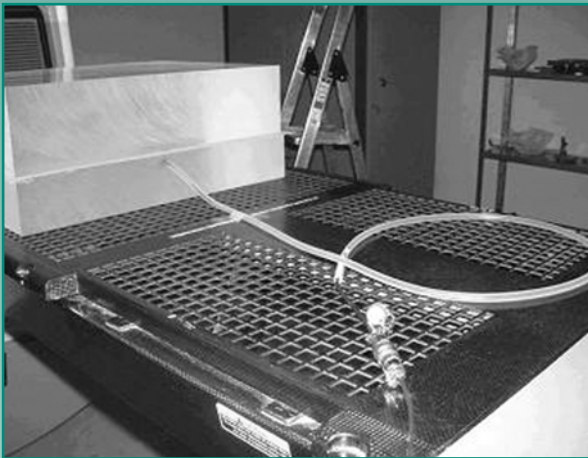


# RADIOPROTECCIÓN

REVISTA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA



▲ **Entrevista a:**  
**Francisco Carrera**  
*Presidente del Comité  
Organizador*  
**X Congreso SEPR**

▲ **Efectos no dirigidos  
de la radiación ionizante:  
Implicaciones para  
la protección radiológica**

▲ **Apuntes para un análisis  
crítico del sistema  
de dosimetría en protección  
radiológica**

▲ **Aspectos de protección  
radiológica y control  
de calidad de la técnica  
de intensidad modulada**

Nº 43 • Vol. XII • 2005

# RADIOPROTECCIÓN

REVISTA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

## Directora

Almudena Real

## Coordinadora

Carmen Roig

## Comité de Redacción

Beatriz Gómez-Argüello  
José Miguel Fernández Soto  
Carlos Huerga  
Paloma Marchena  
Matilde Pelegrí  
Beatriz Robles  
José María Sastre  
Luis Miguel Tobajas  
Susana Torres  
M<sup>o</sup> Ángeles Trillo.

## Coordinador de la página electrónica

Carlos Prieto

## Comité Científico

Presidente: Luis M. Tobajas

David Cancio, Luis Corpas, Felipe Cortés,  
Antonio Delgado, Eugenio Gil,  
Luciano González, Araceli Hernández,  
José Hernández-Armas,  
Ignacio Hernando, Rafael Herranz,  
Pablo Jiménez, Juan Carlos Lentijo,  
María Teresa Macías, Xavier Ortega,  
Pedro Ortiz, Teresa Ortiz, Turiano Picazo,  
Rafael Puchal, Luis Quindós,  
Rafael Ruiz Cruces, Guillermo Sánchez,  
Eduardo Sollet, Alejandro Ubeda,  
Eliseo Vañó.

## Realización, Publicidad y Edición:

SENDA EDITORIAL, S.A.

Directora: Matilde Pelegrí

Isla de Saipán, 47 - 28035 Madrid

Tel.: 91 373 47 50 - Fax: 91 316 91 77

Correo electrónico: senda@gruposenda.net

Imprime: Publiequipo.

Depósito Legal: M-17158-1993 ISSN: 1133-1747

La revista de la SOCIEDAD ESPAÑOLA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA es una publicación técnica y plural que puede coincidir con las opiniones de los que en ella colaboran, aunque no las comparte necesariamente.



EDICIÓN MARZO 2005

Foto de portada:  
Maniquí utilizado para medidas de dosis absoluta y relativa.

## S U M A R I O

- Editorial **3**
- Entrevista **4**  
*Francisco Carrera*  
Presidente del Comité Organizador X Congreso SEPR
- Noticias **7**
  - de la SEPR 7
  - de España 44
  - del Mundo 45
- Colaboraciones **12**
  - Efectos no dirigidos de la radiación ionizante: Implicaciones para la protección radiológica *John B. Little, MD* 12
  - Apuntes para un análisis crítico del sistema de dosimetría en protección radiológica *A. Delgado* 21
  - Aspectos de protección radiológica y control de calidad de la técnica de intensidad modulada *R. Sánchez, M. Sáez, F. Fayos, A. Pozuelo, J. Gutiérrez, G. Rey* 35
- Proyectos de Investigación **42**
- Publicaciones **47**
- Convocatorias **51**

# Editorial

Tenemos entre las manos el primer número de nuestra Revista del año 2005, año en el que conmemoramos el 25 Aniversario de la SEPR, un acontecimiento al que debe darse una singular importancia, tanto por lo que supone de consolidación institucional, como por el reto de progreso continuo que tenemos que afrontar cara al futuro. Es indudable que nuestra consolidación como Sociedad científica se ha debido al esfuerzo y trabajo desinteresado que vienen realizando la mayoría de los socios que la integran, a los que, desde aquí, enviamos un merecido reconocimiento y nuestra felicitación, a la vez que volvemos a solicitar su colaboración para que, como alguien escribió, lo mejor de nuestra trayectoria esté aún por llegar.

Al efecto de generar y recabar ideas para celebrar este cuarto de siglo de andadura, darles forma y conseguir su cristalización, se ha creado un Comité de socios, que empezó a trabajar el pasado mes de diciembre. Reiteramos el mensaje de colaboración a todos los socios para que trasladen sus ideas, canalizándolas a través de la página electrónica. En el interior de la revista se ofrece un avance de los preparativos en curso, que deben culminar con el conjunto de actividades conmemorativas previsto durante la celebración del X Congreso de la Sociedad, en el próximo mes de septiembre en Huelva, cuyo segundo anuncio ha sido ya distribuido y en el que os animamos fervientemente a participar.

En la línea que anticipaba el editorial del número anterior, el pasado 8 de febrero se firmó con el CSN el convenio por el que la SEPR se encargará de la traducción oficial al español de las Guías de Seguridad del OIEA con particular interés en nuestras áreas de actuación. Con el CSN y la SEFM prosiguen de manera positiva las actividades del Foro sobre protección radiológica en el medio sanitario. El presidente de la SEPR realizó una comparecencia ante la Comisión de Industria, Turismo y Comercio del Congreso de los Diputados sobre este tema, percibiéndose una valoración positiva de la Comisión sobre la existencia y actividades del Foro. También continúa la interacción con la Consejería de Sanidad y Consumo de la Comunidad Autónoma de Madrid, en temas de comunicación e información de la protección radiológica en el área sanitaria, que, en su primera fase, ha realizado una propuesta para la actualización y creación de nuevos carteles informativos relativos a los criterios de calidad de las pruebas radiológicas.

Como también se adelantó en el último número, se ha producido el relevo del equipo encargado de dirigir y coordinar esta revista. El nuevo equipo, al que damos una cariñosa bienvenida y de cuya composición se da cumplida cuenta en el interior, ha actuado ya con plena responsabilidad en el presente número. Agradecemos al equipo anterior su dedicación y esfuerzo permanentes además de desinteresados, reflejado en la progresiva mejora de nuestra revista y animamos al que ahora inicia su trabajo para proseguir en la línea ascendente marcada.

De los tres artículos que conforman el contenido científico de este número, uno se enmarca en el campo de los efectos biológicos de las radiaciones. Este trabajo revisa dos tipos de los llamados efectos no dirigidos, efectos que no están dirigidos a la célula irradiada en sí misma, la inestabilidad genómica inducida por radiación y los efectos circunstanciales ("bystander effects").

El segundo de los artículos, como indica explícitamente su título, presenta una revisión crítica, esto es, nada complaciente, del sistema de dosimetría para la protección radiológica. Se analizan lo que el autor identifica como carencias de los fundamentos mismos del sistema y también algunos aspectos conflictivos de la aplicación práctica, en lo que toca a la dosimetría de la radiación externa y de la interna. El trabajo constituye un tema para el debate, sin duda muy oportuno en la situación actual de revisión de las recomendaciones básicas en PR.

El tercer trabajo se enmarca en la protección radiológica en el ámbito médico, centrándose en la radioterapia con intensidad modulada (IMRT), la cual constituye una opción terapéutica en la administración de dosis a tumores. El artículo presenta los resultados de control de calidad de tratamientos de pacientes que se han beneficiado de esta técnica, fijándose en los aspectos de protección radiológica del personal y del paciente e incluyendo la verificación de la dosis administrada a este último colectivo.

Finalmente, dos informaciones de importancia para los lectores. La primera se refiere al nuevo diseño de nuestra página electrónica, que pronto estará operativo, para dotarla de una mayor interactividad y actualización de sus contenidos, lo que redundará en beneficio de la información y comunicación requeridas. La segunda corresponde al Plan de Actividades para el año 2005, que será aprobado en la próxima reunión de la Junta Directiva y cuyo contenido se anticipa cargado de convocatorias que esperamos sean del mayor interés para nuestros socios.



**SOCIEDAD ESPAÑOLA  
DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA**  
[www.sepr.es](http://www.sepr.es)

## Secretaría Técnica

Capitán Haya, 60 - 28020 Madrid  
Tel.: 91 749 95 17 - Fax: 91 749 95 03  
Correo electrónico:  
[secretaria.sociedades@medynet.com](mailto:secretaria.sociedades@medynet.com)

## Comisión 25 Aniversario

Leopoldo Arranz, Pío Carmena,  
José Gutiérrez, Eduardo Sollet,  
Ildefonso Irún, Paloma Marchena,  
Beatriz Robles, M<sup>ª</sup> Teresa Macías

## Junta Directiva

Presidente: José Gutiérrez  
Vicepresidente: Rafael Ruiz  
Secretario General: Ramón Almguera  
Tesorera: Cristina Correa  
Vocales: Manuel Alonso, José Miguel  
Fernández, Eugenio Gil, Pablo L. Gómez  
Vicepresidente de Congresos: Francisco  
Carrera

## Comisión de Asuntos Institucionales

Leopoldo Arranz, David Cancio,  
Pedro Carboneras, Pío Carmena,  
Manuel Fernández, Ignacio Hernando,  
M<sup>ª</sup> Teresa Macías, Xavier Ortega,  
Juan José Peña, Eduardo Sollet  
Responsable: José Gutiérrez

## Comisión de Actividades Científicas

José Baro, Natividad Ferrer,  
Eduardo F. Gallego, Fernando González,  
M<sup>ª</sup> Teresa Macías, M<sup>ª</sup> Luisa Marco,  
Almudena Real, Alejandro Ubeda,  
M<sup>ª</sup> Isabel Villanueva, Fernando Legarda,  
Rosa M<sup>ª</sup> Villarroel  
Responsable: Rafael Ruiz Cruces

## Comisión de Normativa

M<sup>ª</sup> Luisa Chapel, M<sup>ª</sup> Luisa España,  
D<sup>ª</sup> Mercé Ginjaume, M<sup>ª</sup> Isabel Gutiérrez,  
Araceli Hernández, M<sup>ª</sup> Jesús Muñoz,  
M<sup>ª</sup> Teresa Ortiz, Turiano Picazo,  
Eduardo Sollet  
Responsable: Ramón Almguera

## Comisión de Comunicación y Publicaciones

Luis Corpas, Beatriz Gómez-Arguello,  
Olvido Guzmán, M<sup>ª</sup> Pilar López Franco,  
M<sup>ª</sup> Teresa Macías, Paloma Marchena,  
Carlos Prieto, Almudena Real,  
Eduardo Sollet, Luis Miguel Tobajas  
Responsable: José Miguel Fernández

## Comisión de Asuntos Económicos y Financieros

Pío Carmena, Eduardo F. Gallego,  
M<sup>ª</sup> Jesús Muñoz, M<sup>ª</sup> Teresa Ortiz,  
Beatriz Robles  
Responsable: Cristina Correa



# Francisco Carrera

## Presidente del Comité Organizador X Congreso SEPR

**El Congreso de la SEPR se ha convertido en un punto de encuentro obligado para los profesionales y las empresas del sector de la protección radiológica.**

**Francisco Carrera Magariño, Jefe de Servicio de Protección contra las Radiaciones Ionizantes del área hospitalaria Juan Ramón Jiménez de Huelva, es el presidente del Comité Organizador y presenta en estas páginas de RADIOPROTECCIÓN los aspectos más destacados de este evento.**

### **La sede**

Huelva ha sido la ciudad elegida como sede de este X Congreso. Son diversas las razones que han llevado a esta decisión, como expone Francisco Carrera. "Por una parte, la buena sintonía existente, demostrada en la celebración de diferentes actividades conjuntas, entre el Servicio de Protección Radiológica del Hospital Juan Ramón Jiménez, del que soy responsable, y el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Huelva, con una línea de investigación muy activa sobre radiactividad ambiental, y por otra, las muestras de apoyo de destacados miembros de la Sociedad, a nuestra intención, nos convencieron de la oportunidad de postularnos como candida-

tura a la organización del X Congreso."

### **La organización**

Cada Congreso tiene sus peculiaridades organizativas. En esta ocasión se ha configurado un Comité Organizador reducido en número de personas "pero equilibrado en su representatividad, y formado por profesionales de diferentes ámbitos y con experiencia en la organización de eventos científicos. Por otra parte, el Comité Científico agrupa a expertos contrastados en las áreas temáticas seleccionadas, de entre los cuales un núcleo más reducido asesora al Comité Organizador en la confección del Programa Científico."



## El programa técnico

Los congresos de la SEPR tienen una larga tradición de calidad científica. El presidente del Comité Organizador destaca dos aspectos del programa que agrupa a las aportaciones científicas, uno de los cuales es, sin duda, la presencia de destacadas personalidades del mundo de la protección radiológica. "Han confirmado su asistencia **Abel González**, que en esa época habrá dejado su cargo en el OIEA, y que queremos que nos glose su dilatado y fructífero paso por el Organismo. También estará con nosotros **Lars-Erik Holm**, Presidente del ICRP, que nos pondrá al día sobre la publicación de las nuevas Recomendaciones, no exenta de dificultades. **Pedro Ortiz** representará al área médica entre los conferenciantes, con tanto peso en nuestra Sociedad, y con un tema que España lideró desde el principio, con la organización en Málaga de la **Conferencia Internacional sobre Protección Radiológica del Paciente**, y la puesta en marcha del correspondiente Plan de Acción, cuyo estado se revisará en nuestro Congreso."

Pero Carrera no considera menos importante el esfuerzo que se ha hecho por ofrecer a los congresistas las máximas oportunidades de presentar públicamente sus trabajos. "De esta forma, se han programado un total de 15 horas para presentaciones orales, a disposición de los verdaderos protagonistas del Congreso, los asistentes."

Las áreas temáticas que se analizarán en el Congreso de Huelva son las siguientes: Protección radiológica de los trabajadores, Protección radiológica del público y del medio ambiente, Protección radiológica de los pacientes, Dosimetría, metrología e instrumentación, Radiaciones no ionizantes, Residuos radiactivos, Efectos biológi-



cos de las radiaciones, Radiactividad ambiental, Formación en protección radiológica, y Normativa y legislación.

El presidente del Comité Organizador hace referencia a la estructura del programa, y expone que "en su parte científica, el Congreso se desarrolla durante dos jornadas y media, como es tradicional, ofreciendo todos los días una estructura similar: se comienza con los cursos de refresco, de los cuales se han programado tres, de tres horas de duración cada uno, e impartidos simultáneamente, con la idea de profundizar en cada uno de los temas. Tras los cursos de refresco tendremos la conferencia plenaria, las comunicaciones orales y la mesa redonda, para dedicar la tarde a las presentaciones de posters."

Carrera aprovecha estas páginas de la revista para comunicar a todos los socios un cambio en el programa científico. Por problemas de agenda de última hora del Dr. Holm, su conferencia

será pronunciada el viernes, mientras que la del Dr. González tendrá lugar el miércoles. Nos recuerda que "todas las novedades, y en general toda la información, están disponibles en la página web del Congreso, **www.sepr10.com.**"

## Los congresistas

Como ha afirmado Francisco Carrera, los auténticos protagonistas del congreso son los asistentes. Aunque siempre es difícil hacer previsiones de asistencia, el presidente del Comité Organizador afirma que "nuestra presencia en el stand de la SEPR en IRPA 11 nos reportó casi cien preinscritos, que confiamos confirmen su interés inicial. Como suele ser tradicional, los abonos de las inscripciones definitivas suelen demorarse un poco más. Me sentiría satisfecho superando una asistencia de 200 congresistas, aunque confiamos en que sean bastantes más. Hace aproximadamente un mes remitimos a socios, resto de asistentes al IX Congreso celebrado en Bilbao, y diversos colectivos potencialmente interesados, como UTPR, laboratorios de investigación, etc., ejemplares del Segundo Anuncio y Boletines de Inscripción. No obstante, si alguien interesado en asistir al Congreso, o en conocer más de él, no ha recibido la información por correo postal, puede encontrarla en la web del Congreso, incluidos el Segundo Anuncio y el Boletín de Inscripción."

Con relación a la participación de profesionales extranjeros, "se ha difundido el Congreso entre nuestras Sociedades hermanas. Esperamos que los atractivos naturales y la belleza de nuestra tierra, unidos a la bondad del Programa Científico, compensen el

hándicap que supone la situación periférica de nuestra provincia.”

“Tenemos una gran ilusión en contar con la activa participación de la **Sociedad portuguesa** y las **Sociedades iberoamericanas**, por la situación geográfica de Huelva y su tradicional orientación cultural y social hacia los países del otro lado del Atlántico.”

### La exposición comercial

La presencia de las empresas en la exposición comercial es de gran importancia, y su número se ha ido incrementando en las últimas ediciones. Carrera es optimista sobre las previsiones de contratación de stands comerciales, que califica como “muy buenas. Hasta el momento han manifestado su firme interés un número de empresas tal, que ya nos está haciendo pensar en buscar espacios alternativos para poder acogerlas a todas. Quiero insistir desde aquí a las referidas empresas en la importancia de confirmar la reserva de espacios expositivos, de acuerdo a las normas que se detallan en la web, y con el fin de evitar situaciones no deseadas de última hora.”

También recuerda el presidente del Comité Organizador la coincidencia de eventos. “La celebración del Congreso Nacional de la SEFM está reclamando la atención de las empresas del sector, lo cual es posible que retraiga a alguna de ellas de estar en ambos Congresos. Sin embargo, no menos de dos stand, ya confirmados, corresponderán a empresas de este ramo, y esperamos que bastantes más, dado el peso que tienen en la SEPR los socios del área médica. Pero contaremos, como es habitual, con las empresas nacionales cuyo negocio se

enmarca en la instrumentación y los servicios orientados a la protección radiológica en el sector nuclear e industrial, con lo que la coincidencia con otros eventos con seguridad no va a afectarnos de manera significativa.”

### El programa social

Además de su proyección científica, el Congreso de la SEPR es también un punto de encuentro entre los profesionales. Sobre el programa social, Carrera comenta que, “como siempre, la **Cena Oficial** será el evento social culminante del Congreso. El marco donde se desarrollará, un lugar emblemático para el Descubrimiento, que data de 1337, hará de este un acontecimiento especial.

“El día previo tendremos una cena informal, para disfrutar de los conocidos y esperados, por los comentarios que me vienen haciendo, frutos de nuestra tierra y nuestro mar, y amenizada también con una pincelada de nuestro folklore, que aunque suene a tópico, es lo mejor que podemos ofrecer.

“La Bienvenida, por otra parte, la dará el Excmo. **Ayuntamiento de Punta Umbría**, término municipal donde se ubica el Hotel que hemos distinguido como Oficial del Congreso, que desde el principio se ha volcado con la Organización.”

### El 25º Aniversario de la SEPR

El X Congreso coincide con la celebración del **25º Aniversario de la SEPR**, “una fecha muy importante para nosotros, que culmina un proceso de consolidación, y ‘mayoría de edad’, que comenzó con la celebración de IR-PA11. La Junta Directiva de la Sociedad consideró en su día que esta conmemoración debería celebrarse en el marco del evento más importante para cualquier sociedad científica, su Reunión Anual, lo cual además facilita la asistencia de los socios, y por tanto contribuye a la concurrencia y al éxito que merece la ocasión.

“Se ha creado una Comisión *ad hoc*, en el seno de la Sociedad, para organizar los actos que se celebrarán. Entre otros, la Conferencia Inaugural del Congreso estará dedicada a esta efeméride, esperamos contar con la presencia de todos los Presidentes que ha tenido la SEPR hasta el momento, a los que como es lógico se distinguirá, y alguna otra sorpresa que no quiero desvelar.”

La coordinación entre ambos comités facilitará el éxito. “El Comité Organizador, que tengo el honor de presidir, está lógicamente a disposición de la Comisión del 25 aniversario, para facilitar toda la logística que sea necesaria para que esta celebración sea un completo éxito.”





## Firma del Convenio CSN-SEPR para la traducción de las guías de Seguridad del OIEA



Momento de la firma.

El pasado 8 de febrero de 2005 tuvo lugar en la sede del CSN el acto formal de la firma de un Convenio entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Sociedad Española de Protección Radiológica para los servicios de traducción de las guías de seguridad del Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA). El convenio, con una vigencia de tres años a partir de la fecha de su firma, se refiere específicamente a las guías relacionadas con la seguridad radiológica y la seguridad en la gestión de residuos, aunque puede abarcar otro tipo de temáticas cuando así se acuerde.

Según el texto del convenio, ambas partes reconocen la existencia de una gran cantidad de guías de la "Colección de Guías de Seguridad" del OIEA que sólo están disponibles en lengua inglesa, cuando el español es una de las lenguas oficiales del citado organismo y, a este respecto, citan la importancia de disponer, en el plazo más favorable, de una versión de reconocida calidad en lengua española de dichos documentos, que sea aceptada y utilizada por la comunidad hispano parlante.

La traducción de esas guías debe ser realizada en consonancia con los criterios y normas del OIEA, cumpliendo los criterios de calidad y redacción, tanto en las composiciones de los textos como en la definición y utilización de las terminologías y glosarios.

El responsable designado por la SEPR al efecto es D. David Cancio Pérez, quien mantendrá también la coordinación con el OIEA

y estará apoyado directamente por un equipo muy reducido de profesionales de alto nivel para el desarrollo de la tarea.

Complementariamente, la SEPR contará para la tarea con el trabajo técnico de un grupo de traductores expertos, en principio miembros de la SEPR, provenientes del sector específico a que se refieran las diversas Guías en proceso, sin descartar la participación de expertos pertenecientes a sociedades hermanas de Iberoamérica.

La SEPR se felicita por la cristalización de este proyecto, sin duda ilusionante y plenamente coincidente con nuestros objetivos, que contribuirá a mejorar la aplicación de aspectos relevantes de protección radiológica en nuestro país ayudando también a su difusión.

Comité de Redacción

## Reunión del Foro CSN-SEPR-SEFM sobre "Protección Radiológica en el medio sanitario"

El pasado 9 de marzo de 2005 se celebró en Madrid, en la sede del CSN, la reunión del Foro CSN-SEPR-SEFM sobre "Protección Radiológica en el medio sanitario" con los siguientes participantes: Juan Carlos Lentijo, Manuel Rodríguez, Manuel Malavé, Ignacio Amor, Carmen Álvarez, Rosa Villarroel, Manuel Tormo y Pilar Franco (CSN), Pedro Galán, Manuel Fernández y Cristina Núñez (SEFM) y José Gutiérrez, Manuel Alonso y Francisco Carrera (SEPR).



Asistentes a la reunión del Foro CSN-SEPR-SEFM.

El presidente de la SEPR comentó brevemente su comparecencia ante la Comisión de Industria, Turismo y Comercio del Congreso de los Diputados destacando el carácter cordial de la misma y la valoración positiva que percibió en la Comisión sobre la existencia y actividades del Foro.

Se revisó el contenido de la nota de la reunión anterior, que se aprobó sin modificaciones y se realizó el seguimiento de las actividades en curso. Se describe a continuación un resumen de los aspectos más destacados de la reunión:

### Efluentes radiactivos líquidos

Se designa a D. Manuel Fernández Bordes como responsable de la activación del grupo de trabajo que tiene asignada la tarea de desarrollar el procedimiento para gestión de efluentes radiactivos de las IIRR, indicándose la conveniencia de completar la misma en un corto espacio de tiempo.

### Residuos radiactivos sólidos

La propuesta de procedimiento para gestión conforme a Orden Ministerial de mayo de 2003 y GSN 9.3, elaborada a partir del que se utiliza en el Hospital Central de Asturias, se remitirá para comentarios, a los integrantes del foro antes del 31 de marzo a través de Manuel Alonso.

### Nota para incluir al principio de todos los documentos del Foro

Se pasa a comentarios el texto de una nota para incluir al principio de todos los

documentos aclarando el carácter y utilización de los mismos, acordándose una redacción final.

### Calibración de activímetros

El CSN acusa recibo del procedimiento. Se abunda en las dificultades que existen en estos aspectos por la falta de un ente dedicado en exclusiva y con medios suficientes, a ofertar servicios de calibración de dispositivos de medida de los diferentes haces y fuentes empleados en medicina. Se acuerda que no es necesaria ninguna acción posterior dándose por cerrado el tema.

### Metrología

La propuesta de acuerdo concreto del CIEMAT, para implantar un laboratorio específico para neutrones, se espera que sea presentada en el CSN a finales de febrero. Este proyecto cuenta con la participación del laboratorio existente en la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.

Se menciona el problema existente con la calibración de los sistemas de dosimetría en braquiterapia y curieterapia, acordándose que cada una de las sociedades y el CSN realicen alguna gestión ante la Dirección del CIEMAT para tratar de impulsarla. Se indica la conveniencia de recabar previamente información de los responsables de calibración del CIEMAT. Se indica asimismo la conveniencia de comentar esta situación con el Subdirector General de Sanidad ambiental y Salud Laboral del Ministerio de Sanidad.

### Definición de paciente a efectos de notificación y evaluación de sucesos en instalaciones radiactivas medicas

Se acuerda que Carmen Álvarez e Ignacio Amor (CSN) se encarguen de dar forma a la definición, con el fin de que sirva de referencia para potenciales sucesos, enviándose para comentarios a los miembros del Foro.

### Protocolo para dosimetría de Área. RPSCRI artículo 31

Se ha elaborado una nueva versión del documento que expuso Manuel Alonso. Se felicita a todo el grupo por el trabajo realizado. Se acuerda un cambio de título (que pasará a "estudio sobre la viabilidad de

realizar una dosimetría de área para trabajadores B en el ámbito sanitario"). Además se acuerda que antes del 31 de marzo se realicen comentarios centrándose en tres aspectos fundamentales:

- Situaciones en las que se considera adecuada la aplicación de la dosimetría de área para estimación de dosis individuales.
- Viabilidad y conveniencia de realizar asignaciones de dosis distintas a las leídas mediante un dosímetro, por ejemplo mediante realización de cálculos o consideración de cargas de trabajo, existencia de turnos etc.
- Alternativas para solucionar la problemática asociada con la utilización de equipos portátiles en quirófanos para el personal no directamente involucrado en las intervenciones.

El grupo de trabajo contemplará los cambios propuestos en un nuevo borrador e incluirá en sus conclusiones recomendaciones sobre en qué situaciones es adecuado realizar dosimetría de área.

### Control de contaminación interna de trabajadores expuestos en instalaciones radiactivas con material no encapsulado

Se comenta (Ignacio Amor) el documento, ya muy avanzado y la conveniencia de que el documento considere contaminación externa e interna. Asimismo se indica la conveniencia de considerar situaciones en las que la administración de radiofármacos se realiza fuera de las dependencias propias de las instalaciones de medicina nuclear, como por ejemplo en la realización de la técnica del ganglio centinela.

### Criterios de alta y medidas para protección radiológica del público en el tratamiento de pacientes con radiofármacos

No han podido realizarse avances en este tema. Se acuerda que se finalice un borrador de documento antes de finales de marzo y que se circule para comentarios de los miembros del Foro.

### Nuevos grupos de trabajo

Se va a constituir un grupo para desarrollar una guía de información dirigida a la protección de la infancia que, por razones médi-

cas, requieran exposición a las radiaciones ionizantes. En dicho grupo participará también el MSC. Se valora la conveniencia de que formen parte del mismo especialistas médicos, así como de incluir procedimientos de medicina nuclear y radioterapia. Las Directrices Europeas sobre Criterios de Calidad de las Imágenes de Radiodiagnóstico en Pediatría del año 1996, aparecen como documentos de partida. Francisco Carrera se ofrece por parte de la SEPR a participar en el seguimiento de los trabajos, que deberán ofrecer resultados a final de año.

### Varios

Se comenta la problemática de las exposiciones por motivos de seguridad física en lugares tales como aeropuertos, indicando el CSN que estas se consideran en el licenciamiento de las instalaciones mediante la aplicación del principio de justificación.

Se comenta que la próxima reunión del Foro se celebrará en fecha a determinar en función de la evolución de los trabajos en curso.

Comité de Redacción

## Comisión de Actividades Científicas

El pasado 10 de febrero se celebró la reunión de la Comisión de Actividades Científicas de la SEPR, bajo la coordinación de Rafael Ruiz Cruces (vicepresidente de la SEPR). Asistieron a la reunión Josep Baró Casanovas, Natividad Ferrer García, Fernando Legarda Ibáñez, Almudena Real Gallego, Alejandro Úbeda Maeso y Rosa Villarroel Glez-Elide. Presentaron sus excusas Isabel Villanueva Delgado (secretaria del Comité), Fernando González González y M<sup>ª</sup> Teresa Macías Domínguez.

Se procedió a la lectura y aprobación del acta de la reunión anterior celebrada el 19 de noviembre de 2004.

La reunión se centró en dos puntos principales:

- Programa de actividades científicas de la SEPR para 2005.
- Nueva estructura de las Áreas Temáticas de la SEPR.



En relación al programa de actividades científicas la Comisión está elaborando un documento que será presentado a la Junta Directiva para su aprobación, en el que se detallaran las distintas jornadas a celebrar en 2005 y diversas propuestas para el año 2006. Una vez aprobado el documento se dará a conocer a todos los socios a través de la página electrónica de la SEPR, como viene siendo habitual todos los años. De las actividades a realizar en 2005 resaltar la Jornada del 15 de marzo sobre "Protección ante radiaciones no ionizantes (RM, radiocomunicación, láser, UV): Mitos y realidades". La coordinación de dicha Jornada la ha realizado Alejandro Úbeda. En la página electrónica de la SEPR se puede encontrar un programa detallado de la jornada.

El coordinador de la Comisión de Actividades Científicas, Rafael Ruíz-Cruces informó de la reunión mantenida por representantes de la Junta directiva de la SEPR con la Presidenta del Consejo de Seguridad Nuclear. De dicha reunión surgieron muchas propuestas sobre Jornadas de interés para los socios de la SEPR que serán recogidas en el documento de Actividades Científicas 2005 que se está elaborando.

Respecto a las Áreas Temáticas de la SEPR, se está trabajando en la dirección de reducir

el número de éstas con el objetivo de impulsar y mejorar su funcionamiento. Dada la complejidad del tema, será necesario en futuras reuniones de la Comisión de Actividades Científicas seguir trabajando en este punto.

La fecha de la próxima reunión de la Comisión no ha sido fijada, pero seguramente será en el mes de mayo de este año.

*Comité de Redacción*

## Nueva Comisión de Redacción

La revista de la SEPR estrena Comité de Redacción desde este número, que queda integrado de la siguiente manera: **Directora:** Almudena Real; **Coordinadora:** Carmen Roig; **Comité de redacción:** Beatriz Gómez-Argüello, José Miguel Fernández Soto, Carlos Huerga, Paloma Marchena, Matilde Pelegrí, Beatriz Robles, José María Sastre, Luis Miguel Tobajas y M<sup>º</sup> Ángeles Trillo; **Coordinador de la página electrónica:** Carlos Prieto.

Agradecemos sinceramente el trabajo y dedicación prestada por nuestros compañe-



Los miembros de la Comisión de Redacción entrante y saliente.

ros Pilar López Franco, que ha sido directora de la revista en los últimos años, así como a Carlos Prieto, M<sup>º</sup> Ángeles Sánchez y Marina Téllez.

Expresamos también nuestro agradecimiento a Agustín Alonso quien ha ejercido la presidencia del Comité Científico y damos la bienvenida a Luis Miguel Tobajas. Esperamos seguir contando con el importante apoyo de los miembros de este Comité.

## La SEPR cumple 25 años

Allá por 1980, Emilio Iranzo junto con Félix Sagastibelza, Mari Paz Mier del Castillo, Mercedes Montesinos, Pilar Olivares y Juan Sala fueron elegidos como comisión gestora en la primera reunión fundacional donde fuimos convocados todos los interesados en crear una nueva Sociedad científica que promoviera el avance de la Protección Radiológica en todos sus ámbitos de aplicación, divulgando su necesidad y beneficios. De aquí nació la SEPR, que quedó registrada oficialmente el 24 de Abril de 1980.

Cumplimos, por tanto, 25 años este 2005, durante los cuales se ha confirmado nuestra historia, tanto a nivel internacional como nacional, tanto a nivel científico como social. Como ejemplos significativos citemos los 600 socios, 10 congresos nacionales (de los cuales 2 de ellos a nivel internacional como regionales IRPA) y un congreso mundial. Ello significa estar entre las Sociedades científicas de la IRPA más activas.

Para celebrar este acontecimiento, la Junta Directiva creó un comité encargado de preparar una serie de actividades. Hasta el momento, las propuestas más importantes son:

### Comisión 25 Aniversario

*Leopoldo Arranz, Pío Carmena, José Gutiérrez, Eduardo Sollet, Ildefonso Irún, Paloma Marchena, Beatriz Robles, M<sup>º</sup> Teresa Macías*

- Edición de un libro conmemorativo que recopile todas las actividades desarrolladas por la Sociedad a lo largo de su historia presentando, en paralelo, breves apuntes o hitos históricos en España y en el mundo. Se repartirá a todos los socios junto con un CD con todas las publicaciones científicas de nuestra revista RADIOPROTECCIÓN.

- Exposición fotográfica de las actividades de la SEPR realizadas a lo largo de estos 25 años. Se presentará en el Congreso de Huelva.

- Elaboración de un logo específico conmemorativo del 25 aniversario.

- En el Congreso de Huelva, la conferencia magistral de inauguración versará sobre este tema y estará a cargo de un eminente periodista conocedor del sector. Asimismo se pretende reunir por primera vez a los 12 presidentes que ha tenido la Sociedad (Emilio, Ildefonso, Rafael, Benjamín, Pepe Vidal, Gustavo, Eduardo, Xavier, Ignacio, Pedro, Pepe Gutiérrez y yo mismo) y celebrar durante la cena oficial un emotivo acto en este sentido. Esperamos que nadie falle!

El camino recorrido nos da la confianza y la seguridad que en el presente, y sobre todo en el futuro, queda garantizado el cumplimiento de los objetivos por los cuales se fundó la SEPR. Y su solidez es la nuestra.

*Leopoldo Arranz*

**JORNADA CIENTÍFICA**

**“Protección ante Radiaciones No Ionizantes: Mitos y Realidades”**

**Espectro, Normativa y Protección**

El 15 de marzo ha tenido lugar, en el Salón de Actos del Hospital Ramón y Cajal, en Madrid, esta Jornada, organizada por la SEPR en colaboración con el propio hospital.

La mesa del Acto Inaugural estuvo presidida por el Dr. Amador Elena Córdoba, Director Gerente del Hospital Ramón y Cajal, el Dr. Francisco Marqués, Subdirector general de Salud pública, Alimentación y Consumo de la Comunidad de Madrid (en representación del Director General, Dr. Agustín Rivero), el Dr. José Gutiérrez, Presidente de la SEPR y Subdirector del Centro de Investigaciones Energético-Medioambientales y Tecnológica (CIEMAT), el Dr. Luis Guerra, Subdirector Médico de Docencia e Investigación, el Dr. Leopoldo Arranz, Jefe del Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica y la Dra. Jocelyne Leal, Jefe del Servicio de Investigación-Bioelectromagnetismo, estos tres últimos del

hospital Ramón y Cajal. La Clausura estuvo a cargo del Dr. Francisco Vargas, Subdirector General de Sanidad Ambiental y Salud Laboral del Ministerio de Sanidad y Consumo.

Intervinieron como ponentes:

- Dr. Alejandro Úbeda, Servicio Investigación-BEM, Hospital Ramón y Cajal
- Dr. Ing. M. Ángel Fernández, Rohde & Schwarz España.
- Dra. M. Ángeles Trillo, Servicio Investigación-BEM, Hospital Ramón y Cajal
- Dra. Ana Fernández Marcos, Asociación Española Contra el Cáncer.

El número de asistentes registrados fue de 260. La Jornada fue retransmitida por Internet y videoconferencia a 20 países de Iberoamérica. El interés de los países transatlánticos se hizo patente a través de su activa participación on-line durante la sesión de discusión sobre las conclusiones finales.

**RESUMEN DE LAS CONCLUSIONES**

1.- El conjunto de la evidencia disponible indica que los niveles de seguridad establecidos por ICNIRP, por la Unión Europea y por varios países o estados, como es el caso de España, contribuyen a salvaguardar la salud de los ciudadanos ante exposiciones residenciales u ocupacionales a campos electromagnéticos intensos. De acuerdo con esas agencias y comisiones internacionales, los actuales conocimientos de la física de la materia viva y el conjunto de la evidencia científica de la que disponemos no han aportado pruebas consistentes de la existencia de peligros para la población general derivados de exposiciones a campos de potencias o intensidades débiles, propias de ambientes residenciales u ocupacionales típicos.

2.- Las campañas de dosimetrías de RNI ambientales realizadas en España muestran que, en términos generales, los límites de exposición se cumplen holgadamente, tanto en ambientes residenciales como ocupacionales. Algunos trabajadores en ambientes muy específicos de la industria o de la sanidad pueden verse expuestos a niveles próximos a los límites. En estos casos se recomienda la minimización técnica de las exposiciones y la vigilancia sanitaria de los trabajadores.



Acto de apertura. En la mesa, de izquierda a derecha: Leopoldo Arranz, Jefe Servicio Radiofísica y Protección Radiológica, Hosp. Ramón y Cajal; Amador Elena, Director Gerente HRC; Francisco Marqués, Subdirector General de Salud Pública, Alimentación y Consumo CAM; José Gutiérrez, Presidente SEPR; Jocelyne Leal, Jefe Servicio BioElectroMagnetismo, Dpto. Investigación, HRC; Luis Guerra, Subdirector Médico Docencia e Investigación, HRC.



Alejandro Úbeda, (Coordinador de la jornada).



Francisco Marqués, (Subdirector General de Salud Pública, Alimentación y Consumo de la Comunidad de Madrid).



José Gutiérrez, (Presidente de la SEPR).

3.- Los portadores de dispositivos implantables activos deben estar informados de las circunstancias en las cuales el correcto funcionamiento de sus implantes pudiera verse comprometido a causa de interferencias producidas por algunas fuentes emisoras de campos intensos. También algunos equipos de uso médico pueden verse afectados en su funcionamiento por determinadas emisiones relativamente débiles. El correcto conocimiento de las características de compatibilidad electromagnética de esos aparatos permitirá a los responsables de su manejo y mantenimiento evitar la presencia en el ambiente de emisiones susceptibles de provocar disfunciones en el equipo.

4.- Es importante, en consecuencia, que la aplicación de las normativas conceda prioridad a la seguridad de los ciudadanos y garantice el estricto respeto a los límites establecidos. Al mismo tiempo, las autoridades responsables de la Gestión de Riesgos am-

bientales deberán mantener una actitud vigilante y preventiva, promocionar la investigación científica sobre los efectos de los campos electromagnéticos y estar al corriente de los nuevos avances en el conocimiento de la materia.

5.- Esas autoridades deben ser sensibles al interés de los ciudadanos acerca de las exposiciones a campos ambientales. Los ciudadanos deben ser informados adecuadamente para evitar tanto riesgos como alarmas injustificadas.

A este respecto, es necesario subrayar que los científicos de los organismos sanitarios y académicos tienen como función la investigación de los posibles efectos de las radiaciones no ionizantes sobre la salud y la diseminación de los resultados obtenidos. Tal diseminación debe contribuir al conocimiento científico y a la educación de los ciudadanos en la idea de que no existe el riesgo nulo y que el estudio de la respuesta humana a

agentes ambientales supone un proceso lento y costoso. No es función de esos científicos actuar ante la ciudadanía como avales de decisiones sobre políticas sanitarias o como comunicadores dedicados a reconducir problemas derivados de posibles percepciones de riesgo surgidas entre el público o los trabajadores.

6.- De hecho, una encuesta realizada por la Sociedad Española Contra el Cáncer revela que, a pesar de los esfuerzos de las autoridades sanitarias y académicas por informar a los ciudadanos, estos presentan en la actualidad un desconocimiento generalizado acerca de las Radiaciones No-Ionizantes y de sus efectos. Ese déficit de conocimiento es considerado en parte responsable del alto nivel de percepción de riesgos derivados de la exposición a RNI ambientales detectado en la población. En general, los españoles consideran que esas RNI pueden ser causa de patologías como el cáncer, dolor de cabeza o insomnio. Eso determina una actitud en la población claramente contraria a la instalación de antenas de telefonía móvil en las proximidades de sus domicilios. Sin embargo, esa percepción de riesgos no parece ser un elemento disuasorio de la utilización doméstica de equipos generadores de RNI (hornos de microondas o teléfonos móviles), hacia los cuales el beneficio recibido supera significativamente al riesgo percibido.

7.- Estas conclusiones no deben ser consideradas definitivas, sino abiertas a futuras modificaciones basadas en la ampliación del conocimiento a través de nueva evidencia científica.

Alejandro Úbeda  
(Coordinador de la Jornada)



Rueda de prensa. De izquierda a derecha Jocelyne Leal, Alejandro Úbeda, Mª Ángeles Trillo y Leopoldo Arranz.

# Efectos no dirigidos de la radiación ionizante: Implicaciones para la protección radiológica

John B. Little, MD.

Laboratory of Radiobiology. Harvard School of Public Health.  
665 Huntington Avenue, Boston, MA 02115 USA.

Traducido por Almudena Real. CIEMAT.

## RESUMEN

Se acepta de forma generalizada que el daño al ADN es el evento crítico en células irradiadas y que las roturas de la doble cadena del ADN son las principales lesiones responsables de los efectos biológicos de la radiación ionizante. Esto ha llevado al paradigma, mantenido durante mucho tiempo, de que estos efectos, ya sean citotoxicidad, mutagénesis o transformación maligna, ocurren en las células irradiadas como consecuencia del daño que sufren en su ADN. Sin embargo, en la última década se han ido acumulando evidencias que indican que la radiación puede inducir efectos que no están dirigidos a la célula irradiada en sí misma. En este trabajo de revisión, se describirán dos "efectos no dirigidos". El primero, la inestabilidad genómica inducida por radiación, es un fenómeno por el que se transmiten señales a la progenie de la célula irradiada durante muchas generaciones, llevando a la aparición de efectos genéticos tales como mutaciones o aberraciones cromosómicas que aparecen en los descendientes lejanos de la célula irradiada. Los segundos, los "efectos circunstantes" (más conocidos por su nombre inglés "bystander effects") son un fenómeno por el que las células irradiadas transmiten señales de daño a células no irradiadas de una población mixta, lo que lleva a que aparezcan efectos genéticos en estas células "circunstantes" que no han recibido exposición a radiación. El modelo descrito en este trabajo implica cultivos densos en monocapa expuestos a muy bajas fluencias de partículas alfa. Se discuten las potenciales implicaciones de estos dos fenómenos en el análisis del riesgo para la población humana derivado de la exposición a niveles bajos de radiación ionizante.

## INTRODUCCIÓN.

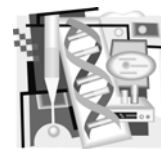
La radiación ionizante tiene muchas características únicas como mutágeno y carcinógeno. Éstas derivan de su capacidad para penetrar en las células y los tejidos y de depositar energía en ellos en forma de ionizaciones; es de-

cir, produciendo la eyección de electrones orbitales en átomos o moléculas. Este evento puede llevar a un daño irreversible en la molécula involucrada, o los radicales libres resultantes (un átomo o molécula que lleva un electrón desapareado) pueden iniciar una cadena de reacciones químicas

mediada por el agua celular, teniendo lugar el daño biológico final en otra molécula de la célula. La radiación ionizante es por tanto no selectiva en el daño que produce, depositando la energía al azar mediante ionizaciones en las células y los tejidos. A diferencia de la mayoría de

## ABSTRACT

It is widely accepted that damage to DNA is the critical event on irradiated cells, and that double strand breaks are the primary DNA lesions responsible for the biological effects of ionizing radiation. This has led to the long standing paradigm that these effects, be they cytotoxicity, mutagenesis or malignant transformation, occur in irradiated cells as a consequence of the DNA damage they incur. Evidence has been accumulating over the past decade, however, to indicate that radiation may induce effects that are not targeted to the irradiated cells itself. Two "non-targeted effects" will be described in this review. The first, radiation-induced genomic instability, is a phenomenon whereby signals are transmitted to the progeny of the irradiated cell over many generations, leading to the occurrence of genetic effects such as mutations and chromosomal aberrations arising in the distant descendants of the irradiated cell. Second, the bystander effect, is a phenomenon whereby irradiated cells transmit damage signals to non-irradiated cells in a mixed population, leading to genetic effects arising in these "bystander" cells that received no radiation exposure. The model system described in this review involves dense monolayer cultures exposed to very low fluences of alpha particles. The potential implications of these two phenomena for the analysis of the risk to the human population of exposure to low levels of ionising radiation is discussed.



agentes químicos, los efectos de la radiación no son específicos de un órgano. Su toxicidad no depende de la absorción, secreción o localización dentro del cuerpo. No depende de la presencia de sitios de unión específicos o receptores en las células, ni de mecanismos de activación o detoxificación comunes a agentes químicos genotóxicos.

La radiación ionizante también tiene características únicas como agente genotóxico en términos del daño en el ADN que produce. La mayoría de los carcinógenos y mutágenos químicos producen daño específico en las bases del ADN, con frecuencia como consecuencia de la formación de aductos en el ADN o productos de la alquilación. Éste también es el caso para la radiación ultravioleta. Dichos daños en las bases son restaurados por procesos metabólicos de reparación por escisión de nucleótidos o bases, mediante los cuales la base dañada es cortada y re-sintetizada usando la cadena complementaria de ADN como molde. Si bien dichos daños pueden llevar a mutaciones, debido a una reparación poco precisa, el daño de las bases no es muy citotóxico para las células y parece jugar un papel menor en la mutagénesis inducida por radiación ionizante [1]. Por ejemplo, una exposición a radiación ultravioleta de 254 nm que mata el 63% de las células (D37) produciría aproximadamente 400.000 dímeros de pirimidina en cada célula, mientras que para un nivel similar de muerte celular, la radiación ionizante sólo induciría 40 roturas de doble cadena de ADN.

En la actualidad se considera que la rotura de doble cadena (DSB, siglas del inglés "Double Strans Break") es la lesión de ADN característica responsable de los efectos biológicos de la ra-

diación ionizante [1, 2]. En algunos sistemas experimentales se ha estimado que una única DSB no reparada puede llevar a una parada del ciclo de división celular [3, 4], mientras que una DSB compleja en un gen específico tiene una alta probabilidad de producir una mutación en ese gen [5]. Las roturas de doble cadena pueden producirse a partir de roturas de cadena sencilla (SSB, siglas del inglés "Single Strand Break") opuestas, originadas bien por ionización al azar o por la acción de radicales libres que producirían la rotura en una sola hebra. Se ha estimado que las DSB pueden ocurrir a partir de SSB que acontezcan en hebras opuestas, a una distancia de aproximadamente 13 pares de bases entre ellas. Sin embargo, en la actualidad hay evidencias considerables que indican que la mayoría de las DSB son consecuencia de la naturaleza específica de la deposición y distribución de energía de las ionizaciones causadas por la radiación en el ADN. Esto da lugar a lo que se ha denominado "daño agrupado" ("clustered damage"), múltiples lesiones en el ADN asociadas íntimamente incluyendo roturas de cadena sencilla y daño en bases [1, 6]. Dicho daño agrupado ocurre tanto tras dosis bajas como tras dosis altas de radiación y tiene una alta probabilidad de producir roturas de doble cadena de ADN complejas que serán difíciles de reparar con precisión por la célula mediante los procesos metabólicos de reparación de ADN [6].

### **Procesos de reparación del ADN.**

En la pasada década ha habido un intenso interés en los procesos metabólicos por los que las células reparan el daño en el ADN, específicamente las

roturas de doble cadena (DSB). Se ha evidenciado que las células de mamíferos poseen complejas rutas enzimáticas para el reconocimiento, transmisión de señales y reparación de las DSB en el ADN. Una descripción detallada de estas rutas está por encima de los objetivos del presente trabajo. La proteína ATM ("Ataxia Telangiectasia Mutated") juega un papel central en los procesos de reconocimiento del daño [7] tanto por detectar las DSB y sufrir una rápida autofosforilación que la convierte en un monómero activo [8] lo que lleva a la fosforilación de la histona H2AX y la consiguiente señal a toda una serie de sensores de transducción de señal que se encuentran después en la secuencia de ADN [9], como por estar implicada tanto en la recombinación homóloga como en la unión de extremos no-homólogos (NHEJ, siglas del inglés "Non-Homologous End Joining"), estando ambos mecanismos específicamente asociados a la reparación de las DSB [10]. La reparación NHEJ ocurre durante todo el ciclo de división celular, mientras que la recombinación homóloga tiene lugar principalmente en células que se encuentran en la fase S tardía y G2 del ciclo de división celular [11]. Otras proteínas implicadas son las proteínas de susceptibilidad al cáncer de mama BRCA1 y BRCA2, la última está especialmente asociada con la recombinación homóloga, así como modificadores de la topología del ADN incluyendo las helicasas BLM ("Bloom's Síndrome") y WRN ("Wester's Síndrome").

La ruta de reparación NHEJ involucra a un grupo específico de proteínas, los complejos ADN-PK, que reconocen extremos rotos y catalizan su unión [12, 13]. Esta unión ocurre con poca o sin que sea necesaria homología en la

secuencia del ADN. El complejo ADN-PK consiste en la subunidad catalítica ADN-TKcs y dos proteínas llamadas Ku70 y Ku80. Mientras que los mecanismos moleculares por los que estas proteínas producen la unión de los extremos rotos no se entienden por completo, evidencias recientes sugieren que la ADN-TKcs sufre autofosforilación en respuesta al daño en el ADN y colocaliza con H2AX [14]. La forma fosforilada de la ADN-TKcs puede estar implicada en el reclutamiento de proteínas Ku70 y Ku80 en los extremos rotos, iniciando su reparación. Aunque la unión de los extremos rotos se lleva a cabo con eficacia por parte de la reparación NHEJ, este proceso no está libre de error. Las células de mamíferos incapaces de llevar a cabo la NHEJ son altamente sensibles a la inducción de mutaciones y aberraciones cromosómicas a gran escala por parte de la radiación ionizante.

### **EFFECTOS NO DIRIGIDOS DE LA RADIACIÓN.**

Todo lo comentado anteriormente apunta a la molécula de ADN como blanco crítico en la célula y a las DSB como la lesión crítica inducida por la radiación. En realidad, esto ha sido un paradigma aceptado durante varias décadas. Los primeros estudios con irradiadores de microhaces identificaron el núcleo de la células como un blanco importante para los efectos citotóxicos de la radiación [15] y estudios posteriores mostraron que la radiosensibilidad estaba fuertemente influenciada por los procesos de reparación del ADN [16]. La exposición a radiación confinada en la molécula de ADN por la incorporación del radionucleido Yodo-125 emisor de electrones Auger incorporado en la iododeoxiuridina, era

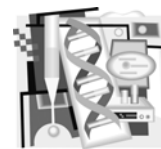
extremadamente citotóxico y mutagénico [5]. La intensa liberación de energía que tenía lugar a unos pocos pares de bases del sitio de decaimiento del Yodo-125 en el ADN producía roturas de doble cadena del ADN complejas, difíciles de reparar con precisión.

Una asunción corolaria que siguió a este paradigma fue que los efectos biológicos de la radiación en la célula, ya fueran citotoxicidad, mutaciones o transformación maligna, ocurrirían en las propias células irradiadas presumiblemente como consecuencia del daño en el ADN que habían sufrido. Sin embargo, en la última década se han ido acumulando evidencias que indican que éste no tiene porque ser siempre el caso. Se ha hecho evidente que la radiación puede inducir un tipo de inestabilidad genómica en células irradiadas que se transmite a su descendencia a lo largo de muchas generaciones de replicación celular, llevando a que se detecten tasas altas de efectos genéticos de tipo mutación o aberraciones cromosómicas en los descendientes lejanos de la célula irradiada. También se ha descubierto que las células irradiadas pueden transmitir señales de daño a células no irradiadas en una población mixta, lo que lleva a que tengan lugar dichos efectos genéticos en estas células "circunstantes" ("bystander") que no reciben exposición a radiación. Estos dos fenómenos han sido denominados efectos "no-dirigidos" de la radiación. En este trabajo la discusión se limitará a los efectos circunstantes observados en cultivos celulares en monocapa. También hay una extensa bibliografía sobre efectos que aparecen en células normales incubadas con medio condicionado procedente de células irradiadas, debido a factores liberados en dicho medio.

### ***Inestabilidad genómica inducida por radiación.***

Las primeras evidencias sobre este fenómeno se obtuvieron de unos estudios sobre la cinética de la transformación maligna inducida por radiación en células in vitro [17, 18]. Los focos de transformación parecían no derivar de una única célula dañada por la radiación, sino que parecía que la radiación inducía un tipo de inestabilidad en el 20-30 % de la población celular irradiada, que tenía el efecto de aumentar la probabilidad de que tuviera lugar un segundo evento de transformación celular. Este segundo evento era un evento raro e implicaba la transformación de uno o más de los progenitores de la célula originalmente irradiada después de muchas rondas de división celular. Este evento de transformación ocurría con una frecuencia constante por célula y por generación, y tenía las características de un evento mutagénico [18]. Estos hallazgos eran consistentes con la hipótesis de que la radiación induce inestabilidad genómica transmisible en células, la cual aumenta la tasa a la que aparece la transformación maligna u otros efectos genéticos en los descendientes de las células irradiadas después de muchas generaciones de replicación celular.

Esta hipótesis fue posteriormente confirmada para la inducción de mutaciones genéticas específicas [19, 20] y aberraciones cromosómicas [21]. Este fenómeno normalmente se estudia examinando la aparición de dichos efectos genéticos en poblaciones clonales derivadas de células únicas que sobreviven a la exposición a radiación. En términos de mutagénesis, aproximadamente el 10% de la población clonal derivada de la célula única irradiada



muestra un aumento significativo en la frecuencia de mutaciones que aparecen de forma espontánea, en comparación con poblaciones clonales derivadas de células no irradiadas [20, 22]. Esta tasa de mutación aumentada persistía durante aproximadamente 30 generaciones post-irradiación. El espectro estructural molecular de estas mutaciones que aparecen tardíamente se parece al de las mutaciones espontáneas ya que la mayoría son mutaciones puntuales [22, 23], indicando que aparecen por un mecanismo diferente al de las mutaciones inducidas directamente por rayos X, que son principalmente de tipo deleción. También se ha observado un aumento de la inestabilidad de minisatélites [24] y microsatélites [25] en la progenie de células irradiadas seleccionadas para una mutación en el locus timidin quinasa, lo que constituye una evidencia adicional de la aparición de una subpoblación de células genéticamente inestables dentro de la población irradiada. Es de interés el hecho de que la inestabilidad medida en las secuencias de minisatélites de células 10T1/2 de ratón transformadas con rayos X estaba marcadamente aumentada cuando las células eran crecidas in vivo, en comparación con su cultivo prolongado in vitro [26].

Un aumento en la frecuencia de aberraciones cromosómicas no clonales se describió por primera vez en descendientes clonales de células cepa hematopoyéticas de ratón examinadas 12-14 generaciones después de la exposición a radiación alfa [21]. Posteriormente se demostró inestabilidad cromosómica persistente inducida por radiación en diversos sistemas celulares [22, 27-32]. La susceptibilidad a inestabilidad cromosómica inducida por radiación varía significativamente

entre células procedentes de distintas cepas de ratón [31, 33] y se han observado diferencias similares en la susceptibilidad genética a inestabilidad cromosómica inducida por radiación en diferentes cepas de fibroblastos humanos diploides [34]. El hecho de que Dugan y Bedford [35] no encontraran evidencias de inducción de inestabilidad cromosómica en una cepa de fibroblastos humanos diploides normales puede estar relacionado con dichos factores genéticos [34]. Además, se ha descrito una reactivación retardada del p53 y una inducción persistente de especies reactivas del oxígeno en fibroblastos humanos normales, así como en células de fibrosarcoma humanas [37].

También se ha observado un aumento persistente en la tasa de muerte celular en poblaciones celulares muchas generaciones después de la irradiación [38-40]. Este fenómeno ha sido denominado en muchas ocasiones como "mutaciones letales" o "fallo reproductivo retardado", pero ha sido medido como una reducción en la capacidad de las células de unirse y formar colonias macroscópicas en un ensayo clásico de supervivencia clonogénica. En algunos sistemas celulares, se ha mostrado que este fenómeno está acompañado de un aumento en la tasa de muerte celular por apoptosis [40-42]. El fallo reproductivo persistente se ha asociado a la inestabilidad cromosómica [42] y a la transformación maligna [43, 44] y se han presentado evidencias que sugieren que el ADN es al menos uno de los blancos críticos en la iniciación de este fenómeno [45]. La inestabilidad era atenuada si se trataban las células irradiadas con captadores de radicales libres o permitiendo que el daño potencialmente letal fuera reparado, al mantener

las células en confluencia antes de analizar el desarrollo de inestabilidad cromosómica [46]. Se ha propuesto que el estrés oxidativo, producido tal vez como resultado de un aumento en la apoptosis independiente de p53, puede contribuir a la perpetuación del fenotipo de inestabilidad en esta población [42, 44].

Se ha descrito la transmisión de inestabilidad cromosómica in vivo en diversos modelos experimentales [47-50], aunque no en otros [51]. Las evidencias sobre inestabilidad transmisible en poblaciones humanas irradiadas son, a día de hoy, escasas [52, 53]. Mientras que se ha sugerido que la inestabilidad inducida en células cepa hematopoyéticas de ratón irradiadas con rayos X puede estar relacionada con la aparición del daño genético no-específico encontrado en las leucemias inducidas por radiación en estos ratones [54], otros trabajos de este laboratorio indican que la susceptibilidad a leucemia/linfoma inducida por radiación es generalmente un fenómeno separable de la sensibilidad a la inducción de inestabilidad genómica [55].

Un modelo interesante implica la inducción de tumores mamarios en ratón por radiación. Se encontró que la sensibilidad a la inducción de tumores era específica de la cepa y que correlacionaba con la inducción de inestabilidad cromosómica en células epiteliales mamarias irradiadas in vivo [50]. La inducción de dicha inestabilidad era dependiente de la dosis. Se mostró posteriormente que en la cepa de ratón sensible, propensa al desarrollo de cáncer (BALB/c), tenía lugar una expresión disminuida de la proteína de reparación del ADN ADN-PKcs, lo que llevaba a que la unión de los extremos de las roturas de doble cadena inducidas por la radiación fuera ineficaz

[56]. Este descubrimiento es de interés en relación con la evidencia de la implicación de los telómeros cromosómicos en la sensibilidad a radiación y en la inestabilidad genómica [57]. Se ha descrito que la ADN-PKcs juega un papel esencial en la función y en la pérdida de los telómeros [58, 59]. En células deficientes en ADN-PKcs tiene lugar una alta frecuencia de fusiones teloméricas [59]; la pérdida de los telómeros ha sido asociada con el desarrollo de inestabilidad cromosómica en células cancerígenas [60]. Por tanto, la inestabilidad transmisible puede ser una consecuencia de ciclos sucesivos de "unión-rotura-fusión", como resultado de la pérdida de los telómeros.

### **Los efectos circunstantes en poblaciones de células irradiadas.**

El modelo experimental utilizado en los estudios sobre los efectos circunstantes que van a ser discutidos en este trabajo implica la exposición de cultivos densos en monocapa de células de mamíferos a muy bajas fluencias de partículas alfa, fluencias con las que únicamente una fracción muy pequeña del núcleo de una población celular será atravesado por una partícula alfa. Esto puede llevarse a cabo con irradiación procedente de una fuente externa de partículas alfa [61] o utilizando irradiadores de precisión con microhaces con los que células específicas pueden ser irradiadas [62-64]. La primera evidencia de este fenómeno se obtuvo de estudios de inducción de intercambio de cromátidas hermanas (SCE) en cultivos en monocapa expuestos a fluencias muy bajas de partículas alfa generadas por una fuente externa [65]. Se observó un aumento en la frecuencia del SCE en el 20-40% de las células ex-

puestas a fluencias con las que sólo entre 1/1.000 y 1/100 núcleos celulares eran atravesados por una partícula alfa. Este hallazgo fue posteriormente confirmado y se presentaron evidencias que sugerían que en el fenómeno estaba implicada la secreción de citoquinas u otros factores por parte de las células irradiadas lo que conducía a una activación del metabolismo oxidativo en células circunstantes [66, 67].

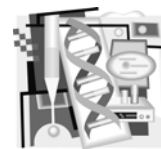
También se ha descrito un aumento de la frecuencia de mutación de genes específicos en células circunstantes, en una población celular expuesta a fluencias muy bajas de partículas alfa [68]. Como resultado de ello, la frecuencia de mutación inducida por trayectoria de partícula alfa aumenta a fluencias bajas, a las que tanto las células circunstantes como las directamente irradiadas tienen el riesgo de inducción de mutaciones. Esto lleva a una hiperlinealidad de la curva dosis respuesta en la región de dosis bajas, y por tanto a un mayor efecto que el previsto por la extrapolación lineal desde dosis altas. Estudios con diversas fuentes de irradiación con microhaces han proporcionado evidencias de una frecuencia aumentada de formación de micronúcleos, muerte celular y apoptosis en células circunstantes [64, 69-71], así como un aumento en la frecuencia de mutaciones [72, 73] y transformación maligna [74].

En células circunstantes de cultivos en monocapa también tienen lugar cambios en la expresión génica; los niveles de expresión de p53, p21Waf1, CDC2, ciclina-B1 y rad51 estaban modulados de forma significativa en células no irradiadas de una población celular diploide humana confluyente expuesta a fluencias muy bajas de partículas alfa [75]. Estos experimentos se realizaron aplicando métodos de "wes-

tern blot" y técnicas de tinción con inmunofluorescencia in situ utilizando microscopía confocal; a pesar de que únicamente el 1-2% de los núcleos habían sido atravesados por una partícula alfa, agrupaciones de células mostraron una expresión aumentada de p21Waf1. Este fenómeno implicaba comunicación célula-célula mediante uniones "gap" [75, 76], algo que también se ha visto para formación de micronúcleos [77] y mutaciones [73]. Parece ser que la exposición a radiación por sí misma puede aumentar la comunicación intercelular, tal y como lo evidencia el aumento en la expresión de conexina 43 [78]. Se obtuvieron evidencias sobre daño en el ADN en células circunstantes al examinar la formación de micronúcleos, una medida del daño en el ADN; la observación de que p53 era fosforilado en la serina 15 apoya el que la estimulación de la ruta p53 de respuesta al daño en células circunstantes sea una consecuencia de este daño en el ADN [76].

Sin embargo, el daño en el ADN que ocurre en células circunstantes parece diferir del inducido en células irradiadas directamente. Las mutaciones inducidas en células directamente irradiadas son principalmente deleciones de genes parciales o totales, mientras que el 90% de las que aparecían en células circunstantes eran mutaciones puntuales [79]. Este descubrimiento es consistente con la evidencia de que el metabolismo oxidativo está estimulado en células circunstantes [67, 80] y ha llevado a postular la hipótesis de que las mutaciones puntuales son el resultado del daño oxidativo en las bases que tiene lugar en las células circunstantes [79]. Un mecanismo similar ha sido propuesto para la observación de que la exposición localizada en el citoplasma con un irradiador de microhaces





lleva a un aumento significativo en la frecuencia de mutaciones puntuales, que parece implicar la generación de especies reactivas del oxígeno [81].

Las células circunstantes deficientes en la ruta de reparación del ADN NHEJ, incluyendo líneas celulares de ratones deficientes en Ku80, Ku70 y ADN-PKcs, son extremadamente sensibles a la inducción de mutaciones y aberraciones cromosómicas [82, 83]. Las mutaciones en estas células circunstantes con rutas de reparación deficientes eran principalmente el resultado de deleciones de genes parciales o totales [83], mientras que las observadas en células circunstantes sin dichas deficiencias eran predominantemente mutaciones puntuales. La marcada sensibilidad de las células circunstantes deficientes en reparación a la inducción de mutaciones y aberraciones cromosómicas a gran escala, puede ser la consecuencia de roturas de doble cadena de ADN no reparadas, que ocurren como resultado de daño agrupado originado por lesiones oxidativas opuestas y roturas de cadena sencilla.

En estudios anteriores se observó que la irradiación con partículas alfa podía inducir la generación intracelular de especies reactivas del oxígeno (ROS) incluyendo el anión superóxido y el peróxido de hidrógeno [67]. Se examinó el papel del estrés oxidativo en la modulación de la transducción de señales y en la formación de micronúcleos en células circunstantes en poblaciones en monocapa confluentes de células humanas diploides expuestas a bajas fluencias de partículas alfa [80, 84]. Los resultados apoyan la hipótesis de que el superóxido y el peróxido de hidrógeno producido por enzimas oxidasa que contienen flavina, median la activación de diversas rutas de señalización inducibles por estrés, así como

la formación de micronúcleos, en células circunstantes. Estos incluyen la ruta p53 de respuesta al daño, así como la ruta de señales de la familia de quinasas MAP. También se ha descrito que el óxido nítrico puede iniciar rutas de transducción de señal intracelular influyendo la respuesta circunstante frente a la radiación [85, 86]. Por lo tanto, parece que las ROS pueden ser los primeros mediadores de la respuesta circunstante, recordando el efecto asociado con la inestabilidad genómica inducida por radiación [44, 46]. La activación en células circunstantes de las quinasas MAP y de sus efectores situados después en la secuencia de ADN [80], es de particular interés en lo que se refiere a la observación de que la señalización a nivel de la membrana está implicada en el efecto circunstante en cultivos monocapa [87].

En conjunto, estos resultados apoyan la hipótesis de que en células circunstantes en cultivos de monocapa tiene lugar una activación del metabolismo oxidativo. Esta conclusión es consistente con los hallazgos realizados en otros sistemas [64, 88, 89] y sugieren que el metabolismo oxidativo está íntimamente implicado en la respuesta circunstante para mutaciones y aberraciones cromosómicas. Más del 90% de las mutaciones que ocurren en células circunstantes fueron mutaciones puntuales [79], tal y como clásicamente se ha asociado con daño oxidativo en las bases. Las ROS pueden inducir roturas de doble cadena de ADN, particularmente como resultado de lesiones oxidativas opuestas y roturas de cadena sencilla. Sin embargo, la mayoría de estas roturas de doble cadena deberían ser restauradas en las células normales por reparación recombinacional, lo que lleva a que el daño oxidativo en las bases sea la principal

lesión mutagénica. Sin embargo, cuando la ruta de reparación NHEJ está inactivada la reparación de las DSB está comprometida observándose un aumento marcado en los efectos circunstantes; es decir, muchas más células circunstantes de la población son susceptibles a la inducción de estos efectos genéticos.

Esta hipótesis es consistente con el hallazgo de que las mutaciones que ocurren en células circunstantes deficientes en reparación son principalmente deleciones parciales o totales de genes [83], como resultaría de que las DSB no fueran reparadas o se repararan de forma errónea. El marcado aumento en la fracción de células con grandes aberraciones cromosómicas también es consistente con estos hallazgos [82]. El relativamente pequeño efecto circunstante observado en células normales para mutagénesis y aberraciones cromosómicas es por tanto una consecuencia del daño oxidativo en el ADN. Sin embargo, cuando las células circunstantes de la población no pueden reparar las roturas de doble cadena en el ADN, éstas se vuelven mucho más sensibles a la inducción de estos efectos genéticos tal y como se manifiesta por mutaciones de tipo deleción y grandes aberraciones cromosómicas.

Los resultados de todos estos estudios claramente indican que las señales de daño pueden transmitirse de células irradiadas a células no irradiadas. En cultivos monocapa confluentes, este fenómeno implica comunicación célula-célula mediada por las uniones "gap" y parece implicar tanto la inducción de especies reactivas del oxígeno como la activación de rutas de transducción de señal extra nucleares. En células circunstantes pueden ocurrir múltiples efectos biológicos incluyendo muerte

celular, inducción de mutaciones y aberraciones cromosómicas y la regulación de la expresión génica. Algunas evidencias sugieren que la regulación de la ruta p53 de respuesta al daño puede ser central en este fenómeno. Finalmente, estudios preliminares con modelos de co-cultivo tanto *in vitro* [90-92] como *in vivo* [93], así como con modelos de trasplantes de tejidos [94] y un sistema de trasplante de células cepa de médula ósea de ratón [49], sugieren que los efectos circunstanciales pueden ocurrir *in vivo*.

### **IMPLICACIONES PARA LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA.**

Loeb y colaboradores [95] y otros han postulado que de forma temprana en el proceso carcinogénico puede tener lugar una mutación en un gen que es importante para mantener la estabilidad genómica, lo que produce un linaje celular con fenotipo mutador. Este fenotipo aumentaría la frecuencia con la que aparecen mutaciones espontáneas en estas células, y por tanto facilita la acumulación del número de eventos genéticos necesarios para que se produzca un cáncer invasivo. Este tipo de ejemplo implica al cáncer de colon no-poliposis hereditario que está asociado con un defecto en la línea germinal en la reparación "mismatch" del ADN. Si bien la inestabilidad genómica es una propiedad de las células tumorales, la mayoría de cánceres no han sido asociados a un defecto específico en la reparación del ADN.

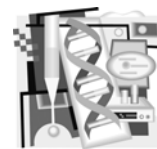
Por tanto, el hallazgo de que la radiación puede inducir por sí misma un fenotipo mutador ha despertado un considerable interés. Sugeriría que el evento inicial inducido por radiación puede ser un evento frecuente que afecte hasta el 10-20% de la pobla-

ción, en lugar de un evento mutagénico poco común. Este nivel aumentado de inestabilidad que puede ser transmitido a lo largo de muchas generaciones de replicas celulares aumentaría por tanto la tasa a la que aparecerían múltiples eventos genéticos importantes para el desarrollo de cáncer en la población celular. Sin embargo, sigue sin conocerse el grado en el que este fenómeno inducido por radiación puede ser importante en la carcinogénesis. El hecho de que parece saturarse a dosis relativamente bajas (del orden de 10-50 cGy) implica que podría influir la extrapolación a efectos de dosis bajas. Claramente es necesario realizar más investigaciones para determinar los mecanismos implicados en la inestabilidad genómica inducida por radiación, en términos tanto del evento iniciador como de la forma por la que los efectos son transmitidos durante muchas generaciones de replicación celular, antes de que se puedan clarificar sus implicaciones en la evaluación del riesgo carcinogénico de exposiciones a dosis y tasas de dosis bajas de radiación ionizante.

Otra área en la que este fenómeno puede ser de significación implica los potenciales efectos transgeneracionales de la irradiación. La suma de las evidencias disponibles sugiere que dicha inestabilidad es inducida en células germinales de padres irradiados y se transmite a la descendencia que nace de ellos [96]. Si, por tanto, la exposición a niveles bajos de radiación ionizante induce el fenotipo de inestabilidad en células germinales de la descendencia de padres irradiados es enteramente factible que esta inestabilidad pudiera aumentar su susceptibilidad al cáncer o a otros efectos genéticos. Por ejemplo, Pils y col. [97] describieron que la inestabilidad genó-

mica manifestada por efectos letales o teratogénicos puede transmitirse a dos generaciones sucesivas de la descendencia en ratón tras irradiación del cigoto, mientras que Niwa y Kominami [98] y Dubrova y sus colegas [99, 100] presentaron evidencias de inestabilidad en la línea germinal transmisible en un loci de minisatélite de ratón. Hay evidencias experimentales preliminares que sugieren que puede existir una susceptibilidad aumentada a la inducción de tumores en la descendencia de ratones irradiados [101, 102]; la inducción de inestabilidad genómica transmisible por radiación en células germinales proporcionaría un mecanismo para dichos efectos transgeneracionales.

El efecto circunstancial tiene claras implicaciones en términos de exposiciones humanas a muy bajas fluencias de radiación particulada de alta LET, tales como las partículas alfa del radón medioambiental o los rayos cósmicos en el espacio que son densamente ionizantes [103]. En el caso del radón, por ejemplo, sólo una pequeña fracción de las células epiteliales bronquiales de una persona, el presunto blanco para cáncer de pulmón, será afectada cada año por una partícula alfa procedente de la exposición residencial a radón. En el pasado, se ha asumido que el riesgo genético o carcinogénico estaba directamente relacionado con el número de núcleos atravesados por una partícula alfa, lo que llevaba a una relación dosis respuesta lineal. La evidencia de que las células irradiadas pueden transmitir señales de daño a células vecinas no irradiadas que dan lugar a alteraciones genéticas en estas células "circunstanciales" invalidaría esta asunción. Más bien, sugeriría que la curva dosis respuesta sería no lineal a dosis medias bajas dando lugar a un



mayor efecto que el previsto en base a la dosis recibida por células individuales a fluencias bajas de partículas alfa.

La evidencia sobre la convergencia de estos fenómenos también es de interés [104, 105]. Estudios realizados con ensayos tanto *in vitro* como *in vivo* han mostrado, por ejemplo, que la inestabilidad genómica transmisible puede aparecer en células circunstantes [106, 107]. Defectos en la ruta de reparación NHEJ se han asociado tanto con inestabilidad genómica inducida por radiación [56] como con efectos circunstantes [82]. Se ha descrito que medio condicionado de ciertos (pero no todos) clones inestables recogidos muchas generaciones celulares después de la irradiación son altamente citotóxicos para células no irradiadas [108]. Finalmente, el estrés oxidativo manifestado por niveles aumentados de especies reactivas del oxígeno ha sido implicado en ambos fenómenos.

Cuando se consideran en conjunto, los resultados emergentes sugieren que el riesgo de exposición a niveles bajos de radiación ionizante sigue siendo incierto; una simple extrapolación de los efectos a dosis altas puede no estar siempre justificada. En algunos casos, tales como la inducción de mutaciones por exposición a fluencias muy bajas de partículas de alta LET, o como se ha descrito para los efectos citotóxicos de dosis muy bajas de rayos X [109], el efecto puede ser mayor que el previsto por una extrapolación lineal desde dosis altas. Por otro lado, ciertos estudios de transformación maligna han revelado un efecto reducido para dosis muy bajas [110, 111]. Sin embargo, estos descubrimientos en su conjunto implican que los efectos biológicos de la radiación en poblaciones celulares pueden no estar restringidos a la respuesta

de células individuales al daño que éstas reciben en su ADN, sino más bien que el tejido responde como un todo. Es necesario un mejor entendimiento de los mecanismos implicados en estos fenómenos, hasta que punto son activos *in vivo*, y como están interrelacionados antes de que puedan ser evaluados como factores que han de incluirse en la estimación del riesgo potencial para una población humana expuesta a niveles bajos de radiación ionizante.

### Agradecimientos

Apoyado por la Ayuda de Investigación DE-FG02-98ER62685 del Departamento de Energía de los EE.UU.

### Referencias

1. Ward J.F. *Radiat. Res.* 142: 362-368; 1995.
2. Goodhead D.T. *Int. J. Radiat. Biol.* 65: 7-17; 1994.
3. Huang L.C., Clarkin K.C., Wahl G.M. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 93: 4827-4832; 1996.
4. Lee S.E., Pellicoli A., Vaze M.B., Sugawara N., Malkova A., Foiani M., Haber J.E. *Mol Cell Biol.* 23: 8913-8923; 2003.
5. Liber H.L., LeMotte P.K., Little J.B. *Mutat. Res.* 111: 387-404; 1983.
6. Sutherland B.M., Bennett P.V., Sidorkina O., Laval J. *Biochemistry* 39: 8026-8031; 2000.
7. Shiloh Y. *Nat. Rev. Cancer* 3: 155-168; 2003.
8. Bakkenist C.J., Kastan M.B. *Nature* 421: 499-506; 2003.
9. Petrini J.H.J., Stracker T.H. *Trends in Cell Biology* 13: 458; 2003.
10. Haber J.E. *Cell* 95: 583-586; 1998.
11. Rothkamm K., Krüger I., Thompson L.H., Löbrich M. *Molec. Cell. Biol.* 23: 5706-5715; 2003.
12. Lee S.H., Kim C.H. *Mol. Cells* 13: 159-166; 2002.
13. Yang J., Yu Y., Hamrick H.E., Duerksen-Hughes P.J. *Carcinogenesis* 24: 1571-1580; 2003.
14. Chan D.W., Chen B.P., Prithivirajasingh S., Kurimasa A., Story M.D., Qin J., Chen D.J. *Genes Dev.* 16: 2333-2338; 2002.
15. Zirkle R.E., Bloom W. *Science* 117: 487-496; 1953.

16. Hanawalt P.C., in *DNA Repair Processes: An Overview*, edited by W.W. Nichols, D.G. Murphy, Symposia Specialists, Miami, FL, 1977, pp. 1-9.
17. Kennedy A.R., Fox M., Murphy G., Little J.B. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 77: 7262-7266; 1980.
18. Kennedy A.R., Cairns J., Little J.B. *Nature* 307: 85-86; 1984.
19. Little J.B., Gorgojo L., Vetrovs H. *Int. J. Radiat. Onco. Biol. Phys.* 19: 1425-1429; 1990.
20. Chang W.P., Little J.B. *Int. J. Radiat. Biol.* 60: 483-496; 1991.
21. Kadhim M.A., MacDonald D.A., Goodhead D.T., Lorimore S.A., Maarsden S.J., Wright E.G. *Nature* 355: 738-740; 1992.
22. Little J.B., Nagasawa H., Pfenning T., Vetrovs H. *Radiat. Res.* 148: 299-307; 1997.
23. Grososky A.J., Parks K.K., Gier C.R., Nelson S.L. *Molec. Cell. Biol.* 16: 6252-6262; 1996.
24. Li C.Y., Yandell D.W., Little J.B. *Molec. Carcinogen.* 5: 270-277; 1992.
25. Romney C.A., Paulauskis J.D., Little J.B. *Mutat. Res.* 478: 97-106; 2001.
26. Paquette B., Little J.B. *Cancer Res.* 54: 3173-3178; 1994.
27. Sabatier L., Dutrillaux B., Martin M.B. *Nature* 357: 548; 1992.
28. Holmberg K., Fair S., Johansson A., Lambert B. *Mutat. Res.* 286: 321-330; 1993.
29. Marder B.A., Morgan W.F. *Mol. Cell Biol.* 13: 6667-6677; 1993.
30. Kadhim M.A., Lorimore S.A., Townsend K.M., Goodhead D.T., Buckle V.J., Wright E.G. *Int. J. Radiat. Biol.* 67: 143-148; 1998.
31. Ponnaiya B., Cornforth M.N., Ullrich R.L. *Radiat. Res.* 147: 121-125; 1997.
32. McIlrath J., Lorimore S.A., Coates P.J., Wright E.G. *Int. J. Radiat. Biol.* 79: 27-34; 2003.
33. Watson G.E., Lorimore S.A., Clutton S.M., Kadhim M.A., Wright E.G. *Int. J. Radiat. Biol.* 69: 175-182; 1996.
34. Kadhim M.A., Marsden S.J., Wright E.G. *Int. J. Radiat. Biol.* 73: 143-148; 1998.
35. Dugan L.C., Bedford J.S. *Radiat. Res.* 159: 301-311; 2003.
36. Rugo R.E., Secretan M.B., Schiestl R.H. *Radiat. Res.* 158: 210-219; 2002.
37. Suzuki K., Yokoyama S., Waseda S., Kodama S., Watanabe M. *Cancer Res.* 63: 936-941; 2003.
38. Seymour S.B., Mothersill C., Alper T. *Int. J. Radiat. Biol.* 50: 167-179; 1986.
39. Chang W.P., Little J.B. *Int. J. Radiat. Biol.* 60: 483-496; 1991.
40. Belyakov O.V., Prise K.M., Trott K.R., Michael B.D. *Int. J. Radiat. Biol.* 75: 985-993; 1999.
41. Jamali M., Trott K.R. *Int. J. Radiat. Biol.* 70: 705-709; 1996.
42. Limoli C.L., Hartmann A., Shepard L.,

- Yang C.-R., Boothman D.A., Bartholomew J., Morgan W.F. *Cancer Res.* 58: 3712-3718; 1998.
43. Lewis D. A., Mayhugh B.M., Qin Y., Trott K., Mendonca M.S. *Radiat. Res.* 156 : 251-258; 2001.
44. Redpath J.L., Gutierrez M. *Int. J. Radiat. Biol.* 77: 1081-1085; 2001.
45. Limoli C.L., Corcoran J.J., Milligan J.R., Ward J.F., Morgan W.F. *Radiat. Res.* 151: 677-685; 1999.
46. Limoli C.L., Kaplan M.I., Giedzinski E., Morgan W.F. *Free Radic. Biol. Med.* 31: 10-19; 2001.
47. Pampfer S., Streffer C. *Int. J. Radiat. Biol.* 55: 85-92; 1989.
48. Watson G.E., Lorimore S.A., Wright E.G. *Cancer Res.* 60: 5608-5611; 2000.
49. Watson G.E., Pocock D.A., Papworth D., Lorimore S.A., Wright E.G. *Int. J. Radiat. Biol.* 77: 409-417; 2001.
50. Ullrich R.L., Davis C.M. *Radiat. Res.* 152: 170-173; 1999.
51. Bouffler S.D., Haines J.W., Edwards A.A., Harrison J.D., Cox R. *Radiat. Res.* 155: 345-352; 2001.
52. Nakanishi M., Tanaka K., Takahashi T., Kyo T., Dohy H., Fujiwara M., Kamada N. *Int. J. Radiat. Biol.* 77: 687-694; 2001 and *Comments Int. J. Radiat. Biol.* 78: 441-445; 2002.
53. Whitehouse C.A., Tawn E.J. *Radiat. Res.* 156: 467-475; 2001.
54. Macdonald D., Boulton E., Ocock D., Goodhead D., Kadhim M., Plumb M. *Int. J. Radiat. Biol.* 77: 1023-1031; 2001.
55. Boulton E., Cleary H., Papworth D., Plumb M. *Int. J. Radiat. Biol.* 77: 21-29; 2001.
56. Okayasu R., Suetomi K., Yu Y., Silver A., Bedford J.S., Cox R., Ullrich R.L. *Cancer Res.* 60: 4342-4345; 2000.
57. Bouffler S.D., Blasco M.A., Cox R., Smith P.J. *Int. J. Radiat. Biol.* 77: 995-1005; 2001.
58. Bailey S.M., Cornforth M.N., Kurimasa A., Chen D.J., Goodwin E.H. *Science* 293: 2462-2465; 2001.
59. Gilley D., Tanaka H., Hande M.P., Kurimasa A., Li G.C., Oshimura M., Chen D.J. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98: 15084-15088; 2001.
60. Fouladi B., Sabatier L., Miller D., Pottier G., Murnane J.P. *Neoplasia* 2: 540-554; 2000.
61. Metting N.F., Koehler A.M., Nagasawa H., Nelson J. M., Little J.B. *Health Physics* 68: 710-715; 1995.
62. Hei T.K., Wu L.J., Liu S-X, Vannais D., Waldren C.A., Randers-Pehrson G. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 94: 3765-3770; 1997.
63. Prise K.M., Belyakov O.V., Folkard M., Michael B.D. *Int. J. Radiat. Biol.* 74: 793-798; 1998.
64. Shao C., Furusawa Y., Kobayashi Y., Funayama T., Wada S. *FASEB J.* 17: 1422-1427; 2003.
65. Nagasawa H., Little J.B. *Cancer Res.* 52: 6394-6396; 1992.
66. Despande A., Goodwin E.H., Bailey S.M., Marrone B., Lehnert B. *Radiat. Res.* 152: 552-557; 1996.
67. Narayanan P., Goodwin E., Lehnert B. *Cancer Res.* 57: 3963-3971; 1997.
68. Nagasawa H., Little J.B. *Radiat. Res.* 152: 552-557; 1999.
69. Prise K.M., Folkard M., Malcolmson A.M., Pullar C.H., Schettino G., Bowey A.G., Michael B.D. *Adv. Space Res.* 25: 2095-2101; 2000.
70. Belyakov O.V., Malcolmson A.M., Folkard M., Prise K.M., Michael B.D. *Br. J. Cancer* 84: 767-774; 2003.
71. Schettino G., Folkard M., Prise K.M., Vojnovic B., Held K.D., Michael B.D., *Radiat. Res.* 160: 505-511; 2003.
72. Zhou H., Randers-Pehrson G., Waldren C.A., Vannais D., Hall E.J., Hei T.K. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 97: 2099-2104; 2000.
73. Zhou H., Suzuki M., Randers-Pehrson G., Vannais D., Chen G., Trosko J.E., Waldren C.A., Hei T.K. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98: 14410-14415; 2001.
74. Sawant S.G., Randers-Pehrson G., Geard C.R., Brenner D.J., Hall E.J. *Radiat. Res.* 155: 397-401; 2001.
75. Azzam E.I., de Toledo S.M., Gooding T., Little J.B. *Radiat. Res.* 150: 497-504; 1998.
76. Azzam E.I., de Toledo S.M., Little J.B. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98: 473-478; 2001.
77. Shao C., Furusawa Y., Aoki M., Ando K. *Radiat. Res.* 160: 318-323; 2003.
78. Azzam E.I., de Toledo S.M., Little J.B. *Cancer Res.* 63: 7128-7135; 2003.
79. Huo L., Nagasawa H., Little J.B. *Radiat. Res.* 156: 521-525; 2001.
80. Azzam E.I., de Toledo S.M., Spitz D.R., Little J.B. *Cancer Res.* 62: 5436-5442; 2002.
81. Wu L.J., Randers-Pehrson G., Xu A., Waldren C.A., Geard D.R., Yu Z.L., Hei T.K. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96: 4959; 1999.
82. Little J.B., Nagasawa H., Li G.C., Chen D.J. *Radiat. Res.* 159: 262-267; 2003.
83. Nagasawa H., Huo L., Little J.B. *Int. J. Radiat. Biol.* 79: 35-41; 2003.
84. Azzam E.I., de Toledo S.M., Little J.B. *Oncogene* 22: 7050-7057; 2003.
85. Matsumoto H., Hayashi S., Hatashita M., Ohnishi K., Shiohara H., Ohtsubo T., Kitai R., Ohnishi T., Kano E. *Radiat. Res.* 155: 387-396; 2001.
86. Shao C., Furusawa Y., Aoki M., Matsumoto H., Ando K. *Int. J. Radiat. Biol.* 78: 837-844; 2002.
87. Nagasawa H., Cremesti A., Kolesnick R., Fuks Z., Little J.B. *Cancer Res.* 62: 2531-2534; 2002.
88. Bishayee A., Hill H.Z., Stein D., Rao D.V., Howell R.W. *Radiat. Res.* 155: 335-344; 2001.
89. Lyng F.M., Seymour C.B., Mothersill C. *Biochem. Soc. Trans.* 29: 350-353; 2001.
90. Bishayee A., Rao D.V., Howell R.W. *Radiat. Res.* 152: 88-97; 1999.
91. Howell R.W., Bishayee A. *Micron* 33: 127-132; 2002.
92. Shao C., Aoki M., Furusawa Y. *Radiat. Environ. Biophys.* 42: 183-187; 2003.
93. Xue L.Y., Butler N.J., Makrigiorgos G.M., Adelstein S.J., Kassisi A.I. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99: 13765-13770; 2002.
94. Belyakov O.V., Molkard M., Mothersill C., Prise K.M., Michael B.D. *Br. J. Cancer* 88: 767-774; 2003.
95. Loeb L.A., Loeb K.R., Anderson J.P. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100: 776-781; 2003.
96. Niwa O. *Oncogene* 22: 7078-7086; 2003.
97. Pils S., Muller W.U., Streffer C. *Mutat. Res.* 429: 85-92; 1999.
98. Niwa O., Kominami R. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98: 1705-1710; 2001.
99. Dubrova Y.E., Plumb M., Brown J., Jeffreys A.J. *Int. J. Radiat. Biol.* 74: 689-696; 1998.
100. Dubrova Y.E., Plumb M. *Mutat. Res.* 499: 143-150; 2002.
101. Nomura T. *Nature* 256 : 575-577 ; 1982.
102. Lord B.I., Woolford L.B., Want L., Stones V.A., McDonald D., Lorimore S.A., Papworth D., Wright E.G., Scott D. *Brit. J. Cancer* 78: 301-311; 1998.
103. Brenner D. J., Elliston C.D. *Radiat. Res.* 156: 612-617; 2001.
104. Lorimore S.A., Wright E.G. *Int. J. Radiat. Biol.* 79: 15-25; 2003.
105. Morgan W.F. *Oncogene* 22: 7094-7099; 2003.
106. Lorimore S., Kadhim M., Pocock D., Stevens D., Papworth D., Goodhead D., Wright E. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95: 5730-5733; 1998.
107. Watson G.E., Lorimore S.A., Macdonald D.A., Wright E.G. *Cancer Res.* 60: 5608-5611; 2000.
108. Nagar S., Smith L.E., Morgan W.F. *Cancer Res.* 63: 324-328; 2003.
109. Joiner M.C., Lamin P., Malaise E.P., Robson T., Arrand J.E., Skov K.A., Marples B. *Mutat. Res.* 358: 171-183; 1996.
110. Azzam E.I., de Toledo S.M., Raaphorst G.P., Mitchel R.E. *Radiat. Res.* 146: 369-373; 1996.
111. Redpath J.L., Short S.C., Woodcock M., Johnston P.J. *Radiat. Res.* 159: 433-436; 2003.

# Apuntes para un análisis crítico del sistema de dosimetría en Protección Radiológica.

A. Delgado  
Unidad de Dosimetría de Radiaciones. CIEMAT.

## RESUMEN

El trabajo presenta los resultados de un análisis del sistema vigente para la dosimetría en protección radiológica. El análisis incluye aspectos fundamentales relativos a la propia definición de las magnitudes limitadoras y determinados aspectos prácticos relacionados con la implantación operacional de ese sistema.

Se analizan las dificultades del sistema, que incluye una cierta estimación de los riesgos biológicos en la definición de las magnitudes dosimétricas, para la parametrización de ese riesgo de modo fiable. En particular, se comenta la problemática existente respecto de los valores para los factores de ponderación para radiación neutrónica, a la luz de las aun recientes recomendaciones incluidas en el informe ICRP-92. La falta de datos cuantitativos concluyentes sobre los riesgos asociados a la radiación de referencia (X y g) en el rango de dosis bajas (<100 mGy) parece estar en la base de esas dificultades.

Desde el punto de vista de la aplicación del sistema de dosimetría en la práctica rutinaria se comenta de modo comparativo la distinta evolución seguida por la dosimetría de la radiación externa y de la radiación interna. Ambas han de ser necesariamente cooperativas en el caso de que ambos riesgos de exposición coexistan, pero han seguido caminos marcadamente diferentes propiciando interpretaciones sobre la calidad y exactitud de sus resultados no siempre debidamente justificados. A este respecto se comentan las limitaciones de las magnitudes operacionales, así como las recomendaciones establecidas respecto a los requerimientos de exactitud en dosimetría personal externa.

Como resultado del análisis se plantea el interrogante de si el sistema actual, particularmente para el caso de la dosimetría externa, es el único posible o si otras aproximaciones son factibles. De cara al futuro y partiendo del impresionante avance de los métodos de dosimetría numérica, sistemas basados en la medida experimental de magnitudes puramente físicas, realmente

## ABSTRACT

The article presents the results obtained in an analysis of the actual system for the dosimetry in radiation protection. It embraces both fundamental aspects relative to the definition of the limiting quantities and also some of the features of the practical implementation of the system.

The difficulties of a system including an estimation of the biological risks in the definition of the dosimetric quantities are analysed. In particular the difficulty in proposing numerical values for the different parameters, such as the radiation weighting factors for neutrons is commented in the light of the recent ICRP-92 report. It seems that the lack of conclusive data for the risks associated to the reference radiation (X and g) in the low dose range (<100 mGy) is the main cause of the mentioned difficulties.

From the point of view of the practical application of the dosimetry system, a comparative description of the different evolution of the external and internal radiation dosimetry is made. Both kinds of dosimetry are necessarily cooperative when both exposure situations may occur, but in reality they have developed in a very different way, suggesting interpretations on their respective quality and accuracy not always fully justified. In this regard, the limitations of the operational quantities for external dosimetry are commented together with the recommended accuracy requirements for the individual dosimetry of external radiation.

As main result of the analysis the question if the actual system is the only possible arises, or if on the contrary, other approaches are possible. For future and taking into account the impressive improvement of

*medibles con sencillez y fiabilidad, podrían servir para asegurar con fiabilidad que no se incurren en riesgos indebidos. En aquellos casos en que los límites de dosis pudieran estar comprometidos se puede proceder al cálculo de las magnitudes limitadoras en un modelo matemático del cuerpo humano. Un sistema de este tipo bien podría constituir una alternativa competitiva en un futuro no muy distante.*

*the numerical dosimetry methods and procedures, other possibilities could be envisaged. A system based on the experimental determination of purely physical quantities, safe and accurately measurable, can be sufficient to exclude undue risks for the majority of the practical situations. While in those where the dose limits may be compromised the effective dose can be calculated using available mathematical phantoms for the human body. Such a system can be a feasible alternative in not a very distant future.*

### **Introducción**

El sistema vigente para la protección frente a las radiaciones ionizantes, inspirado en el informe 60 de la ICRP (1), para asegurar los principios de limitación de dosis y los de justificación y optimización en las prácticas con radiaciones, ha establecido un sistema de dosimetría de una cierta complejidad tanto en el terreno conceptual como en el de su aplicación práctica y operativa. Este sistema ha alcanzado carácter reglamentario en nuestro país (2) y tiene por ello fuerza legal. El propósito del análisis crítico que se ha abordado y que ahora se presenta es el de revisar las bases científicas del sistema, considerando aspectos que muy a menudo están ausentes en otras descripciones del mismo meramente informativas o enunciativas de su estructura y de los requerimientos y obligaciones que comporta desde un punto de vista regulatorio y normativo. Se puede avanzar que el análisis revela la existencia de importantes carencias en el conocimiento científico en que se fundamenta.

Una parte importante del análisis se dedicará también a la consideración de aspectos prácticos del sistema de dosimetría, revisando comparativamente la situación y los métodos de los dos grandes sectores de la dosimetría: la

dosimetría de la radiación externa y la dosimetría de la radiación interna. En particular se harán algunas consideraciones sobre las ventajas que se suponen derivan de las denominadas magnitudes operacionales en el caso de externa, que al menos en apariencia permiten obtener experimentalmente valores representativos de la magnitud limitadora, dosis efectiva, intrínsecamente inmedible dada su definición. Como es conocido, en interna no es factible la determinación experimental de alguna magnitud directamente dosimétrica y a la dosis efectiva se llega por cálculo a partir de datos de actividad. Frecuentemente esto se presenta como una limitación relativa de la dosimetría interna frente a la que se supone más genuina dosimetría externa. La evidencia después de años de uso es que como casi siempre, tampoco aquí hay sucedáneo suficientemente bueno y que las operacionales tienen problemas de entidad bastante considerable.

En lo que sigue se asume que el sistema de dosimetría es bien conocido por los potenciales lectores, por lo que no se describirá en toda su extensión, sino tan solo cuando sea necesario para mejor comprender los diferentes aspectos que se van a ser tratados en esta comunicación.

### **Principios básicos del sistema de dosimetría**

La principal característica del sistema, además de su naturaleza integrada para cualquier tipo de radiación y de sus energías, es que no pretende tan solo caracterizar o cuantificar la exposición al agente nocivo, como ocurre en los sistemas de protección frente a otros agentes contaminantes, sino que incluye también una cierta valoración de los efectos para la salud derivados de la exposición. Por ello en la definición de la principal magnitud dosimétrica limitadora, la Dosis Efectiva, además de la estimación de la energía depositada en el organismo humano (dosis absorbida) intervienen aspectos biológicos, a través de factores de ponderación basados en la diferente eficiencia radiobiológica de los diferentes tipos de radiaciones, así como de la diferente radiosensibilidad de los diferentes órganos y tejidos del cuerpo humano.

Es un esquema ciertamente ambicioso que parece estar basado en un conocimiento bastante profundo de los procesos biológicos inducidos por las radiaciones en el rango de dosis absorbidas en el que se requiere efectuar la protección, conocimiento que permitiera incluso la estimación cuantitativa de la sensibilidad de los tejidos y de la



eficiencia biológica de los distintos tipos de radiación. Pero la realidad es que no se dispone de tal nivel de conocimiento y hay dudas de que se llegue a disponer de ese conocimiento en un futuro razonable, al menos en el rango de las dosis bajas o muy bajas, en el rango de efectos estocásticos, en particular por debajo de los 20 mSv/año, límite propuesto por la ICRP para trabajadores expuestos.

Como es sabido la Dosis Efectiva, E, viene definida por la siguiente ecuación:

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Donde  $w_T$  y  $w_R$  representan respectivamente a los factores de ponderación de los diferentes tejidos (T) y del tipo de radiación (R) y  $D_{T,R}$  es la dosis absorbida en el tejido T inducida por la componente del campo de radiación R. Los sumatorios se extienden a todos los órganos y tejidos y para todas las componentes del campo de radiación.

La observación de la fórmula anterior podría hacer pensar que a semejanza con lo que ocurre habitualmente en la definición de magnitudes y ecuaciones físicas en las que aparecen constantes universales de proporcionalidad, cuyos valores son conocidos con muy alto nivel de exactitud, también  $w_T$  y  $w_R$  pudieran tener naturaleza parecida. No es el caso, y el déficit en el conocimiento de los procesos radiobiológicos determina que los valores adoptados para esos factores de ponderación estén afectados en muchos casos por niveles de incertidumbre realmente muy considerables. Para atestiguar que esto es así basta con comprobar los sucesivos y parece que recurrentes cambios propuestos por la ICRP para los valores de ambos factores de ponderación.

**Tabla I. Comparación entre los valores actuales para  $w_R$  y los propuestos a ICRP.**

Tipo y rango de energía de la radiación incidente	Factor de ponderación de la radiación ( $w_R$ )		
	Publicación 60	Propuesto <sup>c</sup>	
Fotones, todas las energías	1	1	
Electrones y muones (todas las energías) <sup>a</sup>	1	1	
Protones (incidentes)	5	2	
Neutrones, energía < 10 keV	5	Emplear la función propuesta para $w_R$ mostrada en la figura 1	
	10 keV-100keV		10
	> 100 keV-2 MeV		20
	> 2 MeV-20 MeV		10
> 20 MeV	5		
Partículas alfa, fragmentos de fisión e iones pesados <sup>b</sup>	20	20 <sup>d</sup>	

<sup>a</sup> Excluye a los electrones Auger producidos por emisores localizados en el núcleo celular/ADN. Requieren tratamiento especial.

<sup>b</sup> Emplear las relaciones Q-LET contenidas en el ICRP-60 para partículas no especificadas.

<sup>c</sup> Son necesarios cambios para energías de neutrones < 1 MeV para tener en cuenta la contribución gamma en órganos internos.

<sup>d</sup> El Grupo de Trabajo del Comité 4 de la ICRP sobre Protección Radiológica en Vuelos Espaciales ha de someter consideración los valores de  $w_R$  para neutrones de alta energía e iones pesados de LET > 200 keV/μm.

Los cambios que se han venido produciendo y los que parece que se avencinan no son de pequeña magnitud, tantos por ciento pongamos por caso, sino de factores enteros. Por citar solamente los cambios muy recientemente propuestos en el informe ICRP 92 (3), los valores para los factores de ponderación de la radiación pasarían del valor de 5 actual a 2 para neutrones térmicos e idéntico cambio numé-

rico para protones de cualquier energía. En la Tabla I se presentan los cambios propuestos junto a los establecidos por el informe ICRP-60. En el caso de radiación neutrónica en lugar de valores discretos para  $w_R$  en los diferentes rangos de energía, se propone una expresión analítica continua que se presenta gráficamente en la figura 1, también junto a los valores del ICRP-60.

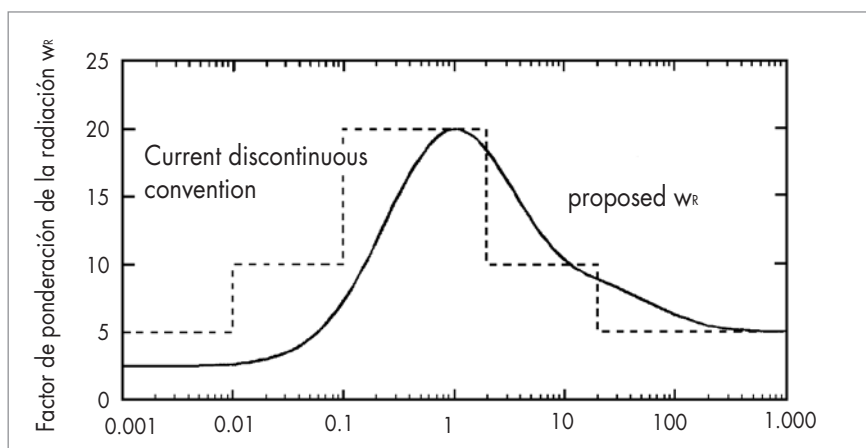


Figura 1. Factores de ponderación de la radiación  $w_R$  para neutrones recogidos en la Publicación 60 (ICRP, 1991) como una función discontinua de la energía del neutrón (----) y las modificaciones propuestas (—).

A no olvidar los cambios a contrario efectuados en el pasado para esos factores. Aunque por el momento no hay cambios en los valores adoptados para  $w_R$  para fotones ni para electrones, si hay evidencias físicas y biológicas del diferente factor de calidad para fotones de baja energía (calidades de mamografía) respecto de fotones de alta energía (MeV), factores entre 3 y 7 para los primeros frente a 1 en la región de alta energía (4).

A todo esto habría que añadir los problemas que la propia definición del factor  $w_R$  genera en aquellas situaciones en las que el campo de radiación externo no coincide o no es representativo del campo interno al cuerpo. Los factores de ponderación se definen para el campo externo, pero obviamente son las radiaciones que constituyen el interno las que realmente generan la dosis absorbida en los distintos órganos y tejidos. Es esta una situación típica de la radiación indirectamente ionizante, fotones y neutrones. En el caso de fotones, no hay problemas en la práctica al tener tanto fotones como electrones el mismo valor para  $w_R$ , pero en el caso de neutrones los problemas son serios ya que la dosis pueden llegar a ser en su mayor parte impartidas por fotones (campo interno),  $w_R=1$ , generados por reacciones de captura de los neutrones térmicos (campo externo), cuando para esos neutrones hasta ahora se adoptaba el valor  $w_R=5$ . El reciente informe 92 (3) ha discutido esta anomalía y ha propuesto una nueva forma de definir  $w_R$ , así como volver a relacionar de modo explícito este factor con el factor de calidad y su dependencia con la magnitud física transferencia lineal de energía,  $L$ , (o mejor su análogo microdosimétrico, energía lineal,  $y$ ), relación que co-

mo se recordará fue abandonada en el ICRP-60 (1).

Pudiera parecer que la problemática respecto de los valores de  $w_R$  se restringe al caso de neutrones y protones, radiaciones con interés tan solo en aplicaciones muy concretas, pero en realidad los problemas para asignar valores para ese tipo de radiaciones en buena medida se originan por la falta de datos firmes para la denominada radiación de referencia, la radiación electromagnética, para la que por definición  $w_R=1$ . Como es sabido, la determinación de valores para  $w_R$  se hace a partir de datos sobre la Eficiencia Biológica Relativa, RBE, de los diferentes tipos de radiación. La RBE se define para comparar un tipo de radiación con la de referencia, como el inverso de la razón de las dosis absorbidas de ambas radiaciones para las que se producen los mismos efectos. Pues bien, el problema es precisamente determinar los efectos para la radiación de referencia en el rango estocástico. En el informe 92 (3), se hace referencia a esta situación de modo recurrente en varios de sus apartados. En las conclusiones, página 99, y destacando la frase en negrita, al referirse al uso del factor RBE en la estimación de factores de riesgo para radiación neutrónica, se hace notar que la considerable incertidumbre en los valores para ese factor se origina principalmente en la carencia de datos firmes sobre efectos de las dosis y las tasas de dosis bajas para la radiación de referencia, la radiación gamma. Obviamente toda esta problemática repercute directamente a la hora de estimar valores para el factor de ponderación de los distintos tipos de radiación.

Ante la carencia de datos directos obtenidos en el rango estocástico de

dosis, los valores adoptados para los diferentes parámetros radiobiológicos en ese rango de dosis se han inferido extrapolando información procedente de diversas líneas de trabajo desde dosis y tasas de dosis en muchos casos sustancialmente más elevadas. Entre esas líneas se cuentan la experimentación "in vivo" con animales de laboratorio, investigando la inducción de diversos tipos de cáncer, o estudios "in vitro" con diversos tipos de cultivos celulares, analizando la inducción de aberraciones por la radiación. Además y de modo primordial en la estimación de los factores de riesgo, pero también en la adopción de valores numéricos para la eficiencia radiobiológica de los diferentes tipos de radiaciones se han tenido en cuenta los datos aportados por el Life Span Study que se lleva acabo con los supervivientes de las explosiones atómicas en Hiroshima y Nagasaki y que incluye alrededor de 90.000 personas en un seguimiento que dura ya más de 50 años. La información proporcionada por esas líneas de trabajo presenta problemas de diverso tipo para derivar de ella datos cuantitativos en humanos con un mínimo nivel de fiabilidad.

Además de los problemas causados por la necesidad de extrapolar desde dosis generalmente en el rango determinista y de la gran variabilidad de los datos publicados, los datos obtenidos con animales de experimentación requieren un análisis muy cuidadoso para evitar errores sistemáticos de los que puede ser un buen ejemplo los que estuvieron en la base de los excesivamente altos valores de  $w_R$  propuestos para radiación neutrónica en el ICRP-60 (1) que ya han sido comentados. Con este tipo de radiación el tamaño del cuerpo objeto de estudio influye





**Tabla II. Fracción de la dosis absorbida neutrónica debida a partículas pesadas ( $D_n/D$ ) y a fotones inducidos en el cuerpo por neutrones ( $D_\gamma/D$ ) [5]. Los datos para ratones y ratas se refieren a maniqués esféricos. Los datos para el maniqué antropomórfico se han obtenido para exposición antero-posterior.**

$E_n$ MeV	Ratones		Ratas		Maniqué antropomórfico	
	$D_n/D$	$D_\gamma/D$	$D_n/D$	$D_\gamma/D$	$D'_n/D'$	$D'_\gamma/D'$
Térmicos	0,462	0,538	0,293	0,707	0,100	0,900
0,001	0,768	0,232	0,329	0,671	0,098	0,902
0,005	0,956	0,044	0,518	0,482	0,116	0,884
0,01	0,982	0,018	0,661	0,339	0,138	0,862
0,02	0,993	0,007	0,793	0,207	0,170	0,830
0,05	0,997	0,003	0,914	0,086	0,265	0,735
0,1	0,999	0,001	0,960	0,040	0,394	0,606
0,2	1,000	0,000	0,982	0,018	0,540	0,460
0,5	1,000	0,000	0,994	0,006	0,768	0,232
1,0	1,000	0,000	0,998	0,002	0,846	0,154
2,0	1,000	0,000	0,999	0,001	0,911	0,089
5,0	1,000	0,000	1,000	0,000	0,961	0,039

apreciablemente en el campo interno generado, debido a las diferentes condiciones de moderación que supone ese tamaño. El efecto es que para una misma exposición neutrónica, en el cuerpo humano una proporción apreciablemente mayor de la dosis es realmente impartida por radiación gamma, a causa de la mayor proporción de neutrones termalizados, que en animales de experimentación de menor tamaño, roedores por ejemplo (5). Si no se considera este efecto entonces una mayor proporción de la dosis absorbida es impartida por protones de retroceso generados por colisiones inelásticas, radiación secundaria con mayor LET que la radiación fotónica. Consecuentemente, el factor de ponderación para radiación neutrónica que se deduciría de datos obtenidos sobre roedores sería aparentemente mayor que si se tiene en cuenta la mayor moderación producida en el cuerpo humano.

La tabla II presenta datos comparativos obtenidos en una simulación numé-

rica para ratones, ratas y para un maniqué antropomórfico en función de la energía de los neutrones. Puede apreciarse que mientras para maniqués de pequeño tamaño la fracción dosis neutrónica es preponderante, siendo la fotónica despreciable para energías superiores a 50 keV, para un maniqué antropomórfico la dosis gamma es preponderante hasta alrededor de 200 keV, manteniendo una contribución significativa hasta 1 MeV aproximadamente. Durante la preparación del ICRP-60 se emplearon directamente datos obtenidos con ratas y ratones expuestos a neutrones sin hacer consideraciones acerca del tamaño del blanco. Como ya se ha mencionado, se obtuvieron por ello unos valores altos para el factor de Eficiencia Radiobiológica que condujeron consecuentemente a la adopción de valores excesivamente altos para el factor de ponderación, que obviamente se define para humanos.

Los estudios experimentales in vitro sobre sistemas celulares pueden ser en

ocasiones la alternativa más fácilmente abordable. Pero además de la enorme variabilidad de los resultados hoy día disponibles, hay que dar un considerable salto para pasar de datos experimentales obtenidos en el estudio de los efectos iniciadores a nivel celular a su empleo para la estimación de sus posibles efectos finales retardados a nivel organismo, que son los que importan a la hora de definir y cuantificar factores de riesgo. Como es bien conocido existen mecanismos celulares de reparación del daño. Hay considerables incertidumbres respecto a la significación real de los datos in vitro.

La epidemiología tiene limitaciones esenciales. No hay datos epidemiológicos en el rango estocástico para radiaciones como protones o neutrones y son ambiguos o no conclusivos los existentes para fotones. Los propios factores de riesgo asumidos por la ICRP prácticamente invalidan a la epidemiología como una fuente de datos en el rango estocástico, a la vista de la formidable amplitud de la muestra que sería necesaria para obtener conclusiones con un mínimo de fiabilidad. Por otra parte, incluso los datos obtenidos para altas dosis provienen en su mayor parte de exposiciones agudas de difícil comparación con las exposiciones de tipo crónico habituales en la mayoría de los circunstancias en actividades con exposición potencial a radiaciones. Es bien conocido que el fraccionamiento de la exposición a cualquier agente contaminante es determinante en la respuesta biológica al mismo. Particularmente en el rango de dosis bajas la tasa de dosis es de gran significación biológica. A nadie se le escapa la sustancial diferencia entre recibir todo el sol del verano el primer

día de vacaciones que si se reparte adecuadamente un poquito cada día.

Todo lo anteriormente expuesto apunta hacia la sustancial debilidad de los conocimientos básicos en los que se fundamenta el actual sistema de dosimetría para protección radiológica. Corolario ineludible es la duda razonable acerca de si su complejidad esta suficientemente justificada y de si no sería posible imaginar un sistema que asegurando similares niveles de protección no dependiera en tan gran medida de aspectos, que pueden considerarse especulativos, como el actualmente en vigor. Es perfectamente legítimo pensar que ante la falta de conocimientos aludida lo que se precisa son nuevas actividades investigadoras que los generen. Sin embargo hay que tener en cuenta que la investigación en biología y en epidemiología relacionada con la exposición a radiaciones son actividades maduras, con décadas de actividad continuada y con una dedicación de recursos humanos y materiales muy considerable. Ante esto es también legítimo considerar si el origen de la debilidad de los conocimientos básicos pudiera ser de naturaleza intrínseca a causa del bajo nivel de los riesgos asociados a la exposición a dosis bajas de radiación, particularmente para radiación electromagnética, riesgos que serían difícilmente discernibles de otros concomitantes y por lo tanto de muy difícil cuantificación.

### **Aspectos prácticos del sistema: dosimetría externa vs. dosimetría interna**

Si hay algo más que indicios sobre la debilidad de los fundamentos mismos del actual sistema de dosimetría para protección radiológica, la realidad es

que la ICRP y las recomendaciones contenidas en su informe 60 (1) han alcanzado fuerza legal, al menos en la Unión Europea, al haber sido recogidos en su integridad en la directiva europea 96/29 que ha sido transpuesta a las legislaciones nacionales, en el caso de España el Real Decreto 783/2001 (2). Ello desde luego no hurta ni impide el debate científico pero si obliga al conocimiento y a la puesta en práctica de lo que ya son preceptos legales. Estando pues el sistema en vigor, el análisis crítico objeto de esta comunicación se derivará en lo que sigue hacia el análisis de algunos aspectos prácticos, en particular a la diferente evolución de los métodos y las prácticas rutinarias en los dos grandes sectores de la dosimetría, la dosimetría de la radiación externa y la dosimetría de la radiación interna.

Aun cuando los principios básicos de protección en particular la limitación de dosis aplican por igual a ambas dosimetrías siendo sus datos concurrentes para estimar el cumplimiento de esos límites, la diferente condición de irradiación, por fuentes externas o internas al organismo implica necesariamente que esos principios comunes se apliquen de modo diferente, con aspectos específicos y peculiaridades propias para cada tipo de dosimetría. Por ejemplo, la magnitud limitadora dosis efectiva ha de redefinirse como la dosis efectiva comprometida en el caso de interna, para tener en cuenta la diferente evolución temporal de las dosis causadas por exposiciones a fuentes externas y las debidas a la incorporación al organismo de contaminantes radiactivos, que permanecen en el mismo un tiempo dictado por sus periodos físico y biológico.

La dosis efectiva por su propia definición, partiendo de la dosis absorbida en los diferentes órganos y tejidos, no es una magnitud determinable experimentalmente, no es una magnitud mensurable. Sin embargo su definición es bastante lógica habida cuenta su objetivo de colaborar a proteger la salud de las personas expuestas, cuantificando para ello los riesgos en función de la dosis absorbida ponderada por los efectos radiobiológicos en los distintos órganos y tejidos del cuerpo humano, teniendo en consideración también el tipo de radiación que los genera. Pero si la dosis efectiva no es directamente mensurable, si puede calcularse a partir de la determinación experimental de alguna magnitud física representativa del campo de radiación generador de la dosis absorbida en los órganos.

En dosimetría interna se ha seguido esta aproximación y la dosis efectiva comprometida se estima partiendo de la determinación de la actividad incorporada al organismo empleando para ello medidas de naturaleza espectrométrica. En el sector de la dosimetría externa por el contrario se consideró inconveniente el carácter no medible de la magnitud limitadora. ICRU ya había propuesto las denominadas magnitudes operacionales (6) en su informe 39 de 1985. La intención de la ICRU fue proponer magnitudes determinables experimentalmente y que al mismo tiempo constituyeran una aproximación razonablemente conservadora de las magnitudes limitadoras tanto para la dosimetría personal como para la de área. Poco tiempo después de la aparición del informe 60 de la ICRP, ICRU actualizó, con cambios de poca entidad, en un nuevo informe, el 51 (7), las magnitudes operacionales a la luz de la nueva definición de las



magnitudes limitadoras propuesta en el ICRP-60.

ICRU procuró intencionadamente que la definición de las magnitudes operacionales permitiera que las técnicas y métodos que venían siendo empleados para dosimetría personal y ambiental, en buena parte medidores de dosis absorbidas, pudieran seguir siendo empleados para la medida de las operacionales. Además, su definición proporcionaba a los laboratorios de metrología información suficiente para establecer las condiciones de calibración y así pronto hubo valores numéricos para los factores de conversión desde el kerma en aire a esas magnitudes. El resultado de todo esto es que se generalizó el uso de las magnitudes operacionales, muy convenientes para reguladores y metrologos. Hoy día están incluidas en las normas de protección frente a las radiaciones de un buen número de países, en especial de la UE y también en el nuestro (2).

La diferente vía seguida por las dos dosimetrías, la externa con sus magnitudes operacionales, y la interna con sus estimaciones tan indirectas de la dosis efectiva, ha llevado a una separación quizás excesiva en su devenir y desarrollo. En ocasiones a la dosimetría interna se la considera, incluso en los organigramas y la estructura de centros importantes de investigación, como una actividad diferente, dedicada más a la pura determinación de la contaminación en personas que a quehaceres genuinamente dosimétricos, condición que a veces parece asociarse tan solo a la dosimetría externa. Es muy común en textos de cursos y en monografías al presentar ambas dosimetrías hacer referencia a que mientras en dosimetría externa se dispone de dispositivos que miden directamente

la dosis (a veces sin mayores precisiones sobre "que dosis"), en interna al no poder, por razones obvias, colocar dosímetros en órganos ni vísceras, pues no se puede medir tal dosis y hay que hacer cálculos complicados de forma que las estimaciones de las dosis interna están afectadas de mayores "errores" que las externas.

Es evidente que esos puntos de vista están, en parte al menos, justificados y responden a hechos y situaciones reales, pero quizás se han simplificado y estereotipado en exceso, obviando otros hechos y situaciones también reales que matizarían tales suposiciones. Desde luego los considerables niveles de incertidumbre que afectan a algunas medidas de dosis internas, que pueden superar incluso un orden de magnitud, son fuente de preocupación más si cabe por las dificultades que parecen existir para alcanzar a mejorar la situación. Pero aun cuando parece darse por seguro que las determinaciones de las dosis externas se pueden hacer con mayores niveles de exactitud, la realidad es que esas determinaciones no están exentas de problemas, aunque quizás esos problemas no hayan sido objeto de análisis ni comentarios fuera de ámbitos muy especializados.

Puede no ser ocioso volver a resaltar algo de sobra conocido y es que los límites reglamentarios de dosis aplican por igual a las dosis internas y externas y que ambas son aditivas para comprobar su cumplimiento. Independientemente de su origen, externo o interno, las dosis se expresan en la misma magnitud, la dosis efectiva, y es justamente esta magnitud la que no es determinable experimentalmente como consecuencia de su propia definición incluyendo elementos físicos y biológicos. Para tratar de poner en sus justos

términos la situación de las dos dosimetrías puede ser conveniente analizar con algún detalle a las propias magnitudes operacionales, en particular su supuesto carácter de magnitudes medibles así como profundizar algo más en la relación cuantitativa entre ellas y la dosis efectiva tratando de analizar cuantitativamente hasta que punto son sustitutas genuinas y convenientes de la dosis efectiva.

### **Las magnitudes operacionales de la ICRU para dosimetría externa**

Aunque quizás no sea muy riguroso comenzar con chismes, puede ser interesante comentar que la ICRP, o al menos a algunos de sus más relevantes miembros, las magnitudes ICRU no les hicieron ninguna gracia cuando fueron propuestas. Hubo discrepancias notorias y bastante públicas y finalmente se montó un comité conjunto ICRP-ICRU para analizar la situación y tratar de armonizar ambos conjuntos de magnitudes, limitadoras y operacionales. Finalmente aparecieron dos documentos idénticos, con idéntico título y contenido pero publicados separadamente por la ICRP, informe 74 de 1997 (8) y por la ICRU, informe 57 de 1998 (9). Título de ambos: "Conversión coefficients for use in radiological protection against external radiation". Los coeficientes de conversión eran obviamente entre las magnitudes limitadoras, las operacionales, y algunas magnitudes físicas como fluencia y kerma.

La publicación de ambos informes no cerró las divergencias y de hecho la ICRP ha seguido considerando a las operacionales como una complicación innecesaria y la ICRU, o al menos sectores cercanos sus comisiones,

**Tabla III**

**Magnitudes para la vigilancia ambiental**

*Dosis equivalente ambiental  $H^*(d)$ :*

Dosis equivalente en un punto determinado de un campo de radiación que sería producida por el correspondiente campo expandido y alineado en la esfera ICRU, a una profundidad "d", sobre el radio opuesto a la dirección del campo alineado.

*Dosis equivalente direccional  $H(d,\Omega)$ :*

Dosis equivalente en un punto determinado en un expandido en la esfera ICRU, a una profundidad d sobre un radio en una dirección especificada  $\Omega$ .

*Campo expandido y alineado:*

Campo de radiación en el que la fluencia y sus distribuciones direccional y energética son las mismas que en el campo expandido, pero la fluencia es unidireccional.

*Campo expandido*

Campo de radiación que se deriva del campo actual en el que la fluencia y sus distribuciones direccional y energética tienen el mismo valor a través de todo el volumen de interés que el campo de radiación real en el punto de referencia.

**Magnitud para la vigilancia individual**

*Dosis equivalente personal  $H_p(d)$ :*

Dosis equivalente en tejidos blandos a una profundidad adecuada "d", por debajo de un punto determinado del cuerpo.

glamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes.

Se trata de magnitudes definidas en presencia de un receptor que es la esfera ICRU en el caso de las definidas para la vigilancia ambiental o de área y el propio cuerpo humano para la magnitud propuesta para la vigilancia individual. Para la definición de las primeras (área) se introducen los campos abstractos llamados alineado (y expandido) y expandido. Las magnitudes se definen en principio para cualquier espesor "d", en la esfera ICRU o en el cuerpo humano, pero se recomienda una profundidad de 10 mm para radiación "fuertemente penetrante", mientras que para las radiaciones débilmente penetrantes se recomienda una profundidad de 0,07 mm para la piel y de 3 mm para el cristalino de los ojos.

Si la definición de estas magnitudes ni su significado son bien conocidos por una buena parte de los profesionales de la dosimetría, la dificultad de hacerlas comprender a los trabajadores expuestos es muy grande y la experiencia de muchos formadores es que se genera una reacción negativa y en algunos casos de desconfianza. Ni que decir tiene que la incomprensión y la desconfianza sería aun mayor si las explicaciones hubiera que darlas al público en general. En este caso definitivamente sería preferible ni mencionarlas y habría que emplear términos más inespecíficos pero intuitivos como la "dosis o la cantidad de radiación". Desde luego no es un punto a desdenar éste de la comunicación a la sociedad de los asuntos referentes a las radiaciones, lo que requiere de términos comprensibles y asimilables. Por ello la simplicidad de las magnitudes dosimétricas es muy deseable.

proponen con alguna frecuencia que los límites de dosis se trasladen directamente a las operacionales (10), tratando de evitar en la práctica la necesidad de referirse a las limitadoras. En este contexto querría recordar la respuesta que Roger Clark, en aquellos momentos Presidente de la ICRP, dio a una pregunta que el autor de este informe efectuó, con alguna intención, en una jornada organizada por la SEPR que tuvo lugar en el CIEMAT en 2003, acerca de la necesidad de las operacionales en la práctica dosimétrica rutinaria. La respuesta fue bastante clara y directa: ninguna, no son realmente magnitudes medibles, solo cal-

culables, es decir como las limitadoras, y por tanto para Clark nada resuelven.

Es de justicia hacer notar que la definición de las magnitudes operacionales para la vigilancia ambiental y personal fue el resultado de una formidable labor de síntesis, tratando de dar acomodo a múltiples compromisos, como el ya comentado de mantener la validez de los métodos que estaban siendo empleados para esas tareas. El resultado ha sido unas magnitudes difíciles de comprender y de asimilar incluso por los profesionales que debían emplearlas y con una cierta apariencia de artificiosidad. En la tabla III se recoge su definición tal y como aparecen en el Anexo II del Re-

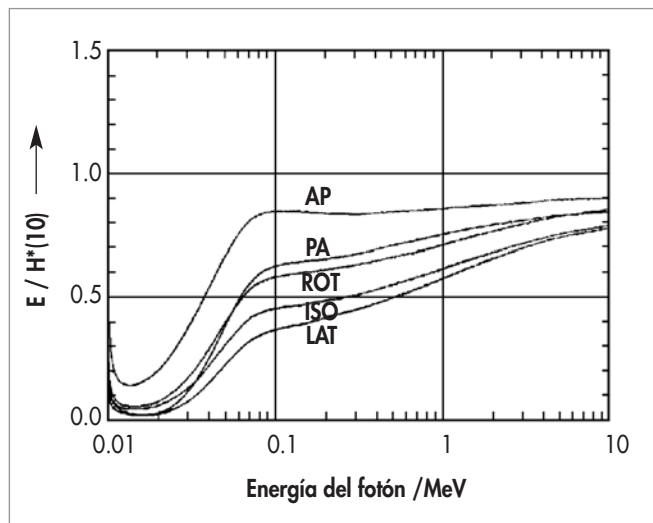


Figura 2. Cociente  $E/H^*(10)$  como una función de la energía del fotón, para fotones monoenergéticos. Los valores de  $E$  son para incidencia de radiación anterior (AP), posterior (PA), lateral (LAT), rotacional.

Las ventajas ya mencionadas de las operacionales vienen según ICRU por su mensurabilidad y por su capacidad para estimar conservadoramente a las magnitudes limitadoras propuestas por ICRP. Conviene analizar en algún detalle en qué medida estos dos asertos se cumplen.

No hay que hacer grandes consideraciones para constatar que a la dosis equivalente personal,  $H_p(d)$ , definida en el interior del cuerpo humano, se le puede hacer al menos cualitativamente la misma crítica que a la dosis efectiva definida partiendo de las inmedibles dosis en órganos. Salvo apaños, también es esencialmente inmedible, ciertamente el apaño no es muy complicado y consiste en diseñar el dosímetro personal colocando el detector de radiación bajo el espesor requerido de material equivalente a tejido. El dosímetro así construido se lleva, como es conocido, sobre la región torácica del trabajador controlado, que no "por debajo de un punto" de su cuerpo tal y como requeriría la definición de la magnitud. Pero queda otro detalle, la magnitud se define en el cuerpo humano. ¿Cómo habría que calibrar un do-

símetro personal en términos de esa magnitud? ¿Habría que exponer también al portador junto a su dosímetro a los haces de calibración para asignar correctamente los valores de calibración? Obviamente no es nada recomendable y hay que recurrir a definir otra magnitud intermedia, la llamada  $H_{p,slab}(10)$ , estimadora de la dosis equivalente personal, a su vez estimadora de la dosis efectiva. La  $H_{p,slab}(10)$  se define no en el cuerpo humano sino sobre un maniquí de PMMA o de agua de dimensiones  $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$  que sustituye al cuerpo humano.

Respecto de la habilidad de las operacionales para estimar la dosis efectiva habría también que hacer algunas consideraciones buscando poner en términos cuantitativos la relación entre ambas magnitudes. En la figura 2, tomada de un artículo reciente (11), presenta datos del informe ICRP 74 (8) (o ICRU- 57 (9)) sobre el cociente  $E/H^*(10)$  para fotones en función de la energía y para diferentes geometrías de irradiación. En la figura puede observarse que mientras que en la zona de alta energía ( $> 1 \text{ MeV}$ ) el cociente  $E/H^*(10)$  presenta valores razo-

nables, entre 0,6 y 0,9, indicando una sobreestimación entre el 70 y el 10% de  $E$  por parte de  $H^*(10)$ , este valor decrece rápidamente y para todas las geometrías al disminuir la energía de los fotones.

Tomando como referencia a la irradiación isótropa, la mas común en situaciones prácticas con radiación dispersa, puede verse que entre 1 y 0.1 MeV la sobreestimación crece hasta factores cercanos a 2. A 60 keV el factor de sobreestimación es de 2,1 y llega a ser de 10, un orden de magnitud, a 25 keV. Se puede argumentar tal y como se hace en los informes ICRP-74 e ICRU 57, que para estas energías tan bajas la validez de  $E$  como magnitud de protección es muy limitada al ser tan solo la piel y el cristalino los órganos realmente expuestos. Pero por idénticos motivos tampoco debería ser entonces 10 mm la profundidad para la medida de  $H^*(d)$ , aunque por encima de 17 keV la radiación fotónica tiene ya la consideración de radiación penetrante y por tanto es de aplicación la recomendación de los 10 mm como profundidad de medida. En condiciones prácticas el espectro de radiación dispersa es generalmente muy ancho, incluyendo bajas energías desde luego, y dependiendo del tipo de instalación y de la energía de las fuentes o haces estará centrado hacia mayor o menor energía, pero no es aventurado suponer que para espectros anchos en el rango de energía inferior a 1 MeV, la sobreestimación práctica de la dosis efectiva en medidas efectuadas con un instrumento calibrado en términos de  $H^*(10)$  sea del orden de un factor 2 o 3 o incluso superior.

La situación con campos neutrónicos tiene también aspectos insatisfactorios, que pueden apreciarse en la figura 3,

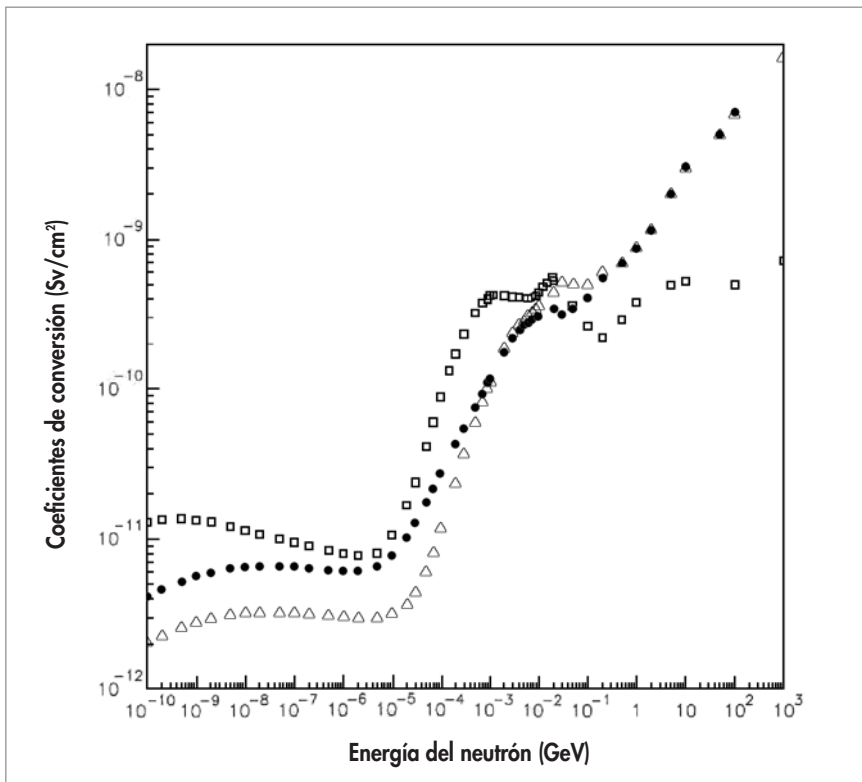


Figura 3. Coeficientes de conversión fluencia-a-dosis efectiva como una función de la energía del neutrón incidente para irradiación isotrópica de acuerdo con la Publicación 60 de ICRP, comparados con aquellos basados en la convención propuesta en la Publicación 92 de la ICRP. También se muestran los factores de conversión fluencia-a-dosis equivalente ambiental  $w_R$  de acuerdo con la publicación 60 de ICRP;  $\Delta$   $w_R$  de acuerdo con la publicación 92 de ICRP; dosis equivalente ambiental de acuerdo con la Publicación 60 de ICRP.

tomada de una publicación muy reciente (12). En ella se presentan los coeficientes de conversión fluencia/dosis efectiva en función de la energía de los neutrones para irradiación isotrópica. Se presentan tres grupos de datos, empleando los valores para los factores  $w_R$  propuestos en el ICRP-60 (puntos negros), los valores revisados para este mismo factor propuestos en el ICRP-92 (triángulos) y por último los factores de conversión fluencia/dosis equivalente ambiental,  $\Phi/H^*(10)$  (cuadrados).

Como los tres grupos de factores de conversión están obtenidos por unidad

de fluencia, sus valores respectivos pueden emplearse para comparar directamente las tres magnitudes resultantes, E (ICRP-60), E (ICRP-92) y  $H^*(10)$ . Puede observarse como  $H^*(10)$  sobreestima en factores que van desde 6 a 2 a la dosis efectiva para todo el rango de energías inferior a 1 MeV, si se toman los valores para  $w_R$  del ICRP-60, siendo la sobreestimación aun mayor, alcanzando un orden de magnitud, si se emplean los valores recientemente propuestos en el ICRP-92 y que parece van a ser recogidos en unas nuevas recomendaciones de la ICRP de próxima aparición. Además

para energías superiores a 1 MeV puede apreciarse que  $H^*(10)$  empieza a no proporcionar una estimación conservadora de E, dosis efectiva, adoptando para una misma fluencia valores inferiores tanto para la aproximación ICRP-60 como para la ICRP-92, que en esta zona del espectro no difieren demasiado. Es interesante notar que los cambios propuestos para el factor  $w_R$  de neutrones, al disminuir E para un mismo valor de dosis absorbida en el rango térmico, hacen crecer la discrepancia entre E y  $H^*(10)$  en este rango (sobreestimación de E). Los cambios además no arreglan de modo significativo la discrepancia que tiene lugar para altas energías (subestimación de E).

Como en el caso de radiación fotónica, y aún en mayor medida, los campos neutrónicos de interés práctico abarcan generalmente un espectro muy amplio de energías, por lo que pudiera existir una cierta compensación entre la subestimación y la sobreestimación que tienen lugar en las diferentes regiones del espectro. No obstante, la contribución de neutrones de alta energía a la dosis efectiva es importante en actividades tales como la dosimetría de tripulaciones de vuelos comerciales, la exploración espacial y en el entorno de aceleradores de alta energía, y en esas actividades la actual definición de  $H^*(10)$  no es considerada adecuada. Por último hacer notar que existen opiniones discrepantes respecto de las propuestas del informe ICRP-92 y de hecho casi inmediatamente después de su publicación aparecieron varios trabajos con propuestas alternativas, la primera de ellas (13) se presentó precisamente en el Congreso IRPA-11 celebrado en Madrid y organizado por la SEPR.



La conclusión nada forzada de lo expuesto es que las magnitudes operacionales no constituyen una alternativa exenta de problemas. La dosis equivalente personal, la magnitud más relevante, no es medible y requiere el establecimiento de otra magnitud intermedia para salvar las dificultades inherentes a su definición directamente sobre el cuerpo humano. La característica que en ocasiones se considera como la aportación más relevante de estas magnitudes es la de proponer profundidades específicas para la medida de la dosis equivalente para radiación penetrante y no penetrante, resulta cuando se aplican los valores propuestos, en sobreestimaciones excesivas o en subestimaciones de importancia como ya se ha visto en los párrafos anteriores. Además, en el caso concreto de campos neutrónicos la esfera ICRU no parece ser un sustituto adecuado para el cuerpo humano.

En un artículo reciente (12) al defender la conveniencia de no alterar el valor  $w_R=1$  para fotones de baja energía en contra de claras evidencias radiobiológicas y microdosimétricas, se argumenta que después de todo si ese parámetro aumentara hasta valores de 2 ó 3, el resultado práctico sería nulo, toda vez que en ese rango de energías las magnitudes operacionales ya sobreestiman a la dosis efectiva en un orden de magnitud (lo del ocho y el ochenta). El argumento tiene connotaciones cínicas que van en la línea de considerar a las operacionales como las magnitudes de referencia en detrimento de las limitadoras. En la práctica, los límites de dosis legales están expresados en términos de la dosis efectiva, y cuando sus valores son trasladados sin más a la dosis equivalente personal, (o a la dosis equivalente am-

biental si esta se tuviera que emplearse para estimar las dosis individuales), tales niveles sufren de hecho una reducción en la misma proporción en que las operacionales sobreestiman a las limitadoras, en el caso de fotones y neutrones de baja energía la reducción pudiera llegar a ser como ya hemos visto de un orden de magnitud. El asunto no es baladí y las implicaciones y también el coste económico de esta situación merecería un estudio serio, ya que no parece que cualquier nivel de sobreestimación de la dosis efectiva pueda ser aceptable. Si la situación fuera la contraria y como ocurre para neutrones de alta energía las operacionales subestimarán a las limitadoras entonces no se aseguraría la debida protección frente a ese tipo de radiaciones.

Después de todo lo expuesto y comentado, presentar las magnitudes operacionales como medibles y buenas estimadoras de las limitadoras parece algo optimista. Su empleo induce errores sistemáticos en la estimación de la dosis efectiva, que suponen la existencia de una nueva fuente de incertidumbre tipo B, que en la práctica parece no tenerse en cuenta cuando se toman los valores de las operacionales como sustitutivos directos de las limitadoras. La notable complejidad o artificialidad de sus definiciones tampoco ayuda a que puedan ser tomadas como una solución definitiva o perdurable para la dosimetría de la radiación externa en niveles de protección.

### **Requerimientos de exactitud y precisión en las medidas dosimétricas**

Los grandes niveles de incertidumbre, por no decir la indeterminación, en al-

gunos de los factores de tipo radiobiológico incluidos en la definición de las magnitudes limitadoras y los problemas aun de mayor entidad inherentes a la definición de las operacionales que se han expuesto en las secciones precedentes, hacen oportuno plantear el importante asunto de los requerimientos de exactitud y precisión en las medidas dosimétricas. Es relevante determinar esos requerimientos ya que el esfuerzo tecnológico requerido y consecuentemente el coste de los preceptivos controles dosimétricos a los trabajadores expuestos depende en buena medida de ello.

Aparentemente, la dosimetría interna parece estar afectada en menor medida que la externa por la indeterminación de los factores radiobiológicos, los factores de ponderación de la radiación primordialmente, toda vez que para los tipos de radiación más relevantes en dosimetría interna, alfa, beta y fotones de alta energía, parece haber consenso en los valores para los factores de ponderación. Lo que no deja de ser sorprendente ya que la falta de datos concluyentes sobre el factor RBE de la radiación de referencia en principio afectaría por igual a cualquier tipo de radiación. Sin embargo, la discusión sobre los factores radiobiológicos, como ya se ha visto, está principalmente centrada en neutrones, protones y también para fotones de baja energía relevantes principalmente en exposiciones externas. Los electrones y fotones de baja energía pueden también contribuir a las dosis internas, pero tienen fundamentalmente importancia en radiodiagnóstico con haces externos, como es el caso de la mamografía, aunque no hay que olvidar el problema no resuelto de los electrones

Auger emitidos por algunos radiofármacos.

Los niveles de incertidumbre en dosimetría interna, considerados elevados y difíciles de cuantificar de modo global, proceden de la existencia de múltiples factores prácticos con influencia en el resultado final, que en muchas ocasiones no son o no pueden ser bien conocidos. Para algunos tipos de radiación influyen en la incertidumbre de medida los muy bajos niveles de actividad que deben ser determinados, que en ocasiones significan valores para la dosis efectiva demasiado cercanos a los límites, a veces incluso y paradójicamente con actividades mínimas detectables por encima de los niveles de investigación establecidos en algunas regulaciones. Además hay que añadir la incertidumbre debida al complejo comportamiento biocinético de los agentes contaminantes y a los propios modelos para los sistemas y órganos del cuerpo humano.

La mejora deseable de los niveles de incertidumbre en dosimetría interna podría venir de potenciar la investigación tanto en modelos biocinéticos como en la mejora de los métodos de medida. Ambas líneas de investigación son costosas y requieren de una considerable infraestructura para abordarlas, laboratorios de experimentación con animales, investigación en nuevos materiales semiconductores o centelleadores. En ocasiones se ha propuesto la construcción de dispositivos muy complejos como detectores proporcionales multicelulares, similares a los empleados para la investigación en física de altas energías para la medida de emisores gamma de baja energía en dosimetría interna, pero sin alcanzar por el momento resultados prácticos.

No es previsible que en el corto ni en el medio plazo se logren avances significativos que permitan superar la situación actual respecto de las incertidumbres inherentes a la determinación de las dosis internas. Ello hace si cabe más necesario en este sector el empleo de métodos de cálculo de dosis armonizados y de sistemas de medida de calidad contrastada y bien trazados a los laboratorios de referencia. Todo ello buscando que las estimaciones de las dosis internas se hagan de modo uniforme y que los resultados proporcionados por los diferentes laboratorios y servicios tengan la necesaria coherencia. La organización de intercomparaciones de las diferentes técnicas de medida y de métodos de cálculo son actividades esenciales a este respecto.

Mientras que en dosimetría interna los elementos de incertidumbre son inherentes al propio proceso de estimación de la dosis efectiva, en dosimetría externa la proposición de las magnitudes operacionales puede haber generado una cierta confusión sobre los requisitos de exactitud y precisión que es importante analizar. En ocasiones parece que las magnitudes operacionales se están tomando como un fin en sí mismas, olvidando su carácter subsidiario de las limitadoras y ello a veces lleva a plantear ejercicios que pueden calificarse de inútiles desde el punto de vista de la mejora en la protección frente a radiaciones, pretendiendo optimizar la precisión y la exactitud de las medidas dosimétricas en términos de las operacionales más allá de lo que pudiera ser consecuente con la incertidumbre inherente a la magnitud dosis efectiva. Como ya ha sido comentado, ésta incertidumbre reside en el pobre e insuficiente conocimiento de

los efectos biológicos y de los factores de riesgo de las radiaciones en el rango estocástico de dosis. También parecen ignorarse las apreciables discrepancias cuantitativas entre ambos grupos de magnitudes, limitadoras y operacionales.

Evidentemente, una vez definidas las magnitudes operacionales es técnicamente factible tratar de desarrollar métodos o procedimientos de calibración y medida que permitan su determinación experimental en condiciones de baja o muy baja incertidumbre. Todo depende del esfuerzo, económico y de trabajo, que se esté dispuesto a invertir en alcanzarlo. El problema viene de la justificación de ese esfuerzo, justificación que solo se alcanzaría si ello permitiera una mejora congruente en los niveles de protección, lo que puede no ser el caso.

La ICRP emitió en su informe 75 de 1997 (14) orientaciones acerca de los requerimientos de incertidumbre recomendables para las medidas para dosimetría personal de la radiación externa. En la tabla IV se recogen los intervalos de incertidumbre propuestos.

La figura 4 presenta gráficamente los requerimientos contenidos en la tabla anterior, aplicados al caso de un control mensual de dosis y tomando la dosis para el registro como  $2\text{mSv}/12 = 0.17\text{ mSv}$  (ICRP-60/ICRP-35) o como  $1\text{mSv}/12 = 0,085\text{ mSv}$  (ICRP-60/ICRP 75).

En la figura las líneas en negrita representan los límites de incertidumbre propuestos por ICRP y las líneas discontinuas son interpolaciones entre las dos regiones de dosis, cerca del límite de dosis y cerca del valor de registro. Las curvas resultantes de la interpolación se conocen como curvas trompeta y proporcionan una estimación conti-





**Tabla IV**  
**Requerimientos de incertidumbre en dosimetría personal de la radiación externa**

a) Para un valor de dosis igual o en las cercanías de los límites de dosis, la relación entre la dosis medida  $H_m$  y el valor adoptado como convencionalmente verdadero  $H_t$  debe cumplirse la relación:

$$1.5 \geq H_m/H_t \geq 1/1.5$$

al nivel de confianza del 95%. Este nivel de confianza se interpreta como que 19 de 20 medidas deben cumplir la relación anterior.

b) Para un valor de dosis menor o igual al valor de registro  $H_r$  para una frecuencia mensual, debe cumplirse la relación:

$$2.0 \geq H_m/H_r \geq 0$$

En este caso no se especifica intervalo de confianza.

nua de los límites recomendados de incertidumbre. Se puede apreciar que para la región cercana a los límites de dosis el intervalo aceptado de incertidumbre es el comprendido entre +50% y -30%, mientras que para la región del nivel de registro la incertidumbre respecto del verdadero valor puede llegar a ser del  $\pm 100\%$ . Una descripción detallada y comentada de los requisitos de incertidumbre en dosimetría personal puede encontrarse en la referencia 15.

Podría parecer que son niveles poco exigentes pero hay que tener presente que se refieren a la incertidumbre global, que incluye no solo a la incertidumbre estadística de las medidas sino también a la contribución de otros factores instrumentales tales como la respuesta direccional y con la energía, además de la debida a la de calibración, que normalmente es de entidad comparativamente pequeña. No son en absoluto niveles triviales de alcanzar como lo demuestran los resultados

de algunas intercomparaciones internacionales llevadas a cabo recientemente (16). Los niveles establecidos para actividades de dosimetría personal pueden ser tomados también como referencia para otras actividades dosimétricas en protección radiológica frente a la radiación externa para las que no hay recomendaciones específicas.

Como ha sido mencionado en la proposición de los niveles de incertidumbre para la dosimetría personal de la radiación externa se han tenido en cuenta la incertidumbre asociada a los riesgos biológicos de las dosis bajas y también el carácter indirecto de las magnitudes operacionales y el grado de acuerdo entre éstas y las limitadoras. No tendría sentido proponer que las operacionales se midieran con niveles de incertidumbre muy exigentes cuando entre ellas y la dosis efectiva puede haber sobreestimaciones o subestimaciones que pueden llegar a ser hasta de un orden de magnitud.

## Conclusiones

Se ha efectuado un análisis de diferentes aspectos del sistema vigente de dosimetría para la protección radiológica que revela claras insuficiencias e indeterminaciones en algunos aspectos fundamentales, que además parecen difíciles de superar aun con renovados esfuerzos investigadores. Las dificultades par estimar cuantitativamente los riesgos para la salud que se suponen a las bajas dosis de radiación están en la base de esas dificultades.

A la luz de los resultados del análisis de los fundamentos del sistema, éste se ha extendido a la consideración relativa de la dosimetría externa y la interna sus similitudes y diferencias,

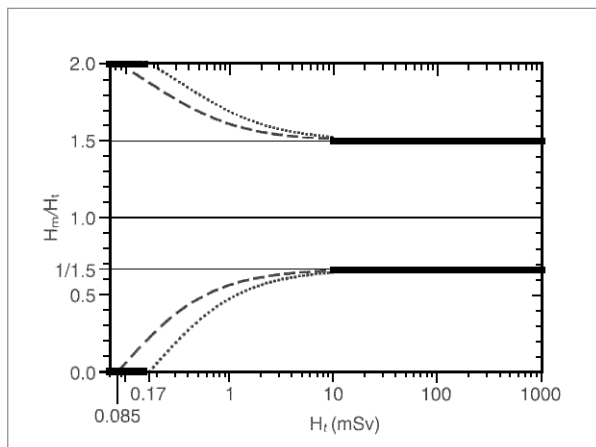


Figura 4. Límites para el cociente  $H_m/H_t$  para monitorización mensual de acuerdo con ICRP 60 e ICRP 75 (líneas en negrita) y las curvas trompeta para  $H_0 = 0,17$  mSv (línea de puntos) y  $H_0 = 0,085$  mSv (línea discontinua).  $H_m$  es el valor de dosis medido y  $H_t$  el valor verdadero convencionalmente. El 95% de todas las medidas deben estar dentro de este límite.

haciendo especial referencia a las características de las denominadas magnitudes operacionales para la dosimetría de la radiación externa. Aunque estas magnitudes se han propuesto como la alternativa medible a las esencialmente inmedibles magnitudes limitadoras, la realidad es que presentan algunas características poco convenientes, proporcionando en un buen número de situaciones una estimación de la dosis efectiva realmente pobre. Ante ello, cabría plantearse la posibilidad de que tal y como se hace en dosimetría interna, la dosis efectiva en irradiaciones externas también se calcule, en aquellos casos en que el cumplimiento de los límites pueda estar comprometido, partiendo de magnitudes caracterizadoras del campo de radiación que podríamos designar como seguras y realmente medibles, como puede ser la distribución espectral de la fluencia. El muy notable avance de las técnicas de simulación por métodos de Monte Carlo aplicados a la dosimetría de radiaciones (17) avalaría además del interés y la oportunidad de esta propuesta innovadora, también su viabilidad tecnológica.

No obstante sus limitaciones el sistema vigente de dosimetría para protección radiológica tiene entre sus méritos el haber contribuido mediante la cuantificación de las dosis incurridas en las diferentes prácticas a su disminución hasta niveles triviales en la gran mayoría de los casos. Hoy día la experiencia de los servicios de dosimetría personal es que las dosis individuales, tanto para exposiciones internas como externas, son o están muy cerca de ser las debidas exclusivamente al fondo radiactivo natural.

Sin embargo, cuando las dosis medidas o estimadas se acercan a los valo-

res de los límites reglamentados, la incertidumbre en la estimación de la dosis efectiva se traduce también en indeterminación sobre el cumplimiento real de los preceptos legales. En el caso de interna, e independientemente de consideraciones acerca de la protección realmente ofrecida, la realidad es que decisiones administrativas tomadas sobre los valores centrales de las estimaciones de dosis podrían ser objetables en base a las considerables incertidumbres inherentes a esos valores. En el caso de externa, las medidas en términos de las operacionales de hecho son también consideradas en ocasiones como inadecuadas para estimar el cumplimiento de los límites de dosis, estando en algunas circunstancias recomendado el estimar por algún medio la dosis efectiva.

La duda sobre si tenemos el mejor sistema de dosimetría para garantizar la protección requerida frente a las radiaciones ionizantes es una duda razonable que merecería ser debatida incluyendo aspectos técnicos, económicos y posiblemente también psicológicos.

## REFERENCIAS

- 1) International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 60, Ann.ICRP21 (1-3) (Oxford:Pergamon Press) (1991).
- 2) Real Decreto 783/2001 de 6 de Julio. Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes. BOE num 178 2784-27393 (2001).
- 3) International Commission on Radiological Protection. Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality factor, Q, and Radiation Weighting Factor  $w_R$ . ICRP Publication 92. Ann.ICRP 33(4) (Oxford†: Elsevier) (2003).
- 4) Real, A. y Delgado, A. Nuevas evidencias sobre la diferente eficiencia radiobiológica de las radiaciones de baja LET. RADIO-PROTECCIÓN. N.º Extraordinario Mayo 74-78 (2002).
- 5) Dietze, G. and Siebert, B.R.L. Photon and neutron dose contributions and mean quality

factors phantoms of different size irradiated by monoenergetic neutrons. Radiat. Res. 140, 130-133 (1994).

- 6) International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU report 39 Determination of Dose Equivalents Resulting from External radiation Sources. (1985).

- 7) International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU report 51 Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry (1993).

- 8) International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for use in radiological against external radiation. ICRP publication 74. Ann.ICRP26(3-4) (Oxford: Pergamon Press).

- 9) International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU report 57. Conversion Coefficients for use in radiological against external radiation. (1998).

- 10) Boehm, J. and Thompson, I.M.G. Adaptation of the present concept of dosimetric radiation protection quantities for external radiation to radiation protection practice. Radiat. Prot. Dosim. 109, 311-315 (2004).

- 11) Dietze, G. and Alberts, W.G. Why it is advisable to keep  $w_R = 1$  and  $Q = 1$  for photons and electrons. Radiat. Prot. Dosim. 109 297-302 (2004).

- 12) Pelliconi, M. The impact of ICRP publication 92 on the conversion coefficients in use for cosmic ray dosimetry. Radiat. Prot. Dosim. 109 303-309 (2004).

- 13) Dietze, G. and Harder, D. Proposal for a modified radiation weighting factor for neutrons. Proceedings of the IRPA-11 Congress www.irpa11.es (2004).

- 14) International Commission on Radiological Protection. General principles for the radiation protection of workers. ICRP publication 75 Ann. ICRP27(1) (1997).

- 15) Ambrosi, P., Fantuzzi, E., de Carvahlo, A.F., Delgado, A., Lindborg, L. and Bartlett, D.T. Procedures for Routine Individual Dose Assessment of External Radiation within EU Countries and Switzerland Status of Harmonisation on 1 April 1999 Radiat Prot. Dosim. 89,7-53 (2000).

- 16) Bordy, J.M., Stadtmann, H., Ambrosi, P., Bartlett, D.T. Christensen, P., Colgan, T. and Hyvonen, H. Performance Test of Dosimetric Services in EU Member States and Switzerland for the Routine Assessment of Individual Doses (Photon, Beta and Neutron). Radiat. Prot. Dosim. 89, 107-154 (2000).

- 17) Gualdrini, G. Monte Carlo simulations for in vivo internal dosimetry. IRPA-11 Congress. Refresher Course RC-3 a www.irpa11.es (2004).

# Aspectos de protección radiológica y control de calidad de la técnica de intensidad modulada

Roberto Sánchez, Moisés Sáez, Francisco Fayos, Azucena Pozuelo, Jorge Gutiérrez, Germán Rey.

Servicio de Física Médica y Protección Radiológica. Hospital Ruber Internacional.

## RESUMEN

La técnica de IMRT se puso en marcha en nuestra institución en el año 2001. Presentamos los resultados de control de calidad de tratamientos de los primeros 166 pacientes que se han beneficiado de esta técnica en diversas localizaciones, principalmente próstata y cabeza y cuello. Para la implementación de esta técnica fue necesario revisar algunos aspectos de protección radiológica, ya que la administración de tratamientos con esta técnica conlleva un aumento en la proporción de fugas. También ha sido necesario implementar un procedimiento de comprobación de que la dosis que se administra al paciente se corresponde con lo planificado.

Hemos estimado que con esta técnica la dosis periférica se puede duplicar, y que el aumento en la proporción de radiación de fugas requiere un tratamiento especial a la hora de diseñar los blindajes de protección. Hasta el momento la dosis comprobada en maniquí ha cumplido con la tolerancia de 5% a un nivel de confianza de 93,5%.

## INTRODUCCIÓN

La radioterapia con intensidad modulada (IMRT) [1,2] se presenta como una novedosa opción terapéutica con la que dar un paso más en la escalada de dosis administrada a los tumores o bien disminuir las dosis en órganos de riesgo. En dicha técnica los campos de radiación dejan de ser uniformes, y generalmente son optimizados por un sistema de planificación inversa, que buscará el plan óptimo a través de la

conformación de las fluencias de los campos. A través de este método es posible mejorar la adecuación de las distribuciones de dosis con respecto a la radioterapia tridimensional conformada (RT3D), y en muchos casos aumentar la dosis a administrar en el PTV sin aumentar la probabilidad de complicación en los órganos de riesgo. El atractivo de la técnica ha conseguido que ya se haya implementado en muchos centros del mundo (EE. UU. y Europa principalmente), a pesar de que

los resultados expresados en términos de supervivencia del paciente sean todavía escasos. Por esta razón, no han dejado de alzarse voces críticas que no han dudado en calificar al fenómeno de la IMRT como un alarde tecnológico, más que de una técnica con resultados esperanzadores [3-5].

Se han desarrollado diferentes soluciones comerciales para conquistar estos objetivos [6], las más extendidas son las que utilizan un colimador multi-láminas (MLC), ya que es un elemento

## ABSTRACT

The IMRT technique was implemented in our hospital in year 2001. Results of the quality control of treatments given to the first 166 patients using IMRT in different anatomical sites, mainly prostate and head and neck are presented. Compared to other radiotherapy techniques, IMRT involves an increase of the radiation leakage from the accelerator head during treatment delivery. Therefore, the implementation of this technique involved the study of some radiation protection parameters. A procedure to check the agreement between the dose delivered to the patient and that planned by the system was developed.

Results show that the patient peripheral dose estimated with our methodology could increase in a factor 2. Besides this paper highlights that the additional radiation leakage through the accelerator head needs a special consideration when the room shielding is designed. At the moment, the agreement between phantom measurements and calculations is within 5% of tolerance with 93.5% of confidence level.

que en los últimos años es adquirido en la mayoría de aceleradores para realizar tratamientos de RT3D, y puede ser habilitado para IMRT instalando software adicional y sin apenas modificaciones del hardware. Otras soluciones como el MimicÆ de Nomos Corp. - que es la primera que apareció en el mercado - requieren la adquisición de hardware adicional que se coloca en el cabezal del acelerador.

Dentro de la IMRT con MLC hay dos modalidades, la denominada IMRT segmentada y la IMRT dinámica. En la primera, también llamada *step and shoot* la modulación de la fluencia se consigue dividiendo cada campo en varios segmentos donde el MLC posee distintas conformaciones, el acelerador coloca el MLC en las posiciones prescritas para el segmento, administra el número de unidades de monitor y cuando finaliza se mueven las láminas a las posiciones del siguiente segmento para administrar las UM correspondientes a ese segmento. El número de segmentos es variable, pero suele estar entre una o dos decenas por campo. Si bien también realizamos sencillos tratamientos de forma manual y directa tipo *step and shoot* de 2 o 3 segmentos por campo, en general están considerados como IMRT sólo los tratamientos realizados con optimización mediante un sistema de planificación inversa. En la modalidad de IMRT dinámica, también denominada *sliding window*, cada campo es dividido en un número de segmentos, sólo que en este caso son unos doscientos y el acelerador no deja de radiar con una tasa variable mientras simultáneamente las láminas se mueven para modular la intensidad.

En nuestra institución se implementó en el año 2001 la técnica de intensidad modulada basada en multiláminas dinámico, y para ello ha sido necesario realizar medidas para caracterizar el MLC, para comprobar la fiabilidad de nuestros detectores, comprobar la exactitud con que administramos la dosis y desarrollar un programa de garantía de calidad, así como considerar aspectos adicionales de protección radiológica<sup>1</sup>. En este trabajo nos centramos en lo que respecta a la protección radiológica del personal y del paciente, incluyendo en éste último la verificación de la dosis administrada al mismo.

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se ha montado la técnica en dos aceleradores Varian®, un Clinac 2100 C/D de energías nominales de 6 y 15 MV, provisto de un colimador multiláminas Mark IV, de 80 láminas de 1 cm. de ancho en su proyección en el isocentro. El otro es un Clinac 600 C/D de energía nominal 6 MV con un MLC Millennium de 120 láminas, de un ancho de 0,5 cm. para las 40 láminas de la zona central del campo y 1 cm. las 20 láminas más periféricas (10 láminas en dirección hacia gantry y 10 hacia la mesa). Contamos con una red de registro y verificación (R/V) de datos que comunica los aceleradores a un servidor que, conectado con los planificadores, almacena toda la información necesaria para administrar los tratamientos (UM, ángulos, posición MLC, etc.). El software de dicha red es el programa Varis v.1.4 de Varian®. Dichas redes R/V de datos ya se hicieron necesarias para transmitir al acelerador la información de los tratamientos conformados con multiláminas (las

≈80 posiciones de las láminas por cada campo), y se hacen más necesarias para transmitir la gran cantidad de datos que se generan en los planes de IMRT dinámicos, que son del orden de 10<sup>5</sup> parámetros.

Contamos con el planificador Cadplan v.6.4.7 junto con el módulo de optimización para IMRT Helios, ambos de Varian®. El planificador Cadplan posee un algoritmo de convolución para el cálculo de dosis.

### **Consideraciones sobre protección radiológica**

En principio cuando se utiliza la técnica de intensidad modulada, la dosis administrada al paciente en cada sesión es similar a la que se viene dando con RT3D, si bien, el número de UM es mayor con IMRT. Dicha eficiencia en UM/Gy depende de diferentes aspectos como la energía, la profundidad a la que se prescribe la dosis, el tamaño de los campos y la complejidad con que se modula el campo. Por ejemplo, cuando se irradia con campos con modificadores como las cuñas el número de unidades de monitor por Gy administrado es mayor que cuando se irradia con campos sin cuña. En una estimación realizada por Followill [7] el número de unidades de monitor promedio administradas con la técnica IMRT con multiláminas es unas 2.8 veces mayor que con campos conformados sin cuña para administrar la misma dosis. Esta menor eficiencia tiene como consecuencia un aumento de la radiación de fugas a través del cabezal del acelerador. Hemos realizado una estimación similar comparando 10 pacientes de cada técnica (IMRT con *sliding window* y RT3D) para las localizaciones

<sup>1</sup> Se puede solicitar información más detallada a los autores sobre diversos aspectos de la implementación de la técnica a través del correo electrónico [radiofisica@ruberinternacional.es](mailto:radiofisica@ruberinternacional.es)



de próstata y cuello y hemos calculado las unidades de monitor promedio necesarias para administrar un Gy en el punto de prescripción, para así calcular las fugas producidas en cada caso. Al cociente entre las UM promedio necesarias para administrar un Gy con IMRT entre las UM promedio necesarias para administrar un Gy con RT3D lo llamaremos factor de eficiencia de UM/Gy para IMRT/RT3D.

Este aumento de las fugas deberá ser analizado en dos aspectos, en el diseño de los blindajes del búnker que aloja la unidad para proteger tanto al personal expuesto y público, y en lo que se refiere a la dosis periférica que recibe el paciente.

#### *Blindajes de protección.*

En nuestro hospital hemos implementado la técnica de IMRT en una unidad multienergética ya establecida previamente con unos blindajes calculados para tratamientos de RT3D, y en otro acelerador que se diseñó teniendo en cuenta que se iban a incluir pacientes tratados con IMRT. En el caso de la unidad ya establecida previamente será necesario realizar una revisión a la baja de la carga de trabajo. Para el cálculo de blindajes utilizamos una carga de trabajo de 1000 Gy/semana, que se corresponde con unos 100 pacientes/día de 2 Gy por paciente. Suponiendo que con la técnica de IMRT se producen  $t$  veces más fugas (= factor de eficiencia de UM/Gy para IMRT/RT3D) y que reducimos la carga de trabajo a 80 pacientes al día podremos tratar  $n$  pacientes de IMRT siempre que se cumpla la siguiente condición:

$$(80 - n) \times f + n \times t \times f = 100 \times f$$

Ecuación 1.

Donde  $f$  es la fracción de radiación de fugas. Esta reducción en la carga de trabajo está también justificada por el hecho de que los pacientes de IMRT consumen más tiempo de acelerador, ya que implican mayor número de campos, más UM/campo y mayor frecuencia de verificación de posicionamiento. El otro búnker fue diseñado teniendo en cuenta el aumento de la radiación de fugas y las cargas de trabajo RT3D e IMRT.

#### *Estimación de la dosis periférica.*

Nos hemos propuesto comparar la dosis que reciben los pacientes fuera del volumen de tratamiento cuando son tratados con IMRT frente a RT3D. La estimación de la dosis periférica se ha simplificado a la suma en un punto a 0.6 m del isocentro de tratamiento de las contribuciones debidas a las fugas y dispersión del cabezal y la dispersión del propio paciente. Para estimar dichas contribuciones hemos acudido a datos publicados [8] donde hemos obtenido la dosis a una distancia de 0.5 m del límite de un campo 20x20 normalizado a la profundidad de dosis máxima, donde suponemos una relación UM/Gy de 100, que resultó ser de 0.05% para 6 MV y para 15 MV hemos tomado los datos referidos para 18 MV que es 0.07%. De dicha dosis, aproximadamente la mitad corresponde a fugas y dispersión del cabezal que dependen del número de UM administradas, y la otra mitad a la dispersión del propio paciente que depende de la dosis administrada en el punto de prescripción. En el caso de la IMRT las contribuciones por fugas y dispersión del cabezal han sido aumentadas por el factor de eficiencia de UM/Gy para IMRT/RT3D y sumadas a la contribución de la dispersión del paciente.

Para estimar la dosis de fugas de neutrones para la energía de 15 MV, nos remitimos a datos ya publicados sobre un acelerador Varian [9], que nos proporcionan medidas del equivalente de dosis de neutrones en mSv por Gy de fotones en el isocentro, para un campo 20 cm x 20 cm en función de la distancia al eje del haz. Para 0.6 m resulta ser 0.8 mSv/Gy.

Por tanto, para obtener las fugas en el caso de los tratamientos de intensidad modulada que hemos considerado, el tanto por ciento de fugas deberá ser multiplicado por la eficiencia que hemos calculado previamente.

#### **Control de calidad para cada paciente**

Los tratamientos de radioterapia conformada 3D se basan en la irradiación del paciente con unos haces estándar y uniformes, modificados con una serie de elementos estándar como cuñas y conformados individualmente. No es necesario verificar los haces para cada paciente, basta la vigilancia de los haces uniformes y los modificadores estándar para controlar los tratamientos de todos los pacientes, y solamente las conformaciones personalizadas necesitan ser verificadas de forma individual en el procedimiento de simulación. En la técnica de intensidad modulada, en cada paciente los haces son modificados de modo no estándar, y por lo tanto, la única forma de verificar los haces de todos los pacientes es hacerlo de forma individual con cada uno de ellos. Si bien, ésta es una afirmación sujeta a controversia [10], ya que algunos autores consideran que es posible controlar a todos los pacientes tratados con IMRT con una serie de tests a su sistema de modulación de intensidad y con la validación independiente de las

unidades de monitor de cada campo. Mientras los planificadores no sean capaces de considerar todos los efectos de los distintos modelos de MLC, predecir la variabilidad de la tasa de dosis y mucha de la información crucial de cálculo permanezca bajo secreto industrial, se hace necesaria en nuestra opinión, la comprobación individualizada de cada tratamiento.

En nuestra institución verificamos en cada paciente, antes de recibir la primera sesión del tratamiento, que la distribución de dosis planificada coincide con la que administra el acelerador dentro de unos niveles de tolerancia. Para ello comprobamos la dosis absoluta en un punto con una cámara de ionización y obtenemos distribuciones de dosis 2D con película radiográfica. La comparación se realiza frente a un cálculo hecho en el planificador, el cual tiene la capacidad para exportar fluencias de otros pacientes a nuestro paciente maniquí donde realizamos las medidas y por tanto reproducir las condiciones de irradiación de la sesión de medidas.

*Medida de dosis en puntos.*

Nuestro dosímetro se compone de una cámara de ionización Wellhöfer IC15 de 0,13 cc. insertada en un maniquí de metacrilato de 2 piezas (figura 1). La cámara está situada a una profundidad de 11,5 cm. en el maniquí y éste se coloca a una distancia fuente superficie de 100 cm. El conjunto cámara maniquí ha sido calibrado frente a nuestro dosímetro de referencia, cámara tipo farmer Wellhöfer IC70 de 0.6 cc. a 11,5 cm. de profundidad en agua, DFS=100 cm. e irradiada con un campo 10 cm x 10 cm. A partir de esta comparación obtenemos un factor de calibración para cada una de nuestras energías que nos

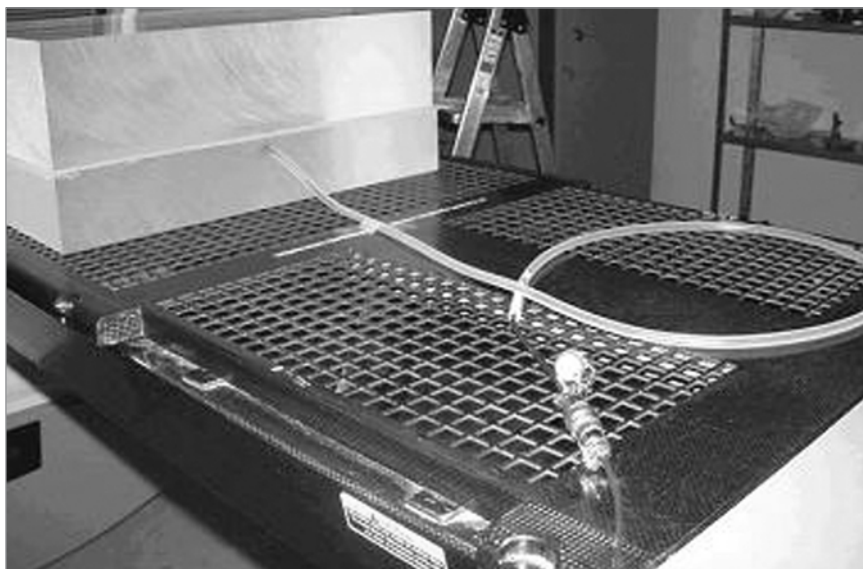


Figura 1: Maniquí utilizado en las medidas de dosis absoluta y relativa de pacientes de IMRT.

relaciona la lectura de nuestro dosímetro con la dosis en agua a 11,5 cm. de profundidad. Cada campo es ejecutado con el gantry a 0° y las mismas UM que resultaron de la optimización, la cámara es posicionada en un punto en medio de la proyección de una de las láminas evitando que el punto efectivo de medida quede en el espacio interláminas, buscándolo siempre con alta dosis y bajo gradiente en todos los campos. Los resultados son introducidos en una hoja de cálculo donde son comparados con los cálculos en Cadplan. De cada paciente se mide la dosis de cada campo procurando que sea en un mismo punto, siempre que en todos los campos esas coordenadas se correspondan con un punto de bajo gradiente y alta dosis. Si no, se escogerá más de un punto.

En nuestro planificador reconstruimos las condiciones de medida (maniquí, DFS, fluencias, etc.) y con las utilidades de software medimos la dosis en esos mismos puntos. El cálculo y la medida se comparan campo a campo,

obteniéndose las diferencias porcentuales  $\delta_i$  para cada campo:

$$\delta_i = \left[ \frac{d_i^{med}}{d_i^{calc}} - 1 \right] \times 100$$

Ecuación 2

donde  $\delta_i$  representan la dosis medida o calculada para cada campo. Como parámetro general de evaluación se obtiene  $\Delta$  como la media ponderada de las diferencias relativas de cada campo, junto con  $\Sigma$  que se calcula como la desviación típica ponderada de las diferencias de los campos, es decir:

$$\Delta = \sum_{i\_campo} w_i \delta_i$$

Ecuación 3

$$\Sigma^2 = \sum_{i\_campo} [w_i (\delta_i - \Delta)]^2$$

Ecuación 4

donde

$$w_i = \frac{d_i^{calc}}{\sum_{j\_campos} d_j^{calc}}$$

Ecuación 5



Para evaluar los resultados de dichas medidas, consideramos que un campo individual no cumple especificaciones si la dosis medida en un punto de alta dosis y bajo gradiente difiere de la calculada en más de un 3%, y un plan será rechazable si  $|\Delta| + 1,5 \times \Sigma > 5\%$  [11,12], que correspondería a un nivel de confianza del 93,5%. La justificación de dicha tolerancia reside en que ésta es la que imponemos al planificador cuando calcula planes de radioterapia conformada en sus situaciones dosimétricas más complejas - campos asimétricos fuera del eje y con modificadores y concluimos en aplicar para IMRT el mismo criterio de calidad que en RT3D.

#### *Medidas de distribuciones 2D con placas.*

El mismo maniquí (figura 1) que utilizamos para medir con cámara de ionización es usado para irradiar las películas Kodak XV con cada una de las fluencias. La disposición de la placa es normal al eje del haz, el maniquí a distancia fuente-superficie 90 cm. y la placa a una profundidad de 10 cm., e irradiamos cada fluencia en una placa. Esta geometría permite el análisis campo a campo de forma independiente. Otros prefieren colocar la placa paralela al eje del haz e irradiar todos los campos en la misma placa cada uno con su correspondiente ángulo de gantry y así obtener un corte transversal con la distribución de dosis. Esta geometría, que requiere el uso de un maniquí específico, es muy conveniente para estudiar la dosis que recibe el paciente en distintos cortes y órganos (por ejemplo, en médula espinal, parótidas, etc.). Por otro lado, sólo permite la verificación en un número limitado de cortes si queremos que sea operativo.

El manejo de la película radiográfica es muy complejo y artesanal, y está afectada por diversos comportamientos que pueden provocar errores sistemáticos en las medidas. Han sido ampliamente descritos en la literatura efectos sobre el comportamiento de la película frente a la radiación dispersa [13-17] y todos aquellos parámetros relacionados con ésta (profundidad o tamaño de campo) u otros efectos como la tasa de dosis o el fraccionamiento de la dosis [18]. Si bien, los distintos autores por lo general están de acuerdo en que dichos efectos, aunque hacen poco práctico el uso de la película para realizar dosimetría absoluta precisa, sí permiten su utilización para realizar dosimetría relativa. Las películas son también muy sensibles a pequeños cambios en las condiciones de revelado por lo que nos vemos obligados a radiar cierto número de placas para obtener una curva de calibración en cada sesión de medidas. Las placas son pinchadas en los bordes para eliminar bolsas de aire y también es pinchada para señalar el eje transversal.

Después de revelar las películas, éstas son digitalizadas para su posterior análisis. Para ello usamos un digitalizador Vidar VXR-12 plus y el software Rit 113 (v.3.11). Las imágenes resultantes son pasadas por un filtro de mediana 5x5 para eliminar en lo posible el ruido propio de la película y el que haya podido aportar el digitalizador. El uso de software específico para analizar las películas y compararlas con los planes calculados es imprescindible. Éste nos permite obtener curvas de calibración para relacionar la densidad óptica con la dosis, leer la información de los ficheros de dosis calculados por el planificador en las mismas condiciones en las que se han radiado las placas y de esta manera podemos

comparar película frente a plan mediante isodoses, tras registrar las imágenes, haciendo coincidir una serie de puntos de control en las mismas.

La evaluación de los resultados en las placas no es tan sencilla como en el caso de la dosis medida con cámara de ionización. Las diferencias de dosis en las zonas de alto gradiente suelen ser muy grandes, por ejemplo en la zona de límite de campo pueden superar el 50%, en zonas fuera del campo (las colas de los perfiles) donde la dosis es muy baja, también pueden darse diferencias grandes como consecuencia de la distinta respuesta ante la radiación dispersa de la cámara de ionización y película. Por ello hay que establecer criterios distintos para los siguientes casos:

- *Regiones de alto gradiente de dosis:* la distancia entre isodoses debe ser menor de 3 mm.
- *Regiones de bajo gradiente de dosis y alta dosis:* la diferencia entre las dosis deberá ser menor del 3%.
- *Regiones de bajo gradiente y baja dosis:* la diferencia de dosis deberá ser menor de unos pocos cGy. Aplicable a las regiones fuera del campo.

Los dos primeros criterios se aglutinan en la función gamma descrita por Low et al. [19], pero ésta no ha sido utilizada en nuestro análisis ya que el software Rit 113 v.3.11 no posee dicha funcionalidad.

## **RESULTADOS**

### ***Consideraciones sobre protección radiológica***

En la tabla I se muestra el número de unidades de monitor necesario para administrar un Gray en el punto de

**Tabla I**  
**UM/Gy promedio para distintas modalidades de tratamiento y distintas localizaciones**

	Próstata		Cuello	
	RT3D	IMRT	RT3D	IMRT
6 MV	-	351	184	475
15 MV	132	239	-	-

**Tabla II**  
**Dosis periférica total (mSv) estimada para un tratamiento de 70 Gy**

	Próstata		Cuello	
	RT3D	IMRT	RT3D	IMRT
6 MV	-	79	49	101
15 MV	130	216	-	-

prescripción (generalmente isocentro) en tratamientos de próstata y cuello con las técnicas RT3D e IMRT. El resultado es en el caso de los pacientes de próstata con 15 MV que es necesario dar 1,8 veces más UM por Gy de prescripción y unas 2.6 veces más cuando se utiliza IMRT con 6 MV. En el caso de los pacientes de cuello sólo estimado para 6 MV serán necesarias 2,6 veces más UM/Gy cuando se utiliza intensidad modulada.

*Blindajes de protección.*

Aplicando la ecuación 1 vemos que unos blindajes calculados con una carga de trabajo de 1000 Gy/semana, es decir 100 pacientes RT3D/día, sería equivalente a una carga de trabajo de 80 pacientes/día de los cuales 10 serían tratados con IMRT suponiendo que éstos últimos producen 3 veces más fugas y distribuidos a partes iguales en los distintos turnos de trabajo. Nuestra otra unidad de radiación, un acelerador monoenergético de 6 MV se alojó en un búnker que fue diseñado teniendo en cuenta que parte de los pacientes se iban a tratar con intensidad modulada, por ello se aumentó la fracción de fugas a 0.12% de modo que fuera un 20% mayor de lo que re-

comendó el fabricante (0.1%). Esto supone que con una carga de trabajo de 80 pacientes/día, 18 podrían tratarse con intensidad modulada.

*Dosis periférica de los pacientes.*

En la tabla II se muestra la dosis periférica estimada según las hipótesis establecidas en el apartado de materiales y métodos. Vemos en el caso de tratamientos de cuello que la dosis periférica cuando se usa IMRT con 6 MV puede aumentar en un 100% respecto de la técnica RT3D. En el caso de la

próstata cuando se usan 15 MV aumenta casi un 70%, si bien cuando se tratan próstatas con IMRT y 6 MV la dosis se reduce en un 40% respecto de los tratamientos RT3D con 15 MV.

**Control de calidad para cada paciente**

En la figura 2 están representadas las magnitudes  $\Delta$  que tiene como barras de error  $1,5\sigma$  [Ecs. 2-5] que resultan del proceso de la medida de la dosis absoluta en un punto para 166 pacientes, de los cuales 91 fueron próstatas, 48 cabeza y cuello y el resto otras localizaciones tales como ginecológicas, columna y partes blandas. La tasa de rechazo de planes hasta el momento ha sido de un 8%, repartida de forma desigual. El primer año la tasa de rechazo de planes fue de un 30%, el segundo año fue de un 15% y en el tercer año fue de un 0%. La mejora gradual puede deberse principalmente a un progresivo refinamiento en el método de medida y a una actualización del planificador que realizó el fabricante, en la que una de las

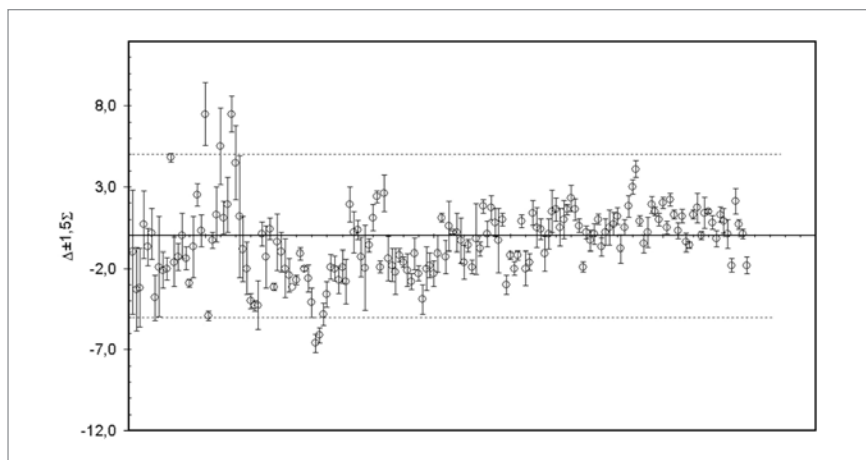


figura 2: Representación de la diferencia entre la dosis absoluta de la medida en un punto con cámara de ionización y del cálculo en el planificador. Los puntos representan la magnitud D según la ecuación 3 y las barras de error representan la magnitud  $15^*S$  tal y como se describe en la ecuación 4. Las líneas punteadas corresponden al límite de  $\pm 5\%$ .





características principales fue obligar al algoritmo de optimización a crear fluencias más suaves y por tanto más fáciles de reproducir y medir. La tasa de rechazo fue también mayor en los planes con muchos campos. Cuando se realizaron planes de 5 campos, la tasa de rechazo fue 2% mientras que cuando se realizaron planes de 7 ó 9 campos la tasa de rechazo fue de 18%. Este hecho podría explicarse debido a que en las dosimetrías con más campos, la dosis que aporta cada uno de ellos es menor que en dosis con menos campos. La dificultad asociada a la medida tanto de la dosimetría relativa como absoluta para dosis pequeñas (<15 cGy) se hace notar. También sería apreciable el hecho de que las dosimetrías con 7 ó 9 campos van generalmente asociadas a tratamientos de cabeza y cuello caracterizados por la necesidad de campos con fluencias de altos gradientes de dosis.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Cuando se trabaja con un acelerador con intensidad modulada es necesario considerar el aumento de las fugas en el cabezal del acelerador en un diseño de los blindajes, o en caso de implementar la técnica en un acelerador con el búnker diseñado previamente para otros tratamientos, es posible disminuir la carga de trabajo. En nuestro caso, la disminución en el número de pacientes, que es posible tratar, en un 20%, está además justificada por el hecho de que los pacientes tratados con IMRT suelen tener más verificación de la posición del paciente en la unidad de tratamiento, más campos y más unidades de monitor ocupando más tiempo de máquina en promedio.

También hemos visto que la dosis periférica que recibe el paciente se pue-

de duplicar cuando usamos intensidad modulada, si bien, el alto nivel de conformación permite usar más frecuentemente 6 MV, que no lleva asociada dosis por fugas de neutrones, y reducir dicha dosis respecto de tratamientos RT3D con 15 MV.

Hemos conseguido garantizar que la dosis administrada en maniquí por el acelerador esté dentro de un 5% con una confianza del 93,5%. Sobre la dosis administrada al paciente, al estar implicada la incertidumbre del posicionamiento, es más difícil hacer predicciones sobre su exactitud. Para restringir dichas incertidumbres, se ha establecido un protocolo de seguimiento del tratamiento en el que se aumenta el número de imágenes de verificación portal donde, al menos cada cinco sesiones, es comprobada la reproducibilidad del posicionamiento con dos imágenes ortogonales (generalmente a 0° y 90° ó 270°), llegando al caso extremo, de realizar dichas imágenes en cada una de las sesiones cuando la reproducibilidad no fue suficientemente satisfactoria.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Paz Avilés su corrección de la redacción del resumen en inglés.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Guidance document on delivery, treatment planning, and clinical implementation of IMRT: Report of the IMRT subcommittee of the AAPM radiation therapy committee. Ezzel et al. *Med. Phys.* 30 (8), August 2003.
- [2] Intensity-Modulated radiation therapy. Steve Webb. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia.
- [3] On the role of intensity-modulated radiation therapy in radiation oncology. Schultz and Kagan. *Med. Phys.* 29 (7), July 2002.
- [4] The return of the snake oil salesmen. E. Glastein. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* Vol. 55. No 1, pp 1-2. 2003

- [5] IMRT may be used to excess because of its higher reimbursement from Medicare. Paliwal and Brezovich. *Med. Phys.* 31 (1), January 2004.
- [6] Intensity-modulated radiotherapy: current status and issues of interest. Intensity modulated radiation therapy collaborative working group. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* Vol 51, No 4, pp. 880-910. 2001
- [7] Estimates of whole-body dose equivalent produced by beam intensity modulated conformal therapy. Followill et al. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* Vol. 38. No. 3, pp. 667-672, 1997.
- [8] Fetal dose from radiotherapy with photons beams: Report of AAPM radiation therapy committee Task Group N°36. *Med Phys.* 22(1).
- [9] Photonuclear dose calculations for high-energy photons beams from Siemens and Varian linacs. Omar Chibani et al. *Med. Phys.* 30 (8), agosto 2003, pp. 1990-2000
- [10] It is necessary to validate each individual IMRT treatment plan before delivery. Cister Ramsey and Scott Dube. *Med. Phys.* 30 (9). Sep 2003
- [11] Tolerances for the accuracy of photon beam calculations of treatment planning systems. Venselaar et al. *Radiat. Oncology.* 60 (2001), pp. 191-201.
- [12] Application of a test package in an intercomparison of the photon dose calculation performance of treatment planning systems used in a clinical setting. Venselaar et al. *Radiat. Oncology* 60 (2001), pp. 203-213.
- [13] Investigation of Kodak extended dose range (EDR) film for megavoltage photon beam dosimetry. Chetty et al. *Phys. Med. Biol.* 47 (2002), pp. 3629-3641.
- [14] Comparative evaluation of Kodak EDR2 and XV2 films for verification of intensity modulated radiation therapy. Dogan et al. *Phys. Med. Biol.* 47, (2002), pp. 4121-4130.
- [15] Evaluation of Kodak EDR2 film for dose verification of intensity modulated radiation therapy delivered by a static multileaf collimator. Zhu, et al. *Med. Phys.* Vol. 29, No. 8 (Aug. 2002), pp. 1687-1692
- [16] Dosimetric performance of an enhanced dose range radiographic film for intensity-modulated radiation therapy quality assurance. Olch. *Med. Phys.* Vol. 29, No. 9 (Sep. 2002), pp. 2159-2168.
- [17] A new approach to film dosimetry for high energy photon beams: Lateral scatter filtering. Burch et al. *Med. Phys.* 24 (5), May 1997, pp 775-783.
- [18] The value of radiographic film for the characterization of intensity-modulated beams. Martens et al. *Phys. Med. Biol.* 47 (2002), pp. 2221-2234.
- [19] A technique for the quantitative evaluation of dose distributions. Low et al. *Med Phys* 25 (5), May 1998, pp 656-661.



# PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

## Proyecto Europeo REFLEX



Franz Adlkofer.

Entre los años 2000-2004 se ha desarrollado el Proyecto Europeo REFLEX de la Comisión Europea sobre "Riesgos Potenciales Ambientales de la Exposición a Campos Electromagnéticos (CEM) de Baja Energía usando Métodos Sensibles in vitro". El objetivo del

Proyecto REFLEX ha sido la investigación in vitro de potenciales respuestas celulares y subcelulares ante exposiciones a CEM, usando equipamiento común diseñado ad hoc y métodos avanzados en toxicología y biología molecular. A tal fin, se exploró la respuesta de células humanas y de roedores a corrientes débiles inducidas por CEM ELF (50 Hz), y a CEM de radiofrecuencia (RF, 900-1800 MHz) con niveles de energía subtermales.

En el Proyecto, que ha sido coordinado por el Profesor Franz Adlkofer, VERUM Foundation (Munich), han participado 11 laboratorios de 7 países europeos. La contribución española al Proyecto ha estado a cargo de la investigadora María Ángeles Trillo y del Servicio de Bioelectromagnetismo del Hospital Ramón y Cajal (Madrid.) Coincidiendo con la finalización del Proyecto y la publicación de sus resultados (<http://www.verum-foundation.de/apopsis/>) el Consorcio de Centros de Investigación implicados en el Proyecto ha emitido un resumen de los principales resultados del estudio. De entre esos resultados, destacaremos aquí los siguientes:

### Respuesta celular a CEM ELF:

(1) CEM-ELF tienen efectos genotóxicos sobre cultivos primarios de fibroblas-

tos humanos y sobre otras líneas celulares. La exposición a CEM ELF incrementaba significativamente la tasa de roturas cromosómicas en el ADN para densidades de flujo magnético a partir de 35  $\mu$ T.

También fueron detectadas aberraciones cromosómicas en fibroblastos humanos expuestos a CEM ELF. Se encontró una fuerte correlación de la intensidad y la duración de la exposición a CEM ELF con el incremento de roturas (simples y dobles) en el ADN cromosómico y con la frecuencia de micronúcleos. Estos efectos genotóxicos fueron obtenidos en dos laboratorios y replicados posteriormente en otros dos laboratorios externos al proyecto REFLEX. Un intento posterior de replicación por un quinto laboratorio no ha detectado hasta el presente los efectos genotóxicos. La sensibilidad de los fibroblastos al CEM incrementaba con la edad del donante y con la presencia espontánea de defectos específicos de reparación genética. Algunos tipos celulares, como los linfocitos de donantes adultos, no se mostraron sensibles a la exposición.

(2) A una densidad de flujo de aproximadamente 2 mT la exposición activaba la expresión de genes tempranos, como p21, c-jun y egr-1, en células madre embrionarias de ratón p53-deficientes, pero no en células de tipo salvaje (no deficiente para ese gen).

(3) A 0,1 mT, la exposición incrementaba la tasa de proliferación de células neuroblastoma.

(4) A 0,8 mT, los CEM ELF estimulaban la diferenciación de células madre de ratón en cardio-miocitos.

Sin embargo, no se detectaron efectos consistentes sobre la síntesis de ADN, el ciclo celular, la diferenciación celular, la proliferación celular o la apoptosis.

### Respuesta celular a CEM RF:

(1) Algunos resultados mostraron que señales RF subtermales indujeron efectos genotóxicos en fibroblastos, en células granulosa y células HL60. Las células respondieron a la exposición a señales con tasas de absorción específica (SAR) entre 0,3 y 2 W/kg con un aumento significativo de rupturas (simples y do-

bles) en la molécula ADN y de la frecuencia de micronúcleos.

También se observaron aberraciones cromosómicas en fibroblastos expuestos.

(2) La exposición a RF con SAR de 1,5 W/kg deprimía la expresión de genes neuronales en células precursoras neuronales y activaba la expresión de genes tempranos en células madre embrionarias p53-deficientes, pero no en células de tipo salvaje.

(3) Los análisis de proteómica mostraron que en líneas endoteliales humanas la exposición alteraba la expresión y la fosforilación de numerosas proteínas, en gran parte no identificadas. Entre las proteínas afectadas se encuentra la proteína de choque térmico hsp27, un marcador para respuestas de estrés celular.

(4) No se encontraron evidencias de que las señales afectaran a procesos tales como proliferación celular, la apoptosis o la inmuno-funcionalidad celular.

(5) Los análisis globales de genoma completo, de microarray de ADN y de proteómica, indicaron que CEM débiles en el rango ELF - RF podrían activar varios grupos de genes implicados en la división, proliferación y diferenciación celular.

Aunque las implicaciones de los resultados descritos arriba no pueden ser evaluadas desde el punto de vista de la protección del público y de los trabajadores ante exposiciones a radiaciones no ionizantes ambientales, la relevancia de la evidencia proporcionada por el Proyecto REFLEX ofrece pocas dudas sobre la necesidad de verificar las observaciones realizadas y de ampliar el estudio.

Según indican los autores en su resumen, el Proyecto REFLEX ha supuesto una contribución sustancial a la base de datos sobre efectos genotóxicos y fenotípicos de los CEM ELF - RF sobre sistemas celulares. Estos datos no confirman ni refutan las hipótesis sobre potenciales riesgos derivados de las exposiciones a CEM ambientales; el proyecto no fue diseñado con ese fin. El valor de los resultados obtenidos reside en la ampliación del conocimiento dirigido a identificar y caracterizar los mecanismos de respuesta



biológica a radiaciones no ionizantes débiles. Entre otras aplicaciones, estos conocimientos serán de utilidad en las evaluaciones de riesgos ambientales que emiten periódicamente agencias internacionales como la Organización Mundial de la Salud (WHO), la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) o ICNIRP.

*María Ángeles Trillo*

## Subvenciones del CSN. Convocatoria 2005

Se ha publicado en el BOE del miércoles 23 de febrero, la convocatoria correspondiente al año 2005 de concesión de ayudas para la realización de proyectos de I+D relacionadas con la seguridad nuclear y la protección radiológica. Los programas son los que se detallan a continuación:

**Primer programa:** Estudios sobre la respuesta del combustible nuclear en

condiciones de alto quemado en caso de accidentes de reactividad y LOCA

**Segundo programa:** Estudios relativos al programa de Investigación Cooperativo sobre los procesos de corrosión bajo tensión asistida por irradiación (CIR II). Estudios de modelación y simulación de fenomenología termohidráulica bifásica en centrales nucleares.

**Tercer programa:** estudios sobre envejecimiento de cables eléctricos.

**Cuarto programa:** Estudios sobre el impacto de los factores humanos y organizativos en la seguridad nuclear. Aplicación del análisis probabilísticos de seguridad a la regulación informada por el riesgo ya al análisis integrado de seguridad. Análisis de riesgos externos naturales inducidos por el hombre.

**Sexto programa:** Evaluación del impacto radiológico por la operación de las instalaciones y por la exposición a la radiación natural.

**Séptimo programa:** Evaluación del impacto radiológico y técnicas de

gestión de materiales y residuos y técnicas de intervención en áreas afectadas por accidentes. Estudios sobre las actividades relacionadas con el desmantelamiento de instalaciones nucleares.

**Octavo programa:** Estudios sobre almacenamientos y gestión del combustible irradiado y comportamiento a largo plazo de su emplazamiento.

**Noveno programa:** Estudios sobre diseño y configuración de las denominadas Centrales Nucleares Avanzadas.

**Décimo programa:** Realización de actividades de formación, información y divulgación relacionadas con el ámbito de competencia del organismo.

Los proyectos que se presenten tendrán un periodo de ejecución máximo de cuatro años. El plazo de presentación será de dos meses a partir del día siguiente a la publicación de esta convocatoria.

*Comité de Redacción*



**Sociedad Española  
de Protección Radiológica**

# huelva

**X CONGRESO NACIONAL  
DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA  
DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA**

**SEPR 2005**

**21, 22 y 23 de SEPTIEMBRE**

### Comienza el Año Internacional de la Física

elmundo.es - Físicos y políticos piden en el Congreso que se promueva la ciencia de... Page 1 of 2

**ciencia/ecología**  
 Viernes, 11 de febrero de 2005  
 Actualizado a las 15:43 (CET) - Internet free @950 by StarDC71

**AÑO MUNDIAL DE LA FÍSICA**  
**Físicos y políticos piden en el Congreso que se promueva la ciencia desde la escuela**

**EFE**

**MADRID.** Prestigiosos físicos como el Premio Nobel de 1998, Horst L. Störmer, junto con académicos y políticos instaron a una mayor promoción de la ciencia desde la escuela con motivo de la inauguración en las Cortes de los actos conmemorativos del Año Mundial de la Física. Un año que estará lleno de homenajes a Albert Einstein, justo cuando se cumplen 100 años de la publicación de la Teoría Especial de la Relatividad.

Al acto de inauguración de esos actos en España asistieron también el presidente del Congreso de los Diputados, Manuel Marín, el presidente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Carlos Martínez Alonso, y el presidente de la Real Sociedad Española de la Física, Gerardo Delgado, quienes insistieron en la necesidad de trabajar más intensamente para que los jóvenes se interesen mucho más por la ciencia.

El Premio Nobel de Física en 1998 aseguró que "la ciencia es lo más emocionante que se puede hacer en esta vida". En su opinión, el reto del 2005 debería ser "cambiar la percepción que se tiene de la materia, para acercarla más al público en general, y para lo que la educación resulta fundamental", precisó.

Por su parte, el presidente del CSIC se refirió también a los descubrimientos de Einstein sobre los que dijo que "han cambiado la percepción de la concepción que hoy en día tenemos del mundo y del tiempo".

Por ello, tras recalcar el "apoyo decidido" de las autoridades españolas con el fomento e impulso de la ciencia, destacó la necesidad de "seguir apostando por ese conocimiento profundo sobre las causas y los orígenes de las cosas, porque -dijo- nos dan las bases para

Se cumplen 100 años de la Teoría de la Relatividad de Einstein

NOTICIAS RELACIONADAS

El tiempo  
 Mapa de Aragón  
 Canales  
 Televisión  
 Empleo  
 Formación  
 Duplicación  
 Traductor  
 Multilingüe  
 Calentador  
 Pag. blancas  
 Pag. amarillas  
 Guía empresas  
 Músicas

SUPLEMENTOS  
 Madrid 2012  
 Auto  
 Universidad  
 Magazine

http://www.elmundo.es/elmundo/2005/02/11/ciencia/1108132712.html 12/02/2005

Portada de "elmundo.es". (12/02/2005).

Una amplia representación del mundo científico, sobre todo de la física, acudió al Congreso de los Diputados para inaugurar formalmente en España el Año Internacional de la Física, proclamado por la Unesco con ocasión del centenario del annus mirabilis de Albert Einstein, durante el cual éste produjo algunos de sus trabajos más importantes. El presidente, Manuel Marín, acogió a los aproximadamente 400 científicos y políticos para contribuir a "acercar la física a los ciudadanos", el objetivo más importante del Año Internacional, y subrayó que esta celebración es tanto una oportunidad como un reto para atraer a los jóvenes y contagiar a todos la curiosidad que sentía Einstein cuando se preguntaba "cómo sería cabalgar en un rayo de luz".

El Premio Nobel de Física en 1998 aseguró que "la ciencia es lo más emocionante que se puede hacer en esta vida". En su opinión, el reto del 2005 debería ser "cambiar la percepción que se tiene de la materia, para acercarla más al público en general, y para lo que la educación resulta fundamental", precisó. En dicha manifestación coincidió con Gerardo Delgado, presidente de la Real Sociedad de Física, que lleva el peso de la conmemoración.

Por su parte, el presidente del CSIC, Carlos Martínez Alonso, tras recalcar el "apoyo decidido" de las autoridades españolas con el fomento e impulso de la ciencia, destacó la necesidad de "seguir apostando por ese conocimiento profundo sobre las causas y los orígenes de las cosas, porque -dijo- nos dan las bases para entender donde estamos, y para poder construir un mundo donde el día de mañana vivamos mejor".

Comité de Redacción

### Premio al póster "IRPA-11"

El póster "El Congreso IRPA 11. Actualidad y Perspectivas de la Protección radiológica" ha sido premiado como uno de los cuatro mejores pósters presentados en la 30 Reunión Anual de la SNE. Leopoldo Arranz, recogió este premio el pasado 24 de febrero de manos de Francisco Martínez Córcoles y M<sup>a</sup> Teresa Domínguez; quienes estaban acompañados por la presidenta del Consejo de Seguridad Nuclear, M<sup>a</sup> Teresa Estevan Bolea. El acto se celebró una vez finalizada la Jornada Anual sobre Operación de las Centrales Nucleares y la Asamblea de la SNE.

34 / SOCIEDAD

EL PAÍS, sábado 12 de febrero de 2005

### Einstein, en el Parlamento

400 científicos y políticos se reúnen para abrir el Año Internacional de la Física

M. R. E. Madrid preguntaba cómo sería "cabalgar en un rayo de luz". Gerardo Delgado, presidente de la Real Sociedad de Física, que lleva el peso de la conmemoración, coincidió en la necesidad de llevar la física a la calle y recordó que Einstein, cuando visitó España en 1923, fue acompañado por José Ortega y Gasset, al cual interesaba mucho la ciencia. Las cosas han cambiado. "Tenemos un problema de imagen", aseguró Delgado, "y no sólo en España". Se refirió a la falta de vocaciones científicas, que se achaca a la forma en que se enseña la física y otras ciencias en la enseñanza secundaria y el bachillerato. Y otro problema es que se considere que la investigación básica no influye en el desarrollo. "Sin estímulo científico el



Horst Störmer (derecha) conversa con Manuel Marín (segundo desde la izquierda). - F. LUIS GALDÓN



De izquierda a derecha, Francisco Martínez Córcoles, Leopoldo Arranz, M<sup>a</sup> Teresa Estevan y M<sup>a</sup> Teresa Domínguez.

Recorte de prensa. EL PAÍS. (12/02/2005).

### Reunión del Grupo de Trabajo de Exposiciones Médicas del Art. 31 del Tratado EURATOM celebrada en Luxemburgo los días 2 y 3 de febrero de 2005

Han asistido a la reunión presidida por la Dra. Ciska Zuur (Holanda), los expertos de: Dinamarca, Reino Unido, Irlanda, Luxemburgo, Suecia, Grecia y España. Por parte de la Comisión Europea (CE) han participado J. Naeguele y M. Sarró que ha actuado como Secretaria del Grupo de Trabajo.

Se ha invitado a tres expertos externos al Grupo de Trabajo para que hagan sendas presentaciones sobre los siguientes temas:

a) Barry Wall del NRPB del Reino Unido, como responsable de un contrato ya asignado por la CE titulado "Development of a harmonised methodology for dose data processing regarding radiodiagnostic imaging procedures in medical applications DOSE DATAMED". En este proyecto se han incluido 7 países que han realizado estimaciones de dosis a pacientes a escala nacional.

b) Ferid Shannoun, del Ministerio de Sanidad de Luxemburgo, sobre la evolución de las dosis a los pacientes en radiodiagnóstico en Luxemburgo, entre los años 1994 y 2002.

c) Prof. F.E. Stieve, de Alemania, sobre la necesidad de mejorar los datos dosimétricos que se aportan a UNSCEAR en el área de las exposiciones médicas.

Con relación a la actualización de los Manuales de Protección Radiológica de la Organización Mundial de la Salud que se inició hace varios años con la participación del OIEA y la CE, se ha invitado a la Comisión Europea a seguir participando en la etapa final de este proyecto que se pretende concluir en un plazo breve.

Se ha discutido el borrador del documento sobre Justificación que ha preparado el OIEA. Se cita expresamente que las exposiciones médicas, cuando se refieren a diagnóstico o tratamiento, no forman parte del documento. El borrador del OIEA contiene algunas referencias e exposiciones médico legales y un anexo sobre algunas prácticas de "screening" en medicina.

Se ha discutido la procedencia de organizar una segunda conferencia europea sobre exposiciones médico legales que se celebraría en la segunda mitad de 2006, de nuevo en Dublín.

Se ha discutido el borrador de la ICRP titulado "Low-dose Extrapolation of Radiation-Related Cancer Risk".

E. Vañó ha presentado los resultados de los contactos con la FDA de Estados Unidos en el tema de los informes sobre accidentes e incidentes en exposiciones médicas.

Se han presentado los resúmenes de los cinco proyectos de contratos que la Unidad de Protección Radiológica de la Dirección General de la Energía de la CE ha presentado para su posible aceptación y financiación durante el año 2005. Los proyectos presentados han sido los siguientes:

a) Acceptance criteria for medical installations.

b) Referral criteria for diagnostic applications.

c) Establishment of a database on incidents/accidents in medical applications.

d) Guidance on radiological protection of children.

e) European guidance on clinical audit for medical exposures.

El Grupo de Trabajo, a petición de la Dirección de la Unidad de Protección Radiológica, ha acordado el nombramiento de un Vice-Presidente del Grupo, designándose por unanimidad al Prof. Eliseo Vañó.

La próxima reunión se celebrará durante el mes de junio del año en curso.

*Eliseo Vañó*

### Radón en las viviendas y el riesgo de cáncer de pulmón

En diciembre de 2004 se publicaron en el British Medical Journal los resultados de un análisis, financiado por la Unión Europea, dirigido a determinar el riesgo de cáncer de pulmón asociado con la exposición en las viviendas a los productos radiactivos de la desintegración del gas radón natural. En el trabajo se analizan los datos individuales obtenidos por nueve países europeos en 13 estudios de casos-controles. En dichos estudios se analizaron 7.148 casos de cáncer de pulmón y se contó con 14.208 controles. Las medidas realizadas en estas muestras consistieron en determinar el riesgo relativo de cáncer de pulmón y la concentración de gas radón en las casas, habitadas durante los 5-34 años anteriores, medido en Bequerelios por metro cúbico (Bq/m<sup>3</sup>) de aire contenido en la vivienda.

La medida media de radón en las viviendas de las personas del grupo control fue de 97 Bq/m<sup>3</sup>, con un 11% de las medidas > 200 y un 4% > 400 Bq/m<sup>3</sup>. Para los casos de cáncer la concentración medida media fue de 104 Bq/m<sup>3</sup>. El riesgo de cáncer de pulmón aumentó un 8,4% (Intervalo de confianza 95% entre 3,0% y 15,8%) por un aumento de 100 Bq/m<sup>3</sup> en la medida de radón (P= 0,0007). Esto corresponde a un aumento del 16% (entre 5% y 31%) por un aumento de 100 Bq/m<sup>3</sup> de radón usual, es decir, después de la corrección debida a la dilución causada por las incertidumbres del radón a la hora de medir concentraciones de radón. La relación dosis-respuesta parece ser lineal sin umbral y seguía siendo significativa (P= 0,04) en análisis limitados a individuos que residían en casas con medidas de radón < 200 Bq/m<sup>3</sup>. El exceso de riesgo proporcionado no difería de forma significativa con los estudios, edad, sexo o hábito de fumar. En ausencia de otras causas de muerte, el riesgo absoluto de cáncer de pulmón a una edad de 75

años a una concentración de radón usual de 0, 100 y 400 Bq/m<sup>3</sup> sería de 0,4%, 0,5% y 0,7%, respectivamente, para los no fumadores con una vida larga y aproximadamente 25 veces superior (10%, 12% y 16%) para fumadores.

Los estudios de forma colectiva, aunque no cuando se analizan de forma separada, muestran riesgos apreciables derivados del radón residencial, particularmente para fumadores y ex fumadores recientes, e indican que es responsable de cerca del 2% de las muertes por cáncer en Europa.

El artículo completo publicado en British Medical Journal está disponible en la dirección electrónica: <http://bmj.bmjournals.com/cgi/content/abstract/bmj.38308.477650.63v1>

Comité de Redacción

## Nueva Junta Directiva en la Sociedad Peruana de Radioprotección

La Sociedad Peruana de Radioprotección (SPR) se fundó el 2 de abril de 1987 y desde entonces ha realizado múltiples actividades relacionadas con la protección del hombre y el medio ambiente contra los riesgos inherentes al mal uso de las radiaciones ionizantes y no ionizantes. La integran más de 50 miembros que trabajan en el ámbito médico, industrial y de la investigación. La SPR emite opiniones técnicas acordadas colegiadamente y difunde permanentemente las medidas de protección radiológica. Esta Sociedad, que no tiene fines de lucro, está afiliada a la International Radiation Protection Association (IRPA). Además es una de las Sociedades fundadoras e integrante de la Federación de Radioprotección en América Latina y el Caribe (FRALC) y del grupo Iberolatinoamericano de Sociedades Científicas de Protección Radiológica (GRIAPRA).

El pasado 18 de noviembre de 2004 tomaron posesión de su cargo los miembros

de la nueva Junta Directiva de la Sociedad Peruana de Radioprotección. Efigenia Seminario Atoche será la presidenta y Eduardo Medina Gironzini el vice-presidente. Renán Ramírez Quijada ocupará el puesto de secretario general, Pedro Valdivia Maldonado el de secretario de Acción Científica, el Dr. Guido Molina Valencia el de secretario de Actas y Fabiola Amaya Falcón el de secretaria de Economía.

Comité de Redacción

## La búsqueda de una mayor transparencia y participación social en la toma de decisiones en Protección Radiológica. Este es el objetivo de unas Jornadas internacionales que se van a celebrar en España en otoño de 2005

Con el título *"Procesos y herramientas para la implicación de los interesados ("stakeholders") en las decisiones en Protección Radiológica"*, la SEPR, conjuntamente con la Sociedad Francesa de Radioprotección (SFRP), y la Sociedad para la Protección Radiológica del Reino Unido (SRP), están preparando unas jornadas de trabajo que se desarrollarán en Salamanca, los días 16, 17 y 18 de noviembre de 2005.

En esas jornadas se pretende dar un paso más en la puesta en común de experiencias prácticas en el campo de la implicación social en la protección radiológica, así como en la definición de criterios y desarrollo de metodologías y herramientas para su mejor aplicación. El camino de la implicación de los interesados en las decisiones sobre cuestiones de protección radiológica (el llamado "stakeholder involvement"), iniciado ya hace años, no tiene vuelta atrás, como quedó de manifiesto en el Congreso IRPA11, donde una de cuyas áreas te-

máticas, así como la sesión de clausura, estuvieron dedicadas al tema.

La madurez alcanzada en numerosos ámbitos a este respecto, así como la creciente necesidad de que las decisiones complejas sean discutidas y las alternativas analizadas, hace necesario contar con todos los actores participantes o afectados por las mismas. Ello pone de relieve la necesidad de desarrollar nuevas herramientas de uso interactivo que permitan transmitir de forma intuitiva y veraz las consecuencias de las distintas opciones.

Las recientes discusiones en el ámbito del CRPPH (Comité sobre Protección Radiológica y Salud Pública de la AEN/OCDE) y de la ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica) no ofrecen dudas con respecto a la irreversibilidad del proceso. Estamos ante lo que podría denominarse el inicio de una etapa de mayor transparencia y participación democrática en la toma de decisiones.

El Comité Organizador de estas jornadas se reunió en Madrid, en la sede del CIEMAT, el pasado día 17 de febrero de 2005, para tratar de cerrar los detalles tanto de tipo organizativo como la estructura del programa de trabajo. El Programa se estructura en cuatro grandes áreas en las que, tras la presentación de una serie de ponencias sobre experiencias en Francia, Reino Unido y España sobre implicación de interesados en las decisiones de PR, se reunirá el correspondiente grupo de trabajo. Dichas áreas son las siguientes:

- Situaciones de operación normal de las instalaciones nucleares y radiactivas.
- Operaciones de gran envergadura que impliquen la transformación significativa de instalaciones nucleares y radiactivas (por ejemplo, su desmantelamiento y recuperación del lugar para otros usos).
- Preparación de la respuesta frente a emergencias.
- Implicación de los interesados en las decisiones sobre PR de la población que habita en lugares contaminados radiactivamente.

El Comité reconoció que estas áreas no son las únicas en las que el tema presenta interés en la actualidad; sin embargo, decidió elegir las y limitar el alcance a ellas por ser en las que se dispone de mayor experiencia en la actualidad. Durante los dos días y medio de duración de las jornadas se pretende reunir a representantes de los organismos reguladores, centros de investigación, universidades y grupos interesados, con el fin de presentar varias ponencias sobre experiencias prácticas, y debatir en grupos de trabajo las distintas facetas que cada caso plantea, de cara a la obtención de conclusiones e ideas con validez para el futuro inmediato, en cuanto al tipo de procesos y herramientas (de ahí el título de las jornadas) que se deben poner a punto.

Las jornadas se van a celebrar en el ámbito de la Universidad de Salamanca, organizadas por la SEPR en colaboración con las otras dos sociedades hermanas.

Es intención de los organizadores el continuar estos debates en futuras ediciones de estas jornadas, en Francia y Reino Unido en los años próximos, donde se podrán abordar otras cuestiones como las asociadas a la gestión de residuos radiactivos o la protección de los trabajadores o de los pacientes.

Está previsto que las actas de las jornadas sean publicadas en nuestra revista *RADIOPROTECCIÓN* para darlas a conocer a todos los socios.

*Eduardo Gallego y Leopoldo Arranz*

rango de dosis bajas, las nuevas recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), incluyendo un análisis crítico de como deben implementarse dichas recomendaciones, la protección del medio ambiente y de especies no humanas, y el realismo en la estimación de dosis. Además, también se presentan trabajos sobre el estado del arte en recuperación de áreas contaminadas, medidas medioambientales, instrumentación, dosimetría, seguridad y la seguridad física de las fuentes radiactivas. En el libro se tratan de forma muy adecuada aspectos relacionados con las necesidades de educación y formación en protección radiológica tanto para personal de seguridad radiológica como para profesionales de la medicina que utilizan radiación, debido especialmente a los rápidos cambios acontecidos en radiología. Un trabajo sobre las lecciones aprendidas en incidentes y accidentes discute el importante papel que estas lecciones desempeñan a la hora de mejorar la seguridad operacional y la preparación para emergencias. Los temas sobre radiaciones no ionizantes incluyen una revisión sobre la protección radiológica frente a láser y un trabajo sobre telefonía móvil, demostrando de esta manera como se ha ampliado el alcance de la protección radiológica. Otro aspecto clave de diversos trabajos es la importancia de la educación del público y la interacción con el a la hora de establecer los estándares y la política de protección radiológica, así como la necesidad de "confianza y conocimiento del riesgo en el público", no sólo para aquellas personas que viven en territorios contaminados, sino también para aquellos países que trabajan con el objetivo de mantener unos estándares consistentes y con una base científica firme.

La selección de los temas y el contenido de los trabajos seleccionados han sido bien pensados y desarrollados, habiendo sido revisados de forma exhaustiva por expertos en los respectivos temas para así asegurar su calidad. En este conciso grupo de trabajos presentados en IRPA-11 se tratan temas

## PUBLICACIONES

### "Current Trends in Radiation Protection". Traducción del comentario publicado en la revista *Health Physics* (Volumen 88, 2005)"

En el volumen 88 de la revista *Health Physics*, publicado el pasado mes de marzo, ha aparecido un comentario muy favorable sobre el libro "Current trends in Radiation Protection" editado por Metivier H., Arranz L., Gallego E., y Sugier A. con motivo del Congreso IRPA 11. A continuación se recoge dicho comentario traducido al español.

Como una continuación del objetivo del Congreso IRPA 11 de Madrid, "Ampliando el mundo de la protección radiológica", los editores de este libro han lanzado una nueva serie de publicaciones denominada "Trends in Radiation Protection", con la intención de informar

y difundir el estado actual del conocimiento en protección radiológica a expertos, investigadores, reguladores y al público en general. Este primer libro de la serie contiene un resumen de los avances y los conceptos tecnológicos en las principales áreas de aplicación en protección radiológica, incluyendo tanto radiaciones ionizantes como no ionizantes, así como discusiones sobre las principales cuestiones a las que se enfrentan los profesionales de la protección radiológica. El libro consiste en una recopilación de las lecturas magistrales presentadas en el Congreso IRPA 11 entre los días 23 y 28 de mayo de 2004.

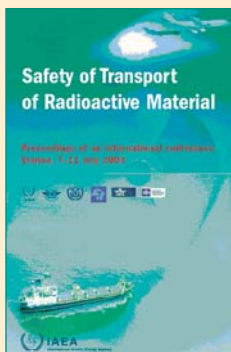
Los trabajos presentados en el libro han sido realizados por especialistas de prestigio internacional en sus respectivas áreas y cubren una variedad de temas que llevan a un buen entendimiento de aspectos actuales de la protección radiológica, tales como el estado en el que se encuentran la investigación sobre los efectos de la radiación ionizante en el

como el impacto de eventos globales, los últimos estudios e investigaciones, el mayor énfasis en la protección del medio ambiente y los cambios en la política internacional. La publicación de estos trabajos selectos puede seguramente ayudar a "ensanchar" el conocimiento del estado del arte en protección radiológica mas allá de aquellos que participaron en el congreso. La mayoría de los trabajos serán entendidos y de utilidad, no sólo por los profesionales de la protección radiológica, sino también por gente de otras profesiones, tales como médicos e investigadores. El libro es de naturaleza muy didáctica y constituye una buena base sobre la que construir otros volúmenes dentro de la serie "Trends in Radiation Protection".

OIEA

**Safety of Transport of Radioactive Material Proceedings of an International Conference in Vienna, Austria, 7-11 July 2003 (Including CD-ROM)**

*Proceedings Series*



En todo el mundo se utilizan materiales radiactivos en diversas aplicaciones que reportan beneficios a la humanidad en el ámbito de la agricultura, la industria, la medicina, la generación de energía eléctrica y la investigación.

El transporte de estos materiales los sitúa fuera de las instalaciones controladas, en zonas de dominio público y a menudo supone su desplazamiento entre distintos países. El OIEA fue encargado de la tarea de desarrollar, mantener y proveer la aplicación de las normas de seguridad para

el transporte de material radiactivo. Esta Conferencia fue convocada con el objeto de tratar la seguridad del transporte internacional del material radiactivo. Tuvo lugar en Viena, en Julio de 2003 y fue copatrocinada por ICAO, IMO y el IPU. Sus Actas contienen las sesiones de apertura, la documentación de la conferencia de trasfondo y otros documentos presentados, los resúmenes de todos los temas tratados y el resumen y conclusiones del Presidente de la Conferencia. Los documentos aportados están disponibles en el CD-ROM que acompaña a este volumen.

STI/PUB/1200, 2004  
ISBN 92-0-108504-4.

**Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica. Requisitos**

*Colección de normas de seguridad N° GS-R-2*



Esta publicación sobre Normas de Seguridad establece los requisitos para la preparación y respuesta ante una emergencia nuclear o radiológica. En ella se amplían, comple-

mentan y organizan los requisitos relativos a la gestión de las emergencias, establecidos en Safety Series N° 120, "Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources (1996)" y en N° 115, "International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources (1996)"

Contenidos: 1. Introducción; 2. Principios y objetivos; 3. Requisitos generales; 4. Requisitos prácticos; 5.

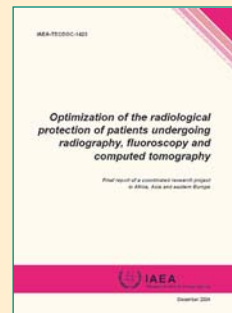
Requisitos de infraestructura; Referencias; Anexo I: Requisitos para protección de trabajadores implicados en una intervención; Anexo II: Niveles de dosis a los cuales se espera una intervención llevada a cabo en determinadas situaciones; Anexo III: Directrices para el establecimiento de niveles de intervención y de actuación en situaciones de exposiciones de emergencia.

STI/PUB/1133, 2004  
ISBN 92-0-311904-3.

**Optimization of the Radiological Protection of Patients Undergoing Radiography, Fluoroscopy and Computed Tomography Final Report of a Coordinated Research Project in Africa, Asia and Eastern Europe**

*IAEA TECDOC Series No. 1423*

Estudios nacionales en el Reino Unido y Estados Unidos han indicado que existen grandes diferencias entre las dosis recibidas por los pacientes en exámenes radiográficos rutinarios, a veces tan grandes como un factor veinte o incluso más. Esto indica que las variaciones en los países en desarrollo donde existe equipamiento antiguo y escaso mantenimiento de las instalaciones, debería ser objeto de interés. Esta publicación contiene los resultados de un Proyecto Coordinado de Investigación llevado a cabo en algunos países del Este de Europa, África y Asia. Se observaron variaciones considerables en estudios de radiología general. La experiencia obtenida en los procesos de optimización indicó reducciones significativas de la dosis suministradas a



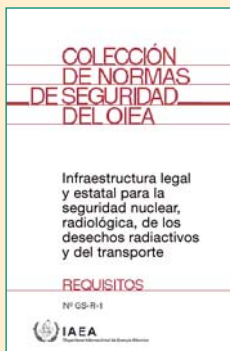


los pacientes, con aceptable calidad de imagen, consistente con los propósitos clínicos del estudio. La metodología basada sobre medida de dosis a pacientes, su comparación con valores de referencia, aseguramiento de la calidad de imagen, la introducción de controles de calidad (CQ), de acciones correctoras cuando fueron necesarias, y la posterior re-evaluación tanto de las dosis a pacientes como de la calidad de imagen, demostraron la efectividad de los programas de optimización de la protección radiológica. Esta publicación también contiene los resultados de un análisis de situación de las dosis a pacientes y el estado de los programas de control de calidad en escopía y tomografía computarizada.

IAEA-TECDOC-1423, 2004  
ISBN 92-0-113504-1.

**Infraestructura legal y estatal para la seguridad nuclear, radiológica, de los desechos radiactivos y del transporte. Requisitos**

*Colección de normas de seguridad*  
Nº GS-R-1



Incluida en la colección Requisitos de Seguridad establece los requisitos para la infraestructura legal y gubernamental en el ámbito de las instalaciones y las actividades, incluyendo instalaciones nucleares, fuentes de radiación ionizantes,

gestión de residuos radiactivos y transporte de material radiactivo. Está contempla el desarrollo de un marco legal para el establecimiento de un organismo regulador y otras acciones para al-

canzar un control regulador efectivo. La publicación incluye todas las fases de las instalaciones del ciclo del combustible mientras duran sus actividades y el periodo subsiguiente de control institucional hasta que no exista un riesgo significativo a la radiación residual. Para las instalaciones habitualmente estas fases incluyen selección de un emplazamiento, diseño, construcción, puesta en servicio, operación y clausura. También incluye otras responsabilidades como son el soporte necesario para el desarrollo de la seguridad, implicaciones en seguros a terceros y preparación de emergencias.

Contenidos: 1. Introducción; 2. Responsabilidad legislativa y gubernamental; 3. Responsabilidades y funciones del Organismo Regulador; 4. Organización del Organismo Regulador; 5. Actividades del Organismo Regulador; 6. Infraestructura específica; Apéndice: Revisión y evaluación durante el ciclo de vida de la central; Glosario.

STI/PUB/1093,2004  
ISBN 92-0-311804-7.

**NCRP**

**NCRP Releases Report No. 147, Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities**

El "National Council on Radiation Protection and Measurements" (NCRP) anuncia la publicación de su Informe No. 147, "Diseño de Blindajes Estructurales para Instalaciones Médicas de Diagnóstico por RX". El Informe presenta recomendaciones e información técnica relacionada con el diseño e instalación de blindajes estructurales para instalaciones que usan rayos X para la obtención de imágenes de uso médico.

El propósito de un blindaje estructural es limitar la exposición a la radiación

tanto de los profesionales expuestos como de los miembros del público. La formación que se facilita ahora reemplaza las recomendaciones para dichas instalaciones proporcionadas en el Informe No. 49 "Diseño de Blindajes Estructurales y Evaluación para Uso Médico de RX y Gamma de Energías hasta 10 MeV", que fue publicado en septiembre de 1976.

El Informe No. 147 incluye una discusión de los factores que deben ser considerados en la selección de materiales de blindaje apropiados y en el cálculo de espesores de barrera. Presenta los fundamentos del blindaje frente a la radiación, discute "objetivos del diseño de barreras" para áreas controladas y no controladas, dentro o próximas a las instalaciones, y expresa las relaciones de estos objetivos con los límites de dosis efectiva para trabajadores y miembros del público fijados por la NCRP. El Informe incluye una discusión detallada de la metodología recomendada para el diseño de blindajes para instalaciones de RX de uso clínico, y proporciona una extensa recopilación de datos y ejemplos para cálculo de blindajes en diferentes tipos de instalaciones.

El Informe está dirigido principalmente a especialistas en protección radiológica. Sin embargo, también resultará de interés a arquitectos, administradores de hospitales y en general a los profesionales involucrados en la planificación de nuevas instalaciones que utilizan RX con propósitos clínicos.

**NRPB**

**NRPB-W64**

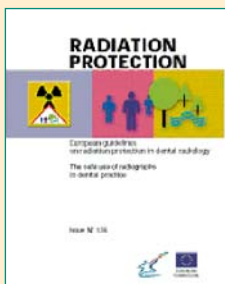
*Radiological Consequences Resulting from Accidents and Incidents Involving the Transport of Radioactive Materials in the UK - 2003 Review*

En el año 2003 se produjeron once accidentes e incidentes con implicación de materiales radiactivos transportados

desde, hacia, o dentro del Reino Unido y este informe contiene las descripciones de cada uno de estos eventos. Además, se incluye el informe de un suceso ocurrido en el año anterior pero que no había sido informado previamente. Ninguno de estos eventos ocasionó consecuencias radiológicas significativas. El número de sucesos ocurridos en 2003 fue significativamente más bajo que el de los últimos años. Sin embargo, es improbable que esta reducción represente una tendencia global, más bien es un ejemplo de la variación estadística en el número anual de sucesos. No hubo casos que implicasen contaminaciones adicionales en contenedores de combustible nuclear irradiado. Los sucesos en 2003 tuvieron en conjunto, menor significación radiológica que los ocurridos en años anteriores. Las particularidades de estos sucesos han sido recogidas en la "Radioactive Material Transport Events Database" (RAMTED), la cual contiene actualmente información sobre 786 eventos que se sabe han ocurrido desde 1958.

## European Commission

### 136: European Guidelines on Radiation Protection in Dental Radiology



El propósito de este estudio es proporcionar una guía práctica para la protección radiológica de los odontólogos y sus ayudantes, basada en dos destacadas Directivas de la Unión Europea:

Directiva 29/96 Euratom, de 13 de mayo de 1996, que modifica los estándares básicos de seguridad para la pro-

tección de la salud de trabajadores y público en general contra los riesgos que se derivan de las radiaciones ionizantes, y la Directiva 43/97 Euratom de 30 de junio de 1997, sobre protección sanitaria contra los riesgos de las radiaciones ionizantes relacionados con las exposiciones médicas (Directiva sobre Exposiciones Médicas).

La Directiva sobre Estándares de Seguridad Básica antes mencionada, asegura la protección de trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes, incluyendo odontólogos y sus ayudantes, y la de los miembros del público.

La Directiva 43/97 Euratom proporciona un alto nivel de protección de la salud frente a las radiaciones ionizantes en las exposiciones médicas. Todas las medidas adoptadas en la Directiva están implicadas no sólo en evitar innecesarias o excesivas exposiciones a la radiación sino también en proporcionar la calidad y efectividad de los usos médicos de las radiaciones.

Ninguna exposición a rayos X puede ser considerada como totalmente libre de riesgo, de forma que el uso de radiaciones por dentistas y sus ayudantes implica una responsabilidad en garantizar la protección adecuada.

Para ayudar a los Estados Miembros en la implantación de las Directivas, la Comisión decidió actualizar y ampliar las guías técnicas en Protección Radiológica 81, Protección Radiológica y Garantía de Calidad en radiología dental: "Uso seguro de radiaciones en la práctica dental" (1995). Se otorgó un contrato a la Universidad de Manchester, Reino Unido, para llevar a cabo el estudio "Guías Europeas de Protección Radiológica en Radiología Dental."

El proyecto fue diseñado para dar formación clara y comprensiva sobre prácticas radiológicas dentales teniendo en cuenta los conocimientos y la tecnología disponible, y proporciona pautas para la aplicación de los principios de protección en radiología dental de los individuos expuestos: pacientes y profesionales.

Este documento proporciona unas pautas generales sobre el uso seguro de las radiaciones en la práctica dental. Pero las indicaciones no suponen un rígido corsé para la práctica clínica. Pueden requerirse variaciones locales de acuerdo con las prácticas en los cuidados de la salud y la provisión existente.



### Stakeholder Participation in Radiological Decision Making: Processes and Implications Summary Report of the 3rd Villigen (Switzerland) Workshop, October 2003

Language: English, Published: 30-JUL-04, 36 pages  
 NEA#05368, ISBN: 92-64-02079-9  
 Available on the Web at:  
<http://www.nea.fr/html/rp/reports/2004/nea5368-stakholder.pdf>  
 (in PDF)

Este resumen busca respuestas a las cuestiones que los profesionales de la Protección Radiológica se hacen cuando se enfrentan a la necesidad de considerar a los grupos interesados (stakeholder) en los procesos de participación. Como se verá claramente no existe un método único que se adapte a todos los procesos: el rango de desviación y la diversidad de las situaciones donde puede ser apropiado aconseja a establecer una aproximación más flexible. Sin embargo, el Workshop demostró que es posible identificar hechos y temas comunes. Esto debería ayudar a los profesionales en el desarrollo de los procesos de participación sin ir en detrimento de la flexibilidad necesaria restando repuesta a las demandas particulares y expectativas en situaciones concretas.

El informe está destinado a políticos y reguladores con responsabilidades en temas de protección radiológica.

# CONVOCATORIAS

## • IRPA 2006. Radiation Protection: From Knowledge to Action.

Del 15 al 19 de mayo del 2006. París, Francia. El Segundo Congreso Europeo de la International Radiation Protection Association (IRPA) está organizado por la French Society for Radiation Protection (SFRP) Desde el 15 de febrero está abierto el plazo para el envío de resúmenes que finalizará el 15 de septiembre del 2005. Para más información consultar en la página web:

[www.irpa2006europe.com](http://www.irpa2006europe.com)

## 2005

### ABRIL

#### • European Workshop on Individual Monitoring of Ionising Radiation.

Del 11 al 15 de abril de 2005. Viena, Austria. Organizado por ARC Seibersdorf research GMBH Health Physics División en colaboración con EURADOS y la OIEA. Más información en <http://im2005.healthphysics.at>

#### • 7<sup>th</sup> International Symposium 'Conditioning of Radioactive Operational & Decommissioning Wastes' (Kontec 2005).

Del 20 al 25 de abril de 2005. Berlin, Alemania. Más información en la dirección electrónica <http://www.kontec2005.com/english/index.htm>, o contactar con Susann Jakusz en la dirección [info@kontecHH.de](mailto:info@kontecHH.de)

#### • VI Curso Teórico-Práctico PET.

Del 28 al 30 de abril de 2005. Pamplona, Navarra. La sede de la Secretaría Técnica se encuentra en el Servicio de Medicina Nuclear de la Clínica Universitaria de Navarra. Colaboran: SEFM, SEMN, SERFA. Más información en la dirección electrónica: [www.unav.es/cun/actividades](http://www.unav.es/cun/actividades), o mediante la dirección de correo: [epanigua@unav.es](mailto:epanigua@unav.es).

### MAYO

• **Tercer Congreso Español de Metrología.** Del 11 al 13 de mayo de 2005. Zaragoza, España. Más información en <http://www.congresodemetrologia.org>

• **ELECTROMED 2005. Fourth International Symposium on Nonthermal Medical/Biological Treatments Using Electromagnetic Fields and Ionized Gases.** Del 16 al 18 de mayo de 2005. Portland, Oregon, EE.UU. Para más información en contactar con: [info@electromed2005.co](mailto:info@electromed2005.co)

### JUNIO

#### • Seventh International Symposium on Change and Consistency in Radiation Protection.

Del 12 al 17 de junio de 2005. Cardiff, Reino Unido. Organizado por la Society for Radiological Protection, con la colaboración de IRPA, SFRP, NVS y la SEPR. Para más información consultar la página electrónica <http://www.srp-uk.org/events/cardiff2005/index.html>

#### • Bioelectromagnetics 2005. (BioEM 2005).

Del 19 al 24 de junio de 2005. Dublín, Irlanda. Organizado por la Sociedad Americana de Bioelectromagnetismo (BEMS) y la Sociedad Europea de Bioelectromagnetismo (EBEA). Más información en la dirección <http://bioelectromagnetics2005.org>.

#### • The XVIII International Symposium on Bioelectrochemistry and Bioenergetics.

Del 19 al 25 de junio de 2005. Coimbra, Portugal. Más información en: <http://www.bes-ise-2005.uc.pt/>

#### • 4<sup>th</sup> International Conference on the Effects of Low and Very Low Doses of Ionizing Radiation on the Human Health and Biota.

Del 25 al 28 de junio de 2005. Hamilton, Ontario (Canada).

Para más información contactar con Kristina Trollip. 1280 Main Street West, NRB-104. Hamilton, Ontario L8S 4K1. Fax: 905-522-5982. Correo electrónico: [wonuc@mcmaster.ca](mailto:wonuc@mcmaster.ca) o visitar la dirección [http://www.wonuc.org/lowrad/conf\\_04.htm](http://www.wonuc.org/lowrad/conf_04.htm)

#### • International Conference on the Safety and Security of Radioactive Sources: Towards a Global System for the Continuous Control of Sources throughout their Life Cycle.

Del 27 de junio al 1 de Julio. Burdeos, Francia. Organizado por la Organización Internacional de la Energía Atómica (OIEA), con la colaboración de la Comisión Europea, la Oficina de Policía Europea (Europol), la Organización Internacional de Policía Criminal-Interpol (ICPO-Interpol), la Organización Internacional de trabajo (ILO), La Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA), La organización Mundial de Consumidores (WCO) y la Organización Mundial de la Salud (WHO). Para más información consultar la dirección electrónica <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/Announcements.asp?ConfID=134>

### JULIO

#### • CEFBIOS 2005-Coherence and Electromagnetic Fields in Biological Systems.

Del 1 al 4 de julio de 2005. Praga, República Checa. Para más información contactar con Jiri Pokorny, Institute of Radio Engineering and Electronics, Academy of Sciences, Chaberska 57, CZ 182 51 Praga 8, República Checa. Teléfono: 00420 266773432; Fax: 00420 284680222. Correo electrónico: [pokorny@ure.cas.cz](mailto:pokorny@ure.cas.cz) o visitar la página electrónica <http://www.ure.cas.cz/events/cefbios2005/>

#### • Curso práctico avanzado sobre simulación Monte Carlo del transporte de electrones y fotones con PENELOPE.

Del 4 al 7 de

julio de 2005. Barcelona. Introducción a la simulación Monte Carlo del transporte de radiación. Estructura y operación del código PENELOPE. Sesiones prácticas sobre el uso de programas genéricos; estructura del programa principal para aplicaciones específicas (dosimetría, radioterapia, etc.).

Para detalles e inscripción, véase <http://www.nea.fr/html/dbprog/pene-lope2005-reg.html>

• **IV Workshop Radiación natural y medio ambiente.** Del 4 al 8 de julio de 2005. Santander. Organizado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Universidad de Cantabria.

• **WHO International EMF Project Workshop: Applying precautionary measures to EMF public health policy.** Del 11 al 13 de julio de 2005. Ottawa, Canadá. Más información en [http://www.who.int/peh-emf/meetings/ottawa\\_june05/en/](http://www.who.int/peh-emf/meetings/ottawa_june05/en/) o a través del correo electrónico [emfproject@who.int](mailto:emfproject@who.int)

### SEPTIEMBRE

• **The Tenth International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM'05).** Del 4 al 8 de septiembre de 2005. Glasgow, Escocia. Más información en la dirección <http://www.icemconf.com/> o contactando con Gary Benda a través del correo electrónico [info@secc.co.uk](mailto:info@secc.co.uk)

• **European Radiation Research 2005: Annual Scientific Meeting of the Association for Radiation Research and 34<sup>th</sup> Annual Meeting of the European Society for Radiation Biology.** Del 5 al 8 de septiembre de 2005. Universidad de Leicester, Reino Unido. Más información en la dirección: <http://www.gci.ac.uk/usr/arr/home.html>.

• **MRS 2005. 29<sup>th</sup> Symposium On The Scientific Basis For Nuclear Waste Management.** Del 12 al 15 de septiembre. Mol, Bélgica. Más información en <http://www.nuclearmarket.com/Conferences/ConfDetails.cfm?ID=761> o en la dirección de correo electrónico [mrs2005@sckcen.be](mailto:mrs2005@sckcen.be)

• **29<sup>th</sup> International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management.** Del 12 al 16 de septiembre de 2005. Ghent, Bélgica. Más información en: [www.sckcen.be/MRS2005](http://www.sckcen.be/MRS2005)

### OCTUBRE

• **International Conference on the Safety of Radioactive Waste Disposal.** Del 3 al 7 de octubre de 2005. Tokio, Japón. Organizado por la Organización Internacional de la Energía Atómica (OIEA), con la colaboración de la Agencia de Energía Nuclear OECD y la Organización Japonesa de Seguridad Nuclear (JNES). Para más información sobre la conferencia consultar la dirección <http://www.pub.iaea.org/MTCD/Meetings/Announcements.asp?ConfID=135>.

• **The 2<sup>nd</sup> International Conference on Radioactivity in the Environment.** Del 2 al 6 de octubre de 2005. Niza, Francia. Organizado por la Unión Internacional de Radioecología y el NRPA, en colaboración con el Journal of Environmental Radioactivity y con la cooperación del OIEA. Para más información contactar con la secretaria de la conferencia. Torum Jolle. NRPA. P.O. Box 55. NO-1332. Osteras. Noruega. [Torum.jolle@nrpa.no](mailto:Torum.jolle@nrpa.no) Más información en la dirección electrónica: <http://www.teamcongress.no/events/IUR20>

• **3<sup>rd</sup> International Symposium Chronic Radiation Exposure: Biological And Health Effects.** Del 24 al 26 de octubre de 2005.

Chelyabinsk, Rusia. Organizado por el Urals Research Center for Radiation Medicine, con la colaboración del Federal Department Medbiotrem of the RF Ministry of Health, Comisión Europea, Organización mundial de la salud, Chelyabinsk Oblast Administration, Russian Federation Ministry for Emergencies y el Southern-Urals Research Center, RAMS Más información en la dirección: <http://urcrm.chel.su/english/symp2005.html>

• **Workshop on Application of Proteomics and Transcriptomics in EMF Research.** Del 30 de octubre al 1 de noviembre de 2005. Helsinki, Finlandia. Más información en: [www.who.int/peh-emf/meetings/proteomics\\_helsinki05/en/](http://www.who.int/peh-emf/meetings/proteomics_helsinki05/en/)

### NOVIEMBRE

• **14<sup>th</sup> International Symposium on Microdosimetry (MICROS 2005).** Del 13 al 18 de noviembre de 2005. Venecia, Italia. Más información en la página electrónica <http://micros05.inl.infn.it>

• **International Symposium on Trends in Radiopharmaceuticals.** Del 14 al 18 de noviembre de 2005. Viena, Austria. Organizado por la Organización Internacional de la Energía Atómica (OIEA). Más información en <http://www.pub.iaea.org/MTCD/Meetings/Announcements.asp?ConfID=130>

• **WHO and the Australian Radiation Protection Society Workshop.** Del 14 al 18 de noviembre de 2005. Melbourne, Australia. Más información en: [http://www.who.int/peh-emf/meetings/melbourne\\_nov05/en/](http://www.who.int/peh-emf/meetings/melbourne_nov05/en/) o a través de los correos electrónicos: [paulal@leishman-associates.com.au](mailto:paulal@leishman-associates.com.au) o [emfproject@who.int](mailto:emfproject@who.int)