

# Riesgos asociados con las radiaciones ionizantes

ADRIANA CASCÓN<sup>1</sup>

Dirección para separatas:

e-mail:

adrianacascon@hotmail.com

## RESUMEN

El uso médico de las radiaciones ionizantes implica ciertos riesgos, aunque están ampliamente compensados por sus beneficios diagnósticos y terapéuticos. No obstante, el conocimiento de esos riesgos, así como su diagnóstico y prevención, minimiza sus inconvenientes y optimiza la calidad y la seguridad de su empleo. En este artículo se discuten aspectos vinculados con la relación dosis-respuesta en la piel (efectos determinísticos), la importancia del límite de la dosis, la fisiopatología del daño biológico y, por último, con las medidas de prevención.

REV ARGENT CARDIOL 2009;77:123-128.

**Palabras clave >** Radicales libres - Vigilancia - Fluoroscopia

## Abreviaturas >

<b>Cx</b>	Arteria circunfleja
<b>DA</b>	Arteria descendente anterior
<b>ESD</b>	<i>Entrance skin dose</i> (dosis de entrada en la piel)
<b>Gy</b>	Gray
<b>IAM</b>	Infarto agudo de miocardio

<b>PL</b>	Período de latencia
<b>RI</b>	Radiaciones ionizantes
<b>Sv</b>	Sievert
<b>TLD</b>	Dosímetros de termoluminiscencia

## CASO CLÍNICO

Un paciente de 48 años con factores de riesgo coronario (hipertensión, dislipidemia) y antecedente de IAM anterior un año atrás consultó por angina de reciente comienzo clase funcional III-IV. Se realizó una cinecoronariografía donde se constataron dos lesiones graves en las arterias descendente anterior (DA) y circunfleja (Cx), motivo por el cual fue derivado a un centro de alta complejidad para la realización de angioplastia en dos vasos. La primera arteria (DA) demandó más de 4 horas de trabajo en la sala por lo que la segunda angioplastia se postergó para el día siguiente. La revascularización de la arteria Cx se efectuó con *stent*; también fue muy difícil y, de nuevo, se prolongó por más de cuatro horas. En ambos procedimientos se obtuvo éxito primario. El paciente fue dado de alta a las 48 horas sin otras complicaciones.

Aproximadamente a los 15 días, su esposa refirió que le había observado en la espalda, sobre la región escapular, una lesión pequeña, como una moneda, circunscripta, eritematosa y asintomática, y a los 30 días comenzó con prurito, principalmente nocturno, descamación seca y eritema. El paciente consultó a un dermatólogo, que le indicó una crema con corticoides. Luego de una semana y ante la persistencia de la lesión, consultó a otro dermatólogo, que le prescribió otra crema tópica con antibióticos, a pesar de lo cual el prurito persistió.

Cinco meses después presentaba una lesión de unos 9 x 7 cm, de color ocre pálido, limpia, no descamativa y sin lesiones agregadas. El médico cardiólogo realizó el diagnóstico de lesión inducida por radiación ionizante. El sustrato habitual de estas lesiones es endotelitis proliferativa en pequeños vasos.

## EL PROBLEMA

Si bien es conocido el gran progreso que en cardiología han significado los procedimientos diagnósticos y terapéuticos que requieren fluoroscopia, es necesario tener presente que su uso implica ciertos riesgos, tanto para los pacientes como para los profesionales que realizan la práctica.

La primera comunicación en la era intervencionista de un caso de necrosis de piel por fluoroscopia prolongada data de 1990. Sin embargo, para 1994 la Food and Drug Administration (FDA) había recibido un número tal de casos que publicó un alerta en su sitio Web (<http://www.fda.gov/cdrh/fluor.html>). Investigaciones posteriores demostraron que el problema persiste (1) y se ha considerado que esto puede ser “la punta del iceberg”, teniendo en cuenta que es posible que un número importante de casos no se comuniquen. (2)

Con el fin de proteger al hombre contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes (RI) sin detrimento de los beneficios asociados con su aplicación en los distintos ámbitos, la radioprotección tiene como objetivo impedir la aparición de efectos determinísticos (véase más adelante) en pacientes y en operadores y disminuir tanto como sea posible la ocurrencia de efectos probabilísticos. Para ello se trabaja con el fin de obtener una imagen óptima, manteniendo los niveles de exposición a la radiación “tan bajos como sea razonable”.

<sup>1</sup> Docente de la Cátedra de Radioprotección del Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Atómico Bariloche

nablemente posible", (3) principio ALARA (*as low as reasonably achievable*) introducido por las directivas 97/43/Euratom.

La radioprotección se funda sobre tres principios básicos: la justificación, la optimización y la limitación de las dosis. (4) La protección radiológica del paciente se sustenta en los dos primeros principios. La justificación de una práctica diagnóstica se fundamenta en que la información esperada a partir de ella contribuirá a confirmar un diagnóstico u orientar la estrategia terapéutica. Además, debe ser superior a la que aportaría otra técnica alternativa que involucre dosis menores o que no implique exposición a RI.

Debido al incremento en la frecuencia de utilización de la radiología intervencionista (angioplastias en múltiples vasos, ablaciones, implantes de desfibriladores y resincronizadores, etc.), que involucran períodos de exposición prolongados, se ha generado un aumento considerable de efectos determinísticos provocados por las radiaciones.

A fin de reducir estos daños, las normas actuales de radioprotección enfatizan el entrenamiento del personal técnico, la utilización de equipos fluoroscópicos sofisticados que reducen la dosis irradiada al paciente mientras se mantiene la calidad de la imagen y el mejoramiento de las técnicas digitales, tendientes al mantenimiento de los niveles de referencia de exposición establecidos para optimizar las operaciones y los sistemas de protección, con el fin de disminuir la exposición a la radiación.

### IMPORTANCIA DE LAS DOSIS

**Para prevenir los riesgos mencionados debemos conocer las dosis límite por debajo de las cuales la probabilidad de ocurrencia de un daño sea mínima.**

Cuando la radiación alcanza un material, cede su energía (o parte de ella) a cada elemento de volumen del material que atraviesa. La cantidad de energía cedida por unidad de masa de material se denomina KERMA (*kinetic energy released in material*).

A fin de limitar las dosis y manejar el riesgo, es necesario cuantificar la cantidad de energía que recibe un tejido o un órgano del cuerpo humano, para lo cual utilizamos algunas medidas de dosis:

Dosis absorbida: expresa la cantidad de energía absorbida por unidad de masa; la unidad de dosis absorbida es el gray (Gy: J/kg).

Dosis equivalente: que en algunos casos se utiliza indistintamente y expresa la dosis absorbida teniendo en cuenta el tipo de radiación (dado que no todos los tipos de radiaciones producen el mismo efecto) y su energía. Por ejemplo, en el caso de los rayos X, en los que se considera igual a 1, la unidad es el sievert (Sv), en cuyo caso Sv es igual a Gy.

Dosis efectiva: que tiene en cuenta los distintos tipos de tejidos que tienen diferente radiosensibilidad.

Cuando un paciente es sometido a una intervención radiológica, las magnitudes que se toman en cuenta se relacionan con la dosis que recibe en la piel en el punto de entrada o ESD (*entrance skin dose*). La dosis de entrada en la piel se define como la dosis absorbida en el centro del campo en la superficie de entrada de la radiación al paciente y se mide en Gy o mGy (1Gy = 1.000 mGy).

En el caso del personal operador se miden las dosis recibidas en los ojos (opcional), los dedos de las manos, debajo del delantal de protección y en el cuello (opcional) (Figuras 1 y 2).

Las dosis se miden de forma directa con dosímetros convencionales de termoluminiscencia (TLD), dado

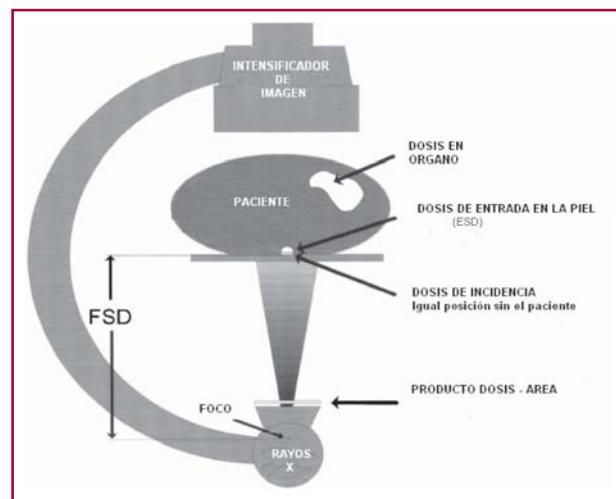


Fig. 1. Medición de dosis recibida en el paciente.

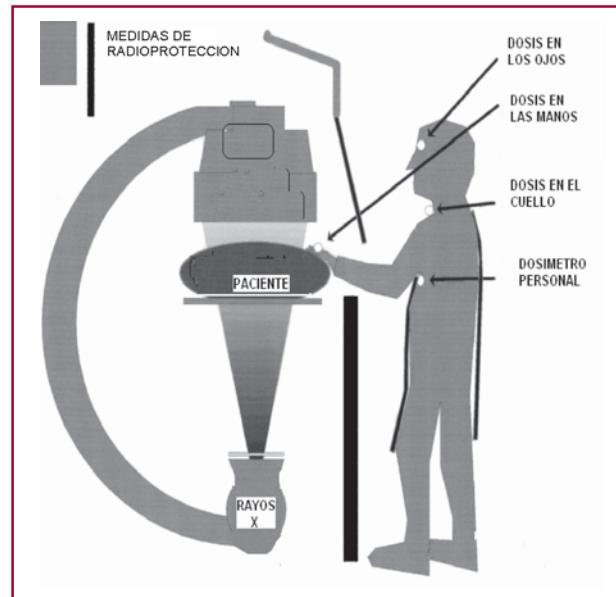


Fig. 2. Sitios de medición de dosis en el personal operador.

que por su tamaño pueden colocarse donde se deseé medir (en especial en la zona de incidencia del haz) y no interfieren con el procedimiento (Tabla 1).

### LÍMITES DE LAS DOSIS

Para acotar y controlar los riesgos debidos a la exposición a las radiaciones se han establecido los siguientes límites a la dosis ponderada a todo el cuerpo recibida por los trabajadores o miembros del público:

- *Límite para trabajadores: 20 mSv/año (promediado en un período de 5 años).*
- *Límite para el público: 1 mSv/año.*

Como referencia se puede acotar que la dosis promedio anual en las personas debida a radiación ambiental (fuentes naturales) es de 2,4 mSv.

Los límites de dosis para el personal operador no se deben superar en ninguna circunstancia. El límite de dosis anual para el personal clasificado es de 20 mSv en todo el cuerpo, de 150 mSv en los ojos y de 500 mSv en la piel.

Si bien no existen valores límite de dosis para los pacientes, todas las exposiciones deben cumplir con el principio ALARA (tan bajas como sea razonablemente posible).

Se aconsejan niveles de referencia para cada tipo de procedimiento; por ejemplo, el DIMOND europeo propone 45 Gy/cm<sup>2</sup> como nivel de referencia para una angiografía coronaria.

### MECANISMOS DEL DAÑO BIOLÓGICO

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes son la consecuencia de un número importante de fenómenos desencadenados por el pasaje de radiación a través de un medio. Los acontecimientos iniciales son ionizaciones y excitaciones de átomos y moléculas del medio a lo largo de las trayectorias de las partículas ionizantes. Estas perturbaciones físicas entrañan una compleja serie de reacciones fisicoquímicas, luego químicas y, finalmente, un efecto biológico que, con dependencia del punto final (*end point*) considerado, corresponderá al nivel molecular, subcelular, celular y tisular.

Una célula comprometida por un evento ionizante puede reparar el daño o bien no repararlo y sobrevivir, o morir. Si sobrevive, podrá continuar con sus funciones dentro del conjunto o podrá sufrir modificaciones que redundarán en la pérdida de los mecanismos de control sobre su capacidad de multiplicación (carcinogénesis).

Cuando la radiación causa excitación o ionización en un sistema biológico, en particular en el nivel de moléculas críticas (proteínas, enzimas, ADN, membranas, etc.), se produce la modificación (daño) de este sistema por acción de la energía entregada. Este mecanismo se denomina efecto directo.

Pero dado que los sistemas biológicos son sistemas esencialmente acuosos, la energía absorbida en ese volumen de agua generará moléculas intermedias (radicales libres: R<sup>•</sup>) con gran reactividad química, que dan lugar a los mecanismos secundarios o indirectos de daño, tal vez los más importantes.

Los radicales libres son moléculas o fragmentos de moléculas que poseen electrones desapareados en sus orbitales externos, propiedad que les confiere gran reactividad química. El daño producido por los radicales libres se denomina efecto indirecto.

### EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Desde el punto de vista de la radioprotección, los efectos biológicos de las RI se pueden clasificar en estocásticos y determinísticos.

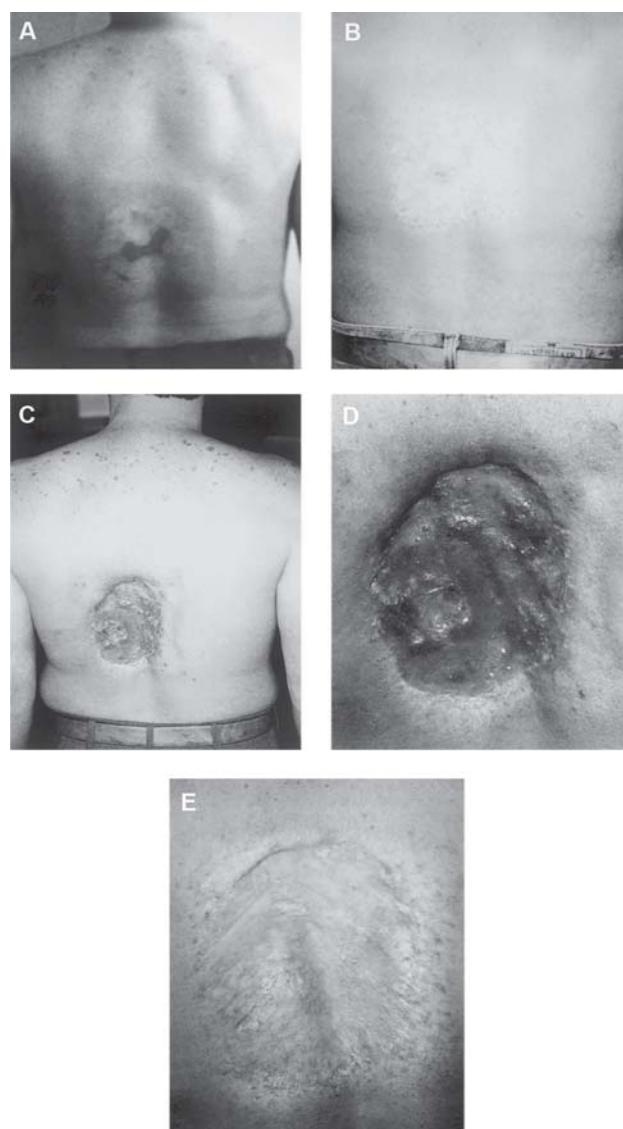
Los *efectos estocásticos* son eventos probabilísticos, no tienen un umbral\* y su probabilidad de ocurrencia aumenta con la dosis. Se consideran graves, equivalentes a un evento fatal. Se producen por daño al ADN (mutación en un oncogén o en un gen supresor de tumores), el cual puede derivar en la producción de cáncer o teratogénesis.

Los *efectos determinísticos* son aquellos cuya frecuencia y gravedad dependen de la dosis y tienen un umbral por debajo del cual no se observan (a nivel clínico) (Figura 3).

\* Umbral: Cantidad de radiación necesaria para provocar un efecto en por lo menos el 1% a 5% de los individuos expuestos.

**Tabla 1.** Rango de dosis efectiva para determinados procedimientos

Clase	Rango de dosis efectiva (mSv)	Ejemplos
0	0	Ultrasonido, resonancia magnética
I	< 1	Radiografía de tórax
II	1-5	Radiografía de columna lumbar, tomografía computarizada de cabeza y cuello, centelograma tiroideo y óseo, renograma, ventilación/perfusión
III	5-10	Tomografía computarizada de tórax, abdomen y pelvis, colon por enema, SPECT
IV	> 10	Ciertas exploraciones de medicina nuclear



**Fig. 3.** A. Espalda de un paciente 6-8 semanas después de haber sido sometido a un estudio de coronariografía múltiple y angioplastia coronaria. B. La lesión 16 a 21 semanas después del procedimiento. Se observa una pequeña área ulcerada. C. La lesión 18-21 meses después del procedimiento. Se observa necrosis tisular. D. Primer plano de la lesión que se muestra en C. E. Espalda del paciente luego del injerto de piel. (Fotografías de T. Shope tomadas de ICRP Publication 85.)

Algunos ejemplos de este tipo de efectos determinísticos incluyen opacidad del cristalino (producción de cataratas inducida por RI) o lesiones en la piel, como eritema, depilación o necrosis (Tabla 2).

El tiempo necesario para que un efecto se manifieste se denomina período de latencia (PL), el cual puede ser de horas, días o semanas para los efectos tempranos o bien de meses o años en los efectos tardíos.

### Los efectos determinísticos

Los efectos determinísticos se producen por la sobreexposición a las radiaciones con dosis que superan las que mencionamos como dosis umbral. Esta sobreexposición puede ser externa (p. ej., cuando se expone a una fuente de rayos X) o interna (cuando se incorpora al organismo algún material radiactivo como el yodo 131), instantánea o prolongada, o sobre todo el cuerpo o parte de él. En estos casos se produce la muerte de una cantidad de células tal que no puede ser compensada por la proliferación de células sobrevivientes y viables. La pérdida resultante de células puede causar deterioros graves de la función de un órgano o tejido, clínicamente detectables.

El efecto determinístico que puede ocurrir con mayor probabilidad en una sobreexposición aguda (p. ej., en una fluoroscopia prolongada como el caso clínico relatado) es el efecto de la interacción de las radiaciones sobre la piel, el cual es dependiente de la dosis, de la profundidad y del área de la piel irradiada.

La escala de gravedad de los síntomas es la misma que para las quemaduras comunes: eritema, edema, ampollas, úlceras, necrosis y esclerosis.

El estudio de los efectos determinísticos se basa sobre el análisis de la distribución espacial y temporal de la dosis sobre el cuerpo.

Con una dosis única de 6-8 Gy en un campo de 5 cm<sup>2</sup>, el eritema inicial aumenta durante la primera semana, pero desaparece progresivamente después de unos 10 días. A este cuadro le sigue la reacción eritematosa principal, que llega al máximo después de unas 2 semanas y dura 20-30 días. En caso de dosis mayores puede ir seguida de descamación seca o húmeda o incluso de necrosis. Esta característica evolutiva (período de latencia) es probablemente la

	Efectos estocásticos	Efectos determinísticos
Gravedad	Independiente de la dosis	Dependiente de la dosis
Mecanismo	Lesión subletal (de una o pocas células)	Lesión letal de muchas células
Naturaleza	Somáticos o teratogénicos Genéticos	Somáticos
Dosis umbral	?	Sí
Relación dosis-efecto	Lineal	Sigmoidea
Aparición	Tardía	Inmediata o tardía

**Tabla 2.** Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes

causa del subdiagnóstico de este tipo de complicaciones.

El análisis topográfico y de las dimensiones de las ampollas, que aparecen con dosis de 15-25 Gy, es de interés para la dosimetría, así como la cronología en el desarrollo de las ampollas, que depende de la dosis recibida por la capa basal: el aumento de la dosis acorta el tiempo de su aparición.

En los estudios que involucran fluoroscopias prolongadas y repetidas en días diferentes (dosis fraccionadas), la dosis umbral para efectos determinísticos es más alta, dado que la lesión al tejido es parcialmente reparada (reparación subletal del daño). Por ejemplo:

- 30 Gy o más: eritema.
- 50-60 Gy: depilación permanente.

Si bien en la actualidad (con mejores equipos de fluoroscopia) este tipo de lesiones son menos frecuentes, la digitalización de las imágenes preocupa a los expertos, dado que con los sistemas digitales modernos pueden producirse sobreexposiciones que pueden pasar inadvertidas para el radiólogo. Con los equipos de fluoroscopia digital es muy fácil obtener imágenes, como también borrarlas, y existe la tendencia a obtener más imágenes que las necesarias, con la consecuente sobreirradiación del paciente.

A fin de tener un parámetro adecuado, podemos ejemplificar con las dosis aportadas por algunos procedimientos. La Health Physics Society en un informe de julio de 2008 presenta los siguientes valores:

Estudio	Dosis	
	MREM	MSV
ATC (Heart study)	750-5.700 (7,5-57)	
Angiograma coronario	460-1.580 (4,6-15,8)	

(Michael G. Stabin)

En cambio, los valores de producto dosis-área y de dosis efectiva para algunos estudios angiográficos co-

rrientes en Newcastle son los siguientes (Br J Radiol 1998;71:634-639):

Procedimiento	PDA cGy cm <sup>2</sup>	DE mSv
Angiografía coronaria	3.040	5,6
ATC	3.760	6,9
Angiografía coronaria + ATC <i>ad hoc</i>	5.060	9,3
ATC + colocación de stent	4.920	9,0
Angiografía coronaria + ATC + colocación de stent	7.070	13,0

ATC: Angioplastia transluminal coronaria. PDA: Producto dosis-área. DE: Dosis efectiva.

Debemos tener presente que las diferencias en las dosis de cada centro dependen del modelo del equipo, de la participación de dosimetristas físicos, de las características del paciente, del número de exposiciones y del entrenamiento del personal, entre otras variables, y sus desviaciones estándares suelen ser muy altas.

El documento 93 de la ICRP (International Commission on Radiation Protection) publicado en 2004 realiza un análisis exhaustivo sobre el tema (9) (Tabla 3).

### MEDIDAS DE PREVENCIÓN

En primer lugar es necesario identificar los factores de riesgo que pueden llevar a una lesión por radiación (Tabla 4).

Las medidas tendientes a incrementar la preventión se sustentan en los controles de calidad y en el control de la dosis durante el procedimiento, así como en el control de parámetros relevantes: tiempo total de fluoroscopia, número total de imágenes obtenidas, dosis por imagen, tasa de dosis, etc.

De esa manera, el entrenamiento responsable de los operadores, el seguimiento de los protocolos loca-

**Tabla 3.** Dosis umbral y tiempos de exposición para la aparición de efectos determinísticos

Efectos	Dosis umbral (Gy)	Tiempo de aparición	Minutos de fluoroscopia a tasa de dosis de 0,02 Gy/min (20 mGy/min)*	Minutos de fluoroscopia a tasa alta de dosis 0,2 Gy/min (200 mGy/min)*
Eritema temprano transitorio	2	2-24 h	100	10
Depilación temporaria	3	Aprox. 3 semanas	150	15
Depilación permanente	7	Aprox. 3 semanas	350	35
Descamación seca	14	4 semanas	700	70
Ulceración secundaria	24	6 semanas o más	1.200	120
Necrosis	18	10 semanas	900	90

**Tabla 4.** Factores de riesgo de lesión por radiación**Del equipamiento**

- Capacidad de movimiento de C-arm, fuente de rayos X e intensificador de imagen
- Tamaño del campo visual
- Posición del colimador
- Filtrado del haz
- Fluoroscopia alta corriente y baja frecuencia
- Fluoroscopia pulsada
- Control automático de la tasa de dosis que incluye manejo de energía del haz
- Espectro de energía de fotones de rayos X
- Software para filtro de imágenes
- Mantenimiento preventivo y calibración
- Control de calidad

**Del paciente**

- Peso y hábito corporal del paciente

**Del médico**

- Posición del intensificador y de la fuente de rayos X con respecto al paciente
- Orientación y desplazamiento del haz
- Tamaño del campo de visión
- Colimación
- Factores técnicos dependientes del tipo de fluoroscopio adquirido
- Fluoroscopia pulsada
- Filtración del haz variable
- Tiempo total de fluoroscopia
- Tiempo total de adquisición de la imagen

les, en particular los relativos a la dosimetría, cuyas precisiones varían con la práctica que se ha de realizar y el paciente, y la participación en el equipo de un físico médico que implementará todas las medidas de radioprotección permitirán la restricción adecuada de las dosis con la consiguiente optimización del principio costo-beneficio.

**CONSIDERACIONES FINALES**

Para finalizar, es importante destacar la relevancia del conocimiento de los efectos de las RI por parte de los médicos cardiólogos que indican procedimientos que requieren fluoroscopia, especialmente angioplastias, ablaciones, implantes de resincronizadores, etc., y de los que efectúan el seguimiento del paciente, a fin de realizar un diagnóstico correcto y eventual tratamiento en el caso de una sobreexposición. Para ello es fundamental tener presente que a todos los pacientes que recibieron en la piel una dosis estima-

da de 3 Gy se les debe hacer un seguimiento de al menos 10 a 14 días posteriores al estudio. Asimismo, es recomendable por parte de los médicos de cabecera el conocimiento de los procedimientos a los que serán sometidos sus pacientes y una estimación del tiempo y, si es posible, de las dosis a las que fueron sometidos.

**SUMMARY****Risks Associated with Ionizing Radiations**

Medical use of ionizing radiations implies certain risks which are widely balanced by their diagnostic and therapeutic benefits. Nevertheless, knowledge about these risks and how to diagnose and prevent them minimizes their disadvantages and optimizes the quality and safety of the method. This article describes the aspects related to skin dose (nonstochastic effects), the importance of dose limit, the physiopathology of biological damage and, finally, the prevention measures.

**Key words >** Free Radicals - Surveillance - Fluoroscopy

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Koenig TR, Mettler FA, Wagner LK. Skin injuries from fluoroscopically guided procedures: part 2, review of 73 cases and recommendations for minimizing dose delivered to patient. *Am J Roentgenol* 2001;177:13-20.
2. Hirshfeld JW Jr, Balter S, Brinker JA, Kern MJ, Klein LW, Lindsay BD, et al; American College of Cardiology Foundation; American Heart Association; American College of Physicians. ACCF/AHA/HRS/SCAI clinical competence statement on physician knowledge to optimize patient safety and image quality in fluoroscopically guided invasive cardiovascular procedures. A report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association/American College of Physicians Task Force on Clinical Competence and Training. *J Am Coll Cardiol* 2004;44:2259-82.
3. On health protection of individuals against the dangers of ionizing radiation in relation to medical exposure, CEC, Council Directive 97/43/Euratom, Euratom Amtsblatt 1997;30:22-7.
4. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection Publication 60: Protection 1991;21:1-3.
5. Guía de Protección Radiológica N° 118 de la Comunidad Europea “Indicaciones para la correcta solicitud de pruebas de diagnóstico por imagen”. 2000.
6. Neofotistou V, Vano E, Padovani R, Kotre J, Dowling A, Toivonen M, et al. Preliminary reference levels in interventional cardiology. *Eur Radiol* 2003;13:2259-63.
7. Planning the medical response to radiological accidents. Safety Series Report N° 4 IAEA-1998.
8. Potential effects of fluoroscopic exposures on the reaction of skin and lens of the eye, 3. Radiopathology of skin and eye and radiation risk, ICRP Publication 85.
9. ICRP Recommendations on “Managing patient dose in digital radiology”. [www.icrp.org](http://www.icrp.org)
10. Shope TB. Radiation-induced skin injuries from fluoroscopy. *RadioGraphics* 1996;16:1195-9.