

## **FACTORES DE DOSIS EN CONTAMINACIÓN INTERNA USANDO SIMULADORES VOXELIZADOS**

**Ocampo J.C., Puerta J.A., y Morales J.**

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

### **RESUMEN**

En el proceso de evaluación de la dosis debido a la incorporación de material radiactivo es necesario el empleo de modelos dosimétricos, que permitan cuantificar la energía absorbida en los órganos del cuerpo humano. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de las fracciones de absorción específicas (SAF) en los phantoms computacionales del hombre y mujer adultos de la ICRP. Las simulaciones fueron realizadas usando el código MCNPX y calculadas para fotones y electrones monoenergéticos, se incluyeron una combinación de 1700 órganos fuente/blanco para 12 energías para ambos tipos de partículas y ambos simuladores. Los resultados muestran en general una gran dependencia en la anatomía asociada a cada uno de los phantoms. Los factores calculados se constituyen en una base de datos de 81600 valores SAF para la evaluación de la dosis individual asociada a la contaminación interna de órganos.

### **1. INTRODUCCIÓN**

En el proceso de evolución de dosis en contaminación interna requiere de una serie de cálculos independientes relacionados con: 1) la medida y la identificación de la actividad incorporada, 2) la biocinética del radionúclido asociado y 3) uso de modelos dosimétricos. Es en estos últimos donde el objetivo es conocer la energía absorbida en los órganos blanco debido a la emisión de radiación por parte de órganos fuente, para esto se ha definido la SAF (Specific Absorbed Fractions), esta cantidad representan la fracción de energía que es adsorbida por un órgano blanco, respecto a la energía total emitida por un órgano fuente, dividido por la masa del órgano blanco. La forma más precisa de calcular estos valores se realiza a través del método de Monte Carlo y la utilización de phantoms computacionales antropomórficos (Hakimabad, 2008).

Los más recientes phantoms computacionales de referencia de la ICRP son de tipo voxelizados, basados en imágenes de Tomografía computarizada de personas reales, por lo cual son anatómicamente más acertados que sus modelos predecesores (phantoms estilizados) y contienen una morfología casi real de los órganos del cuerpo.

En el grupo de Física radiológica de la Universidad Nacional de Colombia, hemos estado realizando la evaluación de las SAF para fotones y electrones en los phantoms voxelizados del ICRP (Ocampo, 2012; Ocampo 2013) en este trabajo se muestran algunos de los resultados de la basta base de datos de SAFs obtenidos. Existen algunos otros trabajos en el

área (Zankl et al, 2012) pero difieren en los procesos aleatorios asociados al método de Monte Carlo y al paquete empleado para tal fin.

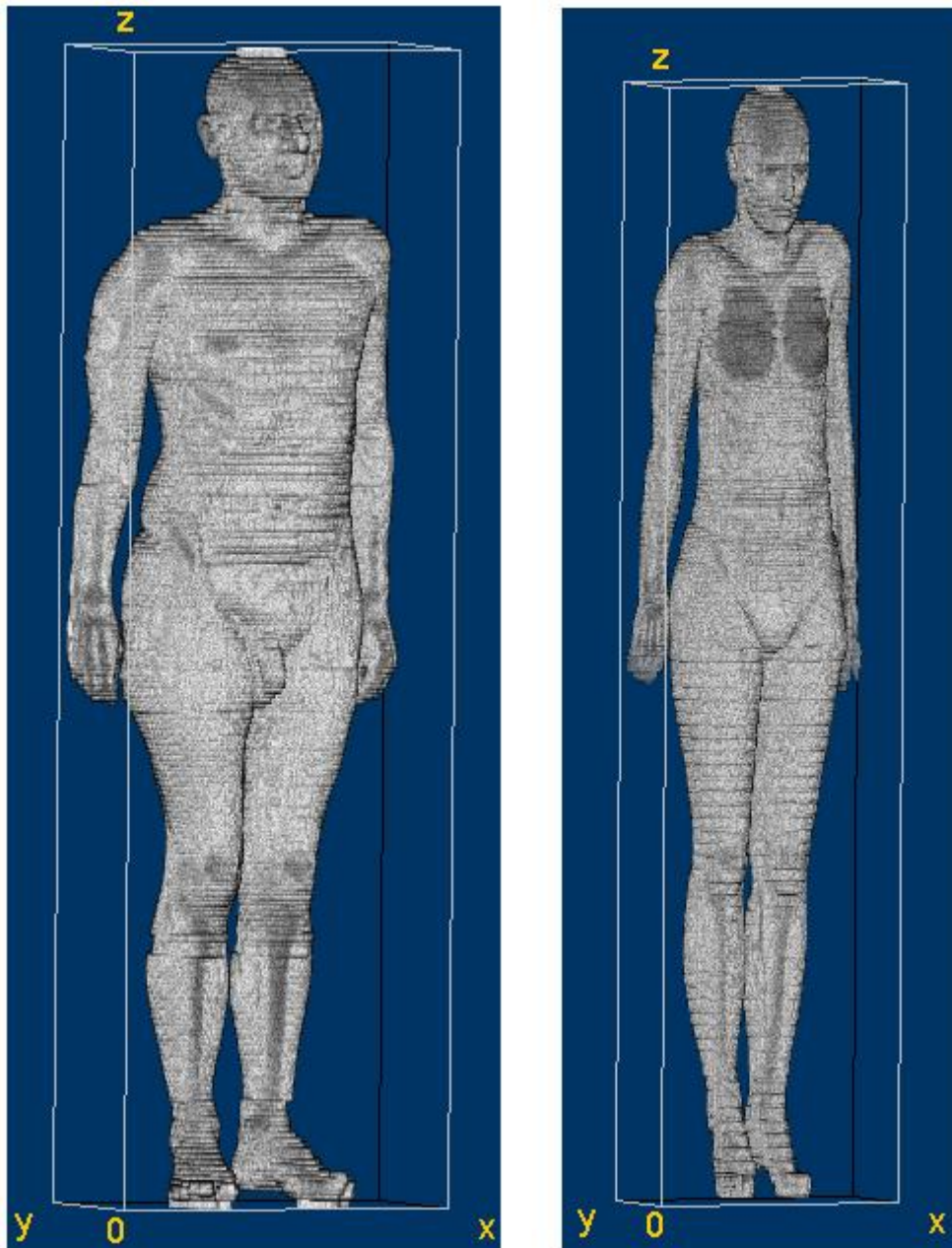
## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1. Phantoms computacionales

En la publicación 110 de la ICRP, se definieron y dieron a conocer los phantoms computacionales de referencia, RCP-AM y RCP-AF, los cuales representan a morfología del hombre y mujer promedio de adultos caucásicos respectivamente (ICRP, 2009). En la siguiente tabla se aprecian las principales características de ambos phantoms, a modo general se puede observar que tanto la resolución plana como espesor de rebana son mucho más pequeñas en el phantom femenino, con lo cual es un modelo más preciso y realista, el número total de voxels están en proporción de 2 a 1, esto va a repercutir como uno de los factores más importantes en el tiempo de ejecución de los programas.

**Tabla 1: Principales características de los phantoms voxelizados de referencia**

<b>Propiedad</b>	<b>RCP-AM</b>	<b>RCP-AF</b>
Estatura (m)	1.76	1.63
Masa (kg)	73	60
Espesor de Rebanadas (mm)	8	4.84
Resolución plana (mm)	2.137	1.775
Volumen de voxel (mm <sup>3</sup> )	36.54	15.25
Número de Columnas	254	299
Numero de Filas	127	137
Número de rebanadas	222	348
Número de voxels de tejido	1,946,375	3,886,020
Número total de voxels	7,161,276	14,255,124



**Figura 1. Phantoms computacionales de referencia RCP-AM y RCP-AF en ImageJ**

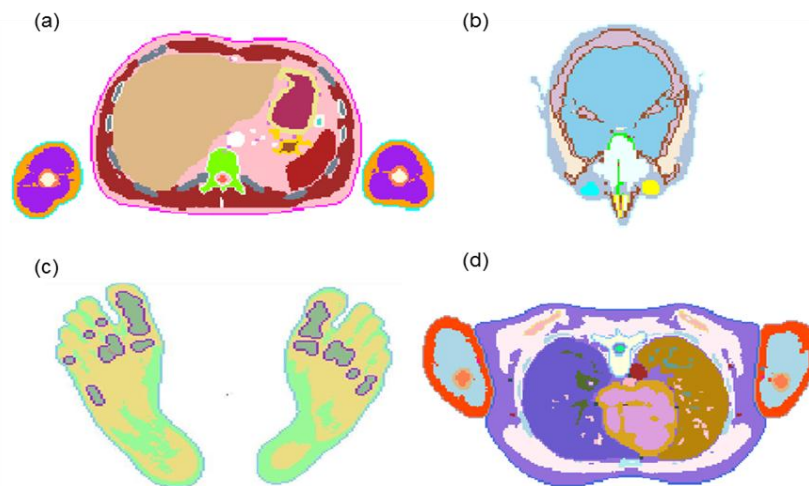
## **2.2. MCNPX**

El código MCNP (Monte Carlo N-Particle) es un código general de transporte de radiación desarrollado en el laboratorio de los Alamos (Los Alamos National Laboratory), el cual simula el transporte de radiación en cualquier tipo de geometría tridimensional. Una de las versiones más utilizadas es el MCNP5 (Briesmeister, 2000) el cual puede transportar neutrones (desde  $1 \times 10^{-11}$  MeV hasta 20 MeV), fotones (1keV – 100GeV) y electrones (1keV – 1GeV). Existe una versión más reciente y diferente del MCNP5, Monte Carlo N-Particle Extended o MCNPX la cual es una versión extendida del MCNP5 que puede transportar todas las partículas elementales (35 en total) en todos sus rangos de energías (por encima de

GeV), aparte de esto esta versión ofrece nuevos tipos de geometrías integradas, nuevos sensores y detectores (tallies) y un paquete con una interfaz gráfica de usuario muy amigable (Pelowitz, 2005; Schwarz, 2008). El MCNPX está escrito en FORTRAN 90 y se puede ejecutar en cualquier plataforma, con la posibilidad de paralelizarse.

### 2.3. Cálculos de Monte Carlo

El transporte de radiación en los phantoms fue simulado usando el código MCNPX versión 2.6. El primer paso al momento de realizar los programas fue la implementación de la geometría de la simulación (que para nuestro caso son los phantoms en sí mismos) en el archivo de entrada del MCNP. Para esto se utilizó el paquete de estructuras repetidas que tiene implementado en código. Si bien no fue posible observar el phantom como un todo (por el gran tamaño de la información), si se pueden visualizar rebanadas específicas como las que se muestran en la figura 2 y una visualización completa de los simuladores en otros software como ImageJ (ver figura 1).



**Figura 1: Cortes transversales a diferentes alturas del cuerpo del RCP-AM. (a) Región abdominal, (b) Cabeza, (c) Pies, (d) Región torácica.**

A continuación se describen las características generales de las simulaciones que se llevaron a cabo. La característica en común que tienen estos es que tanto los fotones como los electrones fueron generados isotrópicamente y homogéneamente en cada uno de los órganos considerados.

#### SAF para fotones

Las SAF fueron calculadas para 50 órganos fuente y un total de 34 órganos blancos de interés dosimétrico en el RCP-AM y el RCP-AF. Estos valores fueron obtenidos para fotones monoenergéticos, de energías de 0.01, 0.015, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 y 4 MeV. Una vez los fotones fueron generados desde cada uno de los órganos fuente, se siguió su historia hasta que fueron completamente absorbidos o salieron de la región de interés. La dosis absorbida en los órganos blanco de este phantom fue calculada utilizando el “track-length cell energy deposition tally”, el cual no tiene en cuenta las partículas secundarias, es decir calculamos la dosis bajo la aproximación de KERMA, lo cual tiene como principal ventaja la rapidez en el tiempo de computo. Las simulaciones para el cálculo de los valores

SAF fueron realizadas en un computador personales de 8 núcleos y 4 GB de RAM. El tiempo de cómputo dependió del número de historias, la energía inicial de fotón generado y principalmente del tamaño del órgano fuente. En total se simularon  $10^7$  historias, y se utilizó la energía de corte por defecto de los fotones de 1 keV.

Debido a la estructura microscópica del sistema óseo, este no se puede visualizar correctamente en imágenes de MRI o CT, es decir, no se pueden segmentar de estas imágenes por lo cual la estructura real de estos tejidos no pueden ser identificados en los phantom voxelizados. Esto hace que en los tejidos radiosensibles del esqueleto: “Red Bone Marrow” y el “endosteal tissue or Bone surface” (RBM y BS respectivamente) se deben emplear técnicas especiales para el cálculo de dosis debido a la exposición de fotones (ICRP, 2009). Para la estimación de la dosis absorbida en RBM se utilizaron las nuevas funciones de respuestas publicadas por Perry B Johnson et al (Eckerman et al, 2007; Perry B Johnson et al, 2011). En cuanto al cálculo de dosis para BS se utilizó el “Homogeneous bone approximation method” (HBM) (Lee et al 2006), en el cual los tejidos del esqueleto son utilizados como regiones sustitutas de la superficie ósea, es decir, la dosis media en todo el esqueleto es una medida representativa de la dosis en BS.

### SAF para electrones

Al igual que para fotones, las SAF para electrones fueron calculadas para 50 órganos fuente y un total de 34 órganos blancos de interés dosimétrico en el RCP-AM. Estos valores fueron obtenidos para fotones monoenergéticos, de energías de 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 4 y 6 MeV. Una vez los electrones fueron generados desde cada uno de los órganos fuente, se siguió su historia hasta que fueron completamente absorbidos o salieron de la región de interés, así mismo para los fotones secundarios producidos en los procesos de interacción. La deposición de energía se registró usando el “tally f8”, se simularon un total  $10^7$  historias y las energías de corte para fotones y electrones fueron tomados por defecto.

A continuación se muestran la lista de órganos fuente y blanco usados así como sus respectivos acrónimos.

**Tabla 2: Órganos fuente definidos en la base de datos**

Órganos Fuente	Acrónimo
Adipose/residual tissue	Adipose
Adrenals	Adrenals
Alveolar-interstitium/Bronchioles	AI/Brchiole
Total Blood	Blood
Brain	Brain
Breast	Breast
Bronchi	Bronchi
Cortical bone mineral volume	C-bone-V
Cortical bone marrow	C-marrow
Cartilage	Cartilage
Anterior nasal passages	ET1

Posterior nasal passages + pharynx	ET2
Gall bladder contents	GB-cont
Gall bladder wall	GB-wall
Blood in heart	Ht-cont
Heart wall	Ht-wall
RKidney + Lkidney	Kidneys
Left colon contents	LC-cont
Left colon wall	LC-wall
Liver	Liver
Lymph nodes in ET region	LN-ET
Lymph nodes in thoracic region	LN-Th
RLung + Llung	Lungs
Muscle	Muscle
Oral cavity	O-cavity
Oesophagus wall	Oesophagus
Ovaries/Testes	Ovaries/Testes
Pancreas	Pancreas
Red bone marrow	R-marrow
Right colon contents	RC-cont
Right colon wall	RC-wall
Rectosigmoid colon contents	Rsig-cont
Rectosigmoid colon wall	Rsig-wall
Salivary glands	S-gland
Soft tissue	S-tissue
Small intestine contents	Si-cont
Small intestine wall	Si-wall
Skin	Skin
Spleen	Spleen
Stomach contents	St-cont
Stomach wall	St-wall
Total body tissues	T-body
Trabecular bone mineral volume	T-bone-V
Trabecular bone marrow	T-marrow
Thymus	Thymus
Thyroid	Thyroid
Urinary bladder contents	UB-cont
Urinary bladder wall	UB-wall
Prostate/Uterus	Prostate/Uterus
Yellow marrow	Y_marrow

**Tabla 3: Órganos blanco donde la energía depositada es registrada**

<b>Órganos Blanco</b>	<b>Acrónimo</b>
Adrenals	Adrenals
Brain	Brain
Breast	Breast
Colon	Colon
Basal cells of anterior nasal passages	ET1
Basal cells of posterior nasal passages + pharynx	ET2
Lymph nodes of ET region	LN ET
50-lm endosteal region	Endost-BS
Eyes-lens	Eyes-lens
Gall bladder wall	GB-wall
Heart wall	Ht-wall
RKidney + Lkidney	Kidneys
Liver	Liver
Rlung+Llung	Lungs
Basal cells of bronchi	Bronchi-bas
Alveolar-interstitium	Al
Lymph nodes in thoracic region	LN TH
Lymph nodes, except LN-ET + LN-Th	Lymph
Muscle	Muscle
Oesophagus	Oesophagus
Oral mucosa	O-mucosa
Testes/Ovaries	Testes/Ovaries
Pancreas	Pancreas
Active (red) marrow	RBM
Salivary glands	S-glands
Skin	Skin
Small intestine wall	SI-wall
Spleen	Spleen
Stomach wall	St-wall
Thymus	Thymus
Thyroid	Thyroid
Urinary bladder wall	UB-wall
Prostate/Uterus	Prostate/Uterus
Total bone	Total bone

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Fotones

Dado el gran camino libre medio de los fotones en la materia, las diferencias geométricas y anatómicas tienen gran impacto en los SAFs de fotones, a modo de ejemplo se muestra la figura 3, donde se aprecian la variabilidad de las SAF en función de la energía para el hígado como fuente, en esta misma grafica se comparan con los valores de SAF de referencia de los phantoms estilizados.

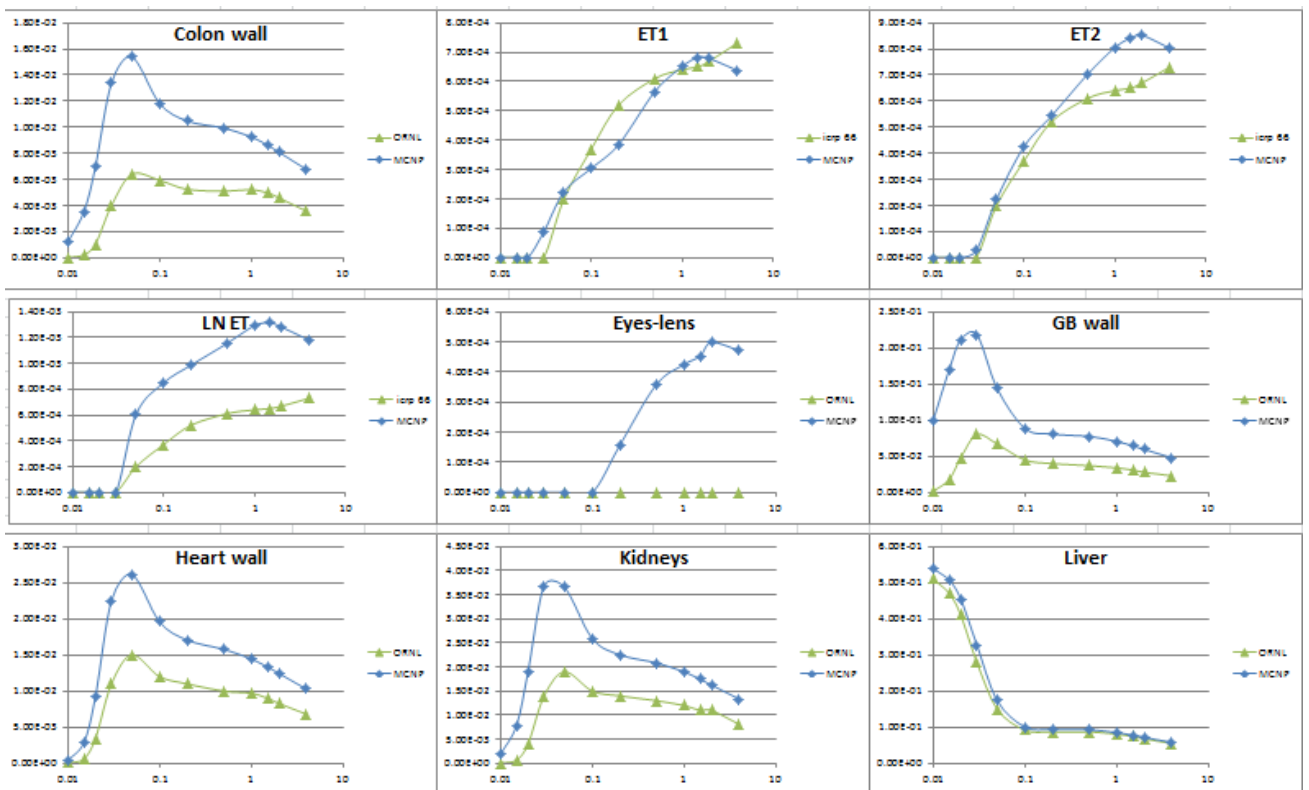


Figura 3. Valores SAF(1/kg) en función de la energía(MeV) para el hígado como fuente en el RCP-AM, los órganos blanco considerados son: Colon, ET1, ET2, LN ET, Eye-Lens, GB Wall, Heart wall, Hidneys y Liver.



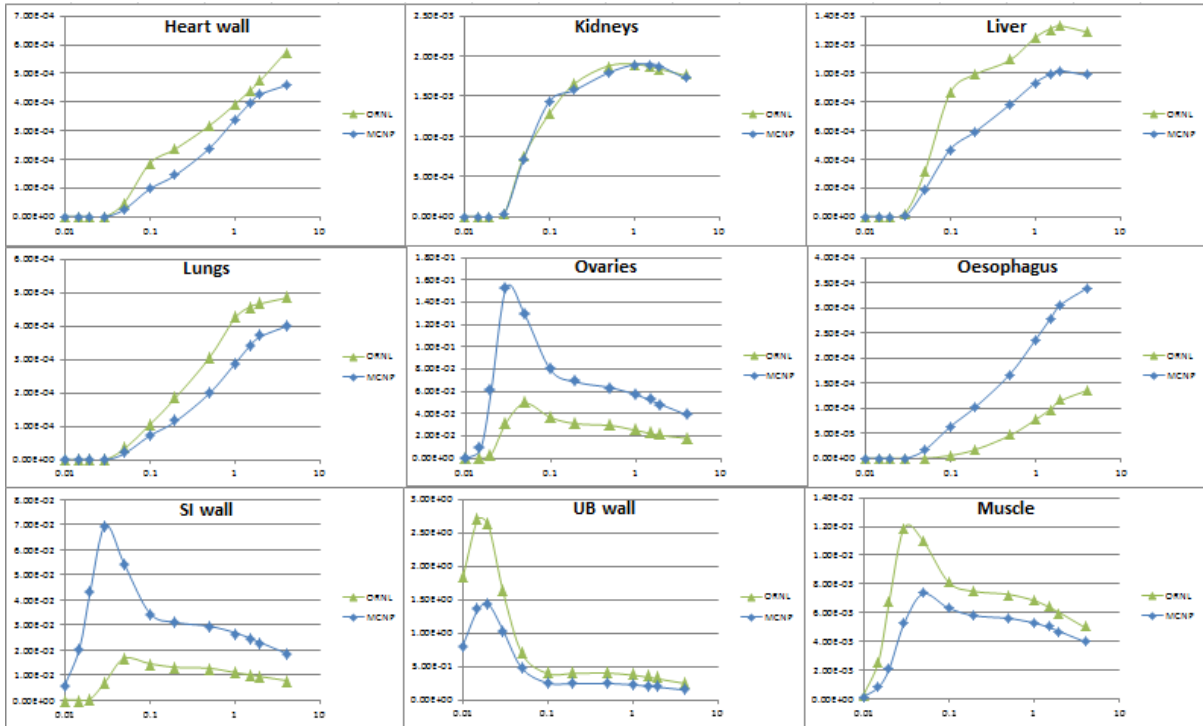


Figura 4. Valores SAF (1/kg) en función de la energía (MeV) para el contenido de la vejiga como fuente en el RCP-AF, los órganos blanco considerados son: Heart wall, Hidneys Liver, lungs, Ovaries, Oesophagus, SI wall, UB wall y Muscle.

### 3.2 Electrones:

Para los electrones la gran diferencia encontrada respecto a los métodos y aproximaciones previamente aceptadas fueron:

1) La no auto absorción completa de la energía emitida para regiones fuente/blanco volumétricas (ver figura 5), aproximación que se venía aceptando desde la publicación 30 de la ICRP.

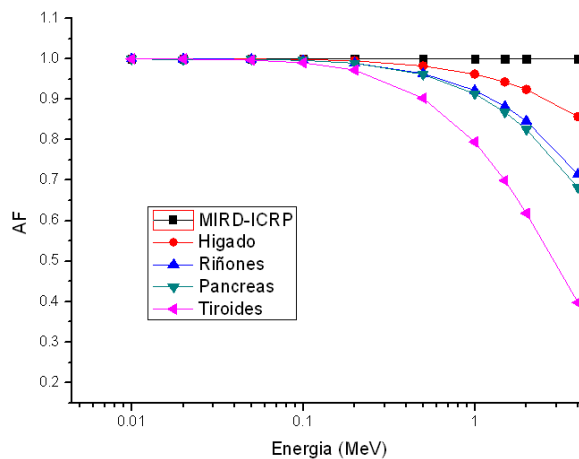


Figura 5. Fracción de auto-absorción en distintos órganos del RCP-AM

2) La sobreestimación de la SAF para regiones donde la fuente es el contenido de órganos con paredes y el blanco son las paredes del mismo, esto se puede apreciar claramente en la figura 6, donde se muestran los valores para el caso particular de la vejiga.

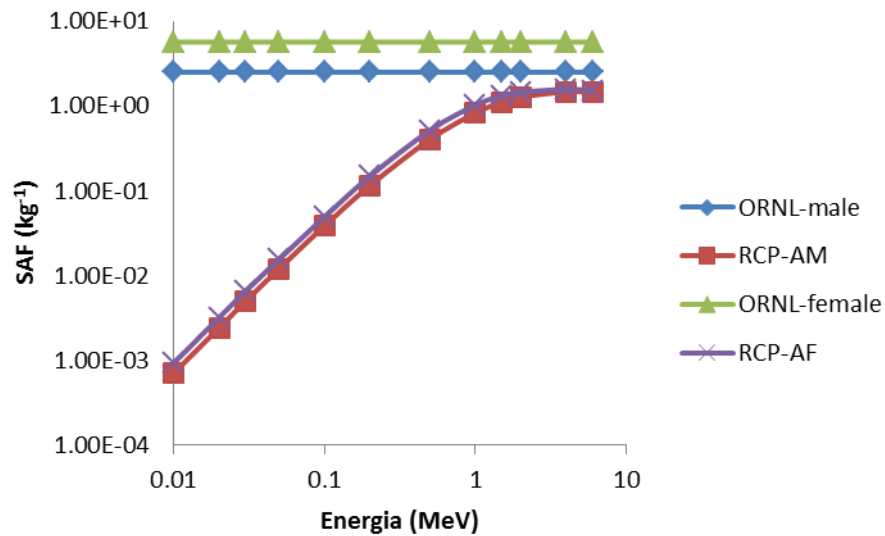


Figura 6: SAF(paredes de la vejiga←contenido de la vejiga)

3) También se encontró que la radiación emitida por el contenido de los órganos con paredes puede alcanzar a irradiar otros órganos. Según la distancia fuente-blanco y la energía emitida los valores de SAF pueden ser del orden de  $1 \times 10^{-6}$  hasta  $4 \times 10^{-2} \text{ kg}^{-1}$ , lo cual es de gran importancia si tenemos presente que en la metodología del ICRP 30 estos valores eran supuesto como cero. Las siguientes figuras muestran lo mencionado anteriormente, es procedente decir que para que este fenómeno ocurra la energía de los electrones emitidos debe ser alta, típicamente energías mayores a 200 keV.

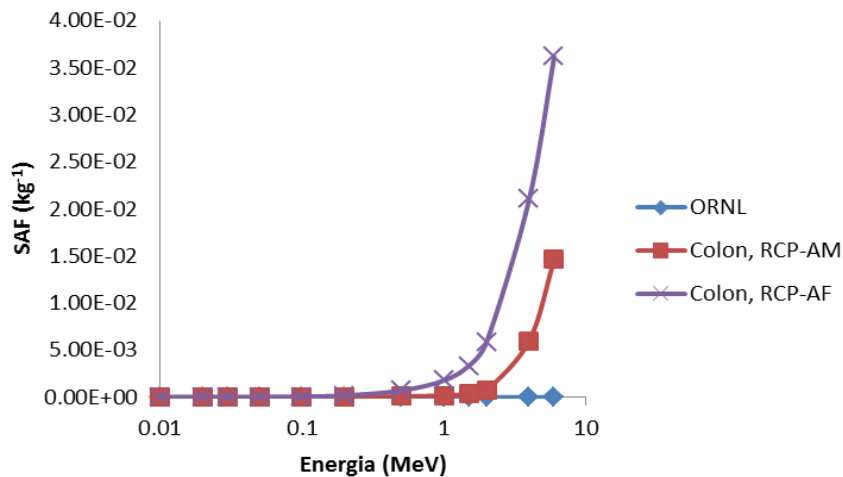


Figura 7: SAF(paredes del colon←contenido del estomago)

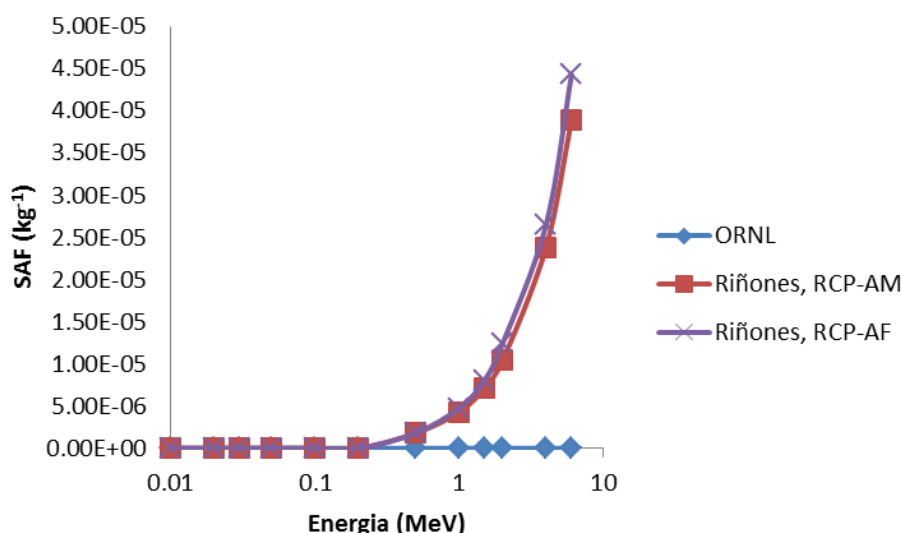


Figura 8: SAF(riñones←contenido de la vejiga)

#### 4. CONCLUSIONES

Dada la gran cantidad de regiones fuente/blanco y el espectro de energías barridas, los resultados constituyen una base de datos de SAFs para fotones y electrones de lo más recientes phantoms computacionales de referencia adultos de la ICRP. Estos valores pueden ser usados en la estimación de dosis debido a la incorporación de material radiactivo, además pueden servir como referencia y control de calidad a los valores que serán adoptados oficialmente en futuras publicaciones de la ICRP.

Los resultados preliminares muestran la variabilidad de los SAF debido a diferencias anatómicas, se espera realizar un compendio de nuevos coeficientes de dosis para una gran variedad de radionúclidos (Protección radiológica) y radiofármacos (Medicina nuclear).

Se espera implementar la base de datos calculada en programas para el cálculo de dosis internas tales como VIDA (voxel-phantom-based software for internal dose assessment).

#### 5. REFERENCIAS

Zankl M, Schlattl H, Petoussi-Hens N, Hoeschen C., “Electron specific absorbed fractions for the adult male and female ICRP/ICRU reference computational phantoms,” *Phys Med Biol.* 2012 Jul 21;57(14):4501-26.

J. C. Ocampo, J. A. Puerta, I. J. Morales. Evaluation of specific absorbed fractions from internal photon sources in the ICRP Reference Male Phantom. *Radiation Protection Dosimetry*, 1. Volume 157, Pp. 133-141. Oxford Journals, 2013.

J. C. Ocampo, J. A. Puerta, J. Morales. Evaluación de fracciones de autoabsorción de electrones en órganos voxelizados. *Revista Colombiana de Física*, vol. 44, No. 1, 2012.

J. C. Ocampo, J. A. Puerta, J. Morales. Fracciones de absorción específicas para fotones con la tiroides como órgano fuente del phantom computacional de referencia del ICRP/ICRU. Revista Colombiana de Física, vol. 44, No. 2, 2012.

Hakimabad HM, Motavalli LR. Evaluation of specific absorbed fractions from internal photon sources in ORNL analytical adult phantom. Radiat Protect Dosim 2008;128:427-31.

ICRP. Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39 (2), 2009.

Pelowitz, D.B. MCNPX User's Manual Version 2.5.0, Los Alamos National Laboratory, Report LA-CP-05-0369, 2005.

Schwarz A.L., Schwarz R.A. and Carter L.L., MCNP/MCNPX Visual Editor Computer Code Manual, 2008.

Briesmeister J F 2000 MCNP—a general Monte Carlo N-particle transport code. Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M (Los Alamos, NM).