

EFECTOS BIOLÓGICOS Y ASPECTOS DE SEGURIDAD DE LAS RADIACIONES NO IONIZANTES EN LA RESONANCIA MAGNÉTICA

NON-IONIZING BIOLOGICAL EFFECTS AND SECURITY ISSUES IN MAGNETIC RESONANCE

Nathaly Barbosa¹
Luis Agulles-Pedrós²
Agustín Daza³
Alfonso Lozano⁴

PALABRAS CLAVE (DeCS)

Imagen por resonancia magnética
Anomalías inducidas por radiación
Límites
Seguridad de equipos

KEY WORDS (MeSH)

Magnetic resonance imaging
Abnormalities radiation-induced
Non ionizing radiation
Equipment safety

RESUMEN

Objetivo: Hacer una revisión, en español, de los efectos biológicos determinísticos de los campos magnéticos estáticos, dinámicos y de radiofrecuencia, propios de los exámenes de resonancia magnética (RM) en hospitales. **Metodología:** Se hace referencia a los límites definidos dependiendo de los distintos usos de la radiofrecuencia en un examen de RM y sus posibles efectos biológicos. Además, se muestran los aspectos de seguridad que deben tenerse en cuenta cuando se diseñan zonas que incluyan esta técnica diagnóstica. Finalmente, se hace una breve revisión de los temas que deben tener en cuenta los entes reguladores ante este tipo de exámenes con radiaciones no ionizantes. **Conclusiones:** A pesar de no ser determinantes los estudios sobre riesgo biológico, sí hay riesgos, principalmente por la existencia de altos campos magnéticos, que aconsejan tener ciertas precauciones en cuanto a instalaciones y personal calificado, así como una legislación acorde, de la que, por otra parte, carece Colombia.

SUMMARY

Objective: To review the deterministic biological effects of static, dynamic and dependent magnetic fields used in clinical magnetic resonance imaging (MRI). **Methods:** The suggested limits are referenced depending on the different MRI applications, as well as their possible biological effects. In addition, safety aspects which must be taken into account when areas that include this diagnostic technique are shown. Lastly, a short description of the important items for the regulatory authorities to consider when facing these types of test with non-ionizing radiation is discussed. **Conclusions:** Even though there is no agreement in the literature about the biological risks, risks do exist due to the presence of high magnetic fields. Specific precautions should be taken in terms of proper facilities and qualified personnel, as well as an appropriate legislation which does not exist in Colombia.

Introducción

Las radiaciones no ionizantes son parte del espectro electromagnético y tienen una longitud de onda lo suficientemente amplia como para que su interacción con el tejido no provoque la creación de pares iónicos

(efecto Compton, fotoeléctrico, etc.); por tanto, las consecuencias son diferentes a las estudiadas desde la radiobiología convencional.

Desde el punto de vista de la protección radiológica los procedimientos de resonancia magnética (RM) son

¹M.Sc. en física médica. Grupo de Medicina Nuclear Molecular, del Instituto Nacional de Cancerología, Bogotá, Colombia.

²Dr. rer. nat, profesor del Departamento de Física, de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

³Estudiante de Maestría en Física Médica. Grupo de Física Médica y Radiológica, del Departamento de Física, de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

⁴Médico neurorradiólogo. Grupo de Radiología e Imágenes Diagnósticas, de la Facultad de Medicina, de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

considerados seguros; sin embargo, los efectos biológicos no estocásticos que se han observado en la interacción del tejido con campos magnéticos constantes, variables y electromagnéticos, han llevado a un estudio exhaustivo de estos fenómenos. Las revisiones multicéntricas en las que la mayoría de los límites de exposición y recomendaciones están basados, han sido llevadas a cabo por la Comisión Internacional de Protección de Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP, por sus siglas en inglés).

La ICNIRP ha concluido que la evidencia clínica en la asociación entre los posibles efectos carcinogénicos y los niveles de radiación es insuficiente para proveer una base clara de límites de exposición (1). Por lo tanto, sus guías de recomendación están basadas en efectos determinísticos de corto plazo, como la inducción de magnetofosfenos, la estimulación de nervios periféricos y músculos, quemaduras, y los incrementos en la temperatura corporal.

Efectos biológicos de la RM

En el caso específico de la resonancia magnética, los efectos biológicos provienen del uso de campos magnéticos constantes, campos magnéticos variables o de gradientes e impulsos de radiofrecuencia. A continuación se explican brevemente los mecanismos biofísicos de interacción y los límites de exposición para cada uno de ellos.

Campos magnéticos intensos constantes

Los tres mecanismos de interacción que existen con los campos magnéticos constantes están descritos desde la biofísica.

El primero de ellos, el magneto-mecánico, explica la alineación y traslación de los momentos magnéticos moleculares con el campo magnético externo, factor dependiente tanto de la intensidad del campo magnético externo como de su variación con respecto a la posición ($B \cdot dB/dx$). Por ejemplo, la alineación de las moléculas de rodopsina (componentes de los bastones retinales) con campos magnéticos muy intensos, crea un estrés mecánico que genera falsas excitaciones, lo cual da lugar a la inducción de magnetofosfenos (2).

Se ha planteado que este tipo de interacciones puede afectar los procesos de coagulación al alinear el fibrinógeno (3) y que el flujo sanguíneo puede verse afectado por el ordenamiento de los eritrocitos oxigenados (4). No obstante, en el cuerpo humano, la energía térmica en la que dichas moléculas están inmersas, hace que prevalezca el movimiento térmico (Browniano), lo que hace de este un fenómeno despreciable (2). Un estudio con campos magnéticos intensos (5) mostró que la fuerza inducida es solo del 1 % de la intensidad en un campo de 4T.

La segunda interacción se refiere a la magneto-hidrodinámica, la cual analiza la interacción del campo magnético con el flujo sanguíneo. Este tipo de análisis evidenció que el cambio en la presión vascular es menor al 0,2 % y expuso que no existen cambios significativos en el sistema circulatorio para campos menores a 10T (6). Así mismo, se encontró que los voluntarios sometidos por una hora en campos de 8T no mostraron cambios en la presión sistólica ni diastólica, ni en el patrón respiratorio o en la frecuencia cardíaca (7).

Adicionalmente, el flujo de iones en los vasos sanguíneos sometidos a un campo magnético, inducirá un potencial eléctrico en estos. La superposición de este potencial inducido modifica la amplitud de la onda T en un electrocardiograma, pero estos potenciales son mucho

menores que los límites que inducen la estimulación cardíaca (8). De la misma forma, el potencial de acción en las fibras nerviosas periféricas se verá alterado, pero es requerido un campo muy intenso, del orden de 24T, para reducir la conducción de las neuronas en un 10 % (9).

Medidas experimentales con campos de hasta 2T no mostraron efectos significativos en la función de los nervios periféricos cuando es estudiado en mamíferos (10). Finalmente, se observaron modificaciones en los resultados de estudios electroencefalográficos con campos superiores a 9,1T, pero fueron transitorios y reversibles en menos de 30 minutos (10) y los signos vitales no se mostraron alterados con 8T (11).

El tercer mecanismo muestra los efectos magnéticos en las reacciones químicas, este explica la modificación de la cinética de las reacciones que usan radicales como productos intermedios. El efecto directo se da entre iones con sus enlaces (12), pero, en un ambiente con una viscosidad como la del agua, se necesitarían campos magnéticos muy intensos (de unos 10 millones de Teslas) para producir una fuerza de Lorentz comparable con la energía de enlace de los iones (2). Por ejemplo; para provocar daños en el DNA se necesitan energías del orden del eV*, y un campo magnético del orden del tesla que interactúa con los espines electrónicos, tan solo genera energías del orden de las micras de eV (μeV). El efecto físico más visible con campos del orden de 2T es vértigo transitorio, debido al movimiento del cuerpo dentro del campo magnético (7).

Con base en este tipo de evidencia, la ICNIRP divide la exposición en normal, controlada y experimental, dependiendo de las intensidades a las que se esté sometido y recomienda los límites de exposición para personal ocupacional y público en general. Estos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Límites operacionales de los campos magnéticos constantes

Modo de operación	Bo
Normal	< 2T
Controlado	Entre 2T y 4T ^a
Experimental	> 4T
Personal Ocupacional	Límite de Bo
Exposición de cabeza y tronco	2T
Exposición de extremidades	8T
Público en general	400 mT ^b

a. El límite superior de la exposición controlada es debido a la falta de información sobre los posibles efectos a campos más altos.

b. El límite para el público en general se obtiene al aplicar un factor de reducción de 0,2 para el límite ocupacional.

Fuente: Reiser MF, et al., 2008 (13); ICNIRP, 2009 (14).

Campos magnéticos variables

Los campos magnéticos variables analizados en esta sección están relacionados con los gradientes de campo magnético y los cambios en el tiempo cuando estos se usan. Los gradientes de campos magnéticos en RM están generalmente dos órdenes de magnitud por debajo de los usados como fijos. Este tipo de radiación electromagnética es de baja frecuencia y, por lo tanto, deposita cantidades pequeñas de energía, razón por la cual su interacción es considerada una interacción atómica (15,16).

*eV: *electronvoltio; unidad de medida de energía. Las interacciones nucleares y atómicas suelen expresarse en esta unidad.*

Sin embargo, sus efectos deben ser tomados en consideración ya que hay fenómenos asociados a estos que tienen consecuencias biológicas significativas. El fenómeno más importante es la inducción de Faraday, ya que la corriente que se induce tiene una frecuencia por debajo de los 100 kHz. En este rango de frecuencias, la conductividad de la membrana celular es varios órdenes de magnitud más baja que la del fluido intra y extracelular, lo que lleva a la inducción de un potencial a través de esta. Cuando el voltaje inducido está por encima del umbral, puede estimular las células nerviosas y musculares (13).

Desde el punto de vista de la seguridad, el primer desenlace a considerar es la fibrilación cardíaca ya que esta puede desencadenar la muerte. Por otro lado, la estimulación nerviosa periférica es una preocupación práctica, debido a que puede hacer el examen poco confortable o una estimulación intolerable puede interferir con el desarrollo total del examen (7).

El factor que puede provocar las corrientes mencionadas aparece durante una secuencia de RM al encender o apagar los gradientes, es decir, variaciones de campo magnético con el tiempo (dB/dt). Serían requeridos gradientes de campo altos, del orden de 6000 T/s, para alcanzar la estimulación del miocardio (17,18). Ya que los rangos de operación clínica se encuentran muy por debajo de este valor, esto no es considerado como una contraindicación. Para la estimulación nerviosa periférica, estudios en humanos han establecido el límite en aproximadamente 200 T/s (2).

Se debe considerar que los gradientes dependen de la forma del impulso, su duración y sus repeticiones (2). Así, por ejemplo, cálculos de corrientes parásitas sugieren que las estimulaciones nerviosas y cardíacas pueden evitarse con 20 T/s para impulsos únicos monofásicos y para impulsos repetitivos mayores a 3 ms (19).

Los umbrales de percepción deben ser determinados por el fabricante para todos los tipos de gradiente y las secuencias deben estar diseñadas de tal forma que no se sobrepasen los umbrales de estimulación nerviosa periférica (20). Usualmente, el valor máximo se encuentra entre 50 -100 T/s, que resulta seguro y cómodo para los voluntarios (2). La FDA no propone un valor numérico como límite, sino que recomienda el monitoreo del paciente para proceder en caso de dolor por estimulación de los nervios periféricos (7). Por otro lado, la MHRA, autoridad reguladora en el Reino Unido, propone el límite en 20 T/s (21).

Los cambios del campo magnético también provocan movimientos de las partes físicas del equipo que provoca sonidos molestos para el paciente. Si bien no son letales, sí pueden llegar a influir en la calidad de la imagen dependiendo del tipo de experimento (22), o incluso rozar los límites permitidos de exposición (7).

Impulsos de radiofrecuencia

Las frecuencias de los campos de RF usados en la RM están por debajo del orden de decenas de MHz. Para estas frecuencias, la conductividad de la membrana celular es comparable con la del líquido intra y extracelular, lo cual implica que no se induce ningún voltaje a través de esta (13). En cambio, el depósito de energía en este rango, causa un aumento en la temperatura del tejido. Dicho incremento depende no solo de las características de la radiación incidente sino también del tejido, más específicamente de su conductividad térmica y de su flujo microvascular (perfusión).

El depósito energético está caracterizado por la energía absorbida por unidad de masa y de tiempo, conocida como la tasa de absorción específica (o SAR, por sus siglas en inglés). Está relacionada con la

corriente inducida j , la magnitud del campo eléctrico E y la densidad del tejido irradiado ρ , por medio de la expresión:

$$SAR = \frac{j \cdot E}{\rho} = \frac{\sigma \cdot E^2}{\rho}$$

Las consideraciones teóricas y experimentales revelan que la absorción de RF en el cuerpo alcanza un máximo cuando la longitud de onda (λ) es del orden del tamaño corporal. Lamentablemente, la λ de los campos de RF usados en la RM está dentro de este rango (1), razón por la cual se ha de prestar atención al depósito de energía, ya que un incremento térmico elevado puede llevar a daños o modificaciones biológicas.

La literatura reporta que, para exposiciones corporales, no se han encontrado efectos adversos si el incremento de temperatura es menor a 1 °C. En el caso de niños o personas con discapacidades cardiocirculatorias el incremento no ha de ser mayor a 0,5 °C. Con respecto al calentamiento localizado, resulta razonable asumir que los efectos adversos serán evitados si la temperatura en regiones localizadas no excede los 38 °C en la cabeza, los 39 °C en el tronco y los 40 °C en las extremidades (23,24).

Un estudio en 50 voluntarios expuestos a 0,4-1,2 W/kg, demostró un incremento de 0,2 °C en su temperatura, sin presentar cambios en la presión sanguínea ni en el ritmo cardíaco (25). Sin embargo, ante la dificultad de medir *in vivo* los incrementos térmicos en estudios por RM, se han desarrollado modelos matemáticos que permiten la estimación de los incrementos térmicos en función de la SAR.

Por ejemplo, se ha calculado que durante una exposición con una SAR de 5 W/kg en el cuerpo completo de un paciente con capacidad termorregulatoria normal, se incrementará su temperatura en un máximo de 0,6 °C dependiendo de las condiciones ambientales (26). Se debe mencionar que estos modelos se basan en la naturaleza clásica de las radiaciones electromagnéticas, y que sería recomendable un análisis cuántico (7).

Basados en este tipo de modelos y en la evidencia clínica respecto al incremento térmico, la ICNIRP (1) recomienda unos límites de la SAR de forma que no excedan las temperaturas que han evidenciado producir complicaciones. En la tabla 2 se muestran algunas de estas recomendaciones para la irradiación corporal total y parcial (cabeza).

Tabla 2. Límites de la SAR para voluntarios y pacientes sometidos a procedimientos de RM con una temperatura ambiental menor a 24 °C

Modo de operación	Todo el cuerpo SAR (W/kg)
Normal	2
Controlada	4
Experimental	> 4
Cualquier región (excepto cabeza) SAR (W/kg)	Cabeza SAR (W/kg)
2-10	3,2
4-10	3,2
> 4-10	>3,2

Fuente: ICNIRP, 2009 (14).

La Comisión Internacional Electrotérmica (IEC, por sus siglas en inglés) recomienda que cuando los límites de exposición controlada

(4,0 W/kg) se vean excedidos, el sistema debe alertar al operador que se encuentra en modo experimental o de investigación (27).

Desarrollo embrionario

No se observaron efectos significativos en el desarrollo pre y posnatal en exposiciones de aproximadamente 1 T en fetos de roedor en el útero (28,29). Por otro lado, se ha reportado que no existe evidencia de alteraciones en el crecimiento o cambios reproductivos cuando se someten ratas a gradientes de campo (30). Aunque es conocido que el calentamiento materno en mamíferos causa anomalías en el desarrollo fetal y embrionario (31,32), los efectos transitorios de potencia de RF no incrementan la temperatura materna por encima de los 39 °C, y no se esperan efectos adversos de su exposición que afecten a un feto humano.

Aspectos técnicos de seguridad

Se debe tener especial cuidado para no realizar exámenes por RM en pacientes con implantes activados por medios electrónicos, magnéticos o mecánicos, cuyo funcionamiento pueda ser interferido por la acción de los campos electromagnéticos producidos.

Por lo tanto, pacientes con marcapasos cardíacos internos, desfibriladores cardíacos implantables, implantes de cóclea, neuroestimuladores, estimuladores de crecimiento óseo, bombas electrónicas de infusión de fármacos y otros dispositivos similares, que puedan verse afectados de forma negativa por los campos electromagnéticos, no deberían someterse a este tipo de examen (33).

Instalación

Para evitar daños o accidentes causados por los campos magnéticos intensos, la Organización Mundial de la Salud (34) recomienda que el espacio dedicado a un equipo de RM se divida en 4 zonas, descritas a continuación (35):

Zona I: Dedicada al público en general y está fuera de la influencia del campo magnético del equipo de RM.

Zona II: Sirve de comunicador entre las zonas I, que no está controlada, y la zona III, controlada. Queda fuera de la influencia del campo magnético del equipo de RM. Es de libre acceso, pero no de libre circulación. Aquí se recibe a los pacientes y se les hace las preguntas de seguridad antes de pasar a la zona III, donde quedarán bajo los efectos del campo magnético del equipo de RM.

En esta zona deberá haber una intensidad de campo magnético igual o menor a 0,5 mT.

Según las recomendaciones específicas de la Medicines and Healthcare products Regulatory Agency (36), en la zona II se recomienda reservar un espacio para casilleros o armarios, para que los pacientes y operarios puedan dejar de forma segura las pertenencias que potencialmente puedan ser dañadas o interfieran con el campo magnético del equipo de RM.

Zona III: Es en donde ya los efectos del campo magnético del equipo de RM pueden provocar heridas por mover objetos ferromagnéticos (como botellas con gas a presión), o dañar algunos equipos electrónicos (desde marcapasos a equipos de medición de las constantes de los pacientes), así como tarjetas de memoria o bancarias.

En esta zona se debe tener mucho cuidado con los materiales ferromagnéticos y evitarlos siempre que sea posible. Podrá haber una intensidad de campo magnético de entre 0,5 mT y 3 mT (que se encuentran dentro de los valores sugeridos por la ICNIRP (tabla 1).

Zona IV: Dedicada exclusivamente al equipo de RM. Deberá estar siempre dentro de la zona III. Por contener al imán, la zona IV debe estar apantallada de ondas electromagnéticas por dos razones; contener al máximo el campo magnético del equipo de RM e impedir que entren otras frecuencias que alteren tanto la adquisición de las RM como la homogeneidad del campo magnético del equipo de RM. Para conseguir este apantallamiento se recomienda la construcción de una jaula de Faraday, cuyas características (que se indicarán más adelante) dependen de la geometría de la zona IV y del tipo de imán a utilizar.

En esta zona se debe prohibir el acceso de metales ferromagnéticos excepto en caso de imperiosa necesidad y, dado el caso, manejar con extremo cuidado. En esta zona habrá una intensidad de campo magnético menor de 3 T. En la zona IV se colocarían el imán y los equipos magnetocompatibles que se requieran.

El apantallamiento

El apantallamiento o *shielding* se produce en dos partes. La primera es el apantallamiento propio del imán, que viene dado dependiendo del equipo de RM a utilizar. El segundo es el que hay que instalar en la habitación que lo alberga, es decir, la zona IV.

Este tipo de apantallamiento se consigue forrando toda la zona IV con una capa de metal. Se puede utilizar una estructura de madera o acero inoxidable forrada con planchas de cobre de unos 2 mm de espesor. Las planchas deben estar unidas por juntas que permitan la conducción eléctrica en toda la unión. La atenuación de la señal debe ser del orden de 100 dB para una frecuencia de 100 MHz. Por fuera de esta capa de cobre, se instalarán el resto de capas aislantes y estructurales necesarias.

El apantallamiento debe dejar unos conductos de ventilación del área para mantener la temperatura y presión atmosféricas adecuadas por medio de rejillas especiales. También debe haber conectores de cables diseñados para tal efecto; tales como ductos para el nitrógeno, el helio y gases medicinales, en caso de que se requieran. Por último, la ventana del tecnólogo debe tener una malla de cobre para contribuir al apantallamiento, así como la puerta, que debe estar cubierta por pestañas de cobre para que sea conductora una vez cerrada.

Legislación

Recomendaciones internacionales

La OMS no es un organismo regulador, por lo que se limita a recomendar a los Estados que regulen este tipo de equipos según los siguientes criterios (34):

- Adoptar los estándares científicos internacionales para limitar la exposición humana.
- Tomar las medidas de protección para el uso científico, médico o industrial de los campos magnéticos (criterios de distancia, controles administrativos, inventarios, etc.).
- Considerar la emisión de licencias para los equipos de RM con campos mayores de 2 T, para asegurar las medidas de protección.
- Financiar la investigación en el campo de la seguridad en RM para completar las lagunas de conocimiento en este campo.

- Tener una base de datos de los equipos de RM, para tener un control de la exposición de personal ocupacionalmente expuesto y pacientes.

Regulación latinoamericana

A nivel latinoamericano, la OPS, como brazo de la OMS, tampoco tiene una regulación acerca los posibles riesgos de los equipos de IRM; por lo tanto, abarca recomendaciones de forma indirecta, por ejemplo para el caso del mantenimiento (37) y/o en la formación de Físicos Médicos –junto con la OIEA– (38). Es de destacar en este último informe, la recomendación internacional de tener expertos a nivel de posgrado no solo para el control y aseguramiento de calidad, sino también como “responsables de evaluar los riesgos biofísicos del equipo de RM”.

La regulación en el ámbito latinoamericano es variada y no siempre abarca un control directo en las aplicaciones médicas. Se suele basar en normas técnicas para evitar riesgos en el marco del cada vez más creciente uso de tecnología inalámbrica o celulares (39).

Los límites fueron determinados, en primera instancia, siguiendo las recomendaciones del Instituto Nacional de Normas de los Estados Unidos de América (ANSI por sus siglas en inglés) (40) o de la ICNIRP (1). En 1991, el ANSI recomendó un límite de exposición ocupacional de 1 mW/cm² para frecuencias de 30 a 300 MHz (41), que fue acogido por algunos países latinoamericanos, como Bolivia (42); aunque, generalmente, se busca un compendio entre el ANSI (43,44) y la ICNIRP (véase el caso de Argentina [45], Brasil [46], Chile [47], Costa Rica [48] o Ecuador [49]).

Legislación colombiana

En cuanto a los límites técnicos en Colombia, se sigue la recomendación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) que se basa en la norma técnica K52 (50). Sin embargo, el ente regulador en el aspecto clínico es el Ministerio de Salud y Protección Social, que tiene la misión de: garantizar el aseguramiento en salud y el acceso de la población a las estrategias de promoción de la salud, prevención de la enfermedad, demás servicios y atenciones en salud y prestaciones económicas, conforme a los principios fundamentales de eficiencia, universalidad y solidaridad, para mejorar el estado de salud y la calidad de vida de la población en Colombia (51). Sin embargo, actualmente no existe una legislación específica relacionada con radiaciones no ionizantes, y en particular para los equipos de RM.

Un primer acercamiento con una normativa específica puede referenciarse en la Resolución 4445 de 1996 del Ministerio de Salud (52): “Por el cual se dictan normas para el cumplimiento del contenido del Título IV de la Ley 09 de 1979, en lo referente a las condiciones sanitarias que deben cumplir los establecimientos hospitalarios y similares”.

En el numeral 6 del artículo 33 (de los servicios de apoyo a las actividades de diagnóstico y tratamiento-generalidades), menciona los servicios de imagenología, y, en la sección 6.3, señala al respecto de la RM: Resonancia magnética: Es el ambiente destinado a la realización, procesamiento e interpretación de los estudios efectuados por variación de campos magnéticos que son traducidos a imágenes, requiere protección contra campos magnéticos, con un recubrimiento que se denomina jaula de Faraday.

Lo anterior evidencia las deficiencias en la definición de las necesidades, al no considerarse los riesgos para el público en general, para el paciente y para el personal ocupacionalmente expuesto, y cumplir así las recomendaciones establecidas por la OMS (34).

En el marco de las condiciones que regulan los servicios hospitalarios, la resolución del 2006 (53) que regula la calidad y el mantenimiento de los servicios de radiología, entre otros, por medio de la habilitación de servicios, no contempla las recomendaciones a nivel internacional de la OMS, y les deja a los centros el criterio de seguridad en RM. Recientemente, esta resolución del 2006 fue completada por la del 2013 (54) que, a pesar de ampliar la protección radiológica de las radiaciones ionizantes, también deja de lado los criterios internacionales en lo pertinente a RM.

Conclusiones

Aunque se han realizado numerosas investigaciones dirigidas específicamente al estudio de los efectos biológicos potenciales de la RM, los resultados de estos estudios han sido predominantemente negativos, lo que apoya la opinión más extendida de que no existen riesgos importantes de salud asociados con el empleo de esta modalidad de diagnóstico por imagen.

No obstante, los efectos no estocásticos de corto plazo deben ser tenidos en cuenta cuando: se quiera seleccionar la intensidad del campo magnético externo, en las secuencias que impliquen el uso de gradientes de campo magnético y la energía depositada por unidad de masa por los impulsos de radiofrecuencia, para evitar complicaciones transitorias o quemaduras leves que pueden hacer del examen un procedimiento poco confortable.

No se debe olvidar que los inconvenientes más comunes al ser sometido a un examen por RM son el ruido acústico y la claustrofobia.

El diseño de blindajes para equipos de RM debe considerar los límites de los campos magnéticos constantes, variables y electromagnéticos para el personal ocupacional y el público en general. Para esto es necesario dividir el diseño en zonas que satisfagan dichos requerimientos.

La carencia de una regulación específica alienta a encaminar esfuerzos mancomunados en pro de una normativa clara y acorde con la realidad socioeconómica del país. Por esto, la investigación, indagación y divulgación sobre los efectos de las radiaciones no ionizantes, representan una herramienta valiosa para los entes reguladores en su objetivo de definir los lineamientos de la política pública en materia de salud.

Referencias

1. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (Up to 300 GHz). *Health Phys.* 1998;74:494-522.
2. Kangarlu A, Robitaille PM. Biological effects and health implications in magnetic resonance imaging. *Concepts Magn. Reson.* 2000;12:321-59.
3. Ueno S, Iwasaka M, Tsuda H. Effect of magnetic fields on fibrin polymerization and fibrinolysis. *IEEE Trans Magn.* 1993;29:3352-4.
4. Kuchel PW, Coy A, Stülbs P. NMR diffusion diffraction of water revealing alignment of erythrocytes in a magnetic field. *Magn Reson Med.* 1997;37:637-43.
5. Ueno S, Iwasaka M. Properties of diamagnetic fluid in high gradient magnetic fields. *J Appl Phys.* 1994;75:7177-9.
6. Keltner JR, Roos MS, Brakeman PR, et al. Magnetohydrodynamics of blood flow. *Magn Reson Med.* 1990;16:139-49.
7. Kangarlu A, Burgess RE, Zhu H, et al. Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultra high field magnetic resonance imaging. *Magn Reson Imaging.* 1999;17:1407-16.
8. Reilly JP. *Applied bioelectricity: from electrical stimulation to electropathology.* New York: Springer; 1998.
9. Wikswo JP, Barach JP. An estimate of the steady magnetic field strength required to influence nerve conduction. *IEEE Trans Biomed Engr.* 1980;27:722-3.
10. Kholodov YA, Alexandrovskaya MM, Dukjanovce SN, et al. Investigations of the reaction of the mammalian brain to static magnetic fields. En: Barnothy M, ed. *Bio-logical effects of the magnetic fields.* 2th ed. New York: Plenum; 1969. p. 215-26.

11. Chakeres DW, Kangarlu A, Boudoulas H, et al. Effect of static magnetic field exposure of up to 8 T on sequential human vital sign measurements. *J Magn Res Imaging*. 2003;18:346-52.
12. Durney CH, Rushforth CK, Anderson AA. Resonant AC-DC magnetic fields: Calculated response. *Bioelectromagnetics*. 1988;9:315-36.
13. Reiser MF, Semmler W, Hricak H. *Magnetic resonance tomography*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag;2008.
14. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics*. 2009;96:504-14.
15. Bottomley PA, Edelstein WA. Power deposition in whole body NMR imaging. *Med Phys*. 1981;8:510-2.
16. Bottomley PA, Redington RW, Edelstein WA, et al. Estimate radiofrequency power deposition in body NMR imaging. *Magn Reson Med*. 1985;2:336-49.
17. Mouchawar GA, Nyenhuis JA, Bourland JD, et al. Magnetic stimulation of excitable tissue calculation of induced eddy-currents with a 3-dimensional finite-element model. *IEEE Trans Magn*. 1993;29:3355-7.
18. Ueno S, Lovsund P, Obery PA. Effects of alternating magnetic fields and low-frequency electric currents on human skin blood flow. *Med Biol Eng Comput*. 1986;24:57-61.
19. Reilly JP. Peripheral nerve stimulation by induced electric currents: exposure to time-varying magnetic field. *Med Biol Eng Comput*. 1989;27:101-10.
20. ICNIRP. Medical magnetic resonance (MR) procedures: protection of patients. *Health Physics*. 2004;87:197-216.
21. Medicines and Healthcare products Regulatory Agency (MHRA). Safety guidelines for magnetic resonance imaging equipment in clinical use. 2007;DB2007.
22. Rizzo Sierra CV. *Magnetic Resonance Imaging (MRI) acoustic noise: Estimation, characterization and reduction*. Groningen (Holanda): Universidad de Groningen; 2008.
23. Dewhirst MW, Vigilanti BJ, Lora-Michiels M. Basic principles of thermal dosimetry and thermal thresholds for tissue damage from hyperthermia. En: Proceedings of a WHO workshop "Adverse Temperature Levels in the Human Body," Geneva, 21-22 March 2002. *Int J Hyperthermia*. 2003;19:267-94.
24. Athey TW, Czerski P. Safety of magnetic resonance in vivo diagnostic examinations. *IEEE*. 1988;10:892-3.
25. Shellock FG, Crues JV. Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical MR imaging at 1.5 T. *Radiology*. 1987;163:259-62.
26. Adair ER, Berglund LG. On thermoregulatory consequences of NMR imaging. *Magn Reson Imag*. 1986;4:321-33.
27. International Electrotechnical Commission, Medical electrical equipment. Part 2: Particular safety standards for diagnostic magnetic resonance imaging instrumentation. *IEEC* 1995; 601-2-33.
28. Murakami J, Torii Y, Masuda K. Fetal development of mice following intrauterine exposure to a static magnetic field of 6.3 T. *Magn Res Imag*. 1992;10:433-7.
29. Knoermann G, Monig H. Studies on the influence of static magnetic fields on prenatal development of mice. *Radiologie*. 1986;26:490-7.
30. Rommereim DN, Romereim RL, Miller DL, et al. Developmental toxicology evaluation of 60 Hz horizontal magnetic field in rats. *Bioelectromagnetics*. 1990;11:257-9.
31. O'Conner ME. Mammalian teratogenesis and radio-frequency fields. *Proc IEEE*. 1980;68:56-60.
32. Lary JM, Conover DL. Teratogenic effects of radiofrequency radiation. *IEEE Eng Med Biol Mag*. 1987;42-46.
33. Shellock FG, Kanal E. Efectos biológicos y seguridad. En: Stark D, Bradley WG. *Resonancia Magnética*. 3.ª ed. Vol. 1. St Louis: Mosby; 1999; p. 291-306.
34. Organización Mundial de la Salud (OMS). *Environmental health criteria, static fields*. Ginebra: OMS; 2006.
35. Kanal E, Borgstede JP, Barkovich AJ, et al. American College of Radiology: white paper on MR safety. *AJR*. 2002;178:1335-47.
36. Safety guidelines for magnetic resonance imaging equipment in clinical use. *MHRA. Device Bulletin*. DB;2008:3.
37. Organización Mundial de la Salud. Introducción al programa de mantenimiento de equipos médicos Serie de documentos técnicos de la OMS sobre dispositivos médicos. 2012 ISBN 978 92 4 350153 6
38. OIEA. *El Físico Médico: criterios y recomendaciones para su formación académica, entrenamiento clínico y certificación en América Latina*. Viena: OIEA; 2010.
39. Skvarca J, Aguirre A. Normas y estándares aplicables a los campos electromagnéticos de radiofrecuencias en América Latina: guía para los límites de exposición y los protocolos de medición. *Rev Panam Salud Publica*. 2006;20:205-12.
40. ANSI. American national standard safety level of electro-magnetic radiation with respect to personnel. *ANSI*. C95.1-1974
41. ANSI/IEEE. Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. 41. *ANSI/IEEE*. C 95.1-1991
42. Bolivia, Superintendencia de Telecomunicaciones. Estándar técnico. *SITTEL* 2002/0313.
43. United States of America, Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE recommended practice for measurements and computations of radio frequency electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100 kHz-300 GHz. (IEEE Std C95.3). New York: IEEE; 2006.
44. United States of America, Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. (IEEE Std C95.1). New York: IEEE; 2006.
45. Argentina. Resoluciones del Ministerio de Salud, MS 202/1995, y de la Secretaría de Comercio, SeCom 530/2000.
46. Brasil. Resolución 303 del 2 de julio de 2002 de la Agencia Nacional de Telecomunicaciones (Agência Nacional de Telecomunicações, ANATEL).
47. Chile. Decreto 594/00 Salud, Título 4, sobre la contaminación ambiental y Resolución 505/00 de la Subsecretaría de Telecomunicaciones, SUBTEL.
48. Costa Rica. Resolución No 2896-98 de la Sala Constitucional.
49. Ecuador. Norma Técnica que establece los límites de máxima exposición permitida. 2004.
50. Colombia. UIT serie K número 52: Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos. Resolución N° 1 del CMNT aprobada el 25 de febrero del 2000.
51. Colombia, Ministerio de la Protección Social. Resolución 4110 de 2012. Bogotá: Minprotección; 2012.
52. Colombia, Ministerio de Salud. Resolución Numero 4445 de 1996. Bogotá: Minsalud; 1996.
53. Colombia, Ministerio de la Protección Social. Resolución 1043 de 2006. Bogotá: Minprotección; 2006.
54. Colombia, Ministerio de la Protección Social. Resolución 1441 de 2013. Bogotá: Minprotección; 2013.

Correspondencia

Nathaly Barbosa
 Instituto Nacional de Cancerología
 Calle 1A # 9-85
 Bogotá, Colombia
 nbarbosap@cancer.gov.co

Recibido para evaluación: 22 de febrero de 2013

Aceptado para publicación: 10 de julio de 2013