

ESTIMACIÓN TEÓRICA Y COMPUTACIONAL DEL STOPPING POWER PARA ELECTRONES Y PROTONES DE UN DOSÍMETRO PAGAT INFUNDIDO CON NANOPARTÍCULAS DE ORO EN RANGO ENERGÉTICO DE APLICACIONES TERAPÉUTICAS

THEORETICAL AND COMPUTATIONAL ESTIMATION OF THE STOPPING POWER FOR ELECTRONS AND PROTONS FOR A PAGAT DOSIMETER INFUSED WITH GOLD NANOPARTICLES IN THE ENERGY RANGE OF THERAPEUTIC APPLICATIONS

C. Salinas Domján^{*1,5}, F. Mattea^{2,3,5}, M. Romero^{2,3,5}, I. Scarinci^{1,5} y M. Valente^{**1,4,5}

¹Instituto de Física Enrique Gaviola, IFEG-CONICET, Córdoba, Argentina

²Instituto de Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Procesos y Química Aplicada, Córdoba, Argentina

³Departamento de Química Orgánica, Facultad de Ciencias Químicas, UNC, Córdoba, Argentina

⁴Centro de Excelencia de Física e Ingeniería en Salud - CFIS & Departamento Ciencias Físicas, Universidad de La Frontera; Chile

⁵Laboratorio de Investigación e Instrumentación en Física Aplicada a la Medicina e Imágenes de Rayos X, LIIFAMIR®; Argentina

Recibido: 24/03/2024 ; Aceptado: 27/05/2024

El presente trabajo estudia el comportamiento del poder de frenado o *stopping power* de un sistema de dosimetría por gel polimérico de tipo PAGAT, infundido con nanopartículas de alto número atómico formadas por átomos de oro, con una concentración de 1 % en masa. El estudio se realiza para diferentes energías de haces de electrones y protones dentro de rangos de aplicaciones terapéuticas, inicialmente con una estimación teórica y posteriormente mediante el empleo de técnicas de simulación con código Monte Carlo: PENELOPE en el caso de electrones, y FLUKA en el caso de protones. Los resultados obtenidos de manera analítica muestran un comportamiento promisorio para sistemas tejido-equivalente infundidos con nanopartículas de oro, mientras que los resultados obtenidos por simulación poseen una mejor correspondencia con modelos que consideran el camino neto recorrido, a comparación de modelos que utilizan el espesor de la muestra como aproximación a configuraciones experimentales.

Palabras Clave: Radioterapia, Poder de frenado, Monte Carlo, FLUKA, PENELOPE.

The present work focuses on the behavior of the stopping power of a polymer gel dosimetry system, known as PAGAT, infused with high atomic number nanoparticles formed by gold, with a 1 % mass concentration. The study is carried out for different energies of electron and proton beams within ranges of therapeutic applications, first by theoretical assessment, and then by simulation with Monte Carlo codes: PENELOPE in the case of electrons, and FLUKA in the case of protons. The results obtained analytically show promising behavior for gold nanoparticle infused tissue-equivalent systems, while the simulation results show better correspondence with models that consider the net path traveled, instead of models based on the thickness of the samples as typically done in experimental determinations.

Keywords: Radiotherapy, Stopping power, Monte Carlo, FLUKA, PENELOPE.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2024.35.3.71>



ISSN - 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la necesidad de conocer de manera precisa el poder de frenado o *Stopping Power* (S) de diversos medios materiales ha incrementado significativamente junto al constante avance en aplicaciones de las radiaciones ionizantes en áreas tecnológicas y de investigación. Particularmente relevante resulta en el ámbito de la física aplicada a la medicina, visto que representa una de las cantidades físicas fundamentales que permiten evaluar efectos dosimétricos y el grado de equivalencia entre materiales frente a la radiación ionizante.

En este sentido, se dispone de nutrida literatura dedicada al estudio del S , su determinación experimental, cálculo

y/o empleo en situaciones prácticas.[1-4] Resultando, por tanto, imperioso conocer el S para determinar la equivalencia al agua para dosímetros de gel polimérico o PGD, los cuales representan uno de los sistemas de dosimetría más relevantes de la actualidad dadas las ventajas que ofrecen [5-8] junto a la relativa facilidad de diseño que permiten para fines específicos, entre los que se incluye la infusión con nanopartículas de alto número atómico brindando capacidades terapéuticas, a la vez que modifican la respuesta radiosensible.[9-12].

El presente trabajo utiliza el formalismo para el S definido por la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU) como la energía promedio disipada por la radiación ionizante por unidad de longitud recorrida en el medio.[4, 13]

$$S = -\frac{dE}{dx} \quad (1)$$

*carolina.salinas@mi.unc.esu.ar

**mauro.valente@gmail.com

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento del S de un sistema de dosimetría por gel polimérico, conocido como PAGAT, infundido con nanopartículas de alto número atómico, constituidas por átomos de oro, con una concentración de 1 % en masa. El estudio se realiza para diferentes energías de haces de electrones y protones dentro de rangos de aplicaciones terapéuticas, inicialmente con una estimación teórica y posteriormente mediante el empleo de técnicas de simulación con código Monte Carlo (MC): PENELOPE en el caso de electrones, y FLUKA en el caso de protones. Además, para las estimaciones del S con electrones como partículas primarias, se estudia y compara el empleo de modelos de simulación que consideren el espesor de la muestra o el camino neto recorrido en el interior de la misma.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

Definición del material

Los dosímetros de gel poliméricos o PGDs se basan en sustancias químicas sensibles a la radiación ionizante que polimerizan en función de la dosis absorbida.[4, 9] La composición de los mismos previo a irradiar puede determinarse a partir de las cantidades de los elementos utilizados en su preparación.

La composición química estándar de los dosímetros de gel conocidos como PAGAT fue previamente estudiada y reportada[5, 14], con una densidad másica (ρ) de $1.038 \pm 0.011 \text{ g/cm}^3$ y una energía media de excitación (I_M) de 70.8 eV . Es a partir de dicha composición estándar que se define la composición del sistema PGD de interés, PAGAT infundido al 1 % en masa con nanopartículas de oro (Au NPs). Se determinan los valores efectivos para el número atómico del material compuesto (Z_{comp}), su número másico (A_{comp}) y su energía media de excitación ($I_{M_{comp}}$), mediante las Ecuaciones 2 a 4.[1, 15]

$$Z_{comp} = \frac{\sum_j \left(\frac{W_j}{A_j}\right) Z_j^2}{\sum_j \left(\frac{W_j}{A_j}\right) Z_j} \quad (2)$$

$$A_{comp} = \sum_j W_j A_j \quad (3)$$

$$\ln [I_{M_{comp}}] = \frac{\sum_j \left(\frac{W_j}{A_j}\right) Z_j \ln(I_j)}{\sum_j \left(\frac{W_j}{A_j}\right) Z_j} \quad (4)$$

Donde W_j , Z_j , A_j e I_j son la fracción en peso, el número atómico, el número másico y la energía media de excitación, respectivamente, del j -ésimo elemento puro de la composición. Los valores Z , A e I para cada elemento puro se obtienen de lo reportado por *National Institute of Standards and Technology* (NIST).[16]

Determinación analítica del S

En primera instancia, se realiza un abordaje teórico para la estimación del S del sistema tanto con electrones como protones, con las respectivas energías empleadas para cada tipo de partícula.

En el caso de los electrones, en base al trabajo presentado por Osman et al. (2022)[1], se calcula el S másico por colisión (S_{col}) y el S másico radiativo (S_{rad}) para determinar el S másico total para las energías de interés: $S_{tot} = S_{col} + S_{rad}$

$S_{col}^{(e^-)}$, debido la transferencia de energía de la partícula incidente a los electrones atómicos del medio irradiado o *target*, es calculado mediante la Ecuación 5 con unidades de MeVcm^2/g :

$$S_{col}^{(e^-)} = k \frac{z^{*2} Z^*}{A_{comp} \beta^2} \left[\ln \left(\frac{E}{I^*} \right) + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\tau}{2} \right) + \frac{F(\tau)}{2} - \frac{\delta}{2} \right] \quad (5)$$

Con $k = 4\pi r_e^2 N_a m c^2 = 0.307075 \text{ MeVcm}^2 \text{mol}^{-1}$ constante, con r_e el radio clásico del electrón y N_a el número de Avogadro. β corresponde al cociente entre la velocidad (v) de la partícula incidente en el medio y la velocidad de la luz en vacío ($\beta = v/c$), τ , E y z^* representan, en el siguiente orden: la energía cinética en unidades de masa en reposo ($m_e c^2$, siendo m_e la masa en reposo del electrón), la energía cinética en eV y la carga efectiva del electrón incidente. Finalmente $F(\tau)$ es función dependiente de dicha energía, Z^* e I^* la carga atómica efectiva y la energía media de excitación efectiva del material blanco; respectivamente. Por último, δ es la corrección del efecto de densidad, ecuaciones detalladas en el trabajo de referencia.[1]

$S_{rad}^{(e^-)}$ es determinado mediante la relación:

$$S_{rad}^{(e^-)} = S_{col}^{(e^-)} \frac{E Z_{comp}}{800} \quad (6)$$

Con E como la energía cinética de la partícula incidente en unidades de MeV .

En el caso de los protones, en base al trabajo presentado por Almutairi et al. (2022), [17] se calcula el S másico mediante la Ecuación 7.

$$S^{(p^+)} = -\frac{dE}{\rho dx} = \frac{5.08 \times 10^{-31} z^2 n}{\beta^2 \rho} [G(\beta) - \ln(I_{M_{comp}})] \quad (7)$$

Donde, z representa el número atómico del proyectil, $G(\beta)$ y n son funciones dependientes de β y características del blanco respectivamente.[17]

Determinación del S por simulación Monte Carlo

Para el cálculo del S por medio de simulaciones MC se emplearon dos códigos: **PENELOPE** en el caso de electrones y **FLUKA** en el caso de protones.

De manera general, el método MC es una herramienta teórica que permite la resolución de problemas cuya naturaleza depende de variables estocásticas. Consta de un conjunto de algoritmos computacionales que utilizan procesos de generación de variables aleatorias para hacer estimaciones numéricas de parámetros desconocidos[18], permitiendo el modelado de situaciones complejas con una gran cantidad de variables involucradas. Entre los fenómenos más usualmente modelados con MC se encuentra el problema de transporte de partículas en medios materiales. Dichas simulaciones parten del supuesto de que el transporte de partículas puede ser modelado como un proceso de Markov y el código sigue cada partícula y las secundarias hasta que escapan o su energía cae por debajo de una energía de corte

establecida por el usuario para terminar el transporte de esa partícula y depositar su energía restante localmente.[19]

El código MC PENELOPE (*PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons*) es un paquete de subrutinas escritas en FORTRAN que realizan el muestreo aleatorio de interacciones y el seguimiento de partículas. Generalmente usado para simulación del transporte acoplado de electrones y fotones en sistemas de materiales arbitrarios que constan de una serie de regiones homogéneas limitadas por interfaces, en un rango de energías de 50 eV a 1 GeV.[19] El usuario debe proporcionar un programa principal (*main*), para seguir la historia de las partículas a través de la estructura del material y llevar el registro de las cantidades de interés. Por este motivo el usuario también debe proporcionar el archivo general de *input* y los archivos de geometría deseada y los materiales a utilizar.

Por otro lado, el código MC FLUKA (*FLUktuierende KAskades*) es un código MC multipropósito, que cubre un amplio rango de aplicaciones, capaz de simular procesos físicos en geometrías complejas a una velocidad mayor y con mejor resultado estadístico en las regiones de interés, capaz de transportar alrededor de 60 tipos de partículas diferentes y calcular diversas cantidades físicas a comparación de sus análogos. Para la mayoría de las aplicaciones, no requiere programación por parte del usuario. Sin embargo, se deja a disposición una cantidad de subrutinas externas que permiten la generación de casos más complejos o personalizados. FLUKA cuenta con un entorno gráfico conocido como *Flair* que permite crear archivos de entrada, vínculos de compilación para los ejecutables, un descryptador de resultados e incluye un entorno generador de geometrías.[20, 21]

En el presente trabajo, el estudio es abordado en dos conjuntos (*Sets*) de simulaciones según la aproximación para estimar el *S*.

El primer conjunto o *Set* de simulaciones, se dedica a estimar el *S* replicando esquemas experimentales típicos considerando, en primera aproximación, el grosor de la muestra (Δx) como el trayecto recorrido por la partícula en el interior de ésta.

Las simulaciones se realizan en PENELOPE con haces monoenergéticos de electrones de 0.1, 1 y 10 MeV, y en FLUKA con haces monoenergéticos de protones de 1, 10 y 100 MeV/n. Para ambos casos, se coloca una fuente puntual, de emisión monodireccional, en $(X, Y, Z) = (0, 0, -1)$ cm con el haz orientado hacia el eje Z positivo y la muestra del material de interés, configurada como detector de energía,¹ se coloca con su extremo inicial en $Z = 0$ tal que su grosor aumente en Z positivo, determinando cinco grosores por partícula y energía.

Las dimensiones transversales de la muestra se mantienen constantes, se puede observar un ejemplo en la Fig. 1 en el caso de electrones de 10 MeV y en la Fig. 2 en el caso de protones de 100 MeV/n, para las demás energías la visualización es análoga.

Los grosores de cada muestra se definen tal que no superen $3/4 R$, con R como el rango, en la aproximación de frenado continuo (CSDA), de los electrones (protones) en

¹Para evitar efectos de retrodispersión que puedan producirse si se coloca un segundo material como detector.

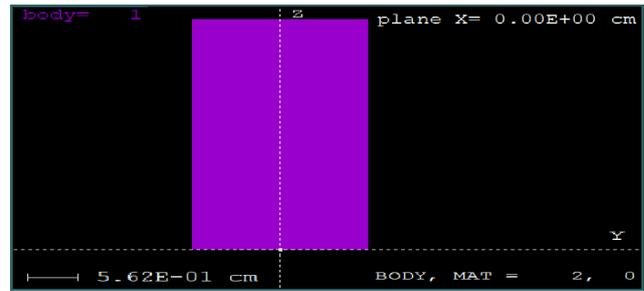


FIG. 1: Muestra electrones de 10 MeV, plano YZ. Gráfico logrado en programa *gview2d*, incluido en el paquete del código PENELOPE.

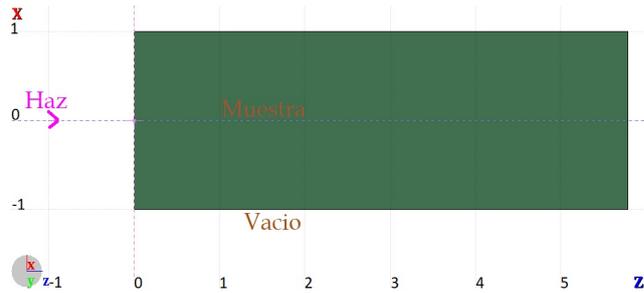


FIG. 2: Muestra protones de 100 MeV/n, plano ZX. Gráfico con entorno de geometría de *Flair*.

agua, dado que el material estándar PAGAT es agua equivalente. El espaciado entre grosores se determina con el criterio de la Ecuación 8.

$$\text{Espaciado} = \frac{(\Delta x)_{\text{Max}} - (\Delta x)_{\text{min}}}{4} \quad (8)$$

En la Tabla 1 se registran los valores correspondientes a R y los grosores empleados para cada partícula y su correspondiente energía.

Se simulan para cada caso 1×10^8 partículas primarias asegurando que el error estadístico sea menor al 2 %, en todos los casos. Se configura una energía umbral de 0.001 MeV con parámetros de simulación mixta en MC PENELOPE de $C1 = C2 = 0.1$.[19]

Para el primer *Set* de simulaciones, el *S* se calcula según la Ecuación 9, con ΔE como la energía cedida por el haz al atravesar la muestra, que puede estimarse por la energía absorbida en ciertas condiciones.[22]

$$S = \frac{\Delta E}{\Delta x} \quad (9)$$

De la distribución de valores de *S* correspondientes a una misma energía y tipo de partícula primaria se determinan el valor promedio y el *S* másico.

Para el segundo conjunto de simulaciones, se adapta la rutina *penmain* del código MC PENELOPE tal que se registren las posiciones de cada partícula primaria en el interior de la muestra y su energía depositada, manteniendo las configuraciones geométricas del primer *Set* de simulaciones. A partir de ello, se define la longitud de la trayectoria recorrida por partícula (Δl) como la suma de las distancias entre posiciones dentro de la muestra y la energía entregada (ΔE) como la suma de las energías depositadas en cada parte de la trayectoria de la partícula, determinando el *S* considerando Δl en lugar de Δx .

TABLA 1: Grosor de muestra por partícula y energía.

| | E [MeV] | 0.1 | 1 | 10 |
|--------------|------------|------------|------------------------|------------------------|
| | Electrones | R_{agua} | 1.431×10^{-2} | 4.367×10^{-1} |
| Δx_1 | | 0.010733 | 0.327525 | 3.731250 |
| Δx_2 | | 0.008299 | 0.253144 | 2.998438 |
| Δx_3 | | 0.005866 | 0.178763 | 2.265625 |
| Δx_4 | | 0.003433 | 0.104381 | 1.532813 |
| Δx_5 | | 0.001000 | 0.030000 | 0.800000 |
| | E [MeV] | 1 | 10 | 100 |
| | Protones | R_{agua} | 2.458×10^{-3} | 1.230×10^{-1} |
| Δx_1 | | 0.001844 | 0.092250 | 5.788500 |
| Δx_2 | | 0.001433 | 0.071438 | 4.486088 |
| Δx_3 | | 0.001022 | 0.050625 | 3.183675 |
| Δx_4 | | 0.000611 | 0.029813 | 1.881263 |
| Δx_5 | | 0.000200 | 0.009000 | 0.578850 |

Los archivos de resultados (*outputs*) de simulación en todos los casos son leídos y procesados mediante el programa de procesamiento de datos Matlab v. 2016.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las propiedades del dosímetro PAGAT infundido con Au NPs

A partir de la composición estándar se determina la composición del sistema PAGAT infundido al 1 % en masa con Au NPs, presentada en la Tabla 2. Considerando el efecto de los constituyentes en la densidad másica del material, la Tabla 3 resume las principales características del sistema, empleadas para definir los archivos correspondientes de simulación.

TABLA 2: Composición PAGAT, 1 % en masa de Au.

| Elemento | Z | Composición química | W | I [eV] |
|----------|----|---------------------|---------|--------|
| H | 1 | 0.64983 | 0.10598 | 19.2 |
| C | 6 | 0.03002 | 0.05834 | 78.0 |
| N | 7 | 0.00884 | 0.02003 | 82.0 |
| O | 8 | 0.31085 | 0.80485 | 95.0 |
| P | 15 | 0.00006 | 0.00030 | 173.0 |
| S | 16 | 0.00003 | 0.00016 | 180.0 |
| Cl | 17 | 0.00006 | 0.00034 | 174.0 |
| Au | 79 | 0.00031 | 0.01000 | 790.0 |

TABLA 3: Características del material

| Cantidad | Valor |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| Z_{comp} | 7.06284 ± 0.00007 |
| A_{comp} | 15.9617 ± 0.0001 |
| $I_{M_{comp}}$ [eV] | 70.2 ± 0.5 |
| ρ [g/cm ³] | 1.038 ± 0.011 |
| $\langle Z_{comp}/A_{comp} \rangle$ | 0.551137 ± 0.000004 |
| n [electrones/m ³] | $(3.45 \pm 0.04) \times 10^{29}$ |

Estimaciones del S

La Tabla 4 reporta los resultados de S para el sistema dosimétrico integral PAGAT con Au NPs, con electrones como

partículas primarias, tanto analíticos como de simulación, los cuales se comparan con valores de S para agua en estado líquido reportada en la base de datos de NIST *ESTAR*. [23] Además, en dicha tabla se presentan valores reportados del material PAGAT con Au NPs obtenidos a partir de *unique material* en la base de datos mencionada. Es notable la similitud de los valores obtenidos analíticamente con dichos valores reportados, tanto para agua como el material obtenido desde *unique material*.

De los resultados de simulación con código MC PENELOPE, para el primer *Set* de simulaciones se obtiene el espectro de energía absorbida para cada grosor, observables a modo de ejemplo en la Fig. 3, se determina el área bajo la curva y con ello ΔE para la determinación del $S^{(e^-)}$ másico. Para el segundo *Set* de simulaciones, una vez determinados Δl y ΔE se calcula el $S^{(e^-)}$ másico y la distancia recorrida promedio (d) por partícula en el interior del material, definida como la suma de los tramos Δl dentro del *target*.

Comparando los valores de S analíticos y de simulación, es notable que los datos obtenidos por simulación se encuentran dentro del mismo orden de magnitud que aquellos determinados analíticamente, con diferencias menores al 62 % para el primer *Set* y menores al 34 % para el segundo *Set*, presentado en la Tabla 4.

Además, en el segundo *Set* d supera el grosor de la muestra, como se presenta un ejemplo en la Tabla 5.

De los resultados presentados, se observa una mejora en la correspondencia con datos de referencia para modelos que calculan el camino neto recorrido en lugar de aproximar por el espesor de la muestra, tal como se considera en configuraciones experimentales.

En el caso de los protones como partículas primarias, con la estimación teórica planteada se obtienen los valores de $S^{(p^+)}$ másico mostrados en la tabla 6, donde nuevamente es notable su similitud con valores de S másicos reportados para agua en la base de datos de NIST *PSTAR*. [23]

Así mismo, con código MC FLUKA, para cada espesor estudiado se obtiene la energía depositada por profundidad de muestra, cuyos resultados se observan en la Fig. 4. Realizando la conversión de unidades correspondiente, se determina el $S^{(p^+)}$ másico cuyos resultados se muestran en la Tabla 6 junto con los resultados analíticos, los datos repor-

TABLA 4: *S* máximo del sistema PGD con 1% w/w Au NPs para electrones con su respectiva incerteza, comparado con datos reportados por NIST, y diferencia porcentual entre valores analíticos vs simulaciones.

| Energía [MeV] | Stopping Power ($S^{(e^-)}$) [MeVcm ² /g] | | | | Diferencia Porcentual [%] | | |
|------------------|--|--------------|-------------|-----------------|---------------------------|-------|-------|
| | Analítico | Simulaciones | | Referencia NIST | | Set 1 | Set 2 |
| | | Set 1 | Set 2 | Agua líquida | PAGAT + Au NPs | | |
| 0.1 | 4.470 ± 0.011 | 7.20 ± 0.08 | 5.06 ± 0.05 | 4.119 | 4.128 | 61.07 | 13.20 |
| 1 | 1.711 ± 0.003 | 2.58 ± 0.03 | 1.37 ± 0.02 | 1.862 | 1.853 | 50.79 | 19.93 |
| 10 | 2.355 ± 0.003 | 1.91 ± 0.02 | 1.56 ± 0.02 | 2.149 | 2.143 | 18.90 | 33.76 |

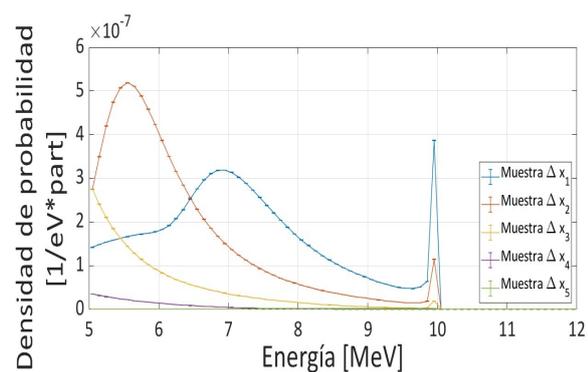
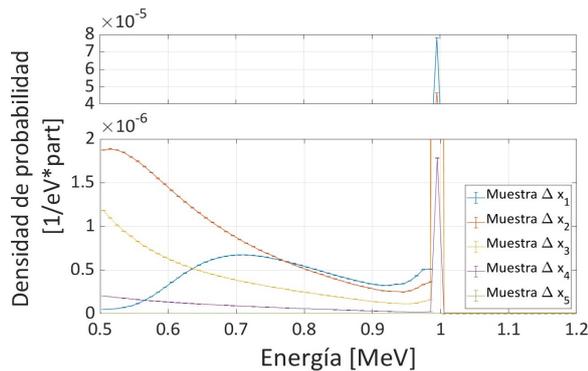
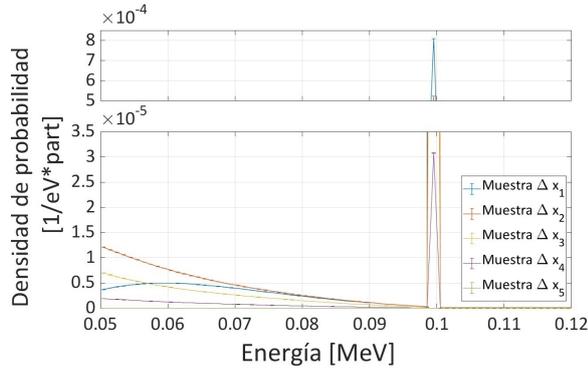


FIG. 3: Espectros de energía absorbida por muestra con electrones: a) 0,1 MeV; b) 1 MeV y c) 10 MeV, con código MC PENELOPE.

tados por NIST para agua líquida y la diferencia porcentual entre valor analítico y de simulación. Los valores obtenidos a partir de simulación se encuentran dentro del mismo orden de magnitud que los determinados analíticamente, con diferencias menores al 22 %.

TABLA 5: Δx_{Max} vs d por energía, electrones.

| Energía [MeV] | Δx_{Max} [cm] | d [cm] |
|---------------|-----------------------|----------|
| 0.1 | 0.010733 | 0.0193 |
| 1 | 0.327525 | 0.7068 |
| 10 | 3.731250 | 6.2048 |

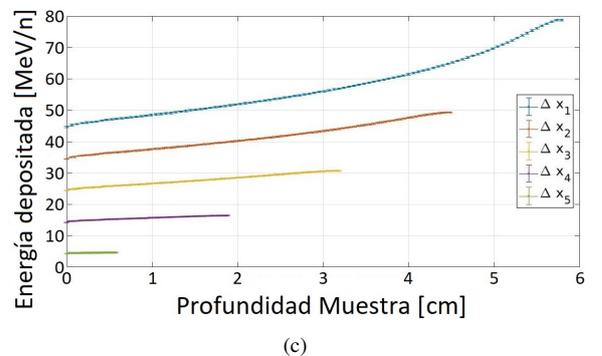
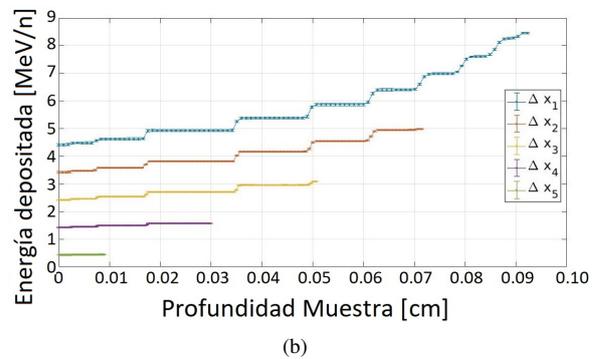
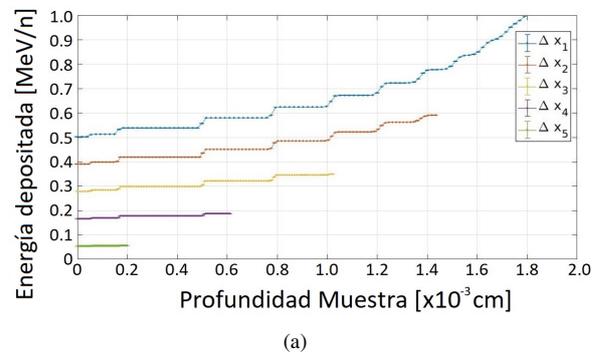


FIG. 4: Energía absorbida por muestra con protones como partículas primarias: a) 1 MeV/n; b) 10 MeV/n y c) 100 MeV/n.

Considerando que las masas de los protones y de las partículas que conforman el blanco son comparables, sus trayectorias mantienen una dirección próxima a la de inciden-

TABLA 6: *S* máximo del sistema PGD con 1% w/w Au NPs para protones con su respectiva incerteza, comparado con datos reportados por NIST, y diferencia porcentual entre valores analíticos vs simulación.

| Energía [MeV/n] | Stopping Power ($S^{(p^+)}$) [MeV cm ² /g] | | | Diferencia Porcentual [%] |
|--------------------|---|------------|-----------------|---------------------------------|
| | Analítico | Simulación | Referencia NIST | |
| | | | Agua líquida | |
| 1 | 271.8 ± 4.3 | 313 ± 1 | 260.8 | 15.16 |
| 10 | 45.97 ± 0.72 | 54.6 ± 0.2 | 45.67 | 18.77 |
| 100 | 7.27 ± 0.11 | 8.8 ± 0.2 | 7.289 | 21.05 |

cia, debido a que sufren, comparativamente, menores desviaciones laterales y menor efecto de *straggling* a lo largo de su trayectoria. Por lo que la determinación del *S* mediante una aproximación como la presentada en la Ecuación 9 puede resultar en valores más exactos, aunque no necesariamente precisos, en el caso de protones que en el caso de electrones.

IV. CONCLUSIONES

El presente trabajo estudió el comportamiento del *Stopping Power* (*S*) de un sistema de dosimetría para el gel polimérico PAGAT infundido con nanopartículas de oro al 1% en masa. Se logró caracterizar los valores de *S* para diferentes energías de haces de electrones y protones dentro de rangos de aplicaciones terapéuticas por medio de abordajes teóricos y por simulación Monte Carlo.

Los resultados obtenidos analíticamente muestran un comportamiento promisorio para sistemas de gel PAGAT tejido-equivalente infundido con nanopartículas de oro, mientras que los resultados por simulación se presentan acorde a datos previamente reportados, observándose una mejora en la diferencia porcentual entre valores analíticos y de simulación, que resultan entre 2 a 5 veces, aproximadamente, menores en modelos que calculan el camino neto recorrido en lugar de aproximar por el espesor de la muestra, procedimiento generalmente implementado en las estimaciones a partir de determinaciones experimentales.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue parcialmente financiado por CONICET, proyecto PIP ESPORA I 11220130100658CO, por SeCyT-UNC proyecto 30820150100052CB y por la Universidad de La Frontera, Chile por medio del proyecto DI21-0068, además de una beca de doctorado otorgada por CONICET a la primer autora.

Este trabajo utilizó recursos computacionales del CCAD de la Universidad Nacional de Córdoba (<https://ccad.unc.edu.ar/>), que forman parte del SNCAD del MinCyT de la República Argentina.

REFERENCIAS

- [1] H. Osman y H. Gümüş. Stopping power and CSDA range calculations of electrons and positrons over the 20 eV–1 GeV energy range in some water equivalent polymer gel dosimeters. *Applied Radiation and Isotopes* **179**, 110024 (ene. de 2022). ISSN: 0969-8043. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.110024>.
- [2] H. Gümüş. Positron CSDA range and stopping power calculations in some human body tissues by using Lenz Jensen atomic screening function. *Radiation Physics and Chemistry* **196**, 110092 (jul. de 2022). ISSN: 0969-806X. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110092>.
- [3] A. Alshibel y K. T. Osman. Mass Stopping Power and Range of Alpha Particles in Biological Human Body Tissues (Blood, Brain, Adipose and Bone). *OALib* **10**, 1-17 (2023). ISSN: 2333-9705. <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1110775>.
- [4] I. Rosenberg. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. *British Journal of Cancer* **98**, 1020-1020 (mar. de 2008). ISSN: 1532-1827. <http://dx.doi.org/10.1038/sj.bjc.6604224>.
- [5] M. Valente, J. Vedelago, D. Chacón, F. Mattea, J. Velásquez y P. Pérez. Water-equivalence of gel dosimeters for radiology medical imaging. *Applied Radiation and Isotopes* **141**, 193-198 (2018).
- [6] Z. A. Nezhad y G. Geraily. A review study on application of gel dosimeters in low energy radiation dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes* **179**, 110015 (2022). ISSN: 0969-8043.
- [7] A. J. Venning, B. Hill, S. Brindha, B. J. Healy y C. Baldock. Investigation of the PAGAT polymer gel dosimeter using magnetic resonance imaging. *Physics in medicine and biology* **50** (2005).
- [8] F. Mattea, M. Romero, J. Vedelago, A. Quiroga, M. Valente y M. C. Strumia. Molecular structure effects on the post irradiation diffusion in polymer gel dosimeters. *Applied Radiation and Isotopes* **100**, 101-107 (2015). ISSN: 0969-8043.
- [9] C. Baldock, Y. D. Deene, S. Doran, G. Ibbott, A. Jirasek, M. Lepage, K. B. McAuley, M. Oldham y L. J. Schreiner. Polymer gel dosimetry. *Phys Med Biol* **55** (2010).
- [10] M. A. Macchione, S. Lechón Páez, M. C. Strumia, M. Valente y F. Mattea. Chemical Overview of Gel Dosimetry Systems: A Comprehensive Review. *Gels* **8**, 663 (oct. de 2022). ISSN: 2310-2861. <http://dx.doi.org/10.3390/gels8100663>.
- [11] A. Gayol, F. Malano, C. Ribo Montenovio, P. Pérez y M. Valente. Dosimetry Effects Due to the Presence of Fe Nanoparticles for Potential Combination of Hyperthermic Cancer Treatment with MRI-Based Image-Guided Radiotherapy. *International Journal of Molecular Sciences* **24**, 514 (dic. de 2022). ISSN: 1422-0067. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms24010514>.
- [12] J. Vedelago, F. Mattea y M. Valente. Integration of Fricke gel dosimetry with Ag nanoparticles for experimental dose enhancement determination in theranostics. *Applied Radiation and Isotopes* **141**, 182-186 (nov. de 2018). ISSN: 0969-8043. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.02.028>.

- [13] L. S. Taylor, M. Tubiana, H. O. Wyckoff, A. Allisy, J. W. Boag, R. H. Chamberlain, E. P. Cowan, F. Ellis, J. F. Fowler y e. a. H. Fränz. *Linear Energy Transfer*. **16** (ene. de 1970). <https://www.osti.gov/biblio/4086450>.
- [14] M. Valente, D. Chacón, F. Mattea, R. Meilij, P. Pérez, M. Romero, I. Scarinci, J. Vedelago, F. Vitullo y A. Wolfel. Linear energy transfer characterization of five gel dosimeter formulations for electron and proton therapeutic beams. *Applied Radiation and Isotopes* **178**, 109972 (2021). ISSN: 0969-8043.
- [15] M. F. L'Annunziata. *Handbook of Radioactivity Analysis* 3rd. ISBN: 978-0-12-384873-4 (Academic Press, San Diego, 2012).
- [16] N. I. of Standards y Technology. *X-Ray Mass Attenuation Coefficients* <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab1.html>. 2022.
- [17] A. S. Almutairi y K. T. Osman. Calculation of Mass Stopping Power and Range of Protons as Well as Important Radiation Quantities in Some Biological Human Bodyparts (Water, Muscle, Skeletal and Bone, Cortical). *International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology* **11**, 99-112 (2022). ISSN: 2168-5444. <http://dx.doi.org/10.4236/ijmpcero.2022.112009>.
- [18] *Radiation Effects in Solids* ISBN: 9781402052934. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-5295-8> (Springer Netherlands, 2007).
- [19] N. E. A. (NEA). *PENELOPE-2008: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport* ISBN: 978-92-64-99066-1 (OECD Publishing, Paris, 2009).
- [20] T. Böhlen, F. Cerutti, M. Chin, A. Fassò, A. Ferrari, P. Ortega, A. Mairani, P. Sala, G. Smirnov y V. Vlachoudis. The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications. *Nuclear Data Sheets* **120**, 211-214 (2014). ISSN: 0090-3752.
- [21] A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fassò y J. Ranft. FLUKA: a multi-particle transport code. *CERN-2005-10* (2005). ISSN: INFN/TC₀5/11, SLAC – R – 773.
- [22] F. H. Attix. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry* ISBN: 9783527617135. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527617135> (Wiley).
- [23] N. I. of Standards y Technology. *Stopping-Power Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions* <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/intro.html>. 2019.