancia del vacío $\mu_0 c$	Z_0	376.730313461	Ω
Constante gravitacional	G	$6.673(10) \times 10^{-11}$	m ³ kg ⁻¹ s ⁻²
	$G / \hbar c$	$6.707(10) \times 10^{-39}$	(GeV/c ²) ⁻²
Constante de Planck	h	$6.62606876(52) \times 10^{-34}$	J s
en eV s		$4.13566727(16) \times 10^{-15}$	eV s
$h / 2\pi$	\hbar	$1.054571596(82) \times 10^{-34}$	J s
en eV s		$6.58211889(26) \times 10^{-16}$	eV s
Masa de Planck $(\hbar c / G)^{1/2}$	m_P	$2.1767(16) \times 10^{-8}$	kg
Longitud de Planck $\hbar / m_P c = (\hbar c / G^3)^{1/2}$	l_P	$1.6160(12) \times 10^{-35}$	m
Tiempo de Planck $l_P / c = (\hbar c / G^3)^{1/2}$	t_P	$5.3906(40) \times 10^{-44}$	s
Carga elemental	e	$1.602176462(63) \times 10^{-19}$	C
Masa del electrón	m_e	$9.10938188(72) \times 10^{-31}$	kg
en MeV		0.510998902(21)	MeV
Constante de Boltzmann	k	$1.3806503(24) \times 10^{-23}$	J K ⁻¹
en eV K ⁻¹		$8.617342(15) \times 10^{-5}$	eV K ⁻¹

*Referencia (Mohr y Taylor, 2005)

Anexo III: Reacciones nucleares para detector CR-39

Entre otras reacciones posibles en un intervalo de energía de 1 a 10 MeV con núcleos blanco como ^1H , ^{12}C y ^{16}O .

1. $^1\text{H} (n, p)$
2. $^1\text{H} (n, e) ^1\text{H}$
3. $^1\text{H} (n, \gamma) ^2\text{H}$
4. $^{12}\text{C} (n, ^{12}\text{C})$
5. $^{12}\text{C} (n, e) ^{12}\text{C}$
6. $^{12}\text{C} (n, n + p) ^{11}\text{B}$
7. $^{12}\text{C} (n, n + 2\alpha) ^4\text{He}$
8. $^{12}\text{C} (n, \gamma) ^{13}\text{C}$
9. $^{12}\text{C} (n, p) ^{12}\text{B}$
10. $^{12}\text{C} (n, \alpha) ^{11}\text{B}$
11. $^{12}\text{C} (n, \alpha) ^9\text{Be}$
12. $^{16}\text{O} (n, ^{16}\text{O})$
13. $^{16}\text{O} (n, e) ^{16}\text{O}$
14. $^{16}\text{O} (n, n') ^{16}\text{O}$
15. $^{16}\text{O} (n, 2n) ^{15}\text{O}$
16. $^{16}\text{O} (n, n + \alpha) ^{12}\text{C}$
17. $^{16}\text{O} (n, n + 3\alpha) ^4\text{He}$
18. $^{16}\text{O} (n, n + p) ^{15}\text{N}$
19. $^{16}\text{O} (n, n + \text{D}) ^{14}\text{N}$
20. $^{16}\text{O} (n, 2n + p) ^{14}\text{N}$
21. $^{16}\text{O} (n, n + 2p) ^{14}\text{C}$
22. $^{16}\text{O} (n, n + p + \alpha) ^{11}\text{B}$
23. $^{16}\text{O} (n, n') ^{16}\text{O}$
24. $^{16}\text{O} (n, \gamma) ^{17}\text{O}$
25. $^{16}\text{O} (n, p) ^{16}\text{N}$
26. $^{16}\text{O} (n, \text{D}) ^{15}\text{N}$
27. $^{16}\text{O} (n, \text{T}) ^{14}\text{N}$
28. $^{16}\text{O} (n, \alpha) ^{13}\text{C}$
29. $^{16}\text{O} (n, 2\alpha) ^9\text{Be}$
30. $^{16}\text{O} (n, p + \alpha) ^{12}\text{B}$
31. $^{16}\text{O} (n, p) ^{16}\text{N}$
32. $^{16}\text{O} (n, \text{D}) ^{15}\text{N}$
33. $^{16}\text{O} (n, \text{T}) ^{14}\text{N}$
34. $^{16}\text{O} (n, \alpha) ^{13}\text{C}$

Donde la notación es la siguiente: neutrón (n), protón (p), partícula alfa (α), electrón (e), radiación gamma (γ), deuterio (D) y tritio (T).

**Referencia (*NNDC-BNLD, 2006*)

Anexo IV: Procedimiento para la lectura de trazas.

El detector CR-39 se coloca en el microscopio óptico estándar con un filtro azul, se obtienen imágenes de 0.108 mm² para una lente de 200x.

Una vez seleccionada la imagen es capturada por medio del programa Mocha, en la barra de herramientas, en la función *Image* y después con la función *Capture Control* aparecerá un ventana en donde se observa la imagen que se observa en el monitor de video y posteriormente se pulsa en la función *Capture* y la imagen se puede guardar en un archivo designado.

Para el conteo automático, primero se marcan las trazas en la imagen, se selecciona en la barra de herramientas *Threshold Image*, se marcan de rojo con *Overlay 1 (Red)*, y se selecciona la escala de grises adecuada, ya seleccionada la escala de grises finalizamos con *Add Threshold*, con ello las trazas han sido marcadas.

Para el conteo de las trazas, en la barra de herramientas se selecciona *Automatic Measurement*, se despliega una ventana, en la columna *Measurement* se elige la opción *Number of Objects*, se añade esta opción con *Add*, para finalizar en el lado izquierdo inferior de la ventana se selecciona *Objects Number, Overlay 1 (Red)*, y realiza el conteo con *Full-Count*. Finalmente, sobre la imagen aparece el número de cada traza y el total de las trazas contadas.

REFERENCIAS

A.R. El-Sersy, S.A. Eman, N.E. Khaled. "Fast neutron spectroscopy using CR-39 track detectors" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 226 (2004) 345-350.*

Al-Jarallah, M.I., Abu- Jarad, F., Hallak, A.B., Coban, A. and Islam M. (1993). Investigation of proton response of CR-39. Nucl. Instrum. Methods B73, 507-511.*

Aparicio O. Claudia, Miranda C. Héctor, Gómez B. Javier, Llosa D. Melchor. "Moderación de neutrones con polietileno y parafina". Lima, Perú. Revista de Investigación de Física, Vol.7 N° 1,2 (2004) 79-82.**

Arthur Beiser. *Conceptos de Física Moderna. Sexta Edición*. Capítulo 11: Física Nuclear. Pág. 519.

Azorin, N.J. (1997). Introducción a la física nuclear. México, Ediciones Científicas AZVEG.

Balnford, J.L. Jr., Walker R.M. and Wefel J.P. (1970). *Calibration of plastics track detectors for use in cosmic ray experiments*. Rad. Effects 5,41-45.*

Becker, K. (1967). *Alpha particle registration in plastics and its applications for Radon and neutron personnel dosimetry*. Health Phys. 16, 113-123.*

Becker, K.(1967). *Direct fast neutron interactions with polymers*. Oak Ridge National Laboratory Rept. 4446, p. 226.

Brookhaven National Laboratory. Nuclear Reaction and Structure Databases of the National Nuclear Data Center. <http://www.nndc.bnl.gov/nsr>

D'Errico, F., Weiss, M., Luszik-Badra, M., Matzke, M., Bernardi, L. and Cecchi, A. (1997). *A CR-39 track image analyzer for neutrón spectrometry*. Radiat. Meas. 28(1-6), 823-830.

Dostal, J. and C. Elson. (1980). General principles of neutron activation analysis. Mineralogical association of Canada short course in neutrón activation analysis in the geosciencies. Ed. G. K. Muecke, Canada.

Durrani, S.A., R.K. Bull. (1987). Solid state nuclear track detection. Principles, methods and applications. Pergamon Press. Int. Ser. Nat. Phil. Vol. 111.

Eisberg Martin Robert, "Fundamentos de Física Moderna" John Wiley & Sons. Inc. New York.1997.

El-Sersy, A. R., Khaled, N. E. and Eman, S.A. (2004). Determination of CR-39 detection efficiency for fast neutron registration and absolute neutrón dosimetry. Nucl. Instrum. Methods B215, 443-448.

Espinosa Guillermo. "Trazas Nucleares en Sólidos" Universidad Nacional Autónoma de México. Primera Edición.1994. ISBN 968-36-4219-5. Editorial UNAM.

Espinosa, G., Gammage, R.B., Meyer, K.E., and Dudney, C.S. (1996). Nuclear track analysis by digital imaging. Radiat. Prot. Dosim. 66(1-4), 363-366.

Espinosa, G., Jacobson, I., Golzarri, J.I., Vázquez, C., Frangoso, R. and Santos, E. (2002). Analysis of the formed track in solid state materials using atomic force microscopy. Radiat. Prot. Dosim. 101(1-4), 89-92.

Fernández, F., Domingo, C., Baixeras, C., Liguera, E., Zamani, M., and Debeauvais, M. (1991). Fast neutron dosimetry with CR-39 using electrochemical etching. Nuclear Track and Radiat. Meas. 19, 467-470.

Ferrer S. A. *Física Nuclear y de Partículas*. ISBN 978-84-370-6568-7. (2006). Editorial GUADA.

Fleischer, R.L. (1998). Tracks to innovation: nuclear tracks in science and technology. New York:Springer.

Fleischer, R.L., Price P.B. (1963). Charged particle tracks in glass. J. Appl. Phys. 34, 2903-2904.

Fleischer, R.L., Price P.B. and Walker R.M. (1965). Solid state track detectors: Applications to nuclear science and geophysics. Ann. Rev. Nuc. Sci. 15, 1-28.

Fleischer, R.L., Price P.B. and Walker R.M. (1965). Solid state track detectors: Applications to nuclear science and geophysics. Ann. Rev. Nuc. Sci. 15, 1-28.

Fleischer, R.L., Price P.B. and Woods R.L. (1969). Nuclear particle track identification in inorganic solids. Phys. Rev. 88, 563-567.

Fleischer, R.L., Price P.B., Walker R.M. and Hubbard E.L. (1964). Track registration in various solid state nuclear track detectors. Phys. Rev. 133a, 1443-1449.

Fleisher, R.L., Buford Price P. and Walker R.M. (1975). Nuclear tracks in solids: principles and applications. Berkeley: University of California.

Frank, A.L. and Benton E.V. (1970). *Measurements of 4He particles and recoil nuclei produced by high energy neutrons in plastics*. Proc. Seventh Inter. Colloq. Corpuscular Photography and visual solid detectors, Barcelona, 441-446.

Frank, A.L. and Benton E.V. (1972). *Development of a high energy neutrón detector*. Defense Nuclear Agency Rept. 2918F.

Gammage, R.B. and Espinosa, G. (1997). *Digital imaging system for track measurements*. Radiat.Meas. 28(1-6), 835-838.

Garduño Romo Enrique. Tesis: “*Detección de neutrones mediante la metodología de trazas nucleares en sólidos*” 2008. FC UNAM.

IAEA, International Atomic Energy Agency. (2001). Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation purposes. IAEA technical reports series No. 403. Supplement to technical reports series No. 318. Vienna, Austria.

IAEA, International Atomic Energy Agency.” *Handbook on nuclear data for borehole logging and mineral analysis*” (1993).. IAEA technical report series No. 357. POB100, A-1400, Vienna, Austria.

J.Jakes, J. Voigt and H. Schaube “Etched Track Size Distributions induced by broad neutron spectra in PADC”. Radiation Protection Dosimetry.Vol. 70 Nos.1-4 pp.133-138 (1997).*

J.K. Pálfavi, L.Sajó-Bohus, J. Szabó, J. Pálfavi Jr. “*Study on etching of PADC track etch detector by an alpha source*”. Puebla,2012.*

Karen García Valencia, Tesis: “*Detección de neutrones mediante la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos*.” IF, UNAM , 2015.

L’Annunziata, M.F.. A handbook of radioactivity analysis. Academic Press, (1998) New York.

M.I. Al-Jarallah, F. Abu-Jarad, A.B. Hallak, A. Coban And M.Islam. “Investigation of proton response of CR-39” . Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B37 (1993)507-511. North Holland.*

M.T. Collopy, P. Carpenter, C.D. Harmon, J. Vandenberg, G.W. Cooper. “Calibration of CR-39 for detecting fusion neutrons” Rev. Sci. Instrum.63(10) October 1992.*

Shani, G.. “*Activation analysis with isotopic sources*”. Activation Analysis vol. 2 Ed. Z.B. Alfassi, CR Press Inc., (1990) Florida, USA.

Tipler Paul A. “*Modern Physics*” Worth Publishers, Inc., New York, USA (1980).

Vallejo Delgado Luis Ricardo. Tesis: “*Caracterización de plásticos detectores de trazas nucleares de estado sólido, CR-39 y LR-115 y su posible aplicación a dosimetría de neutrones rápidos y térmicos*”. 1989. Universidad Austral de Chile.