

CÁLCULO DE H(50) Y E(50) PARA ^{90}Sr - ^{90}Y Y UTILIZANDO EL HATM Y LOS MODELOS VOXELIZADOS DE LA MUJER Y HOMBRE ADULTOS DE REFERENCIA DE LA ICRP^a

ESTIMATION OF H(50) AND E(50) FOR ^{90}Sr - ^{90}Y USING HATM AND THE VOXELIZED MODEL FOR ICRP REFERENCE ADULT MALE AND ADULT FEMALE

JORGE PUERTA^b, BIBIANA PEÑA^b, VANESSA PEÑA^b, JUAN OCAMPO^b, JAVIER MORALES^b

Recibido 06-04-2018, aceptado 17-09-2018, versión final 04-10-2018.

Artículo Investigación

RESUMEN: La Comisión Internacional de Protección Radiológica, ICRP, propuso una nueva metodología para el cálculo de coeficientes de dosis para trabajador ocupacionalmente expuesto que cambia la propuesta en las publicaciones 60 y 78 de la misma comisión. En este trabajo se reprodujeron los valores AF para hombre adulto reportados en la publicación 100 de la ICRP utilizando el software MCNPx y se calcularon con la misma metodología los SAFs para los compartimientos del HATM de mujer adulta, para electrones monoenergéticos dentro del rango de energías de 0.01 a 4 MeV. Se calcularon los SAFs en phantom voxelizados para hombre y mujer adulto, cuya estructura anatómica se reporta en la publicación 110 de la misma Comisión, usando la misma metodología de cálculo con el software MCNPx. Con estos datos se calcularon los coeficientes h(50) y e(50) para incorporación única por ingestión del ^{90}Sr - ^{90}Y , dada su importancia dosimétrica. Se consideraron las fracciones de absorción en intestino delgado reportados por la ICRP 78 y la metodología recomendada por la publicación 103 de la ICRP, encontrando valores de e(50) menores que los reportados por la ICRP en sus publicaciones anteriores. Finalmente, se comparan los valores obtenidos con los reportados por Li *et al.* (2006).

PALABRAS CLAVE: Dosimetría interna; fracción absorbida; fantomas voxelizados.

ABSTRACT: International Commission for Radiological Protection, ICRP, proposed a new methodology for the calculation of dose coefficients for occupationally exposed workers that changes the proposal in publications 60 and 78 of the same commission. In this work, the AF values for adult men reported in publication 100 of the ICRP were reproduced using the MCNPx software and the SAFs were calculated with the same methodology for the compartments of the HATM of adult women, for monoenergetic electrons within the energy range of 0.01 to 4 MeV. We calculated voxel phantom SAFs for adult men and women, whose anatomical structure is reported in publication 110 of the same Commission, using the same calculation methodology with the MCNPx software. With this data, the coefficients h(50)

^aPuerta, J.; Peña, B.; Peña, V. Ocampo, J. & Morales, J. (2018). Cálculo de h(50) y e(50) para ^{90}Sr - ^{90}Y utilizando el HATM y los modelos voxelizados de la mujer y hombre adultos de referencia de la ICRP. *Rev. Fac. Cienc.*, 8(1), 6–19. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v8n1.71572>

^bGrupo de Física Radiológica, Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. japura@unal.edu.co

and e(50) were calculated for single incorporation by ingestion of ^{90}Sr - ^{90}Y , given their dosimetric importance. We considered the absorption fractions in the small intestine reported by ICRP 78 and the methodology recommended by publication 103 of the ICRP, finding values of e(50) lower than reported by the ICRP in its previous publications. Finally, the obtained values are compared with those reported by Li *et al.* (2006).

KEYWORDS: Absorbed fraction; internal dosimetry; voxelized phantom.

1. INTRODUCCIÓN

La ICRP publicó en el año 2007 el nuevo modelo del Tracto Alimentario Humano, HATM, publicación 100, que reemplaza el anterior modelo del tracto gastrointestinal propuesto en la publicación 30. El modelo identifica las regiones anatómicas donde ocurre la retención y transferencia. Este modelo es mucho más complejo que el anterior e incluye un modelo morfológico detallado y un modelo radiobiológico completo, definiendo los tejidos y células en riesgo radiológico. Este modelo proporciona tasas de transferencia entre cada región que lo compone por género y edad. Por otra parte, en el mismo año la Comisión dio las nuevas recomendaciones en la publicación 103 (ICRP, 2007), que establecen una metodología clara sobre el cálculo de dosis efectiva y dosis equivalentes, considerando los dos géneros. Del mismo modo, aparecen las publicaciones 107 que da los nuevos esquemas de desintegración (ICRP, 2008) y la 110 en donde recomienda el uso de los phantom voxelizados de referencia adulto (ICRP, 2009), denominados RCP-AM, para hombre y RCP-AF para mujer, para el cálculo de dosis. Estos nuevos modelos y la nueva metodología de cálculo de dosis efectiva comprometida, requieren calcular nuevamente las fracciones de absorción específicas, SAFs, en órganos blanco para los diferentes tipos de radiación emitidas por las fuentes y en consecuencia establecer los nuevos valores de los coeficientes de dosis equivalentes comprometidas y el coeficiente de dosis efectiva comprometida para cada radionúclido de interés dosimétrico.

En este artículo se reproducen las fracciones de absorción (AF) para hombre adulto en las regiones del HATM reportados por la ICRP en el apéndice F utilizando el software Monte Carlo N-particle transport code (MCNPx) y la información reportada por la ICRP 100 de las células blanco en los diferentes compartimientos del HATM, de esta forma, con la información suministrada, se calculan los SAFs para órganos blanco del HATM para mujer adulta. Además, se utilizan los valores del SAFs de RCP-AM (Ocampo *et al.*, 2013) para electrones monoenergéticos en un rango de 0.01 a 6 MeV y se calcularon los SAFs para el mismo rango de energía de los electrones para el Phantom voxelizado RCP-AM, utilizando MCNPx.

Por otro lado, se hizo uso del modelo metabólico propuesto por la publicación 67 de la ICRP, del Sr y se calculó el número de desintegraciones producida durante 50 años (periodo propuesto por la ICRP para trabajador), luego de la incorporación única de 1 Bq de ^{90}Sr - ^{90}Y , por ingestión. Se consideraron los dos valores de f1, de 0.01 y 0.3 propuestos por la publicación 78 de la ICRP y haciendo uso de los datos del SAFs se procedió a calcular los coeficientes de dosis equivalente comprometidas y de dosis efectiva comprometida en los dos casos, con lo cual se pudo mostrar la diferencia de estos coeficientes con los reportados

por la ICRP en la publicación 78 y los calculados para órganos blanco con los obtenidos haciendo uso del software AIDE.

Posteriormente, se calcularon los coeficientes de dosis efectiva comprometida en función de los valores de f_1 , reportados por Li *et al.* (2006), para los dos phantom RCP-AM y RCP-AF, y se pudo mostrar también la diferencia de los valores de $e(50)$ haciendo uso de la metodología propuesta en la publicación 103, haciendo uso del HATM, con los reportados por los autores mencionados anteriormente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Modelos de ingestión

El modelo del tracto gastrointestinal, adoptado por la ICRP hasta el 2006, está basado en el modelo desarrollado por Eve y propuesto desde su publicación 30 (ICRP, 1979). El modelo usado para describir la cinética metabólica del tracto gastrointestinal está compuesto por cuatro compartimientos: el estómago (ST), el intestino delgado (SI), el intestino grueso superior (ULI), que representa el colon ascendente y el colon transverso, y el intestino grueso inferior (LLI) representando el colon descendente. Los tiempos medios de residencia del material incorporado en estos compartimientos son de 1, 4, 13 y 24 horas respectivamente. En este modelo se asume que el intestino delgado es el único sitio de absorción desde el tracto gastrointestinal a los fluidos del cuerpo. La velocidad constante λ_B , para la transferencia de actividad a los fluidos sistémicos del cuerpo (sangre), puede ser estimada a partir de f_1 (ver Ecuación 1), que es la fracción del elemento estable que llega a los fluidos del cuerpo después de la ingestión.

$$\lambda_B = \frac{f_1 \lambda_B}{1 - f_1} = \frac{f_1 \times 6}{1 - f_1} \quad (1)$$

Cuando f_1 es igual a 1, indica que todo el material fue absorbido, y la ICRP asumió que el material pasa directamente del estómago a los fluidos del cuerpo y no pasa por otras regiones del tracto gastrointestinal. En la medida que el valor de f_1 disminuye, se espera una mayor excreción en las heces.

El ICRP en su publicación 100 del año 2007, propone un modelo del tracto alimentario humano, denominado HATM, y reemplaza el modelo del tracto gastrointestinal propuesto por la publicación 30 de la misma Comisión. El modelo está descrito a través de coeficientes de transferencia que se definen como la fracción instantánea de la sustancia contenida y que deja el compartimiento por unidad de tiempo, dichos coeficientes están dados en d^{-1} . Se recomienda además, que excepto para aquellos casos en que haya información específica de retención y transferencia del radionúclido desde y hacia los dientes, mucosa oral, paredes del estómago y regiones del intestino, el correspondiente coeficiente se asume igual a cero, con lo cual el modelo se reduce a ocho compartimientos.

En el nuevo modelo el ICRP, publicación 100, define valores del factor de transferencia f_A que reemplaza los valores de f_1 proporcionados por el ICRP en su publicación 30. Asume que si la absorción toma lugar en el

intestino delgado, entonces en este caso la fracción de transferencia desde el intestino delgado a sangre, f_{SI} , es igual a f_A . En los casos donde la información de absorción diferentes a intestino delgado esté disponible, f_A se especificará en términos de valores fraccionales de absorción. Por ejemplo, si se conoce que un elemento es absorbido tanto desde el estómago como del intestino delgado, valores de f_{ST} y f_{SI} deberán especificarse:

$$f_A = f_{ST} + f_{SI} \quad (2)$$

Por tanto los coeficientes de transferencia desde el intestino delgado a sangre, $\lambda_{SI,B}$, y desde el estómago a sangre, $\lambda_{ST,B}$, están dados por las relaciones 3 y 4 respectivamente:

$$\lambda_{SI,B} = \frac{f_{SI}\lambda_{SI,RC}}{1 - f_{SI}} \quad (3)$$

$$\lambda_{ST,B} = \frac{f_{ST}\lambda_{ST,SI}}{1 - f_{ST}} \quad (4)$$

En donde $\lambda_{SI,RC}$ es el coeficiente de transferencia desde el intestino delgado a colon derecho y $\lambda_{ST,SI}$ es el coeficiente de transferencia desde el estómago al intestino delgado.

El modelo sistémico utilizado para el ^{90}Sr , es el propuesto por la publicación 67 de la ICRP. Se consideró la incorporación por ingestión de materiales inespecíficos, por tanto se utilizó el modelo del HATM recomendado en estas condiciones, que resulta mucho más simplificado que el modelo completo, propuesto en la publicación 100 del ICRP, con los tiempos de tránsito en cada región para dieta total, asumiendo un hombre adulto. El modelo del estroncio se muestra en la Figura 1.

En la publicación 110 de la ICRP, se presentan los phantoms computacionales de referencia, RCP-AM y RCP-AF, los cuales representan la morfología del hombre y mujer promedio adultos caucásicos respectivamente (ICRP, 2009).

2.2. Determinación de los SAF (Células blanco ← Fuente) para electrones en el HATM

Para el cálculo de las fracciones de absorción específica para electrones mono energéticos, se usaron los modelos geométricos de la ICRP, publicación 100, que especifican la región fuente y la región blanco para cada región del HATM. Las AF se calcularon usando el código MCNP, los resultados obtenidos en dicho software, se dividieron por la energía inicial de la fuente, obteniendo así las fracciones de absorción para todas las energías calculadas. Para obtener los diferentes valores de SAF, estas fracciones absorbidas se dividieron por la masa de las células blanco, en el caso de hombre adulto, lo que permitió reproducir los valores reportados por la ICRP. Para la mujer adulta fue necesario calcular las masas de las células blanco a partir de modelos geométricos, asumiendo, con excepción del estómago, cada región del HATM como un cilindro y el estómago como una esfera. La densidad del tejido se asumió como 1g/cm^3 .

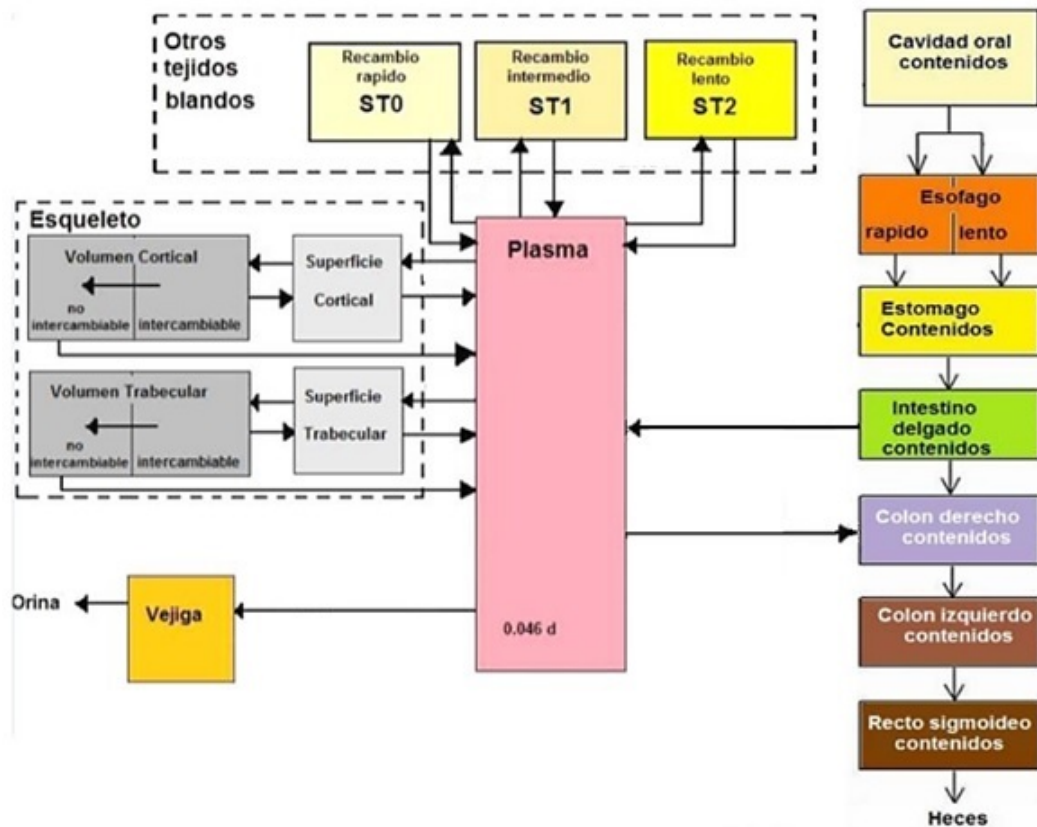


Figura 1: HATM y Modelo Sistémico del Estroncio (Sr). Fuente: Elaboración propia.

2.3. Cálculo de SAF para los órganos de los phantoms voxelizados

Los cálculos de los valores de SAF para los emisores beta considerados, se realizaron utilizando el phantom computacional de referencia masculino y femenino (RCP-AM y FM), de la publicación 110 de la ICRP y el código MCNPX.

En la simulación de Monte Carlo se consideró como fuente todos los compartimientos del modelo biocinética sistémico del Sr/Y y el contenido de los órganos del HATM. La simulación se realizó para electrones monoenergéticos de energías 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 4 y 6 MeV los cuales fueron generados homogéneamente e isotrópicamente desde cada uno de los órganos fuente, se tuvo en cuenta el transporte de los fotones secundarios, el número de historias empleadas fue de 1×10^7 partículas y se calculó la energía depositada por los electrones y fotones en 28 órganos blanco de interés dosimétrico. La deposición de energía se registró usando el “tally f8” y las energías de corte para fotones y electrones fueron tomados por defecto. Una vez obtenidos los valores de SAF, se interpolaron los resultados usando las energías y los esquemas de decaimientos del Sr-90 y del Y-90, la información nuclear fue tomada de la más reciente base

2.4. Determinación de U para las diferentes fracciones de absorción

Para el cálculo del número de desintegraciones (U), se utilizó el modelo sistémico (compartimental) del ^{90}Sr (ver Figura 1), considerando una incorporación única por ingestión y que la transferencia entre los compartimientos sigue una cinética de primer orden, que puede ser descrita por un sistema de ecuaciones diferenciales lineales, donde se representa la transferencia de un radionúclido entre los compartimientos que componen el modelo metabólico y se obtiene finalmente el número de transformaciones nucleares al cabo de 50 años, como lo recomienda la ICRP.

3. RESULTADOS

3.1. SAF del HATM de hombre adulto y mujer adulta

Inicialmente, los valores de la fracción de absorción de hombre adulto se obtuvieron con energías de los electrones de 0.18 a 4 MeV para todas las regiones. Los datos obtenidos se compararon con los datos que se encuentran en la publicación de la ICRP 100, Apéndice F. Los valores obtenidos y los valores presentados en dicha publicación se compararon y se muestra a modo de ejemplo el caso de las tres regiones del colon en la Figura 2. Los puntos representan los valores calculados y reportados y la curva sólo muestra la tendencia.

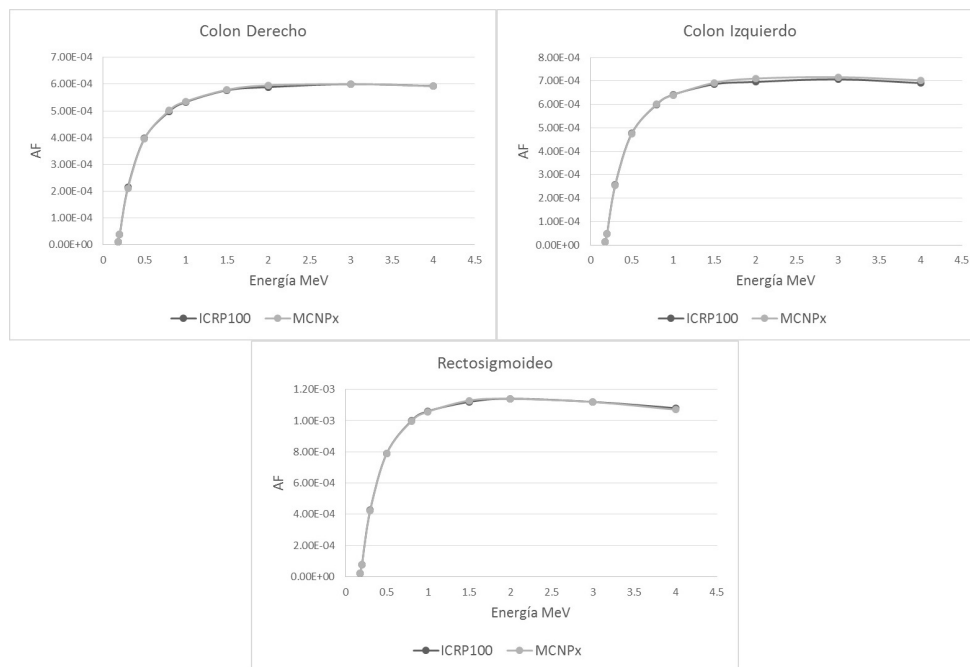


Figura 2: Comparación entre AF calculada y AF reportada por el ICRP 100 para hombre adulto. Fuente: Elaboración propia.

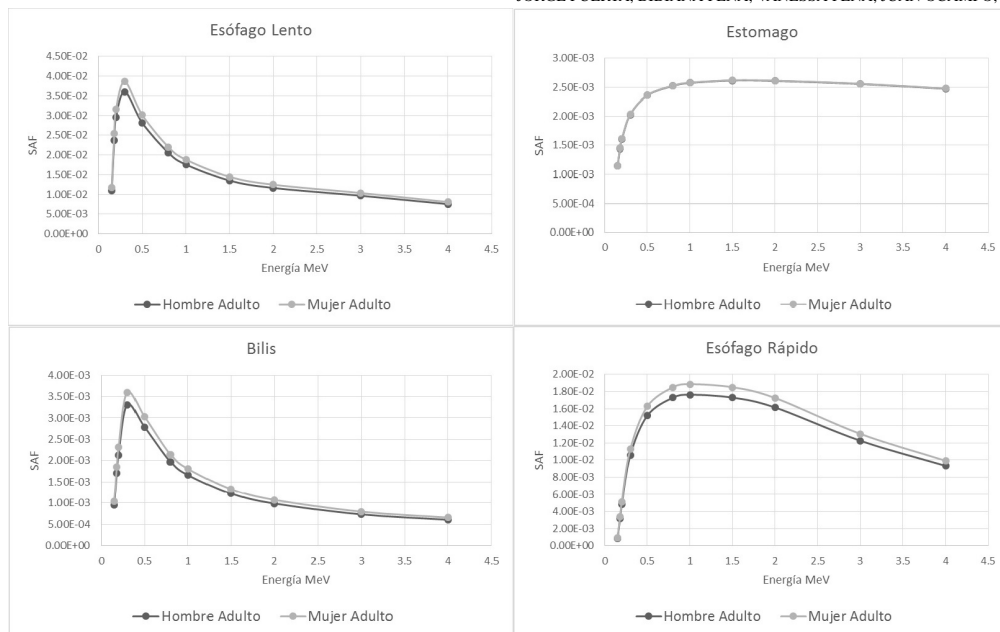


Figura 3: Curvas que muestran la tendencia de los valores de SAF en función de la energía de los electrones para esófago, bilis y estómago. Fuente: Elaboración propia.

Los valores de AF obtenidos para hombre adulto muestran gran concordancia con los valores reportados por la ICRP, se observa que para el rango de energías usado, el error con respecto al ICRP están entre el 0.02 % y el 3.45 % y los errores reportados en el cálculo en el MCNPx son menores al 1 %. Las diferencias con el ICRP pueden ser debido a que en el método de cálculo no se usan métodos de reducción de varianza, excepto el método que tiene por defecto el software MCNP. La publicación 100 de la ICRP reporta los valores de AFs usando el código MCNP para hombre adulto, pero no reporta si usa sólo el método de reducción de varianza utilizado.

La Figura 3, muestra los valores del SAF obtenidos en esófago lento, esófago rápido, bilis y estómago, cuyos valores en general son mayores para mujer adulta que para el hombre adulto. La región de la cavidad bucal, la cual según la ICRP se considera iguales en ambos casos, tienen por tanto los mismos valores reportados por la ICRP publicación 100.

En la Figura 4 se muestran los valores del SAF obtenidos en intestino delgado, colon derecho, colon izquierdo y recto sigmoideo, al igual que los casos anteriores, son mayores para mujer adulta que para el hombre adulto.

3.2. Valores de $h(50)$ y $e(50)$ para el ^{90}Sr - ^{90}Y

Utilizando los valores de SAF para órganos blanco y los anteriores valores de SAF obtenidos para las regiones blanco del HATM, se evaluaron las dosis equivalentes comprometidas por órgano y la dosis efectiva

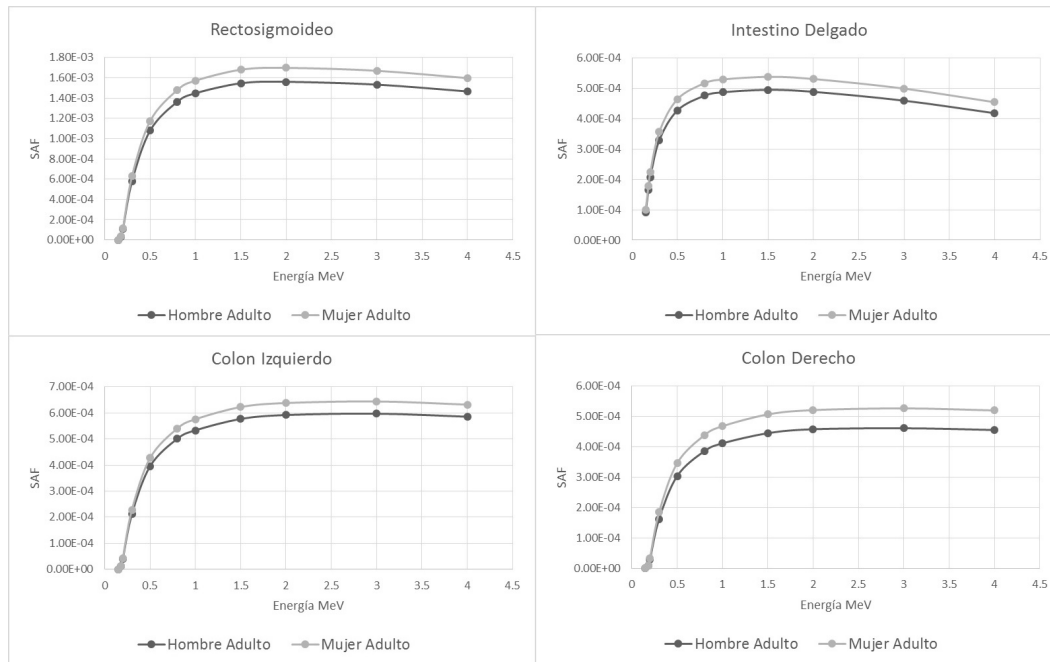


Figura 4: Curvas que muestran la tendencia de los valores de SAF en función de la energía de los electrones para intestino delgado, colon derecho, colon izquierdo y recto sigmoideo. Fuente: Elaboración propia.

comprometida para ambos géneros, considerando las dos fracciones de absorción en intestino delgado reportados por la ICRP 78, de 0.30 y 0.01 y la metodología recomendada por la publicación 103 de la ICRP. Estos valores se compararon con los obtenidos a través del Software AIDE, que utiliza la metodología propuesta en la publicación 60 de la ICRP y considera el modelo del tracto gastrointestinal de la publicación 30 de la misma Comisión y el Modelo del Tracto Respiratorio de su publicación 66, que para este caso se usó en el cálculo de dosis en la regiones extratorácica (ET) y pulmonar (ver Tabla 1).

Los coeficientes de dosis equivalentes comprometidas obtenidos, son mayores en los órganos de la mujer que en el hombre adulto usando los phantom voxelizados, esto se debe a las masas relativamente más bajas en la mujer que en el hombre de referencia, lo que incide sobre los valores del SAF. Se observa que los coeficientes de dosis equivalente comprometidas en la mayoría de los órganos, con excepción de hueso superficial y médula ósea roja, son mayores en la metodología de cálculo de la publicación 103 del ICRP que en el cálculo realizado con AIDE, esto se debe a que la fracción absorbida para electrones no es constante porque hay contribución de órganos vecinos y a las diferencias de masas consideradas en ambos phantom.

En relación al sistema óseo, los coeficientes resultan menores en superficie ósea y médula ósea, con el cálculo realizado con los phantom voxelizados y la metodología propuesta por la ICRP publicación 103, que el método anterior. Esto se debe básicamente a que en el cálculo de las fracciones absorbidas, en el cálculo realizado con AIDE, se consideraban constantes de acuerdo al rango de energía de los electrones, programa

Tabla 1: Comparación de los coeficientes de dosis usando los phantoms voxelizados de referencia con los coeficientes reportados por el Software AIDE.

Sr-90/Y-90: Coeficientes de dosis equivalente comprometida (Sv/Bq) y coeficientes de dosis efectiva comprometida (Sv/Bq) para incorporación única.								
f1	RCP-AF		RCP-AM		ICRP 103		AIDE	
	0.30	0.01	0.30	0.01	0.30	0.01	0.30	0.01
Cerebro	2.69E-08	8.96E-10	1.10E-08	3.68E-10	1.90E-08	6.32E-10	6.62E-10	2.21E-11
Mama	7.80E-10	2.61E-11	5.66E-10	1.89E-11	6.73E-10	2.25E-11	6.62E-10	2.21E-11
Colon	2.70E-09	2.27E-09	1.85E-09	1.30E-09	2.28E-09	1.79E-09	1.27E-08	1.48E-08
Superficie ósea	2.09E-07	6.97E-09	1.32E-07	4.39E-09	1.71E-07	5.68E-09	4.08E-07	1.36E-08
Hígado	2.14E-09	7.32E-11	1.22E-09	4.15E-11	1.68E-09	5.74E-11	6.62E-10	2.21E-11
Pulmones	1.23E-08	4.11E-10	4.55E-09	1.52E-10	8.43E-09	2.82E-10	6.62E-10	2.21E-11
Esófago	2.10E-08	7.05E-10	6.35E-09	2.16E-10	1.37E-08	4.61E-10	6.62E-10	2.21E-11
Gónadas	8.70E-10	3.55E-11	7.07E-10	2.36E-11	7.89E-10	2.96E-11	6.62E-10	2.21E-11
Médula ósea roja	6.60E-08	2.20E-09	5.05E-08	1.68E-09	5.83E-08	1.94E-09	1.79E-07	5.96E-09
Glándulas salivares	2.43E-08	8.09E-10	4.41E-09	1.47E-10	1.44E-08	4.78E-10		
Piel	1.49E-09	4.97E-11	1.22E-09	4.09E-11	1.36E-09	4.53E-11	6.62E-10	2.21E-11
Pared estómago	9.98E-10	3.16E-10	7.80E-10	2.56E-10	8.89E-10	2.86E-10	2.59E-10	2.59E-10
Tiroides	8.93E-10	2.98E-11	6.76E-10	2.26E-11	7.85E-10	2.62E-11	6.62E-10	2.21E-11
Vejiga	1.46E-08	6.76E-10	1.12E-09	3.82E-11	7.86E-09	3.57E-10	1.48E-09	4.94E-11
Otros órganos	1.16E-08	4.43E-10	3.47E-09	1.32E-10	7.54E-09	2.88E-10	6.72E-10	3.66E-11
e(50)	1.56E-08	8.30E-10	9.32E-09	4.89E-10	1.25E-08	6.60E-10	2.76E-08	2.68E-09

SEECALL. En la nueva metodología se considera que la distribución según la energía y la masa de la región blanco son diferentes.

En las Figuras 5 y 6 se puede observar el cálculo de los coeficientes de dosis efectiva comprometida y los coeficientes de dosis equivalentes comprometidas en las regiones del HATM, con la metodología del ICRP publicación 103 y el phantom de mujer y hombre adulto voxelizado de la publicación 110 de la ICRP. En las mismas figuras se comparan estos valores anteriores con los calculados con la metodología de la publicación 60 y el modelo del tracto gastrointestinal de la publicación 30 usado en el Software AIDE, para incorporación única por ingestión ^{90}Sr con un f1 de 0.01 y 0.3.

Aquí también se evidencia que los coeficientes de dosis equivalente comprometidas en el RCP- AF son mayores que en el RCP-AM, con excepción del estómago y el intestino delgado, esto se debe principalmente

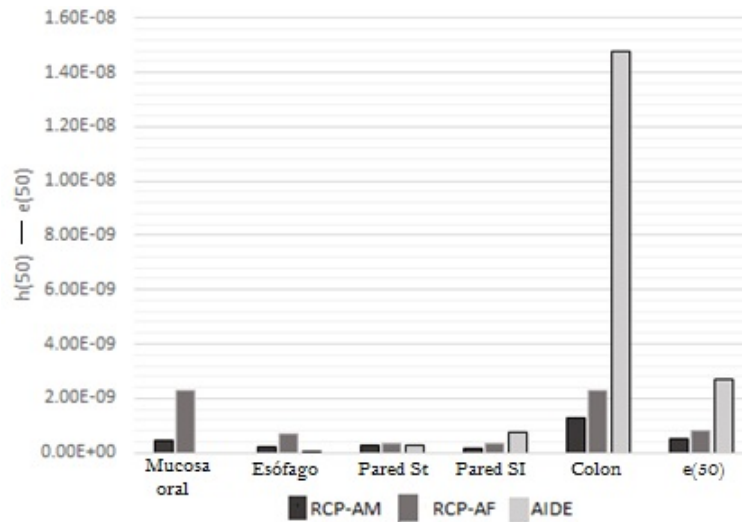


Figura 5: Comparación de los coeficientes del hombre y la mujer adulta usando el phantom voxelizado y el modelo del HATM con los obtenidos haciendo uso del software AIDE, para f1 de 0.01. Fuente: Elaboración propia.

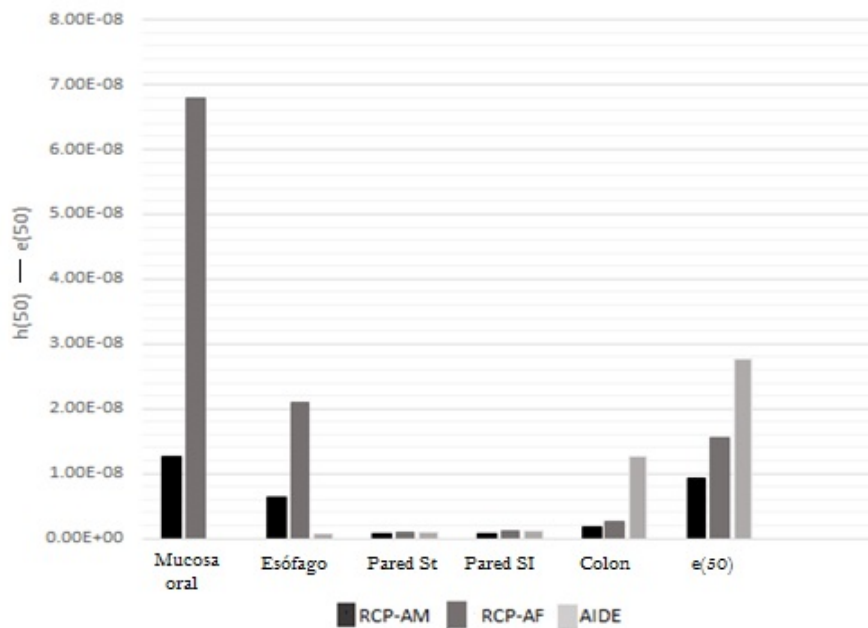


Figura 6: Comparación de los coeficientes del hombre y la mujer adulta usando el phantom voxelizado y el modelo del HATM con los obtenidos haciendo uso del software AIDE, para f1 de 0.30. Fuente: Elaboración propia.

a la diferencias de las masas de las células blanco, igualmente ocurre con los coeficientes de dosis efectiva comprometida. En relación con los cálculos obtenidos en el software AIDE, hay una diferencia sustancial en el coeficiente de colon, esto se debe a que en la nueva metodología la energía absorbida depende de la energía de los electrones y no es constante, además se consideran las masas de las células blanco y no la

pared como un todo, por otro lado se sigue conservando un mayor valor del coeficiente en colon para un f_1 de 0.01 que para un f_1 de 0.30 como es de esperarse.

Finalmente, los coeficientes de dosis efectiva comprometidas para las fracciones de absorción consideradas anteriormente, resultan menores en la metodología del ICRP publicación 103 y el phantom de mujer y hombre adulto voxelizado de la publicación 110 de la ICRP, que los obtenidos con AIDE, como se puede ver en la tabla 1 y en las Figuras 5 y 6, a pesar de que los coeficientes de dosis individuales en la mayoría de los órganos son mayores como se discutió anteriormente, esto se debe básicamente en que los órganos que contribuyen de manera sustancial a este coeficiente son los obtenidos en superficie ósea, médula ósea y colon y sus coeficientes de dosis equivalentes comprometidas son menores que en AIDE.

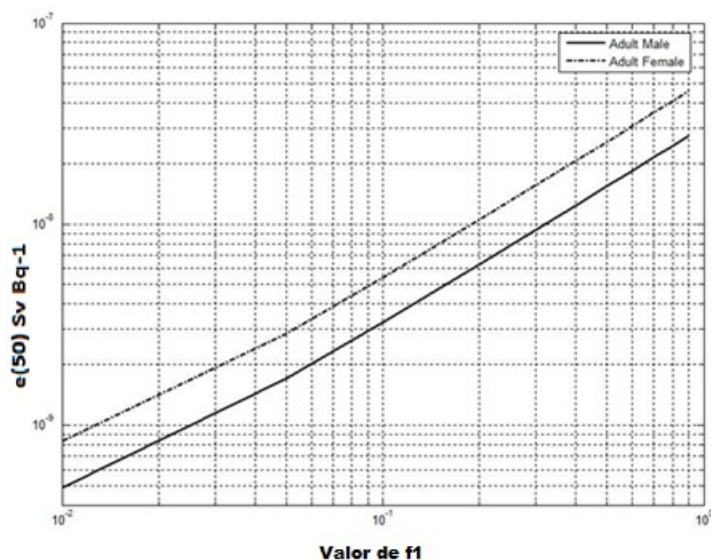


Figura 7: Coeficientes de dosis efectiva comprometida para RCP-AM y RCP-AF usando el modelo del HATM en función de los valores de f_1 . Fuente: Elaboración propia.

Li *et al.* (2006) publicaron el comportamiento del ^{90}Sr en humanos, en donde muestran las diferencias de absorción del ^{90}Sr en intestino delgado después de la incorporación en diferentes productos alimenticios, mostrando que el valor de f_1 varía hasta valores de 0.97 y reporta los coeficientes de dosis efectiva comprometidas para cada valor de f_1 , para el caso del ^{90}Sr . En la Figura 7, se muestran la tendencia de los coeficientes de dosis efectiva comprometida, variando para valores de f_1 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9, utilizando los resultados del modelo del HATM, la metodología del ICRP publicación 103 y RCP-AM y RCP-AF de la publicación 110 de la ICRP.

De igual forma se muestra la tendencia de los coeficientes de dosis efectiva comprometida, reportados por Li *et al.* (2006) y los valores obtenidos usando el modelo del HATM y la metodología recomendada por

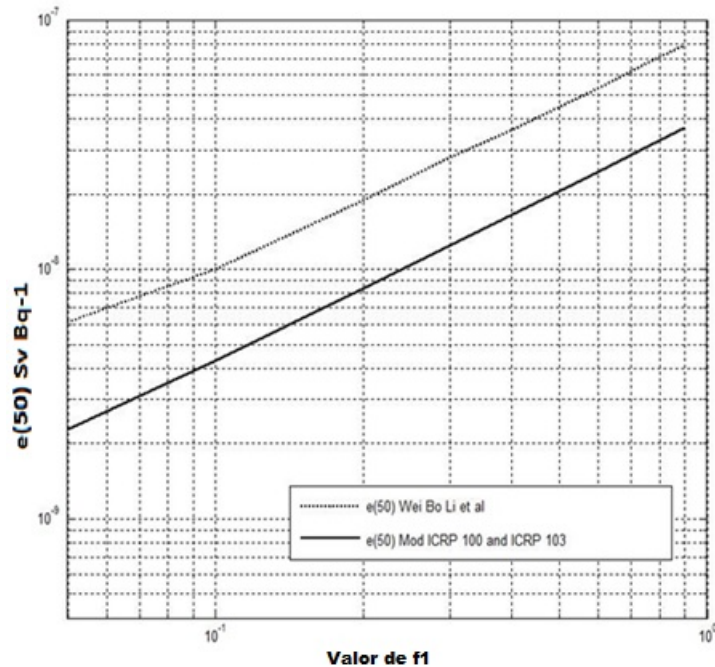


Figura 8: Tendencia de los Coeficientes de dosis efectiva comprometida, reportados por Wei Bo Li *et al.* y los obtenidos usando el modelo del HATM y la metodología recomendada por la ICRP 103 en función de los valores de f_1 . Fuente: Elaboración propia.

la ICRP 103 en función de los valores de f_1 . Los valores obtenidos en este trabajo son menores que los publicados por Li *et al.* (2006) y esto se debe sin duda a que la mayor contribución a los coeficientes de dosis se da debido a hueso superficial, médula ósea y colon, como se mencionó en párrafos anteriores.

4. CONCLUSIONES

La fracción absorbida calculada para un hombre adulto en los diferentes compartimientos del HATM, concuerdan muy bien con el ICRP, observando que para el rango de energías utilizada, el error con respecto a los valores reportados por la ICRP son del 0.02 % y el 3.45 % y los errores relativos reportados en el cálculo en el MCNPX menores al 1 %. Las diferencias con respecto a la ICRP pueden deberse a que el método de cálculo propuesto no utiliza ningún método de reducción de varianza, excepto el método intrínseco que por defecto usa la MCNP. Los valores del SAF obtenidos para la Mujer Adulta en el HATM son mayores que los del Hombre Adulto, esto es debido a la diferencia de tamaño de la región blanco, exceptuando el estómago cuyos valores son muy similares. Los valores de SAFs decrecen con el diámetro interno de las regiones. Esto es debido al rango de los electrones y el incremento de la autoabsorción en las regiones fuente, en la medida que la energía de los electrones decrece.

El coeficiente $h(50)$ en esófago resulta ser mayor en los phantom RCP-AM y RCP-AF, que el que se obtiene en el software AIDE, para la incorporación única y fracciones de absorción f_1 de 0.01 y 0.30, para $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$,

debido a que en el modelo se especifica muy bien las regiones blanco y fuente, en cuanto que en el Software mencionado utiliza una metodología de órgano sustituto. El coeficiente $h(50)$ de colon resulta menor que el del Software esto se debe a que en el HATM la energía absorbida depende de la energía de los electrones y no es constante, además se consideran las masas de las células blanco y no la pared como un todo.

Los coeficientes de dosis equivalentes comprometidas obtenidos, son mayores en los órganos del RCP-AF que en RCP-AM, esto se debe a las masas relativamente más bajas en la mujer que en el hombre de referencia, lo que incide sobre los valores del SAF. Los coeficientes de dosis equivalente comprometidos en la mayoría de los órganos, son mayores en la metodología de cálculo de la publicación 103 del ICRP que en el cálculo realizado con AIDE, esto se debe a que la fracción absorbida para electrones no es constante y hay contribución de órganos vecinos y a las diferencias de masas consideradas en los RCP-AF y RCP-AM, que en el phantom estilizado. En relación al sistema óseo, los coeficientes resultan menores en superficie ósea y médula ósea, con el cálculo realizado con RCP-AF y RCP-AM y la metodología propuesta por la ICRP publicación 103, que el obtenido con el software AIDE. Esto se debe básicamente a que en el cálculo de las fracciones absorbidas, en el cálculo realizado con AIDE, se consideraban constantes de acuerdo al rango de energía de los electrones. En la nueva metodología los SAF obtenidos son dependientes de la energía, se tiene en cuenta la distribución del RBM y el hueso superficial (BS) en las diferentes partes del esqueleto. Adicionalmente, las masas de los blancos son diferentes. (En el caso del hombre RBM pasó de 1.5kg a 1.17kg y Endosteum paso de 0.12kg a 0.544 kg.

Para el caso particular del $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, los valores que comandan los coeficientes de dosis efectiva comprometida son los $h(50)$ de colon, hueso superficial y médula ósea, por esta razón, estos coeficientes resultan ser menores que los obtenidos por el Software AIDE, resultando ser de 1.25×10^{-08} y 6.60×10^{-10} Sv/Bq, para f_1 de 0.3 y 0.01 respectivamente.

De acuerdo con los valores de f_1 , reportados por Li *et al.* (2006), para la incorporación de ^{90}Sr , se calcularon los coeficientes de dosis efectiva comprometida para un rango de valores de f_1 de 0.01 hasta 0.9, utilizando los $h(50)$ obtenidos en este trabajo, usando la metodología propuesta por la ICRP publicación 103, resultando evidentemente menores en todos los casos a los valores de $e(50)$ reportados por estos autores, en consecuencia la metodología anterior para este radioisótopo sobreestima la dosis respecto a la metodología utilizada actualmente.

Referencias

- AIDE Software. (2007). Activities and internal dose estimates. (Versión 6.0).
- Cristy, M. & Eckerman, K. F. (1993). SEECAL: Program to calculate age-dependent specific effective energies.

ICRP. (1979). Limits for intakes of radionuclides by workers. Limits for intakes of radionuclides by workers. *ICRP PUBLICATION*, 30(PART 1).

ICRP. (2007). Human alimentary tract model for radiological Protection, Publication 100. Elsevier.

ICRP. (1993) Age-dependent doses to members of the public from intakes of radionuclides - Part 2 Ingestion Dose Coefficients. Pergamon Press.

ICRP. (2009). Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. *Ann. ICRP*, 39(2). Elsevier.

ICRP. (2008). Nuclear decay data for dosimetric calculations. Publication 107. *Ann. ICRP*, 38(3). Elsevier.

ICRP. (2007). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 103. *Ann. ICRP*, 37(2-4). Elsevier.

ICRP. (1991). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60. Pergamon Press.

ICRP. (1994). Human respiratory tract model for radiological protection, Publication 66. *Ann. ICRP*, 24(1-3).

Li, W. B.; Höllriegl, V.; Roth, P. & Oeh, U. (2006). Human biokinetics of strontium. Part I: Intestinal absorption rate and its impact on the dose coefficient of ^{90}Sr after ingestion. *Radiation and environmental biophysics*, 45(2), 115-124.

Ocampo, J. C.; Puerta, J. A. & Morales, J. (2013). Evaluation of specific absorbed fractions from internal photon sources in the ICRP Reference Male Phantom. *Radiation protection dosimetry*, 157(1), 133–141.

Pelowitz, D. B. (2005). MCNPX user's manual (Version 2.5.0). *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos*.