

Vigilancia de incorporaciones de ^{131}I y estimación de dosis efectiva comprometida en el personal de un servicio de medicina nuclear

^{131}I intake survey and effective dose calculation for personnel in a nuclear medicine department

A Rodríguez-Laguna¹, E Estrada-Lobato¹, ME Brandan², LA Medina^{2,3*}

¹ Departamento de Medicina Nuclear, Instituto Nacional de Cancerología (INCan), San Fernando 22, 14080 DF, México.

² Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 DF, México.

³ Unidad de Investigación Biomédica en Cáncer INCan-UNAM, San Fernando 22, 14080 DF, México.

Fecha de Recepción: 11/11/2009 - Fecha de Aceptación: 16/03/2010

El personal de un departamento de medicina nuclear presenta el riesgo de incorporación de radionucleidos (^{131}I) en el organismo, ya sea por un descuido en el seguimiento de las normas de protección radiológica, por la ocurrencia de un accidente, o debido a actos malintencionados. La actividad retenida en el organismo puede ser estimada utilizando un sistema de detección basado en NaI(Tl) o HpGe. Este trabajo presenta una propuesta metodológica para el uso de una cámara gamma en la detección de posibles incorporaciones de ^{131}I en el personal de un departamento de medicina nuclear. Se utilizó una cámara gamma Siemens en la que se determinaron la sensibilidad y la actividad mínima detectable para cuantificar actividades retenidas en la glándula tiroides. Se usó un maniquí antropomórfico de cuerpo entero REMCAL para simular y cuantificar una incorporación. Se utilizó el software AIDE (Activity and Internal Dose Estimates) para estimar la incorporación y la dosis efectiva comprometida $E(50)$ mínimas que se pueden medir con la cámara gamma. La cámara gamma puede detectar una actividad de ^{131}I retenida en tiroides, tan baja como 175 Bq sin colimadores, y 5948 Bq con colimadores de alta energía y permite estimar $E(50)$ menores que el 5% del límite anual. Se mostró la utilidad de una cámara gamma para detectar incorporaciones de ^{131}I y estimar la $E(50)$.

Palabras clave: Protección radiológica, cámara gamma, incorporación de ^{131}I , dosis efectiva comprometida, departamento de medicina nuclear.

The staff of a nuclear medicine department is subject to the risk of ^{131}I intake as consequence of oversights in the radiation safety procedures, the occurrence of an accident, or malicious acts. The intake can be estimated by using a detection system based on NaI(Tl) or HpGe. This paper presents a methodological proposal for the use of a gammacamera for detection of occupational intakes of ^{131}I in the Nuclear Medicine staff. We used a Siemens e.cam gamma camera (GC) as the radionuclide intake detection system. GC sensitivity and minimum detectable activity were determined to quantify activity retained in the thyroid gland. A whole-body anthropomorphic phantom REMCAL was also used to simulate and quantify the intake in the thyroid gland. To estimate the minimal uptake and the minimal committed effective dose $E(50)$ that can be quantified with the gammacamera, the AIDE (Activity and Internal Dose Estimates) software was used. The gammacamera can detect ^{131}I activity in thyroid, as low as 175 Bq without collimators, and 5948 Bq with high-energy collimators. The calculation of $E(50)$ shows to be as low as 5% of the annual limit. This work has shown the utility of the gammacamera to detect intakes of ^{131}I and to estimate the $E(50)$.

Key words: Radiation safety, gamma camera, ^{131}I intake, committed effective dose, nuclear medicine department.

* Correspondencia
Email: medina@fisica.unam.mx

Introducción

El ^{131}I es un radionucleido con una alta radiotoxicidad, que se utiliza en medicina nuclear fundamentalmente para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades tiroideas (cáncer diferenciado de tiroides e hipertiroidismo). El ^{131}I es un emisor beta-gamma con un período de semidesintegración de 8,02 días cuyas emisiones de mayor importancia se presentan en la tabla 1. Las actividades utilizadas en la práctica clínica pueden variar en función de la opinión y experiencia del médico tratante, pero de manera general, éstas pueden ser 3,7-111 MBq (0,1-3 mCi) para la evaluación de la función tiroidea, 148-925 MBq (4-25 mCi) para tratamiento de hipertiroidismo, y 1110-7400 MBq (30-200 mCi) para el cáncer diferenciado de tiroides (CDT). En México, aquellos pacientes a quienes se ha suministrado más de 1110 MBq de cualquier radionucleido, y particularmente de ^{131}I , o que generen una tasa de exposición a 1 m de distancia mayor que 5 mR/h, deben ser hospitalizados¹. El personal encargado de la atención de estos pacientes, incluidos médicos, físicos, técnicos, enfermeros y personal de limpieza, corre el riesgo de presentar incorporaciones de este radionucleido vía inhalación e ingestión, debido al manejo del radionucleido antes de su administración y a la manipulación de objetos y desechos que han entrado en contacto con la orina y saliva de los pacientes.

Tabla 1. Principales emisiones radiactivas del ^{131}I .

Radiación	Desintegración (%)	Energía (keV)
Beta 1	2,1	69,4 (prom)
Beta 3	7,27	96,6 (prom)
Beta 4	89,9	191,6 (prom)
Gamma 7	6,1	284,3
Gamma 14	81,2	364,5
Gamma 17	7,3	637,0

<http://atom.kaeri.re.kr>

En torno a la protección radiológica del personal ocupacionalmente expuesto a la radiación ionizante (POE), la estimación de la dosis externa ocupacional originada en el manejo de fuentes radiactivas está bien establecida y se basa en mediciones realizadas rutinariamente con dosímetros personales, principalmente dosímetros termolumiscentes. Sin embargo, esto no es así en el caso de las estimaciones de la dosis interna ocupacional originada en la potencial incorporación de material radiactivo debido al manejo de fuentes radiactivas no encapsuladas, como es el caso del ^{131}I . La principal limitación para la estimación de la dosis interna es la dificultad técnica para determinar y calcular, de manera práctica y rutinaria, la incorporación del ^{131}I .

Las recomendaciones nacionales e internacionales para la estimación de la dosis interna ocupacional,

originada por la incorporación de material radiactivo al cuerpo humano, se basan en la estimación de la actividad de material radiactivo que fue ingerida o inhalada. Tal estimación puede realizarse por métodos directos (e.g. mediciones externas en cuerpo entero, órganos o regiones específicas) y por métodos indirectos (e.g. medición de muestras de orina o heces). En general, ambos métodos pueden hacer uso de sistemas de detección basados en cristales de centelleo, como el NaI(Tl), o materiales semiconductores como el germanio hiperpuro (HpGe). Estos materiales presentan diferentes ventajas, uno con respecto a otro, en términos de su sensibilidad, resolución energética, condiciones de funcionamiento y costos. A partir de la estimación de la actividad retenida o la actividad excretada y el uso de los modelos biocinéticos propuestos por La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)²⁻⁷ es posible estimar la actividad incorporada y la dosis efectiva comprometida $E(50)$, que es la dosis total a cuerpo entero esperada a ser depositada durante 50 años, originada por una incorporación.

Desafortunadamente, el elevado costo de un sistema de conteo de cuerpo entero de HpGe, que sería el sistema *ad hoc* para estimar de manera periódica la actividad incorporada en el POE, limita la realización del cálculo de la dosis interna ocupacional en un departamento de medicina nuclear. Tal situación hace que sea necesario diseñar métodos alternativos para ejercer la vigilancia de las exposiciones internas ocupacionales que permitan el acatamiento de las regulaciones establecidas de manera oficial y que den cumplimiento al principio de limitación de dosis para protección del POE. El objetivo de este trabajo es proponer y probar un mecanismo viable para la vigilancia de incorporaciones ocupacionales de ^{131}I y la evaluación de la dosis efectiva comprometida resultante en el POE de un departamento de medicina nuclear. Con este fin se retoma la idea del aprovechamiento de una cámara gamma para realizar la vigilancia de exposición interna ocupacional, mediante la adquisición de imágenes planas para la cuantificación de la actividad incorporada. En este trabajo se propone un método para la determinación de la sensibilidad para realizar mediciones de la actividad mínima detectable en tiroides y en muestras de orina. Finalmente se propone un esquema de interpretación de las mediciones para estimar la dosis efectiva comprometida asociada, sobre la base de la metodología propuesta por la ICRP.

Material y métodos

Se utilizó una cámara gamma (CG) de doble detector (e.cam, Siemens) ubicada en el Departamento de Medicina Nuclear del Instituto Nacional de Cancerología (INCan, México). Las principales características de este equipo incluyen⁸: un campo de visión de 53,3x38,7 cm²,

resolución espacial intrínseca FWHM $\leq 3,9\text{mm}$, resolución en energía $\leq 9,9\%$, sensibilidad del sistema (con colimador para energía baja y alta resolución) utilizando $^{99\text{m}}\text{Tc}$ de 91 cps/MBq (202 cpm/ μCi), y con colimador para energía media utilizando ^{111}In de 194 cps/MBq (430 cpm/ μCi). Esta cámara gamma es evaluada periódicamente mediante las pruebas de aseguramiento de calidad establecidas por el fabricante, las cuales son realizadas por el físico médico del departamento de medicina nuclear.

Para determinar la actividad mínima detectable por el sistema se utilizó un maniquí antropomórfico REMCAL (Radiation Equivalent Manikin Calibration, Phantom Laboratory, EEUU)⁹, fig. 1. Este maniquí está formado por un molde antropomórfico articulado de cuerpo entero, fabricado con acetato butirato de celulosa con un grosor de 2 a 3 mm, que puede llenarse con agua. Contiene diversos maniqués de órganos (tiroides, pulmones, corazón, riñones, bazo, páncreas, estómago, vejiga e intestino delgado inferior) fabricados del mismo material. Estos componentes también pueden llenarse con agua de forma individual y se les puede incorporar una cantidad conocida de material radiactivo. El maniquí tiene una altura de 175 cm y una masa de 73,5 kg al ser llenado completamente con agua.



Fig. 1. Maniquí antropomórfico REMCAL sobre la camilla de la cámara gamma Siemens, modelo e.cam® del Departamento de Medicina Nuclear del INCa.

Con la cámara gamma se adquirieron imágenes planas del maniquí antropomórfico utilizando una ventana de energía ($\pm 15\%$) centrada en el pico principal de emisión del ^{131}I (364 keV). Las imágenes se adquirieron con un factor de amplificación de 1,0 y se almacenaron en un tamaño de matriz de 256x256 píxeles y una profundidad de 16 bits. Las imágenes fueron analizadas con el código Osiris, versión 4.0*. Mediante este programa se definió en cada imagen una región de interés

(ROI) sobre el órgano o estructura de estudio, en la cual se determinó el número de eventos registrados en cuentas. Posteriormente, este número de cuentas fue dividido por el tiempo de adquisición de la imagen para obtener la tasa de conteo, la cual es proporcional a la concentración de actividad presente en el volumen proyectado en la ROI de la imagen. En todos los casos se reporta la tasa de conteo neta (R_n) de la fuente radiactiva, que es la tasa de conteo total (R_t) menos la tasa de conteo de la radiación de fondo (R_f) (i.e. sin fuente radiactiva) ambas determinadas en una misma ROI:

$$R_n = R_t - R_f \quad (1)$$

La incertidumbre asignada a R_n se calculó mediante la siguiente ecuación¹¹:

$$\sigma_{R_n} = \sqrt{\frac{R_t}{t_t} + \frac{R_f}{t_f}} \quad (2)$$

donde t_t y t_f son los tiempos de adquisición de las imágenes de la fuente radiactiva y de la radiación de fondo.

Para realizar la interpretación de mediciones y las estimaciones de dosimetría interna se utilizó el programa de cómputo AIDE (Activity and Internal Dose Estimates)^{11,12} que permite realizar cálculos de dosimetría interna e interpretación de mediciones *in vivo* e *in vitro*, basados en los modelos biocinéticos y la metodología propuestos por la ICRP. Con este programa se pueden realizar cálculos de actividades incorporadas, dosis absorbidas y dosis equivalentes en órganos y tejidos y dosis efectivas comprometidas debidas a la incorporación de material radiactivo en el cuerpo humano por inhalación, ingestión, inyección y a través de heridas.

El uso de colimadores presenta un compromiso entre la resolución espacial y la eficiencia de detección o sensibilidad de la CG. Solamente es posible mejorar uno de estos parámetros a cambio del detrimento del otro. Para utilizar la cámara gamma como un instrumento de detección y medición de la contaminación interna, es deseable que ésta posea una buena sensibilidad para poder detectar bajos niveles de actividad. Adicionalmente, es deseable que el equipo permita obtener una resolución espacial suficiente para poder identificar y delimitar las regiones contaminadas. Es evidente que la máxima sensibilidad del sistema se logra en la ausencia de colimadores, sin embargo, de esta manera es imposible la formación de imágenes. Por lo anterior, es inmediato inferir que es ventajoso el uso de la CG sin colimadores con el propósito de determinar la existencia de una incorporación, pero si se desea determinar la localización y magnitud de la contaminación es necesario el uso de colimadores, a cambio de reducir la sensibilidad del sistema. Por

* Département d'imagerie et des sciences de l'information médicale, Hôpitaux Universitaires de Genève. Osiris, User Manual. <http://www.sim.hcuge.ch/osiris/>

lo tanto, el objetivo se centra en estimar la capacidad de detección de la cámara gamma, e investigar cuál es el colimador que proporciona una relación sensibilidad-resolución equilibrada, que permita utilizar la cámara gamma como un instrumento para detectar, localizar y cuantificar una incorporación ocupacional de ^{131}I . Con el fin de determinar la sensibilidad para ^{131}I , la porción superior del maniquí antropométrico se llenó totalmente con agua, incluyendo el compartimiento que simula la glándula tiroides (volumen de 25 ml). Este compartimiento se llenó uniformemente con agua y una actividad de $3,0 \pm 0,2 \mu\text{Ci}$ de ^{131}I . Se adquirieron imágenes estáticas de esta porción del maniquí, colocando el volumen de la tiroides al centro de los detectores. La distancia del maniquí a los detectores fue de 10 cm, fig. 2. Se adquirieron imágenes sin colimadores y con el colimador para energía baja y sensibilidad alta (EBSA), con un tiempo de adquisición de 5 minutos. Posteriormente, se agregó en el volumen que representa la tiroides una actividad de $8,0 \pm 0,2 \mu\text{Ci}$ y se adquirieron imágenes utilizando los colimadores para energía media (EM) y energía alta (EA) y un tiempo de adquisición de 10 minutos. Previamente a la incorporación de material radiactivo al maniquí, se obtuvieron imágenes de fondo para cada colimador.

Para la estimación de incorporaciones y de dosis efectiva comprometida se propone un método complementario mediante la medición de actividad de ^{131}I en muestras de orina (100 ml) del POE contenidas en botellas de cultivo celular con capacidad de 250 ml y un área de 75 cm^2 (BDFalcon "Flasks"). Puesto que se desea obtener la máxima sensibilidad y no se requiere la delimitación de una ROI, se propone que las mediciones se realicen sin el uso de colimadores. Para determinar la sensibilidad con la geometría de las muestras de orina se prepararon diferentes botellas de cultivo con un contenido de 100 ml de agua y con actividades desde 1,0 hasta $10,0 \pm 0,2 \mu\text{Ci}$. Las botellas se introdujeron en bolsas de plástico con la finalidad de

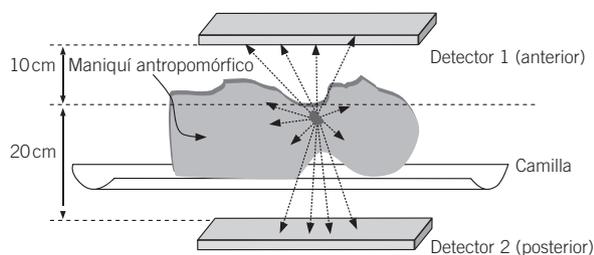


Fig. 2. Arreglo experimental para la determinación de la sensibilidad de la cámara gamma para mediciones *in vivo* de ^{131}I en tiroides, utilizando el maniquí antropométrico.

evitar cualquier posibilidad de derrame. Cada botella se colocó de forma horizontal y al centro de la camilla de la CG. Los detectores se colocaron a una distancia de 10 cm de la muestra, fig. 3. El tiempo de adquisición de las imágenes fue de 5 minutos.

La actividad mínima detectable (AMD) para un radionucleido, un sistema y un método de medición específicos, se define como la actividad que incrementa el número de cuentas registradas por una cantidad que es estadísticamente significativa, respecto de las variaciones aleatorias normales correspondientes a la radiación de fondo, que pueden ser registradas durante un mismo periodo de medición¹³. En otras palabras, AMD establece la mínima actividad que debe existir en una muestra o en el organismo que hace que el número de cuentas que registra la CG sea significativamente diferente del número de cuentas debido a la radiación de fondo. La siguiente ecuación se empleó para determinar AMD para la cámara gamma utilizando las diferentes condiciones de colimación descritas en la sección anterior:

$$AMD(Bq) = 3,7 \times 10^4 \cdot \frac{4,65 \sqrt{B \cdot t} + 3,0}{f \cdot t} \quad (3)$$

donde B es la tasa de conteo de la radiación de fondo, medida en cuentas por minuto, f es la sensibilidad (cpm/ μCi) de la cámara gamma, y t es el tiempo de adquisición de las imágenes medido en minutos. En la derivación original de esta ecuación¹³, el valor constante 3,0 era originalmente 2,71, pero posteriormente se demostró¹⁴, quedando aceptado de manera general, que el valor 3,0 era más apropiado para el cálculo de AMD.

A partir de AMD es posible determinar la incorporación mínima detectable (IMD) y la dosis efectiva comprometida mínima detectable ($E_{50}MD$), para diferentes tiempos propuestos entre la incorporación y la medición. IMD y $E_{50}MD$ se calculan mediante la aplicación de las fracciones de retención y de los coeficientes de dosis de acuerdo con los modelos

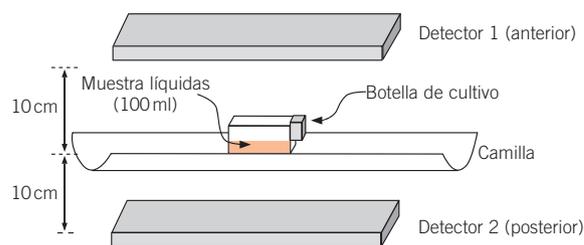


Fig. 3. Arreglo experimental para la determinación de la sensibilidad de la cámara gamma para el análisis de muestras de orina.

biocinéticos propuestos por la ICRP, utilizando las siguientes ecuaciones¹⁵:

$$IMD = \frac{AMD}{m_j(t)} \quad (4)$$

$$E_{50}MD = IMD \cdot e(g)_j \quad (5)$$

donde $m_j(t)$ es la fracción de retención para el radionucleido j para un tiempo t transcurrido entre la incorporación y la medición, y $e(g)_j$ es el coeficiente de dosis por inhalación o ingestión para el radionucleido j . Los valores de $m_j(t)$ y $e(g)_j$ se obtuvieron del programa de cómputo AIDE, y para las incorporaciones por inhalación se eligió un DAMA (diámetro aerodinámico de la mediana de la actividad) de $5\mu\text{m}$, como lo sugiere la ICRP² para exposiciones ocupacionales; también se supuso un tipo de absorción F (rápida) recomendado para todos los compuestos de yodo. Para las incorporaciones por ingestión se eligió una fracción de absorción $f_1=1$, recomendada por la ICRP² para los compuestos de yodo. El criterio que se propone para determinar si un método de medición es apropiado y que permite definir su frecuencia de ejecución apropiada, está basado en la dosis efectiva mínima comprometida que el método es capaz de estimar. En particular, un método y su frecuencia serán apropiados si permiten la estimación de una dosis comprometida menor o igual al 5% del límite anual de dosis (que consideraremos como 20 mSv). Esto es, el método de detección y la frecuencia de vigilancia deberán ser útiles para estimar una dosis efectiva comprometida debida a una incorporación por ingestión o inhalación menor que o igual a 1 mSv.

La población de estudio estuvo formada por 5 voluntarios del departamento de medicina nuclear que participan en la atención de los pacientes a quienes se suministra ^{131}I . A estas personas se les realizó mensualmente, y durante un periodo de 6 meses, una gammagrafía de la región cervical con la finalidad de investigar la incorporación de ^{131}I en tiroides. Se utilizó la CG sin colimadores y las imágenes fueron adquiridas con los parámetros utilizados en la determinación de la sensibilidad correspondiente. La distancia del detector a la superficie del cuello de los voluntarios fue de 10 cm. En cada gammagrafía adquirida se determinó la tasa de conteo neta registrada en una ROI igual al campo de visión útil de las imágenes. En todos los casos se obtuvo una imagen para determinar la tasa de conteo de la radiación de fondo. La periodicidad de los análisis se basó en la actividad mínima detectable del sistema.

El método de medición descrito en este trabajo permite determinar la actividad retenida (A_m) por el POE. El primer paso en la interpretación de estos datos es hacer una reconstrucción de la actividad del radionucleido que la persona ingirió o inhaló (A_0), la cual es diferente de A_m .

Los modelos biocinéticos de la ICRP describen la actividad retenida a cuerpo entero y en órganos específicos, como función del tiempo transcurrido desde la incorporación, lo que hace posible estimar A_0 a partir de A_m . Posteriormente es posible realizar una estimación de la dosis efectiva comprometida $E(50)$, calculada mediante el producto de A_0 y el coeficiente de dosis apropiado $e(g)_j$. La actividad incorporada $A_{0,j}$ para un radionucleido j , ingerido o inhalado, está determinada por la siguiente ecuación:

$$A_{0,j} = \frac{A_{m,j}}{m_j(t)} \quad (6)$$

donde $m_j(t)$ es la fracción de incorporación retenida al tiempo t transcurrido desde la incorporación. Los valores de $m(t)$ para diferentes tiempos después de la incorporación están disponibles para diversos radionucleidos en cuerpo entero y órganos individuales, para incorporaciones por inhalación e ingestión¹².

Para elegir el valor apropiado de $m(t)$ es necesario conocer la ruta y el momento de la incorporación. Una de las principales fuentes de incertidumbre en la interpretación de las mediciones es la estimación de estos parámetros. En el caso de una vigilancia rutinaria, es muy probable que el momento de incorporación sea desconocido. La aproximación más sencilla en este caso es suponer que ocurrió una incorporación aguda a la mitad del periodo de vigilancia.

Una vez que se ha estimado $A_{0,j}$, es posible estimar la dosis efectiva comprometida $E(50)$ por medio de la siguiente ecuación:

(7)

$$E(50) = \sum e(g)_{j,inh} \cdot A_{0,j,inh} + \sum e(g)_{j,ing} \cdot A_{0,j,ing}$$

mediante el uso de los coeficientes de dosis apropiados $e(g)_{j,inh}$ y $e(g)_{j,ing}$ expresados en unidades de Sv/Bq. La fig. 4 presenta un esquema que resume los pasos descritos para la interpretación de las mediciones directas e indirectas.

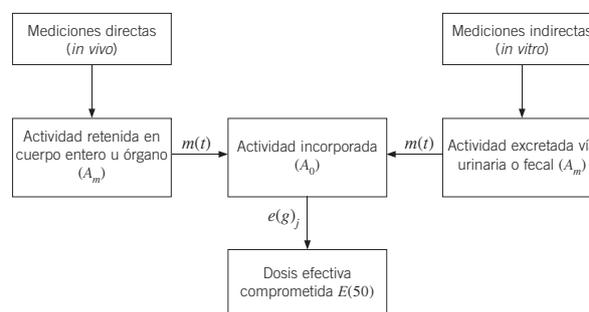


Fig. 4. Procedimiento general para la interpretación de mediciones directas e indirectas de incorporaciones ocupacionales de ^{131}I .

Tabla 2. Sensibilidad de la cámara gamma para mediciones *in vivo* de tiroides.

Colimador	Actividad (μCi)	Tasa de conteo de fondo (cpm)	Tasa de conteo neta (cpm)	Sensibilidad (cpm/ μCi)
		Imagen anterior	Imagen anterior	Imagen anterior
SC	3,0 \pm 0,2	53 \pm 7	9940 \pm 45	3313 \pm 221
EBSA	3,0 \pm 0,2	27 \pm 7	1114 \pm 15	371 \pm 25
EM	11,0 \pm 0,2	21 \pm 5	1917 \pm 14	176 \pm 3
EA	11,0 \pm 0,2	17 \pm 4	618 \pm 8	57 \pm 1

Resultados y discusión

Sensibilidad, IMD y $E_{50}MD$ para mediciones de ^{131}I

En la fig. 5 se muestran las imágenes de la tiroides del maniquí antropomórfico, con diferentes condiciones de colimación, que fueron utilizadas para determinar la sensibilidad de la cámara gamma. La ROI se dibujó siguiendo el contorno de las imágenes de la tiroides obtenidas con los colimadores de energía alta, fig. 5d. En la tabla 2 se muestran las actividades utilizadas, las tasas de conteo de fondo y de las muestras, así como las sensibilidades (cpm/ μCi) correspondientes. A partir de la tasa de conteo de fondo y la sensibilidad, se determinó AMD para cada condición de colimación y para un tiempo de adquisición de 5 minutos. Estos valores se muestran en la tabla 3. En las tablas 4 y 5 se muestran los valores de IMD y $E_{50}MD$ para inhalación e ingestión, sin el colimador y con el colimador de alta energía. Las fracciones de retención y los coeficientes de dosis se calcularon con el programa de cómputo AIDE. La fig. 6 y la fig. 7 muestran las gráficas de $E_{50}MD$ en función del tiempo posterior a la incorporación por inhalación e ingestión, respectivamente, para las diferentes condiciones de colimación. En ambas gráficas la línea horizontal discontinua indica el valor de 1 mSv y la línea horizontal continua el límite anual de 20 mSv. Ambas gráficas muestran que la sensibilidad de la CG sin colimador permite establecer un programa de vigilancia con una frecuencia de 30 días, mientras que con el uso de los colimadores de EBSA y EM, el periodo de vigilancia tendría que reducirse a 15 días. Finalmente, es posible observar que el uso del colimador de EA reduciría el periodo de vigilancia a 7 días. Todo lo anterior, para poder reconstruir incorporaciones de ^{131}I que deriven en dosis efectivas comprometidas menores que 1,0 mSv.

Al respecto, se considera conveniente el uso de la cámara gamma sin colimadores para establecer una vigilancia rutinaria mensual, en la cual, si el tiempo exacto de incorporación es desconocido, se suponga

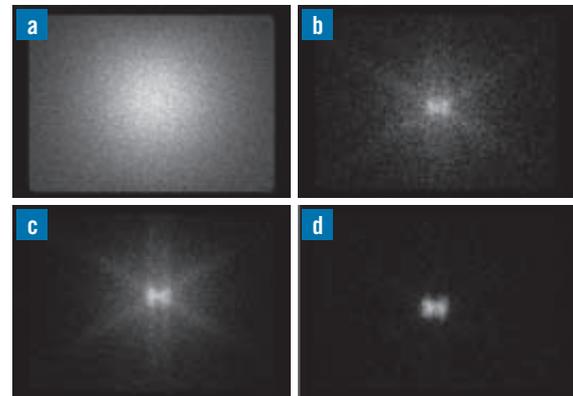


Fig. 5. Imagen anterior de la tiroides del maniquí antropomórfico inyectada con 3,0 \pm 0,2 μCi de ^{131}I , adquiridas utilizando la cámara gamma: a) sin colimadores; b) con los colimadores para energía baja-sensibilidad alta; c) con los colimadores para energía media; d) con los colimadores para energía alta.

Tabla 3. AMD para mediciones de ^{131}I en tiroides, (5 minutos) con diferentes colimadores. Entre paréntesis se indican los valores de AMD en nCi.

Colimador	AMD (Bq)	
	Imagen anterior	Imagen posterior
SC	175 (4,7)	499 (13,5)
EBSA	1136 (30,7)	2626 (71,0)
EM	2139 (57,8)	4945 (133,6)
EA	5948 (160,8)	11298 (305,3)

que ocurrió a la mitad del periodo de vigilancia, esto es, hace 15 días. De esta manera, sería posible estimar incorporaciones ocurridas hace un mes, que resulten en una dosis efectiva comprometida tan bajas como 0,22 mSv. Sin embargo, debido a que no es posible delimitar el área de la tiroides en una imagen adquirida sin colimadores, se propone que adicionalmente se utilice el colimador de energía baja-sensibilidad alta con el

Tabla 4. IMD y E_{50} MD para inhalación e ingestión para mediciones de ¹³¹I en tiroides, utilizando la cámara gamma sin colimadores.

t (días)	Inhalación ¹³¹ I, DAMA 5 μm, tipo F				Ingestión ¹³¹ I, f=1,0			
	m(t)	IMD (kBq)	IMD (nCi)	E_{50} MD (mSv)	m(t)	IMD (kBq)	IMD (nCi)	E_{50} MD (mSv)
1	1,23x10 ⁻¹	1,43	38,5	0,02	2,54x10 ⁻¹	0,69	18,7	0,02
2	1,19x10 ⁻¹	1,47	39,8	0,02	2,48x10 ⁻¹	0,71	19,1	0,02
3	1,09x10 ⁻¹	1,61	43,5	0,02	2,27x10 ⁻¹	0,77	20,9	0,02
5	9,02x10 ⁻²	1,94	52,6	0,02	1,88x10 ⁻¹	0,93	25,2	0,02
7	7,47x10 ⁻²	2,35	63,5	0,03	1,55x10 ⁻¹	1,13	30,6	0,02
15	3,52x10 ⁻²	4,98	134,7	0,05	7,33x10 ⁻¹	2,39	64,7	0,05
30	8,69x10 ⁻³	20,2	545,5	0,22	1,81x10 ⁻²	9,69	261,9	0,21
45	2,16x10 ⁻³	81,2	2194,7	0,89	4,49x10 ⁻³	39,1	1055,8	0,86
60	5,37x10 ⁻⁴	327,0	8827,8	3,59	1,12x10 ⁻³	1570	4232,6	3,44

Coefficientes de dosis e(g) en mSv/Bq para ¹³¹I: inhalación e(g)=1,1x10⁻⁵; ingestión e(g)=2,2x10⁻⁵

Tabla 5. IMD y E_{50} MD para inhalación e ingestión para mediciones de ¹³¹I en tiroides, utilizando la cámara gamma con el colimador de alta energía.

t (días)	Inhalación ¹³¹ I, DAMA 5 μm, tipo F				Ingestión ¹³¹ I, f=1,0			
	m(t)	IMD (kBq)	IMD (nCi)	E_{50} MD (mSv)	m(t)	IMD (kBq)	IMD (nCi)	E_{50} MD (mSv)
1	1,23x10 ⁻¹	48,4	1307,2	0,53	2,54x10 ⁻¹	23,4	633,0	0,51
2	1,19x10 ⁻¹	50,0	1351,1	0,55	2,48x10 ⁻¹	24,0	648,3	0,52
3	1,09x10 ⁻¹	54,6	1475,1	0,6	2,27x10 ⁻¹	26,2	708,3	0,58
5	9,02x10 ⁻²	66,0	1782,5	0,72	1,88x10 ⁻¹	31,6	855,2	0,69
7	7,47x10 ⁻²	79,6	2152,4	0,88	1,55x10 ⁻¹	38,4	1037,3	0,84
15	3,52x10 ⁻²	169,0	4567,7	1,86	7,33x10 ⁻¹	81,2	2193,5	1,79
30	8,69x10 ⁻³	685,0	1,8x10 ⁴	7,53	1,81x10 ⁻²	329,0	8883,1	7,23
60	5,37x10 ⁻⁴	1110	2,9x10 ⁵	121,9	1,12x10 ⁻³	5310	1,43x10 ⁵	116,8

Coefficientes de dosis e(g) en mSv/Bq para ¹³¹I: inhalación e(g)=1,1x10⁻⁵; ingestión e(g)=2,2x10⁻⁵

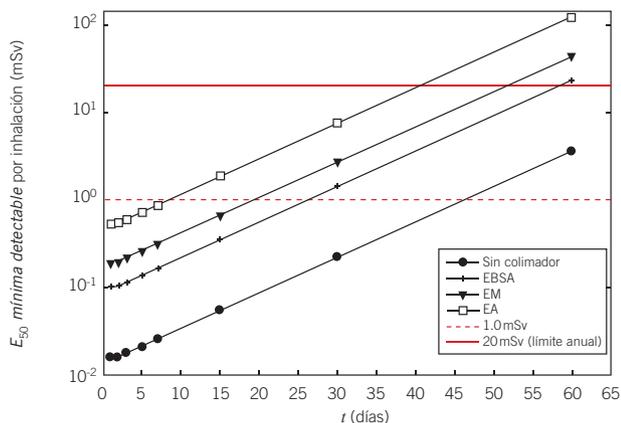


Fig. 6. Dosis efectiva comprometida mínima detectable para una incorporación de ¹³¹I por inhalación, para diferentes tiempos supuestos entre la ocurrencia de la incorporación y la medición con la cámara gamma.

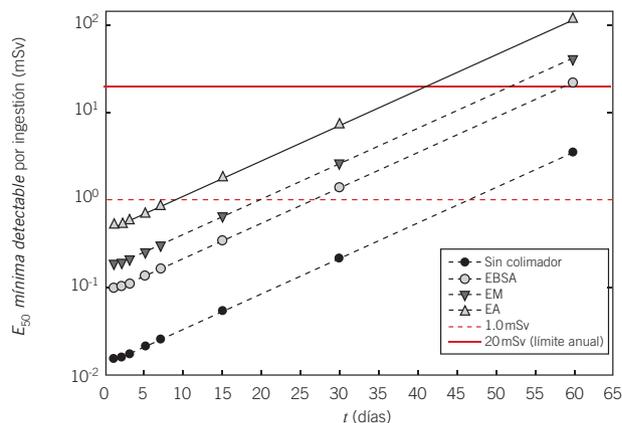


Fig. 7. Dosis efectiva comprometida mínima detectable para una incorporación de ¹³¹I por ingestión, para diferentes tiempos supuestos entre la ocurrencia de la incorporación y la medición con la cámara gamma.

propósito de trazar una región de interés alrededor de la imagen de la tiroides y poder determinar el número de cuentas en esta región pero en la imagen obtenida sin colimadores. Si bien este colimador no está diseñado para la formación de imágenes a partir de ^{131}I , según se observa en la fig. 5b, es posible delimitar el contorno de la tiroides.

En el caso de una medición en tiroides donde la tasa de conteo sea muy pequeña, aún cuando se utilice la CG sin colimadores, no será posible adquirir una imagen con los colimadores de energía baja-sensibilidad alta ya que de acuerdo a los valores mostrados en la tabla 2, la sensibilidad se reduce aproximadamente en un factor de 10. En este caso, se puede optar por adquirir solamente la imagen sin colimadores y utilizar una ROI que cubra todo el campo de visión útil de la imagen. La sensibilidad obtenida a partir de la imagen anterior mostrada en la fig. 5a utilizando la ROI mencionada es de $2,82 \pm 0,19 \text{ cpm/Bq}$ ($104\,525 \pm 6969 \text{ cpm}/\mu\text{Ci}$) y permite obtener una *AMD* de 46 Bq ($1,2 \text{ nCi}$).

Sensibilidad de la cámara gamma para el análisis de muestras de orina con presencia de ^{131}I

En la tabla 6 se muestran las actividades de ^{131}I utilizadas para determinar la sensibilidad de la cámara gamma para analizar muestras de orina. Para cada imagen se determinó el número de cuentas en todo el campo de visión, definiendo una ROI con un área de 256×256 píxeles. La tasa de conteo neta total (RC_T) del sistema se definió como la suma de las tasas de conteo netas (i.e. las tasas de conteo de las muestras menos las tasas de conteo de la radiación de fondo) obtenidas de las imágenes anterior y posterior, RC_A y RC_P , respectivamente:

$$RC_T = RC_A + RC_P \quad (8)$$

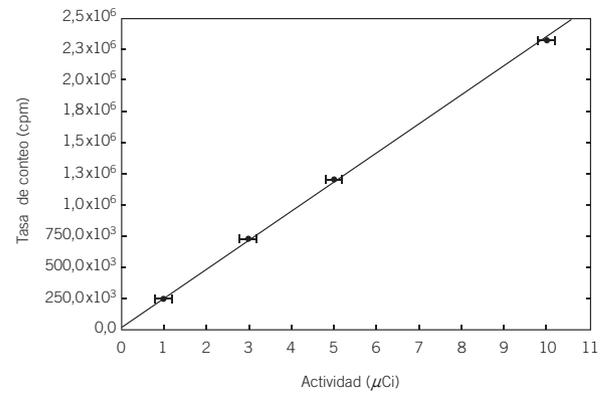


Fig. 8. Gráfica de RC_T (cpm) vs. *Actividad* (μCi) para determinar la sensibilidad de la cámara gamma para el análisis de muestras de orina con presencia de ^{131}I . La pendiente de la gráfica indica la sensibilidad ($229\,595 \text{ cpm}/\mu\text{Ci}$).

Para determinar la sensibilidad, se representó gráficamente RC_T (cpm) frente a *Actividad* (μCi), fig. 8. Utilizando el método de mínimos cuadrados, se ajustó una recta a cada conjunto de datos experimental cuya pendiente es el factor de sensibilidad buscado. De esta manera, se obtuvo un factor de sensibilidad de $229\,595 \pm 7714 \text{ cpm}/\mu\text{Ci}$ ($6,2 \pm 0,2 \text{ cpm/Bq}$). La actividad mínima detectable para las muestras líquidas de 100 ml, considerando un tiempo de adquisición de 10 minutos es de 17,0 Bq para el ^{131}I . Esto es, en una muestra de orina de 100 ml deberán existir estas actividades para que el sistema sea capaz de registrar una tasa de conteo significativa por encima de las variaciones estadísticas de la tasa de conteo de fondo.

Para realizar la reconstrucción de una incorporación y el cálculo de la dosis efectiva comprometida asociada mediante el análisis de muestras de orina es necesario aplicar las fracciones de excreción y los coeficientes de dosis apropiados. Estos valores se han determinado para volúmenes de orina de 1200

Tabla 6. Actividades y tasas de conteo para la determinación de la sensibilidad de la cámara gamma para el análisis de muestras de orina.

Actividad (μCi)	RC_A (cpm)	RC_P (cpm)	RC_T (cpm)
Fondo	2432 ± 49	2635 ± 51	5068 ± 71
1,0 ± 0,2	104943 ± 331	143138 ± 385	248081 ± 498
3,0 ± 0,2	306741 ± 558	419891 ± 625	726632 ± 852
5,0 ± 0,2	508027 ± 715	694848 ± 837	1202874 ± 1097
10,0 ± 0,2	981664 ± 996	1337495 ± 1.159	2319158 ± 1523

Tabla 7. IMD y $E_{50}MD$ para ^{131}I para el análisis de muestras de orina.

t (días)	Inhalación ^{131}I , DAMA 5 μm , tipo F				Ingestión ^{131}I , $f=1,0$			
	$m(t)$	IMD (kBq)	IMD (μCi)	$E_{50}MD$ (mSv)	$m(t)$	IMD (kBq)	IMD (μCi)	$E_{50}MD$ (mSv)
1	$2,82 \times 10^{-1}$	0,96	0,03	0,01	$5,83 \times 10^{-1}$	0,46	0,01	0,01
2	$2,32 \times 10^{-2}$	11,7	0,32	0,1	$5,08 \times 10^{-2}$	5,35	0,14	0,1
3	$1,38 \times 10^{-3}$	196,4	5,33	2,2	$3,01 \times 10^{-3}$	90,4	2,44	2,0
4	$1,48 \times 10^{-4}$	1840	49,7	20,2	$3,13 \times 10^{-4}$	872	23,6	19,1
5	$9,12 \times 10^{-5}$	2971	80,6	32,8	$1,87 \times 10^{-4}$	1450	39,2	32,0

Coefficientes de dosis $e(g)$ en mSv/Bq para ^{131}I : inhalación $e(g)=1.1 \times 10^{-5}$; ingestión $e(g)=2.2 \times 10^{-5}$

y 1600 ml, para mujeres y hombres, respectivamente, que representan la excreción de orina diaria de referencia¹⁵. De esta manera, las actividades medidas en las muestras de orina de 100 ml deberán ser normalizadas al volumen estándar correspondiente. En este trabajo se tomará el valor de 1600 ml ya que así se obtienen los valores de AMD más altos, siendo éste de 272 Bq para ^{131}I . En la tabla 7 se muestran los valores de IMD y $E_{50}MD$ para el análisis de muestras de orina, considerando diferentes tiempos entre la incorporación y el análisis de las muestras. Es posible observar que el método es apropiado solamente si se aplica en las primeras 48 horas posteriores a una incorporación. Después de este periodo, las dosis efectivas comprometidas que el método puede detectar son superiores a 2,2 mSv, que representa un poco más del 10% del límite anual de dosis efectiva establecido. En la práctica, sería muy difícil establecer un programa de vigilancia rutinario, basado en muestras de orina, con una frecuencia de 48 horas para todo el personal. Se propone que este método sea aplicado solamente de forma especial, ante la presencia de niveles elevados de contaminación superficial de las áreas de trabajo, que es un indicador efectivo de la ocurrencia de contaminación interna del personal, o bien, ante la ocurrencia de un accidente que involucre el derrame y dispersión de material radiactivo. Adicionalmente, este método puede emplearse como un componente de una vigilancia confirmatoria, aplicándolo de manera aleatoria al personal.

Actividades incorporadas y dosis efectiva comprometida

Con las imágenes de los POE voluntarios se calculó la tasa de conteo, y utilizando la sensibilidad de la cámara gamma ($2,8 \pm 0,2 \text{ cpm/Bq}$) se estimó la actividad de ^{131}I presente en tiroides. Utilizando

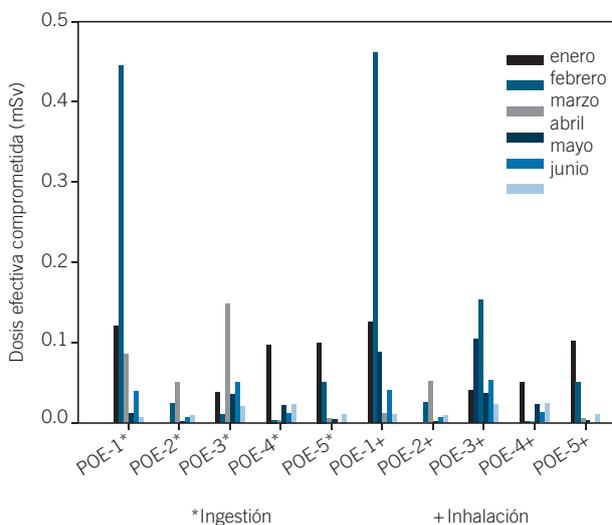


Fig. 9. Dosis efectiva comprometida, suponiendo que las incorporaciones ocurrieron por inhalación o ingestión. Se muestran los valores mensuales calculados para cada POE participante en el estudio referido al cálculo por ingestión (*) o inhalación (+).

el programa AIDE se calculó la dosis efectiva comprometida, suponiendo que las incorporaciones ocurrieron por inhalación o ingestión, fig. 9, y que cada incorporación ocurrió a la mitad del periodo de vigilancia, esto es, 15 días previos a la obtención de la gammagrafía mensual. En la figura se observa que para el POE-1, durante el mes de febrero, hay un incremento en la dosis, en comparación con los otros sujetos. Este incremento se asocia con un incidente acontecido en ese mes en el que un paciente, con cáncer tiroideo bajo tratamiento, vomitó poco tiempo después de ingerir la cápsula de ^{131}I (150 mCi). En este caso fue el POE-1 quien tuvo que realizar las labores de descontaminación y aún cuando utilizó

Tabla 8. Dosis efectiva total, E (mSv) en el personal ocupacionalmente expuesto a la radiación (POE) del Departamento de Medicina Nuclear del INCan durante el primer semestre de 2009.

POE	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	E (mSv)
1	0,13	0,46	0,24	0,28	0,04	0,01	1,16
2	0,001	0,27	0,31	0,42	0,27	0,12	1,39
3	0,04	0,10	0,34	0,42	0,26	0,14	1,31
4	0,55	0,27	0,90	0,82	0,61	0,37	3,54
5	0,10	0,05	0,31	0,17	0,09	0,48	1,21

ropa de protección (pijama y bata quirúrgica, mascarilla, doble par de guantes de látex y cubrezapatos) y siguió el procedimiento de seguridad radiológica aplicable, incorporó, posiblemente por inhalación, una pequeña cantidad del radionucleido. El valor de dosis registrado muestra la utilidad del método de cálculo empleado. En la tabla 8 se muestra la dosis efectiva total, $E = H_p(10) + E(50)$ recibida por los sujetos de estudio durante el primer semestre de 2009. Para el cálculo de E se consideró la dosis efectiva comprometida, $E(50)$ por inhalación.

La descripción cualitativa y cuantitativa de la distribución de un radionucleido dentro del cuerpo humano es de interés primordial en la aplicación de métodos diagnósticos y terapéuticos en medicina nuclear. Al respecto, existen diversas propuestas metodológicas para la cuantificación de la actividad de radiofármacos en órganos específicos con interés clínico¹⁶⁻¹⁹. Así mismo, ha existido el interés de aprovechar las cámaras gamma para desarrollar métodos alternativos para cuantificar actividades pequeñas incorporadas en accidentes en instalaciones nucleares o radiológicas, o bien, para la vigilancia radiológica ocupacional^{20,21}. El uso no clínico de una CG obedece a la búsqueda de alternativas viables para la estimación de exposiciones internas, dada la amplia disponibilidad de este tipo de equipos, en contraposición a los altos costos y disponibilidad limitada de equipos *ad hoc*, como el sistema de conteo de cuerpo entero de HpGe.

En el presente trabajo se utilizó una CG como sistema de detección, permitiendo detectar incorporaciones de ¹³¹I y calcular la dosis efectiva comprometida resultante, a partir de la cuantificación de actividades basadas en imágenes planas. Este trabajo mostró que la cámara gamma tiene la capacidad de detectar una actividad retenida en la glándula tiroidea, tan baja como 175 Bq (4,7 nCi), cuando no se usan colimadores, y de 5948 Bq (161 nCi), cuando se usan los colimadores de alta energía. Este método es aplicable para mediciones únicas

o bien, a partir de mediciones múltiples realizadas en diferentes momentos. Para realizar el análisis de mediciones múltiples es posible emplear el programa de cómputo AIDE, que utiliza diversos métodos estadísticos para estimar la actividad incorporada y la dosis efectiva comprometida. Al respecto, es necesario mencionar que el uso de mediciones múltiples es conveniente ya que permite realizar una mejor estimación del momento y la vía en la cual ocurrió la incorporación.

Según los resultados obtenidos, se propone la aplicación del método de vigilancia descrito en tres modalidades: periódica, especial y aleatoria. Con el uso de cámara gamma sin colimador es factible realizar una medición mensual a todo el personal que esté involucrado directamente con el manejo de ¹³¹I, como es el caso de médicos, físicos, enfermeras y personal de intendencia que participen en la atención del área de hospitalización de pacientes a quienes se ha suministrado el radionucleido con propósitos terapéuticos. En caso de que se detecte una incorporación y que el momento en que ocurrió ésta sea desconocido, se puede suponer que la incorporación ocurrió a la mitad del periodo de vigilancia. Así mismo, si se detecta una incorporación, es posible realizar mediciones posteriores de seguimiento para acotar el momento de la incorporación y obtener una mejor estimación de la dosis efectiva comprometida resultante. Si la actividad detectada por la cámara gamma es suficiente para realizar una cuantificación, entonces pueden emplearse colimadores para delimitar la ROI.

Adicionalmente a la vigilancia rutinaria, este método es útil para realizar una vigilancia especial al personal que esté bajo sospecha fundamentada de haber sufrido una incorporación, por ejemplo, debido al derrame de material radiactivo o la ejecución de una intervención especial.

Finalmente, se propone la aplicación de una vigilancia aleatoria al personal que no está directamente involucrado con el manejo de ¹³¹I, y que, sin embargo,

no se encuentra exento de una incorporación, por un accidente o un acto malintencionado.

Se recomienda que la aplicación del método propuesto sea complementada con un programa de vigilancia periódica de contaminación superficial removible en las áreas de trabajo. En este caso se puede aplicar la técnica de frotis y utilizar un detector de centelleo tipo pozo. La contaminación removible de las áreas de trabajo representa un indicador sensible de la necesidad de mejorar las prácticas de seguridad radiológica y del manejo del material radiactivo. Así mismo, es un indicador de la necesidad de una vigilancia *in vivo* de incorporaciones de ^{131}I por parte del personal.

Se espera que la metodología propuesta en este trabajo contribuya a promover la cultura de la seguridad radiológica en los departamentos de medicina nuclear y facilite la intervención para la corrección oportuna de posibles prácticas deficientes en el manejo de fuentes abiertas de radiación, con el fin de minimizar las incorporaciones de material radiactivo en el personal evitando daños a su salud. La principal aplicación de este método es verificar y documentar que los trabajadores de un servicio de medicina nuclear se encuentran protegidos apropiadamente contra los riesgos de incorporación de material radiactivo asociados con las prácticas cotidianas y los asociados con la ocurrencia de incidentes, así como, identificar una cota de las dosis efectivas comprometidas existentes con el fin de verificar el cumplimiento de los límites de dosis establecidos. Igualmente, se espera que contribuya al desarrollo de prácticas de dosimetría interna y sirva como modelo para la implementación de programas similares en otras instalaciones de medicina nuclear.

Conclusiones

Este trabajo muestra la utilidad de una cámara gamma para detectar incorporaciones ocupacionales de ^{131}I y estimar la dosis efectiva comprometida resultante, mediante la adquisición y cuantificación de imágenes planas. Al mismo tiempo, se comprueba la pertinencia y viabilidad de la implementación de un programa de vigilancia de exposiciones internas ocupacionales en un departamento de medicina nuclear, utilizando una cámara gamma *in situ*.

Agradecimientos

Al personal técnico del Departamento de Medicina Nuclear del Instituto Nacional de Cancerología de México, por su entusiasta y activa participación durante la realización del estudio.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México, por permitir el uso del maniquí REMCAL.

Bibliografía

1. Norma Oficial Mexicana NOM-013-NUCL-1995. Requerimientos de seguridad radiológica para egresar a pacientes a quienes se les ha administrado material radiactivo, Diario Oficial de la Federación, México;1995.
2. International Commission on Radiological Protection. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by workers. Replacement of ICRP Publication 61, ICRP Publication 68, Annals of the ICRP. 24(4). Oxford: Pergamon Press;1995.
3. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intakes of Radionuclides: Part 3. Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 69, Annals of the ICRP. 25(1). Oxford: Pergamon Press;1995.
4. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4, Inhalation Dose Coefficients. ICRP Publication 71. Annals of the ICRP. 25(3-4). Oxford: Pergamon Press;1995.
5. International Commission on Radiological Protection. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66, Annals of the ICRP. 24(1-3). Oxford: Pergamon Press;1994.
6. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2, Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67, Elsevier Science Ltd;1993.
7. International Commission on Radiological Protection. Publication No.56: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. ICRP, Part 1. Annals of the ICRP 20(2). Oxford: Pergamon Press;1988.
8. Siemens Medical Solutions USA, Inc. e.cam Signature Series;2004.
9. International Commission on Radiation Units and Measurements. Phantoms and Computational Models in Therapy, Diagnosis and Protection. ICRU Report No.48; Oxford: Pergamon Press;1992.
10. Cherry S, Sorenson J, Phelps M. Physics in Nuclear Medicine. 3 ed. Philadelphia (Pa): Saunders;2003.
11. Bertelli L, Melo DR, Lipsztein J, Cruz-Suarez R. AIDE: Internal Dosimetry Software. Radiat Prot Dosimetry 2008;130:358-67.
12. AIDE-Activity and Internal Dose Estimates. Reference Manual, version 6.0; 2007.
13. Curie LA. Limits for qualitative detection and quantitative determination. Anal Chem 1968;40:586-93.
14. Brodsky A. Exact Calculation of Probabilities of False Positives and False Negatives for Low Background Counting. Health Physics 1992;63:198-204.
15. International Commission on Radiological Protection. Publication No. 100: Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection, Annals of the ICRP Volume 36/1-2;2006.
16. Carbaugh EH. Minimum Detectable Dose as a Measure of Bioassay Programme Capability. Radiat Prot Dosimetry 2003;105:391-6.

17. Hammond ND, Moldofsky PJ, Beardsley MR, Mulhern CB. External imaging techniques for quantitation of distribution of I-131 F(ab')₂ fragments of monoclonal antibody in humans. *Med Phys* 1984;11:778-83.
18. Eary JF, Appelbaum FL, Durack L, Brown P. Preliminary validation of the opposing view method for quantitative gamma camera imaging. *Med Phys* 1989;16:382-7.
19. Fleming JS. A Technique for the Absolute Measurement of Activity using a Camera Gamma and Computer. *Phys Med Biol* 1979;24:176-180.
20. Lucena EA, Rebelo AM, Araújo F, Sousa WO, Dantas AL, Dantas et al. Evaluation of Internal Exposure of Nuclear Medicine Staff Through in vivo and in vitro Bioassay Techniques. *Radiat Prot Dosimetry* 2007; 127:465-8.
21. Nishiyama H, Lukes SJ, Saenger EL. Low-Level Internal Radionuclide Contamination: Use of Gamma Camera for Detection. *Radiology* 1984;150:235-40.