

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA SALUD



**EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL A
CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN OPERARIOS
DE ESPECTRÓMETROS DE RESONANCIA
MAGNÉTICA NUCLEAR**

TESIS DOCTORAL

TANIA BERLANA LLORENTE

Director: Dr. ALEJANDRO ÚBEDA MAESO

Codirector: Dr. FRANCISCO GUILLÉN GRIMA

MAYO 2017

Dr. ALEJANDRO ÚBEDA MAESO y Dr. FRANCISCO GUILLEN GRIMA

Hacen constar

Que la tesis titulada **“EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN OPERARIOS DE ESPECTRÓMETROS DE RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR”** original de D^a **TANIA BERLANA LLORENTE** ha sido realizada bajo nuestra dirección.

En Pamplona a 22 de mayo de 2017

Dr. Alejandro Úbeda Maeso

Director de Tesis

Dr. Francisco Guillén Grima

Codirector de Tesis

A Ainara, mi pequeña golondrina
a Fernando, mi gran apoyo

El nuevo paradigma científico es que para entender la vida necesitamos un doble enfoque molecular y electromagnético. El universo está hecho de vacío, materia y ondas. Las moléculas, las células, interaccionan por contacto y por ondas. Probablemente en un futuro la física cambiará nuestra concepción actual de la biología molecular y celular.

(Luc Montagnier, 2010)

AGRADECIMIENTOS.

Mi primer y mayor agradecimiento es para Fernando, por ser mi mejor compañero en este viaje... por estar siempre a mi lado y darme una vez más su apoyo en cada nuevo proyecto... por hacerme disfrutar el camino cuidando los pequeños detalles... por hacerme cada día más fácil y liberarme de tiempo para poder dedicarme a esta tesis... no hay palabras para resumir todo este tiempo juntos... sin ti no habría llegado a este punto del camino.

Mi agradecimiento más dulce para Ainara, mi vida... Gracias por sentarte a pintar junto a mí para estar a mi lado, por entender que a veces no era tiempo de juegos... por regalarme cada día tus “mejores besos y abrazos”. Tu alegría y tu sonrisa han sido mi mejor compañía en esta travesía... TU eres sin duda el mejor regalo que me ha dado la vida.

Gracias a mis padres y a mi hermana por inculcarme el valor del esfuerzo y el interés por aprender siempre más (vosotros habéis sido mi mejor ejemplo)... por dejarme desde pequeña perseguir mis sueños... Gracias por cuidar de mí y de los míos... sin vosotros no estaría hoy aquí.

A Alejandro gracias por mucho. Gracias por aceptar este reto... gracias por compartir tu conocimiento conmigo, por enseñarme tanto (y abrir mis ojos para ver y entender más allá de los estándares)... por exigirme siempre un poco más... gracias por adaptarte a mis tiempos... gracias por tus ánimos y apoyo constante... echaré de menos las conversaciones contigo... Sin duda ha sido un placer conocerte y compartir este tiempo contigo.

A Francisco por su amabilidad y disponibilidad a pesar de la distancia, por sus indicaciones en la preparación de la memoria, por facilitarme el trabajo con la Universidad... Muchas gracias.

A Fernando Usera por empujarme a la aventura de la tesis doctoral, por pensar en mí y darme esta oportunidad... por confiar que podría conseguirlo (incluso más que yo misma)... Tú pusiste la primera piedra... sin tí jamás habría empezado a andar este camino.

A mis compañeros de fatigas del CSIC (Paco, Ana, Toni, Joaquín, Sol, ... y muchos más), por acompañarme en los viajes y hacerme disfrutar de muchos buenos momentos juntos... por hacerme el trabajo más fácil,... A Yacob por ser mi mejor confidente... y a tantos investigadores del CSIC que compartieron sus experiencias conmigo acercándome al mundo de la espectrometría de RMN.

Llegar al final de esta tesis ha supuesto un gran esfuerzo personal, y no habría sido posible sin vuestro apoyo y vuestro ánimo.

A todos millones de gracias

Los equipos de espectrometría por resonancia magnética nuclear (RMN) emplean campos electromagnéticos de radiofrecuencia (RF) y campos magnéticos estáticos (CME) de muy alta densidad, de manera que se admite que los trabajadores que operan con estos sistemas están expuestos cotidianamente a ese tipo de radiaciones no ionizantes. Sin embargo, en la actualidad no se dispone de datos metrológicos precisos sobre los niveles y condiciones reales de radioexposición ocupacional de esos trabajadores. El presente estudio ha llevado a cabo una caracterización precisa y completa de la exposición a CME y a RF recibida por los operadores de espectrómetros, y del ambiente electromagnético en los laboratorios de RMN. Con ese fin se ha diseñado un procedimiento *ad hoc*, basado en la medición de parámetros físicos de campo relevantes y en la estimación de la duración y frecuencia de las exposiciones, que se ha validado mediante la realización de mediciones de campos durante la ejecución de las diferentes tareas desarrolladas por los operarios en 9 centros de investigación en España que disponían de 19 espectrómetros. Los registros revelaron que la configuración y el blindaje de los dispositivos confinan las emisiones de RF en el interior de los aparatos, no registrándose en ningún caso niveles mensurables ($E \geq 0,01$ V/m) en su exterior. En cuanto a los CME, los registros permitieron determinar los niveles de exposición personal en función de las características específicas del equipo de RMN, del tipo de tarea ejecutada y de los protocolos de trabajo adoptados por cada centro. Los datos metrológicos mostraron que los operarios pueden estar expuestos a niveles de hasta $86,00 \pm 4,00$ mT en el tórax, $396,00 \pm 15,00$ mT en la cabeza y $672,00 \pm 10,00$ mT en las manos. Aunque estos niveles quedan por debajo de los límites vigentes para la protección ocupacional ante efectos nocivos a corto plazo debidos a exposiciones instantáneas y esporádicas, superan con mucho el nivel basal geomagnético de 0,05 mT, y pueden rebasar el umbral de 0,5 mT establecido para compatibilidad electromagnética con implantes médicos, así como el límite de 40 mT recomendado para la protección del público general y de la trabajadora gestante. Adicionalmente, ante la actual inexistencia de estándares para la protección ante potenciales efectos nocivos de exposiciones crónicas a campos subumbral, que no pueden ser descartados si nos atenemos a la evidencia epidemiológica y experimental disponible, el estudio propone criterios específicos para la valoración de la exposición considerando eventuales efectos a largo plazo, lo que permite adoptar medidas técnicas y organizativas dirigidas a la prevención del riesgo y a la protección radiológica de los trabajadores mediante la minimización de la exposición.

SUMMARY

Nuclear magnetic resonance (NMR) spectrometry equipment employs strong radiofrequency electromagnetic fields (RF) and static magnetic fields (SMF), so it is assumed that workers operating these systems are exposed on a daily basis to such type of non-ionizing radiation. However, precise metrological data on the actual levels and conditions of occupational exposure of these workers are not available yet. The present study has carried out an accurate and complete characterization of the SMF and RF exposure received by the operators of spectrometers, and of the electromagnetic environment in NMR laboratories. To that end, an *ad hoc* procedure has been designed, based on the measurement of relevant electric and magnetic parameters, and on the estimation of the duration and frequency of the exposures. This procedure has been validated through environmental and personal field recordings during the execution of the different tasks performed by operators working in 9 Spanish research centres having a total of 19 spectrometers. The data revealed that the configuration and shielding of the equipment confined the RF emissions inside the devices, with no recordings of measurable field levels ($E \geq 0.01$ V/m) on the outside. As for SMF, the records allowed to determine the personal exposure levels according to the specific characteristics of the NMR equipment, the type of task performed and the working protocols adopted by each centre. The metrological data showed that operators can be exposed to field levels up to 86.00 ± 4.00 mT in the thorax, 396.00 ± 15.00 mT in the head and 672.00 ± 10.00 mT in the hands. Although these levels fall below the current occupational standards for protection against short-term adverse effects due to instantaneous and sporadic field exposure, they far exceed the 0.05 mT basal geomagnetic level and may exceed the 0.5 mT threshold for electromagnetic compatibility with medical implants, as well as the 40 mT limit recommended for protection of the general public and the pregnant worker. Additionally, given the current lack of standards for protection against potential adverse effects of chronic exposure to sub-threshold fields, which can not be ruled out considering the available epidemiological and experimental evidence, this study proposes specific criteria for exposure assessment considering potential long-term effects. These criteria allow implement technical and organizational strategies, aimed at risk prevention and radiation protection of workers by minimizing their exposure.

INDICE

PREFACIO-PRÓLOGO	13
1. INTRODUCCIÓN A LAS RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS	15
1.1 ESPECTRO DE LAS RADIACIONES	17
1.1.1 RADIACIONES IONIZANTES.....	18
1.1.2 RADIACIONES NO IONIZANTES.....	24
1.1.2.1 Radiaciones ópticas	25
1.1.2.2 Campos Electromagnéticos	28
➤ Radiofrecuencia (RF).....	28
➤ Frecuencia Baja y Extremadamente Baja (BF Y ELF).....	30
➤ Campos eléctricos y Magnéticos estáticos (CME).....	31
1.2 RESONANCIA MAGNÉTICA	32
1.2.1 RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR EN MEDICINA.....	35
1.2.2 RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR EN INVESTIGACIÓN.....	39
1.3 EFECTOS DERIVADOS DE LA EXPOSICIÓN A CME, LF Y ELF, RF	44
1.3.1 EFECTOS EN LA SALUD POR EXPOSICIÓN A CAMPOS MAGNÉTICOS ESTÁTICOS.....	44
1.3.2 EFECTOS EN LA SALUD POR EXPOSICIÓN A CAMPOS DE FRECUENCIA BAJA Y EXTREMADAMENTE BAJA.....	45
1.3.3 EFECTOS EN LA SALUD POR EXPOSICIÓN A CAMPOS DE RADIOFRECUENCIA.....	47
1.4 ESTÁNDARES INTERNACIONALES DE PROTECCIÓN FRENTE A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	50
1.4.1. CRITERIOS PARA PREVENCIÓN DE EFECTOS NOCIVOS A CORTO PLAZO.....	50
1.4.2. CRITERIOS PARA PREVENCIÓN DE EFECTOS EN LA SALUD A LARGO PLAZO Y CAMPOS DÉBILES.....	54
2.FUNDAMENTO Y OBJETIVOS	55
3. MATERIAL Y MÉTODO	58
3.1 MATERIAL	59
3.2 MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	64
3.2.1 PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL	64

MEDIANTE MEDICIÓN	69
3.2.1.1. Fase previa.....	69
3.2.1.2. Fase de medición.....	74
3.2.1.3.Fase de análisis de resultados.....	78
➤ Criterios de valoración para efectos a corto plazo.....	78
➤ Criterios de valoración de exposición crónica a niveles subumbral de CEM RF.....	79
➤ Criterios de valoración de exposición crónica a niveles subumbral de CME....	81
➤ Criterios de valoración para trabajadores especialmente sensibles.....	82
3.2.2 PROCEDIMIENTO DE ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN MEDIANTE DATOS DEL FABRICANTE.....	83
4.RESULTADOS.....	85
4.1 RESULTADOS DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN MEDIANTE MEDICIÓN.....	86
4.1.1 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN A RF	86
4.1.2 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN A CME..	86
4.1.2.1 Exposición en la mano durante la introducción de la muestra.....	86
4.1.2.2 Exposición en el cuerpo durante la introducción de la muestra.....	90
4.1.2.3 Exposición en la mano durante la operación de ajuste de parámetros....	93
4.1.2.4 Exposición en el cuerpo durante la operación de ajuste de parámetros..	95
4.1.2.5. Comparativa del nivel de exposición entre espectrómetros con apantallamiento estándar y ultraapantallados.....	99
4.1.2.6. Exposición en la consola.....	103
4.1.2.7. CME en ambientes próximos.....	103
4.2 RESULTADOS DE ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A PARTIR DE LOS DATOS DEL FABRICANTE.....	107
4.2.1 ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A PARTIR DE ISOLÍNEAS DE EMISIÓN	108
4.2.1.1 Estimación de la inducción para el equipo 17.....	108
4.2.1.2. Estimación de la inducción para el equipo 9.....	109
4.2.1.3. Estimación de la inducción para el equipo 12.....	111
4.2.2 ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A PARTIR DE TABLAS DE EMISIÓN.....	112
4.2.3 ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA AMBIENTAL DE LOS DATOS PROPORCIONADOS POR LOS FABRICANTES.....	116
4.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS REGISTRADOS MEDIANTE MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS VERSUS ESTIMACIÓN DE LA	118

INDUCCIÓN MAGNÉTICA A PARTIR DE LA INFORMACIÓN DEL FABRICANTE.....	
4.3.1 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN EN REGIONES ANATÓMICAS DE INTERÉS DURANTE LA MANIPULACIÓN DE LOS EQUIPOS.....	118
4.3.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN EN LAS PROXIMIDADES DE LOS EQUIPOS.....	121
5.DISCUSIÓN.....	123
6.CONCLUSIONES.....	144
APÉNDICES	
APÉNDICE 1: PARÁMETROS DE LAS RADIACIONES.....	148
APÉNDICE 2: MECANISMOS DE INTERACCIÓN DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS CON LA MATERIA.....	151
APÉNDICE 3:EFECTOS EN LA SALUD DERIVADOS DE LA EXPOSICIÓN A CME, LF-ELF Y CEM RF.....	153
APÉNDICE 4: PARÁMETROS PARA LA EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN.....	172
APÉNDICE 5: CRITERIOS DE CAMPO CERCAÑO Y CAMPO LEJANO.....	175
BIBLIOGRAFIA.....	177
PUBLICACIONES	198

INDICE DE ABREVIATURAS

ALARA	Tan bajo como sea razonablemente posible (<i>As Low As Reasonably Achievable</i>)
ALATA	Tan bajo como sea técnicamente posible (<i>As Low As Technically Achievable</i>)
B	inducción magnética o densidad de flujo magnético
CEM	Campo electromagnético
CENQUIOR	Centro de Química Orgánica
CIB	Centro de Investigaciones Biológicas
CID	Centro de Investigación y Desarrollo
CIPR	Comisión Internacional para la Protección Radiológica
CM	Campo Magnético
CME	Campo Magnético Estático
CNB	Centro Nacional de Biotecnología
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
CTE	Comprobación Técnica de Emisiones
E	intensidad de campo eléctrico
\mathcal{E}	Estandar
ELF	Extremadamente Baja Frecuencia
H	intensidad de campo magnético
HSEMP	Hipersensibilidad Electromagnética Percibida
I	intensidad de corriente
I_c	corriente de contacto
I_L	corriente inducida en las extremidades
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (<i>International Agency for Research on Cancer</i>)
ICMAB	Instituto de Ciencias Materiales de Barcelona
ICMM	Instituto de Ciencias Materiales de Madrid
ICMS	Instituto de Ciencias Materiales de Sevilla

ICNIRP	Comisión Internacional sobre Protección de las Radiaciones No Ionizantes (<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>)
INSHT	Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
IR	Infrarrojo
IQFR	Instituto Química- Física Rocasolano
J	densidad de corriente inducida
LF	Baja Frecuencia
RD	Real Decreto
RF	Radiofrecuencia
RI	Radiación Ionizante
RM	Resonancia Magnética
RMI	Resonancia Magnética de Imagen
RMN	Resonancia Magnética Nuclear
RNI	Radiación No Ionizante
S	Densidad de potencia
SA	Absorción de energía
SAR	Tasa de absorción de energía
UA	Ultraapantallado
UE	Unión Europea
UNSCEAR	Comité Científico de Naciones Unidas para los efectos de la radiación atómica (<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>)
UV	Ultravioleta
WHO	Organización Mundial de la Salud (<i>World Health Organization</i>)

PREFACIO – PRÓLOGO

“Nuestros conocimientos actuales acerca de los efectos estocásticos de las radiaciones no ionizantes están al nivel que se encontraban hace 70 años los conocimientos sobre los efectos de las radiaciones ionizantes”.

Francisco Fernández Moreno (físico, académico, Consejero del CSN, 2011).

“Debido a la reciente controversia marcada por intereses en conflicto, la investigación sobre los bioefectos de los campos electromagnéticos ha sufrido un retroceso de al menos 20 años” Carl F. Blackman (biofísico, Investigador Jefe de Unidad de la US. Environmental Protection Agency, expresidente de la International BioElectroMagnetics Society, 2010).

Las interpretaciones de la evidencia sobre los bioefectos de las radiaciones no ionizantes, en general, y de los campos magnéticos y electromagnéticos, en particular, son en la actualidad objeto de una fuerte controversia marcada por “intereses en conflicto”. Esos niveles de controversia no se habían dado en el caso de las investigaciones sobre los bioefectos de las radiaciones ionizantes, cuyos inicios no se vieron interferidos por intereses encontrados. Pero en el caso de los campos electromagnéticos, la controversia ha supuesto una rémora severa para una correcta exploración de los mecanismos de respuesta a esos campos, que hubiera permitido, como permitió en el caso de las ionizantes, un rápido desarrollo de estrategias eficientes, tanto de seguridad radiológica como de generación de nuevas aplicaciones médicas.

A ese respecto, el presente estudio se enfoca específicamente en la problemática de seguridad radiológica ocupacional, centrada en el colectivo relativamente exiguo de investigadores que utilizan cotidianamente equipos de espectrometría por resonancia magnética nuclear. Dadas las características de esos equipos, se asume que sus usuarios están expuestos a niveles de campos magnéticos

y electromagnéticos netamente más elevados que los que recibe la media de la población en sus ámbitos ocupacionales. Sin embargo, hasta el presente carecemos de datos fidedignos sobre los niveles reales de exposición de estos trabajadores. Este estudio da respuesta a esa carencia mediante el análisis de los datos dosimétricos (metrológicos) obtenidos en una campaña de mediciones sistematizadas de exposición personal y ambiental, realizada en 9 centros de investigación españoles, dotados de un total de 19 modelos de espectrómetros diferentes. Para las mediciones hemos desarrollado y aplicado un protocolo avanzado de dosimetría ad hoc. La correspondiente evaluación de seguridad radiológica se basa, asimismo, en un procedimiento de diseño propio, que no descarta la hipótesis de potencial nocividad por exposición crónica a densidades de campo que no alcanzan los niveles considerados deletéreos en el plazo inmediato.

Es obvio que estudios metrológicos como el presente no pueden pretender resolver per se la controversia sobre los potenciales efectos de los campos débiles, que se verá reflejada en algunos textos de la introducción y la discusión de la presente memoria. La resolución definitiva a dicha controversia pasa ineludiblemente por el conocimiento de los mecanismos biofísicos que subyacen en la respuesta biológica a campos débiles. Y para ese tipo de conocimiento es crucial ampliar la investigación experimental a niveles “micro”: celular, subcelular y molecular. No obstante, y en tanto esos mecanismos no estén suficientemente descritos, existe un consenso general sobre la idea de que los datos metrológicos y dosimétricos resultan cruciales en protección radiológica ocupacional. La información proporcionada por tales datos permite determinar y obviar aquellas condiciones que puedan dar lugar a accidentes por sobreexposición, así como diseñar estrategias preventivas de minimización de la exposición ocupacional. Adicionalmente, los datos dosimétricos permiten enfocar y diseñar más eficazmente los futuros estudios, tanto experimentales como epidemiológicos, y refinar la interpretación y conclusiones de la evidencia epidemiológica y experimental disponible en el presente.

INTRODUCCION

1. INTRODUCCIÓN A LAS RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS

La radiación electromagnética es una perturbación de tipo ondulatorio que se compone de un campo eléctrico asociado a un campo magnético, ambos oscilando en fase, que se desplazan en planos perpendiculares entre sí y a la propia dirección de propagación, de manera que en su transmisión por el espacio se comporta como una onda.

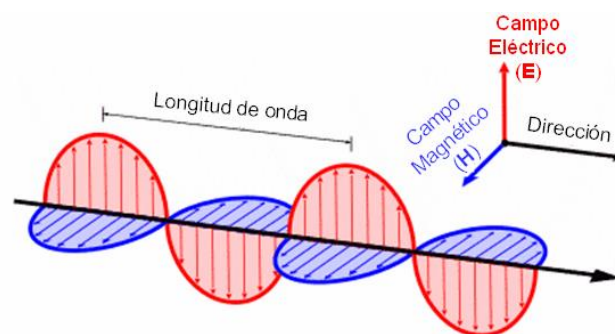


Figura F11: imagen representativa de la propagación de la radiación electromagnética. (Fuente: Curso Superior en Prevención de Riesgos Laborales. V2.0. Unidad didáctica: Campos Electromagnéticos Ed. INSHT)

La radiación electromagnética presenta a su vez un carácter corpuscular al estar constituida por pequeños cuantos que son los que transportan la energía, de manera que ésta se concentra en pequeños paquetes de energía en lugar de estar distribuida por toda la onda de forma homogénea. En su propagación, esta energía, constituida por paquetes elementales o fotones, interacciona con la materia pudiendo ser depositada en los objetos irradiados, dando lugar a diferentes efectos en los organismos vivos dependiendo de la frecuencia de la radiación.

Para explicar esta doble naturaleza de las radiaciones se desarrolló la teoría onda-corpúsculo. Por tanto, actualmente, el comportamiento de las radiaciones electromagnéticas se explica asignándoles esta doble naturaleza: cuando se propagan en el espacio se comportan como ondas, pero sus interacciones con la materia son fenómenos de tipo corpuscular.

Los parámetros físicos básicos que caracterizan las radiaciones son frecuencia (o longitud de onda), y energía (ver Apéndice 1 para definición de parámetros).

1.1. ESPECTRO DE LAS RADIACIONES

El conjunto de las radiaciones se divide en diferentes regiones atendiendo a sus valores de frecuencia o longitud de onda; es lo que habitualmente se denomina el espectro de las radiaciones.

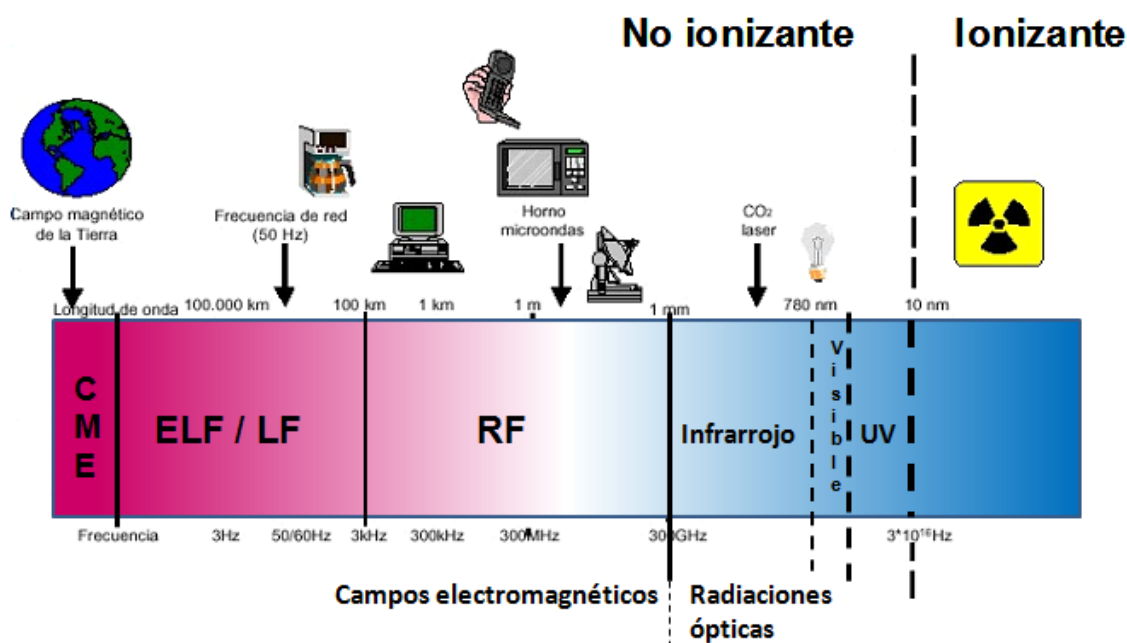


Figura FI2: Espectro electromagnético. (CME: Campo Magnético Estático; ELF: Extremadamente baja frecuencia; LF: Baja Frecuencia; RF: Radiofrecuencia; UV: ultravioleta). Modificado a partir de imagen procedente de Curso Superior en Prevención de Riesgos Laborales. V2.0. Unidad didáctica: Campos Electromagnéticos Ed. INSHT.

El espectro de las radiaciones lo componen dos grandes grupos: Radiaciones ionizantes (RI) y Radiaciones No Ionizantes (RNI), y dentro de éstas últimas se encuentran a su vez las Radiaciones Ópticas y los Campos Electromagnéticos.

En la tabla T11 se expone la clasificación del espectro electromagnético donde se detallan los valores de frecuencia y longitud de onda para cada tipo de radiación, destacando en negrita la magnitud más empleada en el correspondiente rango.

Espectro electromagnético		Longitud de onda	Frecuencia	
Radiación ionizante		<100nm	>3000THz	
Radiación no ionizante	Ultravioleta	400-100nm	750-3000THz	
	Radiaciones Ópticas	Visible	760-400nm-	385-750THz
		Infrarrojo	1mm-760nm	300GHz-385THz
		Radiofrecuencias¹	3km-1mm	100kHz-300GHz
	Campos electromagnéticos	Baja y Extremadamente baja frecuencia	∞ -3 km	0-100 kHz
		Campos estáticos	∞	0 Hz

Tabla T11: Clasificación del espectro electromagnético con los correspondientes intervalos de frecuencias y longitud de onda para cada rango.

1.1.1 RADIACIONES IONIZANTES

Las **radiaciones ionizantes** son aquellas radiaciones con energía suficiente para ionizar la materia. Así, cuando la radiación colisiona al azar con átomos y moléculas, es capaz de arrancar electrones del átomo, dando lugar a iones y radicales

¹ En algunos textos la clasificación de la radiación no ionizante diferencia entre microondas (300 MHz – 300 GHz) y radiofrecuencia (100 kHz – 300 MHz) y en otras referencias las radiofrecuencias engloban el rango comprendido entre 100 kHz y 300 GHz. En este documento utilizaremos el segundo criterio.

libres, al romper los enlaces químicos, provocando otros cambios a nivel molecular potencialmente capaces de dañar las células afectadas.

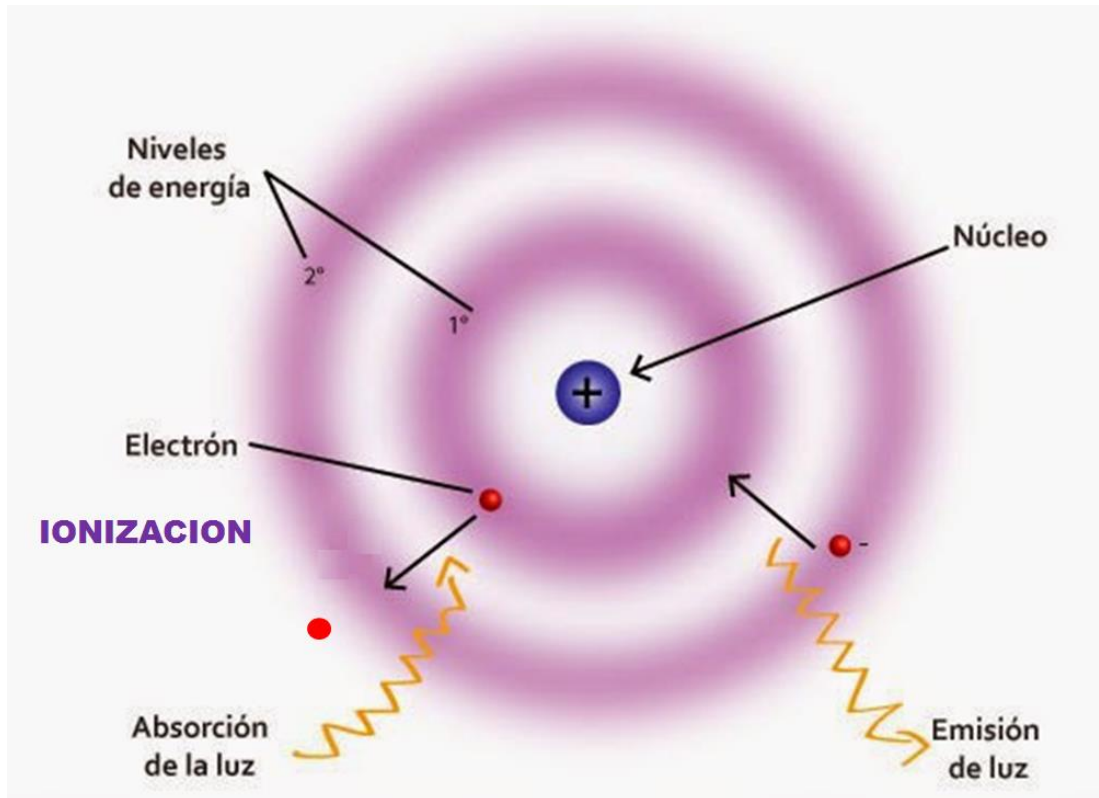


Figura F13: proceso de ionización del átomo

Las radiaciones ionizantes pueden proceder de sustancias radiactivas, que de forma natural emiten espontáneamente dichas radiaciones, o de fuentes artificiales, tales como generadores de Rayos X y aceleradores de partículas.

En la actualidad las RI tienen múltiples aplicaciones en la investigación, la industria y la medicina. En investigación se utilizan para determinar la composición interna de diversos materiales mediante técnicas que emplean rayos X, como la fluorescencia de rayos X; en la industria, las radiaciones ionizantes se emplean para la producción de energía (uranio radiactivo en centrales nucleares) y para el control de calidad, permitiendo detectar errores de fabricación y ensamblaje (rayos X para observación de estructuras internas). En el campo de la medicina, las radiaciones ionizantes permiten realizar una gran variedad de estudios diagnósticos (rayos X empleados en radiografías y sustancias radiactivas como trazadores para generar

imágenes detalladas) y tratamientos médicos (radiofármacos terapéuticos para tratar trastornos como hipertiroidismo y radioterapia con rayos gamma y otros tipos de radiación para tratamientos oncológicos).

En cuanto a los efectos nocivos de la RI, desde su descubrimiento por Roentgen en 1895, los rayos X fueron introducidos con tanta rapidez para el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades que muy pronto comenzaron a encontrarse lesiones debidas a sobreexposiciones de la radiación entre los primeros radiólogos, cuando aún se desconocían sus riesgos (Brown, 1933). Las primeras lesiones detectadas fueron sobre todo reacciones cutáneas en las manos de quienes trabajaban con los primeros equipos de radiología, si bien ya en el primer decenio de uso regular de las RI se observaron otro tipos de lesiones, incluidos los primeros cánceres atribuidos a la radiación (Stone, 1959). Desde estos primeros hallazgos, el estudio de los efectos biológicos de la radiación ionizante ha recibido un impulso permanente como consecuencia del incremento de sus aplicaciones.

El efecto adverso más importante en la salud es el daño que produce por ionización de moléculas esenciales, como el ADN, que puede manifestarse en forma de efectos genotóxicos directos de tipo mutágeno y cancerígeno en las personas expuestas. La frecuencia de los daños genotóxicos directos aumenta en función lineal de la dosis de radiación absorbida, sin umbral, por lo que se consideran efectos estocásticos resultantes de alteraciones moleculares aleatorias en células individuales (NAS1990; CIPR 1991).

Aparte de estos efectos estocásticos, la radiación ionizante puede producir en los tejidos afectados efectos agudos, considerados de naturaleza no estocástica o determinista (CIPR 1984 y 1991). Estas lesiones agudas se producen en los órganos y tejidos más radiosensibles como la piel, la médula ósea y el tejido linfóide, el intestino, las gónadas, aparato respiratorio y cristalino, entre otros. Estas lesiones agudas se han observado en pacientes tratados inicialmente con radioterapia y en accidentes graves, como el que ocurrió en el reactor nuclear de Chernobil, que originó enfermedades radiológicas y quemaduras en más de 200 personas entre equipos de emergencia y bomberos (liquidadores), de las que 31 fallecieron (UNSCEAR 1988).

El conocimiento de los efectos de la RI sobre la salud y sus mecanismos de interacción con la biomateria ha permitido el desarrollo de medidas eficaces de protección radiológica ante este tipo de agente físico. En el caso de los accidentes graves en instalaciones radiactivas, para limitar los efectos agudos se han establecido protocolos operacionales para la gestión de riesgos, con el fin de agilizar y mejorar la respuesta tras el accidente. Tales protocolos incluyen planes de emergencia específicos y programas de vigilancia radiológica medioambiental (denominado EREMP de sus siglas en inglés).

Por otro lado, se han implantado medidas de prevención encaminadas a proteger frente a los peligros derivados de exposiciones crónicas a dosis bajas de radiaciones ionizantes, principalmente en trabajadores de centrales nucleares, personal sanitario o investigador. Estas medidas incluyen controles dosimétricos y la aplicación de estrategias de minimización ALARA y ALATA² de la exposición.

Aunque la población está expuesta a radiación ionizante de origen natural procedente de radionucleidos existentes en el aire y la corteza terrestre o los rayos cósmicos (ver figura FI4A), en general no se encuentra sometida a radiaciones ionizantes de origen artificial, salvo en el caso de pacientes con tratamientos médicos o en pruebas de diagnóstico (FI4B). Sin embargo, sí existen colectivos profesionalmente expuestos a radiaciones ionizantes, como operadores en centrales nucleares, profesionales en el ámbito sanitario y personal investigador, entre otros.

² ALARA: Tan bajo como sea razonablemente posible (*As Low As Reasonably Achievable*)
ALATA: Tan bajo como sea técnicamente posible (*As Low As Technically Achievable*)

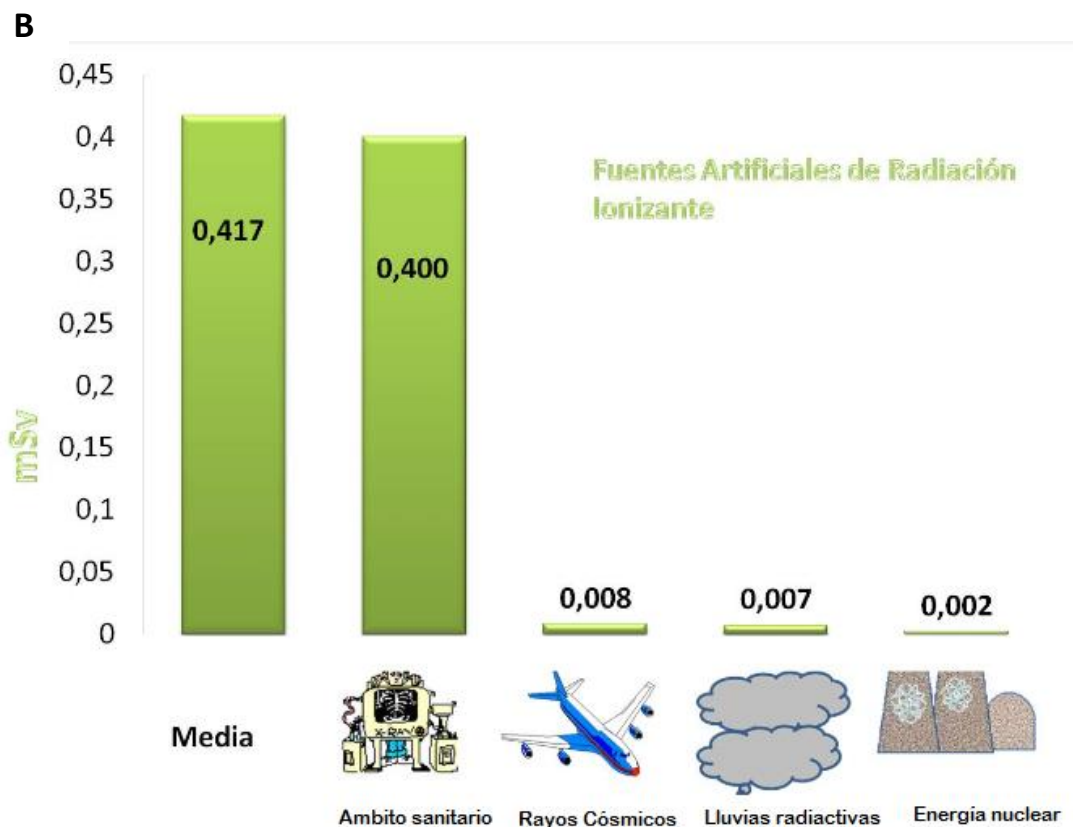
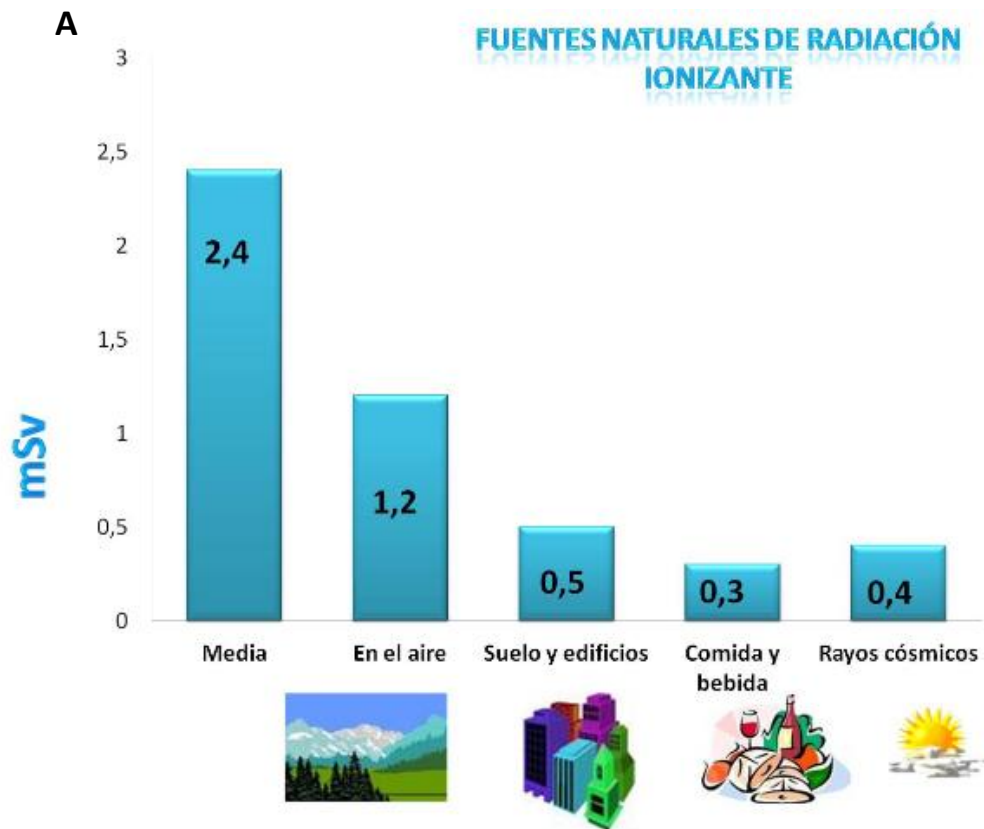


Figura FI4: A: Fuentes de exposici6n natural a Radiaci6n Ionizante. B: Fuentes de exposici6n artificial a Radiaci6n Ionizante. Fuente: Foro de la Industria Nuclear Espa~ola

Si bien, como se ha mencionado, la población en general está poco expuesta a RI de origen no natural, existe una notable preocupación social en torno a las radiaciones emitidas por centrales nucleares, y en particular en relación con su estado de funcionamiento y con la gestión de los residuos generados. Con el fin de mantener a la población adecuadamente informada, las instituciones públicas españolas han desarrollado medidas como la creación de un portal on line para la libre consulta del estado operativo de las centrales nucleares que operan en el territorio nacional (<https://www.csn.es/centrales-nucleares-de-espana>).

The screenshot shows the CSN (Consejo de Seguridad Nuclear) website interface. At the top, there is a navigation bar with the CSN logo and several menu items: 'CSN', 'Seguridad nuclear' (highlighted in green), 'Protección radiológica', 'Respuesta a emergencias', and 'Centro de documentación'. Below the navigation bar, the breadcrumb 'Seguridad nuclear > Estados Operativos' is visible on the left, and 'A+ A-' on the right. The main content area is titled 'Estados Operativos' and contains a paragraph explaining that the website updates the operational status of nuclear power plants in Spain daily. Below this is a search section with the label 'Buscar fecha', a date input field containing '10/04/2017', and a 'Buscar' button. Underneath the search bar, the text 'Datos operativos de las centrales - 10/04/2017' is displayed above a map of Spain. The map shows the locations of several nuclear power plants: Sta. Mª de Garoña, Trillo, Almaraz I, Almaraz II, Cofrentes, Ascó I, Ascó II, and Vandellós II. Below the map, there are links for 'Valores Individuales' and 'Gráficas'.

Figura F15: Imagen representativa del tipo de información on line, de libre acceso, sobre el nivel de estado operativo de las centrales nucleares españolas. (Fuente:csn.es)

1.1.2 RADIACIONES NO IONIZANTES

La radiación no ionizante carece de energía suficiente para ionizar la materia, es decir, para arrancar electrones del átomo, pero en su interacción con los sistemas biológicos, las RNI son capaces de generar excitaciones electrónicas.

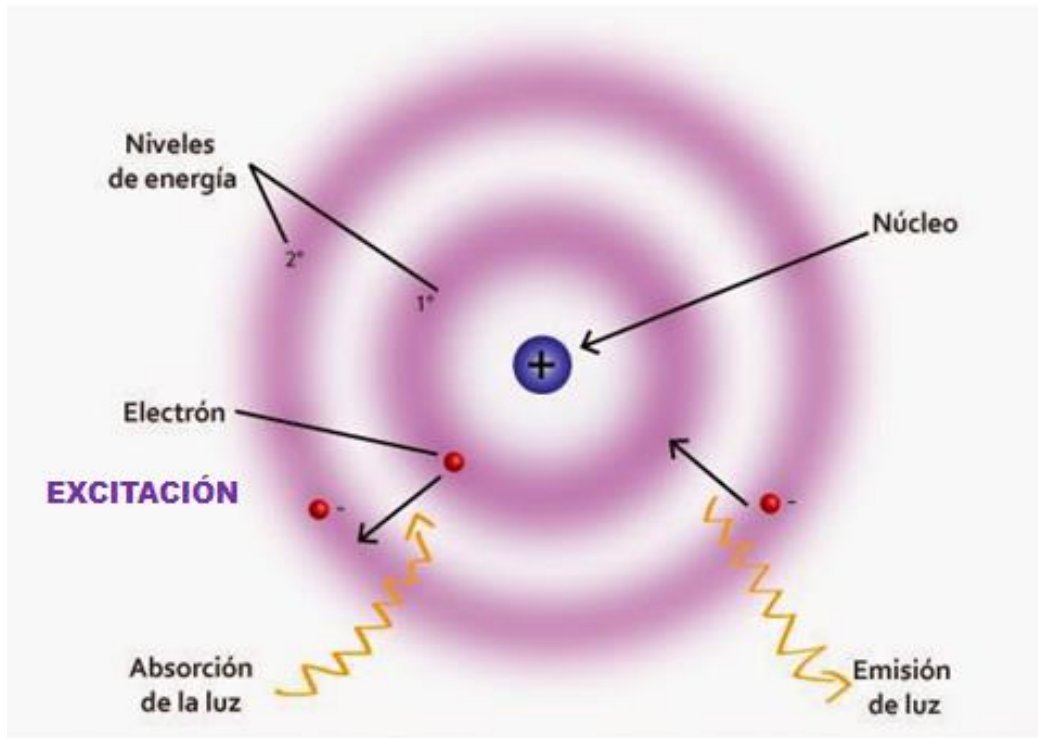


Figura F16: proceso de excitación del átomo

El espectro no ionizante incluye las radiaciones ópticas (ultravioleta, visible e infrarroja)³ y campos electromagnéticos (radiofrecuencia, frecuencia baja y extremadamente baja y campo estático). Básicamente, las aplicaciones de las RNI, y sus efectos sobre la salud, dependen de la frecuencia de la radiación.

³ La terminología radiación óptica está ampliamente aceptada, si bien la radiación ultravioleta e infrarroja se encuentran fuera del rango visible.

1.1.2.1 Radiaciones Ópticas.

Aunque por sus características este tipo de radiación, en principio, no es capaz de ionizar la materia, la exposición a radiaciones ópticas puede generar a nivel de piel y ojos daños bien conocidos, e incluso producir efectos carcinógenos sobre la piel en el caso de la radiación óptica más energética.

La radiación ultravioleta (UV), cuya principal fuente es el Sol, también es emitida por un gran número de dispositivos utilizados en la industria, investigación y medicina. En la industria se emplea en fotolitografía para la fabricación de semiconductores y circuitos integrados, para la localización de fisuras en estructuras, en procesamiento de alimentos, para eliminar microorganismos presentes en alimentos líquidos, y en recubrimientos dotados de fotoiniciadores. En investigación la radiación UV es utilizada en fotolitografía y en diversas técnicas de espectrometría para el análisis de estructuras químicas (espectrometría por absorción atómica, espectrometría por emisión, espectrometría Ramán, entre otras), así como en lámparas germicidas en cabinas de bioseguridad. En medicina se emplea para esterilizar superficies y utensilios y en tratamientos médicos frente a la psoriasis y otras dolencias cutáneas. La radiación ultravioleta está presente en procesos de soldadura, detectores de humos, trampas para insectos voladores, lámparas fluorescentes y lámparas de bronceado, y también se emplea para autenticar obras de arte, entre otras aplicaciones.

La radiación infrarroja (IR) se emplea principalmente en la investigación, la medicina, la tecnología militar y la industria. En investigación se emplea para la determinación de la estructura molecular mediante análisis espectral IR. En medicina se utiliza en el diagnóstico de enfermedades tumorales y en ciertos tipos de cirugías reemplazando al bisturí, ya que al mismo tiempo que corta, cauteriza los vasos sanguíneos, evitando así las hemorragias. En la tecnología de seguridad y defensa, la radiación infrarroja permite establecer imágenes cartográficas de las temperaturas de los cuerpos emisores (termografía). En la industria interviene en procesos que implican el curado térmico de distintos tipos de materiales, en los que se emplean fuentes de calor que emiten radiación IR de potencias elevadas. Este tipo de radiación se aplica también al secado de barnices y pinturas, cueros, papeles y

películas fotográficas, pastas alimenticias, deshidratación de frutas, verduras, etc. También es muy usada en alarmas y sistemas de control a distancia por infrarrojos.

En función de su frecuencia y potencia, la radiación óptica puede producir diversas lesiones agudas sobre el ojo humano, que van desde la quemadura de retina y córnea a la fotorretinitis o *Blue-Light Hazard*, además de otros daños por exposición crónica, como cataratas y conjuntivitis. También produce efectos agudos sobre la piel, como enrojecimiento o quemaduras, y otros de tipo crónico, como el cáncer de piel.

La siguiente figura muestra un cuadro resumen de lesiones cutáneas y oculares derivadas de la exposición a los distintos tipos de radiación óptica de alta potencia, en función de la longitud de onda y de la duración de la exposición.

LONGITUD DE ONDA	ÓRGANO	RIESGO	TIEMPO
180 - 400 nm UV	PIEL OJOS	Eritemas/Cáncer piel Queratitis/Conjuntivitis	8 horas
315- 400 nm UVA	OJOS	Cataratas	8 horas
300 – 700 nm UVA – VISIBLE	OJOS	Retinitis	$t \leq 10^4$ s
			$t > 10^4$ s
380 – 1400 nm UVA – VISIBLE – IRA	OJOS	Quemadura retina	$t > 10$ s
			$10^6 \leq t \leq 10$ s
780 – 1400 nm IRA	OJOS	Quemadura retina	$t > 10$ s
			$10^6 \leq t \leq 10$ s
780 – 3000 nm IR	OJOS	Quemadura córnea Cataratas	$t \leq 10^3$ s
			$t > 10^3$ s
380 – 3000 nm UVA – VISIBLE – IR	PIEL	Quemaduras piel	$t < 10$ s

Tabla T12: Resumen de efectos agudos y crónicos en piel y ojos por exposición a radiación óptica, según tipo de radiación, longitud de onda y duración de la exposición (fuente: guía técnica de radiaciones ópticas. INSHT).

El deterioro de la capa de ozono ha incrementado la presencia de radiación ultravioleta solar y, por tanto, el nivel de exposición de la población en general. Por otro lado, debido a las múltiples aplicaciones de la radiación óptica, tanto ultravioleta como infrarroja, existen diversos colectivos expuestos profesionalmente a este tipo de radiación, como personal del ámbito sanitario e investigador, operarios de la industria, empleados de altos hornos y fundiciones, soldadores, etc.

El conocimiento de los efectos nocivos de la exposición a radiación óptica ha permitido desarrollar sistemas adecuados de protección. En particular, se han diseñado mecanismos de barrera y dispositivos de apantallamientos específicos para las frecuencias de radiación correspondientes, con categorías de protección normalizadas (protectores oculares, pantallas faciales, cremas solares, prendas de protección frente a radiación UV, etc.) cuyo uso está cada vez más extendido.

Específicamente, en lo que se refiere a la radiación UV, datos epidemiológicos recogidos en los últimos decenios han permitido vincular determinados tipos de cáncer de piel con la exposición a las radiaciones ultravioletas más energéticas. Por ello, en un país con altos niveles de radiación solar, como España, se ha reforzado desde las instituciones públicas las campañas encaminadas a concienciar a la población de la necesidad de protegerse. En este contexto se encuadran las campañas preventivas de protección frente a la radiación solar o los portales destinados a informar de la predicción del nivel de la radiación ultravioleta (<http://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/radiacionuv>).

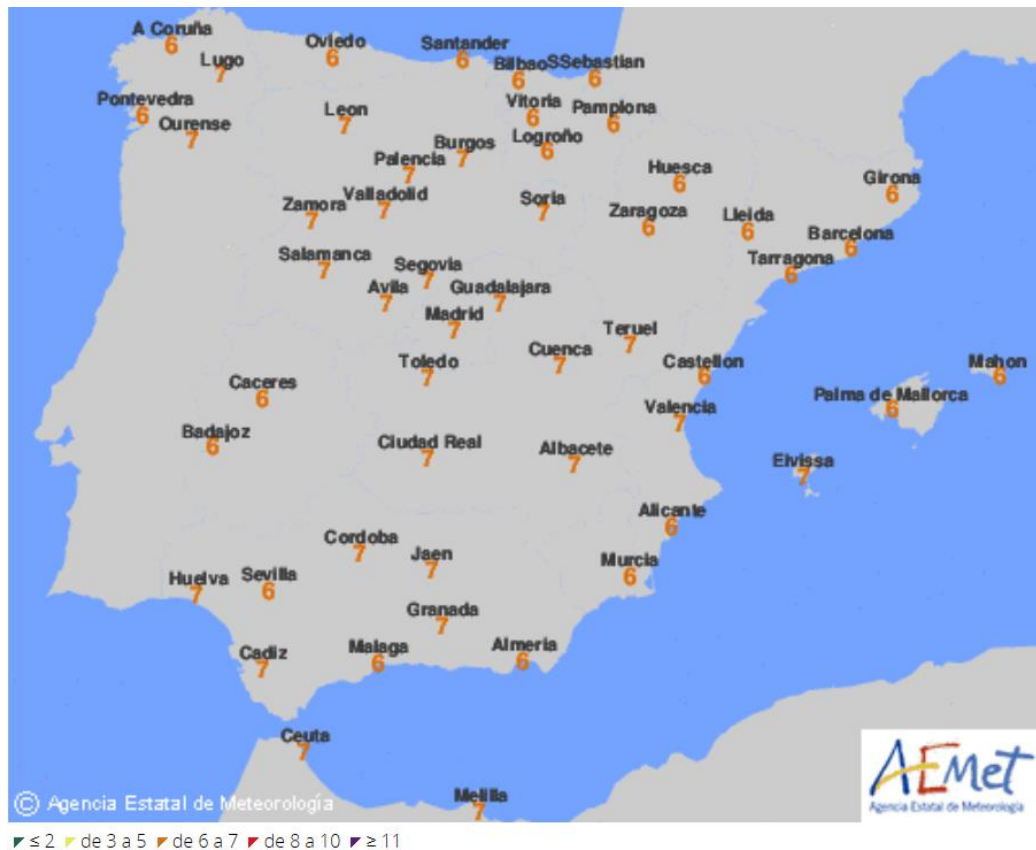


Figura F17: imagen representativa del tipo de información on line sobre niveles locales de radiación UV, proporcionada por agencias públicas. (Fuente: aemet.es)

1.1.2.2 Campos Electromagnéticos

➤ Radiofrecuencia

Las radiofrecuencias (RF) abarcan el rango del espectro radioeléctrico comprendido entre 100 kHz y 300 GHz. Las fuentes típicas de generación de RF son la telefonía móvil, aplicaciones inalámbricas, transmisores de RF, estaciones base de telefonía, nueva tecnología de televisión digital, sistemas de radares civiles o militares, hornos microondas para calentar y cocinar alimentos, entre otras. Este tipo de radiación también se utiliza en aplicaciones médicas con fines de diagnóstico y terapéuticos (como la diatermia y onda corta) y en laboratorios de investigación para la fabricación de nano- y micro-estructuras.

La población en general está expuesta a campos RF debido al uso generalizado de telefonía móvil. En cuanto a los colectivos profesionalmente expuestos a radiofrecuencias, se encuentran los operarios de antenas de telefonía y radio, personal de investigación en salas blancas de diseño y fabricación de circuitos electrónicos, operadores de radares de tráfico y meteorológicos, y personal sanitario, entre otros.

La exposición a campos de radiofrecuencia (RF) produce efectos adversos a corto plazo bien conocidos como estimulación del tejido nervioso o muscular, o calentamiento de los tejidos biológicos, dependiendo de las características de la señal (ICNIRP 1998, 2009b). En relación con posibles bioefectos a largo plazo las conclusiones no están claras por lo que las evidencias de posibles efectos crónicos son limitadas

Debido a la controversia suscitada sobre posibles efectos derivados de la exposición residencial crónica a radiaciones RF de telefonía móvil, y conscientes de la importancia de contrarrestar la percepción sobre los correspondientes riesgos entre la población, las instituciones han desarrollado acciones específicas como la creación de portales on line con la información cartografiada de los niveles de emisión registrados en el entorno de las estaciones de telefonía móvil instaladas a nivel nacional. (<http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/NivelesExposicion/Paginas/niveles.aspx>). En cuanto a la exposición residencial a radiaciones RF significativamente más potentes, como las generadas por emisoras de radio, televisión, radar (civil o militar) etc., los niveles correspondientes no han sido medidos o no están disponibles para su consulta por el público o los profesionales.

ESTACIONES DE TELEFONÍA MÓVIL

LOCALIZACIÓN

Código VODAFONE ESPAÑA, S.A. - 55727	Dirección CL HIGUERAS, 32. MADRID, MADRID
--	---

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Operador	Referencia	Banda Asignada (MHz)
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	M M -0431261	1825.10 - 1845.10
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	M M -0430182	1905.00 - 1910.00; 2140.00 - 2155.00

NIVELES MEDIDOS EN EL ENTORNO

Distancia (m)	(*) Acimut (°)	Valor Medido ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)
89.0	358.0	0.29804
105.0	9.0	0.06899
76.0	262.0	0.02080
32.0	263.0	0.34473
107.0	331.0	0.08618
102.0	342.0	0.21011

Los niveles medidos cumplen la normativa legal vigente, al encontrarse muy por debajo de los niveles de referencia establecidos.

El nivel de referencia más restrictivo para los servicios de radiocomunicación es de $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. El nivel de referencia para los distintos servicios de telefonía móvil es siempre superior al valor más restrictivo ($200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) anteriormente indicado. Por ejemplo, para el servicio de telefonía móvil en la frecuencia de 2000 MHz, el nivel de referencia es $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Figura F18: imagen representativa de la información cartografiada proporcionada on line sobre la localización, las características técnicas y los niveles medidos en el entorno de estaciones de telefonía móvil. (Fuente: minetad.es)

➤ Frecuencia baja y extremadamente baja

Los campos de frecuencia baja (LF) y extremadamente baja (ELF) se extienden desde 0Hz a 100 kHz y son generados principalmente por equipos e instalaciones eléctricas de uso residencial y doméstico, así como por tecnologías industriales de potencia y conducción eléctrica o por aplicaciones médicas para el tratamiento del dolor o estimulación de la reparación y regeneración tisular.

El uso ampliamente extendido de equipos y dispositivos eléctricos que usan y emiten señales de frecuencias bajas es una de las principales causas de exposición crónica para la población general. En cuanto a los colectivos profesionales, uno de los

grupos más expuesto es el de operarios en instalaciones de transporte de energía eléctrica.

Los efectos a corto plazo conocidos derivados de la exposición a campos de frecuencia baja y extremadamente baja, son la estimulación directa de los tejidos nerviosos y musculares y la inducción de fosfenos. Hay también evidencias científicas indirectas de efectos en las funciones cerebrales que influyen en otros procesos visuales y en la coordinación motora, que pueden verse transitoriamente afectadas por los campos eléctricos inducidos en tales tejidos u órganos cuando son expuestos a campos magnéticos de bajas frecuencias. En relación con efectos crónicos, se han llevado a cabo numerosos estudios y los resultados no son concluyentes.

➤ *Campos eléctricos y magnéticos estáticos.*

Los campos eléctricos estáticos son producidos por cuerpos cargados eléctricamente. La exposición a campos eléctricos estáticos no induce campos significativos en tejidos y órganos internos, debido a la alta conductividad de los tejidos corporales respecto al aire. De manera que el principal efecto del campo eléctrico estático es la generación de cargas superficiales, que también pueden ser producidas por fricción, y pueden generar chispas de descarga y movimiento del vello corporal, que pueden ser percibidos por el individuo en forma de sensación desagradable.

Los campos magnéticos estáticos (CME) son generados por imanes o por partículas cargadas en movimiento, como las corrientes eléctricas. Los campos magnéticos estáticos tienen múltiples aplicaciones en la industria, la investigación y en medicina. En la industria se emplea en procesos tecnológicos energéticos, como reactores de fusión termonuclear, en sistemas magnetohidrodinámicos, sistemas de almacenamiento de energía con imanes superconductores, en la producción de aluminio, procesos electrolíticos o fabricación de imanes, entre otros. En investigación están presentes en aceleradores de partículas y espectrómetros de Resonancia

Magnética Nuclear. En medicina se emplean en particular para el diagnóstico por imagen mediante resonancia magnética nuclear.

Los efectos en la salud a corto plazo derivados de la exposición a campos magnéticos estáticos incluyen episodios pasajeros de vértigo, sabor metálico y problemas de concentración. En relación con efectos a largo plazo, la evidencia disponible no es concluyente.

La población en general no está expuesta a campos eléctricos y magnéticos estáticos, salvo aquellos de origen natural como las tormentas o el campo geomagnético terrestre. El colectivo más expuesto profesionalmente a campos estáticos está formado por operadores altamente cualificados en ámbitos de la industria, del diagnóstico médico por imagen de resonancia magnética, o de la investigación basada en el uso de aceleradores de partículas o de la espectrometría por resonancia magnética nuclear.

1.2. RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR

La resonancia magnética nuclear (RMN) es una de las diversas aplicaciones de los campos magnéticos estáticos en el ámbito de la medicina y la investigación. La técnica de RMN fue descrita inicialmente por Isidor Rabí en 1938 y, más tarde, Félix Bloch y Edward Mills Purcell obtuvieron el Premio Nobel de Física en 1952 por su aplicación en líquidos y sólidos. Actualmente, la espectroscopia de resonancia magnética nuclear es utilizada en medicina para el diagnóstico de patologías y en investigación para determinar la composición química de diferentes materiales de origen diverso.

El hidrógeno es el principal elemento usado en el desarrollo de la tecnología de RMN por su abundancia en elementos como el agua. De ahí la relevancia del hidrógeno en resonancia magnética de imagen (RMI) médica y veterinaria, dado que el agua representa alrededor del 75% del peso total del cuerpo de los humanos y de otros organismos de interés.

La técnica de la RMN se basa en la orientación de los momentos magnéticos nucleares en presencia de un campo exógeno. En ausencia de un campo magnético externo los momentos magnéticos de los núcleos atómicos tienden a orientarse al azar espontáneamente, sin embargo, se alinean en la orientación marcada por el campo magnético estático exógeno (B_0), cuando se encuentran en presencia de éste.

El núcleo puede tener uno de los dos estados discretos de energía: el estado de baja energía con spin hacia arriba (up), el cual está alineado con su momento magnético paralelo al campo magnético externo (B_0) y en la misma dirección que este (estado β en la figura F110) y el estado de alta energía con el spin hacia abajo (down), el cual está alineado con su momento magnético paralelo a la dirección del campo (B_0) y en la dirección opuesta a este (estado α en la figura F110). La cantidad relativa de núcleos con spin hacia arriba y hacia abajo (baja y alta energía), viene determinado por la intensidad del campo magnético externo B_0 y la energía térmica, mientras que en ausencia del campo B_0 y en equilibrio térmico, el número de núcleos con spin up (baja energía) es ligeramente mayor que los núcleos con spin down (alta energía). Este pequeño exceso produce una magnetización neta debida al balance relativo de núcleos con spin up y spin down.

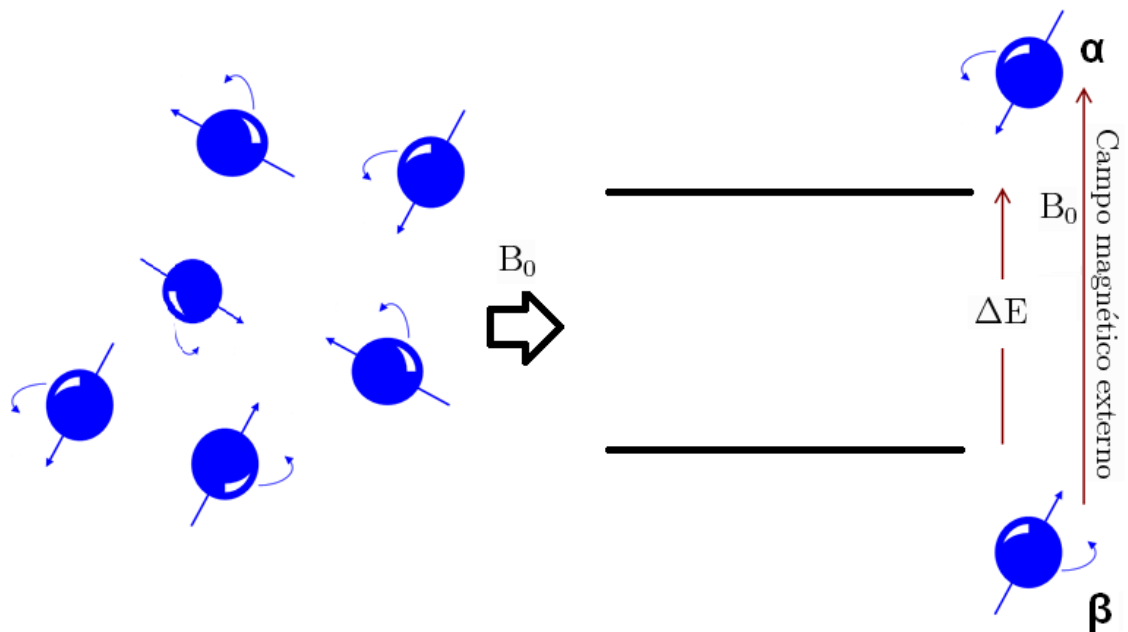


Figura FI10. Representación de la diferencia energética entre los estados de spin down (α) de alta energía y spin up (β) de baja energía, en función del campo magnético estático externo B_0 .

Por tanto, en presencia del campo externo, la diferencia de energía entre los dos estados de espín depende de la fuerza del campo magnético aplicado B_0 , de manera que cuanto mayor sea el campo magnético, mayor diferencia energética habrá entre los dos estados de espín.

En estas condiciones de existencia de B_0 , la aplicación de pulsos oscilantes de RF externos a la frecuencia de resonancia (denominada frecuencia Larmor) rota la magnetización longitudinal de equilibrio existente al plano transversal para hacerla detectable. Una vez que cesa la señal RF, el núcleo activo pierde la energía y algunos de los núcleos con spin hacia abajo (alta energía) vuelve al estado de núcleo hacia arriba (baja energía), alineando sus momentos magnéticos en la dirección del spin hacia arriba.

Cuando los núcleos vuelven a su estado inicial emiten señales cuya frecuencia depende de la diferencia de energía entre los estados de espín. El espectrómetro de RMN detecta estas señales y las registra como una gráfica de frecuencias frente a

intensidad, que es el llamado espectro de RMN. El término resonancia magnética nuclear procede del hecho de que los núcleos están en resonancia con la radiofrecuencia, es decir, los núcleos de la muestra introducida pasan de un estado de espín a otro como respuesta a la radiación RF a la que son sometidos.

Por tanto, esta tecnología se basa en la propiedad de alineamiento de los momentos magnéticos permanentes de un determinado material cuando este se encuentra en presencia de un CME con una densidad de flujo B_0 suficientemente elevada. Si en esas condiciones se aplica un campo RF, perpendicular y de menor intensidad que el CME, el vector polarización se desvía de su dirección inicial cuando los parámetros de campo se aproximan a las condiciones de resonancia específicas del núcleo atómico expuesto, permitiendo así caracterizar el elemento.

Para optimizar la técnica de análisis es necesario aplicar campos magnéticos extremadamente estables y de intensidad muy alta. Para ello se emplean determinadas aleaciones metálicas que, sometidas a temperaturas próximas al cero absoluto (-273 °C), no ofrecen resistencia al paso de la corriente eléctrica, adquiriendo características de superconductividad. Por eso los equipos de RMN utilizan fluidos criogénicos, habitualmente helio líquido a -269 °C, además de agua comprimida o nitrógeno que permiten mantener el helio a baja temperatura y disminuir su evaporación.

1.2.1 RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR EN MEDICINA

La RMN en el ámbito de la medicina se aplica como prueba diagnóstica a partir de imágenes corporales. Esta técnica no invasiva aporta información gráfica sobre patologías que no pueden valorarse mediante otras técnicas de imagen como la radiografía o la ecografía, y presenta la ventaja adicional de que, a diferencia de la radiografía, el paciente no se ve expuesto a radiación ionizante, por lo que es una técnica ampliamente extendida.

Las imágenes obtenidas por RMN se presentan como cortes gráficos de muy alta resolución de los tejidos blandos internos. Así, la Resonancia Magnética de Imagen es una tecnología idónea para diagnosticar patologías de la columna y las articulaciones, así como para estudiar y para diagnosticar dolencias o malformaciones del corazón, la aorta, las arterias coronarias y los vasos sanguíneos, incluidos pequeños aneurismas. A nivel de torso, se emplea para examinar detalladamente los órganos internos del tórax y el abdomen, lo que permite diagnosticar y evaluar tumores y enfermedades funcionales.



Figura F110: Imagen representativa de una gráfica obtenida mediante RMI. Fuente Surur A. et al. (2010)

La obtención de las imágenes en RMN se consigue mediante la estimulación de los átomos de los tejidos a estudiar. En efecto, según se ha descrito más arriba, los protones de los átomos se alinean en presencia de un campo magnético estático de alta densidad de flujo magnético (B). Simultáneamente, se someten los tejidos blancos a una radiación de una frecuencia RF específica de resonancia, de manera que cuando la exposición a la señal RF es interrumpida, los protones vuelven a su posición original, emitiendo a su vez señales RF que son captadas por un receptor, amplificadas y analizadas por un ordenador que las transformará en imágenes.

Debido a que el imán principal genera un campo constante, todos los núcleos que posean el mismo momento magnético (por ejemplo, todos los núcleos de hidrógeno) tendrán la misma frecuencia de resonancia. Esto implica que, en estas condiciones, se registrará la misma señal RF procedente de todos los núcleos con la misma frecuencia de resonancia que se encuentren en cualquier punto de los tejidos expuestos. En esas condiciones, la información proporcionada carece del componente estéreo, que es imprescindible en imagen médica. En RMN esa carencia se solventa mediante las denominadas bobinas de gradiente, cada una de las cuales genera un campo magnético específico, de intensidad elevada y con una frecuencia controlada (por ejemplo en una parte del tejido se genera un campo magnético de 0,5 T; en otra parte el campo es de 1 T; en otra, de 1,5 T; etc.). Se trata de ondas pulsadas complejas, con frecuencias de entre 0,5 y 5 kHz, que varían en función del escáner y tipo de prueba diagnóstica. Estos campos magnéticos de gradiente modifican la resultante del campo estático B_0 , modificando la frecuencia de resonancia de los núcleos en las distintas partes de los tejidos expuestos. En la práctica se emplean tres bobinas ortogonales para asignar a cada región anatómica una frecuencia de resonancia diferente, de manera que cuando se produzca y detecte un fenómeno de resonancia a una frecuencia determinada, será posible determinar la región del espacio de la que proviene.

La resolución de las imágenes diagnósticas de RMN es función directa de la densidad de flujo de los campos magnéticos estáticos de los imanes empleados por los equipos. En la actualidad, se aplican densidades de entre 0,2 y 9,4T, si bien la mayoría de los sistemas opera a 1,5 y 3 teslas.

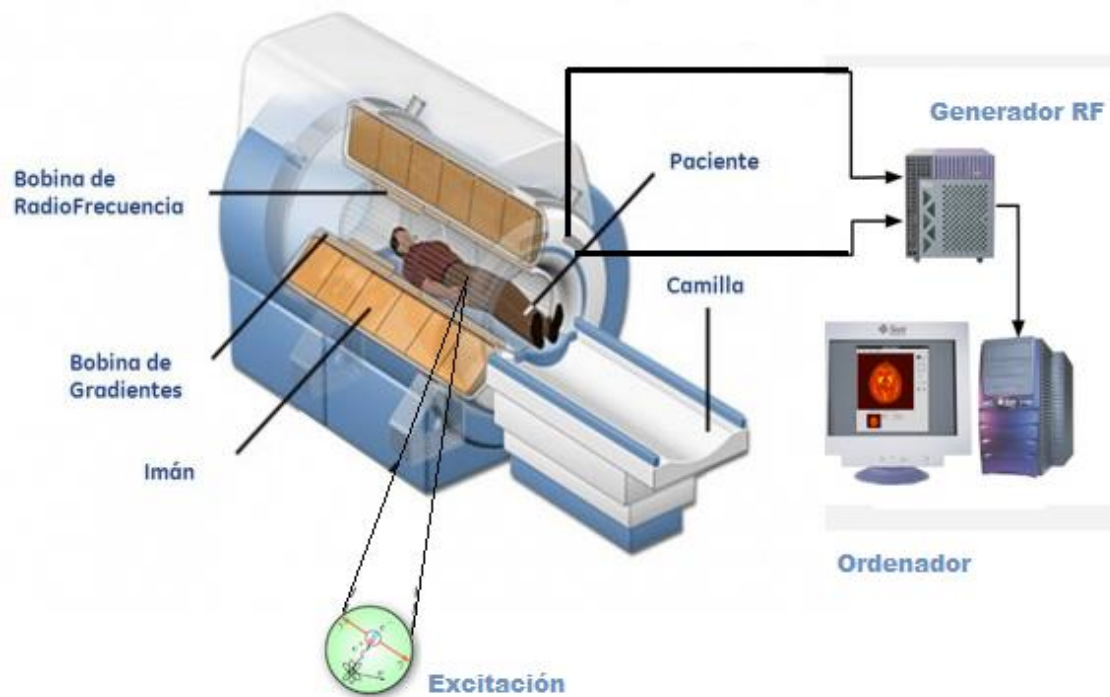


Figura FI11: esquema del equipo de RMN de diagnóstico por imagen, que consta de los siguientes elementos: un imán de grandes dimensiones, un generador de señal RF, bobinas de gradiente, bobina receptora (antena) de RF, camilla para el paciente y ordenador para procesamiento de señales (Modificado a partir de imagen procedente de <https://resonanciamagneticaumes.jimdo.com/partes-de-un-equipo-de-rm/>)

EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SERVICIOS DE DIAGNÓSTICO MEDIANTE RMI

El uso creciente de esta técnica diagnóstica, que ha dado lugar a un incremento significativo de la exposición a la que está sometido el personal sanitario que trabaja en salas de resonancia magnética de imagen, ha llevado a caracterizar con precisión los niveles de campo recibidos por estos trabajadores (Chakeres et al., 2005; de Vocht et al., 2006a-b; Wilén et al., 2011). En su conjunto los datos metrológicos han revelado que este colectivo ocupacional puede estar sometido regularmente a campos magnéticos estáticos que pueden exceder los valores de referencia a partir de los cuales aparecen los mencionados bioefectos (European Union. Non-binding guide to good practice for implementing Directive 2013/35/EU Electromagnetic Fields. Volume I: Practical Guide. 2014).

1.2.2. APLICACIÓN DE RMN EN INVESTIGACIÓN

En el ámbito de la investigación, la RMN es una técnica no destructiva que proporciona datos cuantitativos sobre la estructura química, la dinámica y las interacciones moleculares en materiales en estado sólido, semisólido o en dilución. Estos materiales pueden tener orígenes muy diversos: desde moléculas bioquímicas (proteínas, ADN, etc.) hasta compuestos complejos tales como alimentos, preparados farmacéuticos o muestras de tejidos o fluidos orgánicos. La figura FI12 muestra una imagen de espectro obtenido por RMN

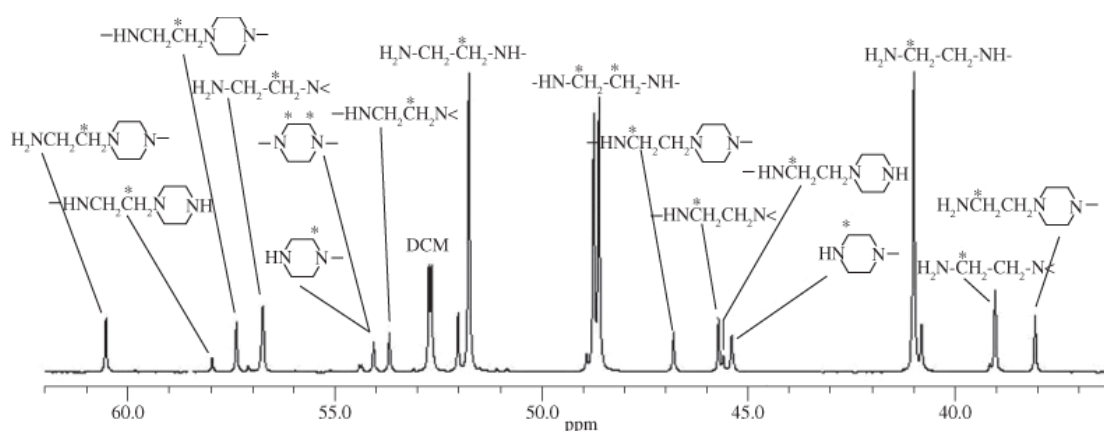


Figura FI12. Imagen de un espectro obtenido mediante RMN de ^{13}C del producto tetractilenpentamina (TEPA). Fuente: González F. et al. (2007): <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282008000100010>

Las áreas de aplicación de la RMN como técnica de espectrometría son múltiples. Así, entre sus principales usos en investigación la espectrometría de RMN se aplica en: análisis estructural y estereoquímico para la caracterización de compuestos químicos con núcleos activos; identificación y cuantificación de compuestos orgánicos y organometálicos; control de impurezas; estudios de sistemas dinámicos y parámetros físicos moleculares; control de calidad en alimentos; diagnóstico y pronóstico molecular en clínica; determinación de perfiles metabólicos en biopsias y/o biofluidos, etc. También en otros sectores, como los de la industria química, farmacéutica, agroalimentaria y petroquímica, se emplea la espectroscopia de RMN para el análisis

Un equipo de espectrometría por RMN consta de los siguientes elementos (F113):

- Un imán que genera un campo magnético estático, cuyo valor es único y característico del equipo. La intensidad, homogeneidad y estabilidad del campo generado determina la sensibilidad y resolución máximas del equipo. Las unidades pequeñas de sobremesa emplean imanes permanentes de tierras raras, mientras que los equipos de gran tamaño emplean imanes superconductores, que permanecen totalmente energizados durante largos periodos de tiempo para mejorar la estabilidad del campo. Los imanes potentes admiten el empleo de rangos de frecuencias más altos, dada la proporcionalidad entre la densidad de flujo de campo estático y la frecuencia de la señal RF.
- Un sintetizador de frecuencias externo, que genera los pulsos RF, en función del análisis del elemento objeto de estudio. La frecuencia máxima que se puede sintonizar, correspondiente a la empleada para el análisis de átomo de hidrógeno, viene determinada por el valor del campo magnético estático, es característica de cada equipo y figura en la propia denominación del equipo.
- Una sonda, que se sitúa dentro del imán, en la que se introduce la muestra. La sonda contiene una o más bobinas de RF sintonizadas a la frecuencia del núcleo a estudiar (Figura F114).
- Un puesto de control con un computador que sirve de interfaz con el equipo y permite analizar la información obtenida.

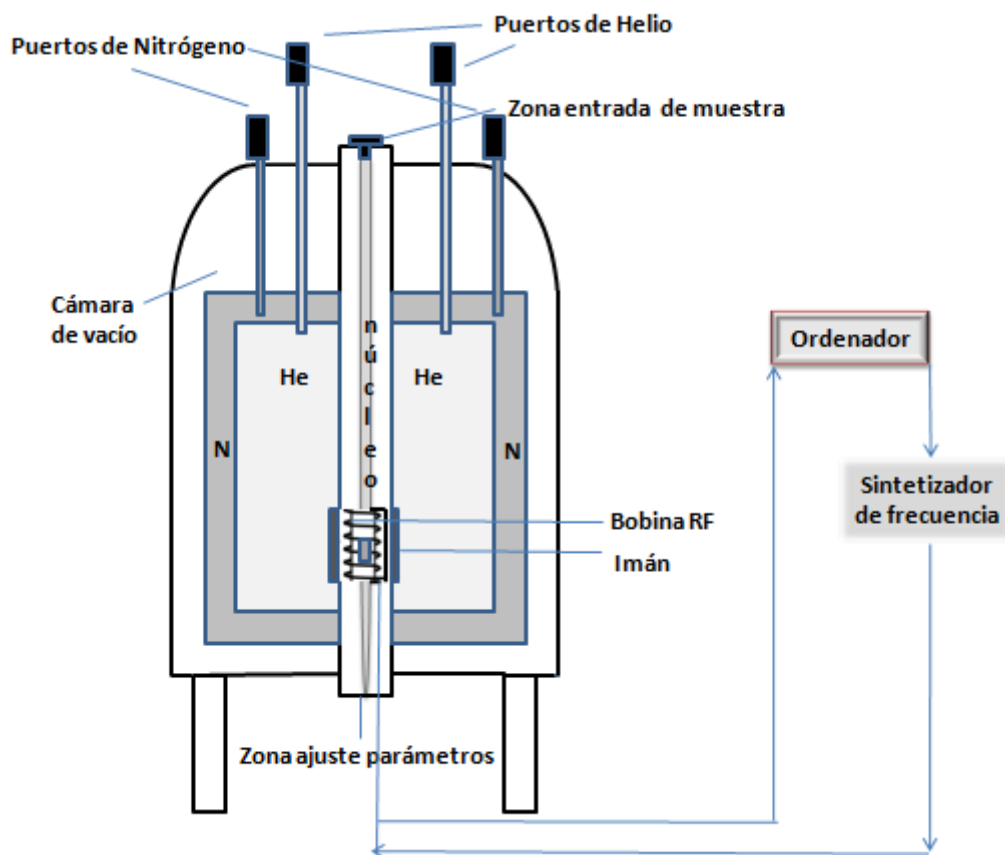


Figura F113. Esquema de un Espectrómetro de RMN con los principales elementos. (N: nitrógeno; He: Helio)

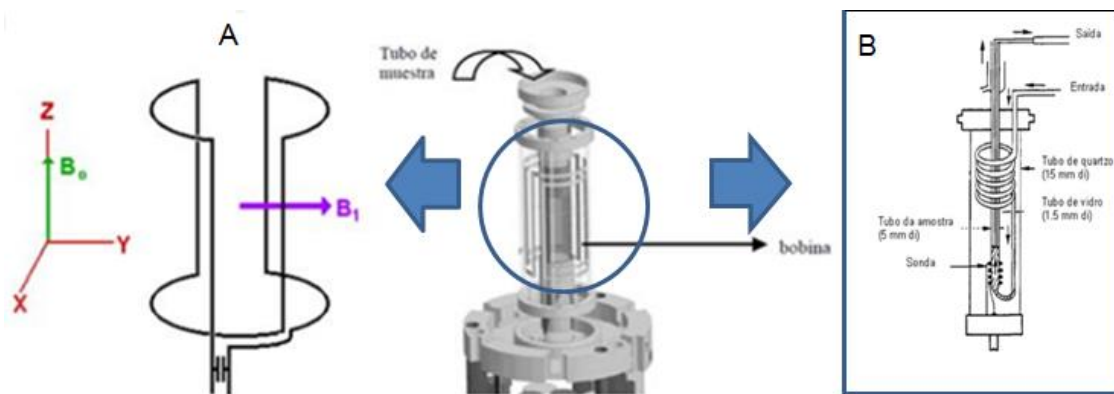


Figura F114. Imagen de la sonda de RMN. (A) representación del campo magnético. (B) esquema interior de la sonda de RMN. (Modificado a partir imagen disponible en <http://www.uam.es/otros/germn/images/05Instrumentacion.pdf>)

Existen múltiples modelos de espectrómetros de RMN que poseen distintos tipos de apantallamiento y trabajan a diferentes frecuencias. Los equipos de RMN típicamente trabajan a 200 MHz, 300 MHz, 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz y 1000 MHz, y utilizan campos estáticos de 4,7 T; 7,47 T; 9,4 T; 11,7 T; 14,1 T; 16,5 T; 18 T, 21,1 T y 23,5 T, correspondientes a cada una de las frecuencias citadas.

EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SERVICIOS DE RMN EN CENTROS DE INVESTIGACIÓN

El personal de investigación que desarrolla su actividad laboral con espectrómetros de RMN en centros de investigación está expuestos crónicamente a campos magnéticos estáticos y de radiofrecuencias emitidos por los equipos durante su funcionamiento.

El personal de mantenimiento para los espectrómetros de RMN, al igual que en los equipos de RMI, puede estar expuesto esporádicamente a niveles superiores de radiación electromagnética debido a que pueden ejercer sus tareas en estrecho contacto con las fuentes de campo. Por tanto, en este colectivo hay que considerar la eventualidad de que se den efectos potencialmente nocivos derivados de una sobreexposición accidental a condiciones y niveles de exposición significativamente altos. Tales efectos son del tipo agudo y de naturaleza determinista, basados en mecanismos clásicos, bien caracterizados, de acción directa e inmediata de los campos sobre órganos específicos y sistemas biológicos completos (ver Apéndice 2: mecanismos de interacción de los campos electromagnéticos con la materia). Sin embargo, ese tipo de sobreexposición accidental esporádica no es objeto del presente estudio, toda vez que la prevención y tratamiento de ese tipo de accidentes están contemplados y bien descritos en los correspondientes cursos de formación específica.

Este trabajo se centra en las condiciones y niveles de exposición a los que está típicamente expuesto crónicamente el personal investigador que trabaja con espectrómetros de RMN. Así, la Guía Europea de Buenas Prácticas Volumen 2 (European Commission 2014) admite que esos niveles de exposición podrían constituir un factor de riesgo para los espectrometristas, sin embargo reconoce que tales niveles y condiciones todavía no han sido caracterizados adecuadamente.

En esta exposición ocupacional del personal investigador que trabaja con los espectrómetros de RMN, aparte de los citados efectos deterministas directos de los campos estáticos y RF, podrían darse otros fenómenos que impliquen efectos estocásticos por exposición crónica o frecuente a valores de campo que se encuentren por debajo del umbral de daño inmediato establecido en los estándares internacionales de protección ocupacional. No obstante, los mecanismos biofísicos implicados en esos potenciales efectos estocásticos no están todavía suficientemente caracterizados, y siguen siendo objeto de estudio por parte de la bioelectromagnética. Esta disciplina biofísica investiga los mecanismos de respuesta a radiaciones electromagnéticas subumbral y supraumbral, a través de la experimentación en voluntarios y en biosistemas animales, celulares y moleculares, y de la epidemiología de distintos tipos de dolencias, principalmente enfermedades oncológicas, neurológicas, infertilidad y anomalías en el desarrollo embrionario.

1.3 EFECTOS DERIVADOS DE LA EXPOSICIÓN A CAMPOS MAGNÉTICOS ESTÁTICOS, FRECUENCIA BAJA Y EXTREMADAMENTE BAJA Y RADIOFRECUENCIA

1.3.1 EFECTOS ADVERSOS POR EXPOSICIÓN A CAMPOS MAGNÉTICOS ESTÁTICOS

Como se ha comentado más arriba, los efectos a corto plazo derivados de la exposición a campos magnéticos estáticos incluyen episodios pasajeros de vértigo, sabor metálico y problemas de concentración durante exposiciones agudas a campos intensos (Chakeres et al. 2005; de Vocht et al., 2006a-b; Wilén et al., 2011). Se trata de estudios observacionales que muestran que, en general, los síntomas descritos son transitorios y tienden a remitir, indicando la existencia de mecanismos de recuperación o adaptación (Zanotti et al., 2015). También existe un bloque significativo de evidencia experimental in vitro, in vivo y en voluntarios humanos, dirigido al estudio de la respuesta a corto plazo a campos magnéticos estáticos en el rango de densidades de flujo que abarca desde los militeslas a los teslas (ver Apéndice 2).

En cuanto a la potencial genotoxicidad de los campos magnéticos estáticos, los estudios se han enfocado preferentemente en su influencia a nivel celular en los procesos de inducción y progresión promovidos por carcinógenos conocidos, a su interacción con la respuesta a agentes quimioterapéuticos o al incremento en la frecuencia de aberraciones cromosómicas. Aunque distintos estudios han descrito efectos potencialmente genotóxicos, en su conjunto el tipo de efectos observados es diverso.

En cuanto a posible inducción de estrés oxidativo por exposición a CME, cabe destacar el bloque de estudios realizados en ratas sometidas a un breve intervalo diario de exposición a campo $B \approx 0,1$ T durante periodos de entre 5 y 30 días (Elferchichi et al., 2011; Ghodbane et al., 2011; Miryam et al., 2010; Lahbib et al., 2010; Amara et al., 2009). En su conjunto, estos resultados indican que, a medio plazo, la exposición in vivo a tales niveles de campo estático puede generar estrés oxidativo en

diversos tejidos. No obstante, las implicaciones de ese efecto a nivel de la salud humana, no han sido evaluados.

Asimismo, se han llevado a cabo estudios en voluntarios expuestos a campos estáticos de 8 T, centrados en la investigación de potenciales efectos en funciones cardíacas, cognitivas o sensoriales, la reproducción y el desarrollo. También en este caso, el conjunto de la evidencia ha sido considerado inadecuado e insuficiente para alcanzar conclusiones definitivas en lo que respecta a la salud (WHO 2006a).

En definitiva, la evidencia epidemiológica y experimental disponible sobre los posibles efectos deletéreos de la exposición crónica a CME se considera todavía limitada y no permite alcanzar conclusiones definitivas al respecto (ver revisiones de: Feychting, 2005; de Vocht et al., 2012). En este contexto, la Organización Mundial de la Salud (WHO) viene considerando que no existen evidencias suficientes de efectos adversos a corto y largo plazo debidos a la exposición de CME elevados, como los recibidos por usuarios de equipos de RMN y RMI (IARC, 2002; WHO 2006a).

1.3.2. EFECTOS EN LA SALUD DERIVADOS DE CAMPOS DE FRECUENCIA BAJA Y EXTREMADAMENTE BAJA

Los equipos de espectrometría no generan campos de frecuencia baja (LF: $300 \text{ Hz} < f \leq 100 \text{ kHz}$) y extremadamente baja (ELF: $0 < f \leq 300 \text{ Hz}$). Sin embargo, el desplazamiento del trabajador en un gradiente de CME puede inducir en los tejidos expuestos campos o corrientes de baja frecuencia, siendo esta frecuencia función de la velocidad del desplazamiento y de las características del gradiente, entre otros parámetros físicos. La existencia de estos campos electromagnéticos (CEM) y corrientes, cuyos potenciales efectos a corto y largo plazo se describen sucintamente a continuación, son factores a considerar en materia de protección radiológica ocupacional en ambientes con elevados niveles de CME. Sin embargo, la extremadamente compleja y costosa valoración de esos campos y de sus posibles efectos queda fuera de los objetivos del presente trabajo, que se centra

exclusivamente en el estudio de la exposición a CME y CEM RF emitidos por espectrómetros de RMN.

Como ya se ha mencionado, los efectos a corto plazo conocidos de los campos de frecuencia baja y extremadamente baja en la salud, son debidos a la estimulación de los nervios o de los órganos sensoriales (ICNIRP 1998, ICNIRP 2010). Estos estímulos pueden dar lugar a síntomas transitorios como vértigo o fosfenos retinianos, que podrían provocar molestias temporales, alterar funciones cognitivas u otras funciones cerebrales o musculares. También se han considerado e investigado posibles efectos crónicos de la exposición a estos campos, principalmente en materia de efectos genotóxicos y carcinógenos (Markkanen et al. 2008), en el sistema nervioso (Cvetkovic and Cossic, 2009) y en la reproducción y el desarrollo (Borhani et al., 2011). En la actualidad existen discrepancias entre expertos a la hora de interpretar y valorar la extensa evidencia en la materia, que se resume en el Apéndice 3 de la presente memoria.

Uno de los temas que más interés ha suscitado son los posibles efectos de tipo carcinógeno, de inducción de daño en el ADN o en el mecanismo de reparación, entre otros. Algunos estudios in vitro han referido que la exposición a CM de baja frecuencia altera la respuesta celular frente a agentes o procesos cancerígenos (ver, por ejemplo; Markkanen et al. 2008). También existe amplia evidencia de alteraciones en la proliferación celular, el ciclo celular, la apoptosis o la comunicación intercelular en células de cánceres humanos expuestas in vitro a campos magnéticos y electromagnéticos ELF subumbrales. Y se ha comprobado experimentalmente que en estos efectos intervienen alteraciones en la regulación de moléculas de señalización o de proteínas de control del ciclo celular, y factores de estrés oxidativo, entre otros (ver, por ejemplo, Belyaev et al., 2016). No obstante, comisiones como ICNIRP (Comisión Internacional para la protección frente a radiaciones no ionizantes) persisten en considerar que el conjunto de la evidencia experimental in vivo e in vitro no es concluyente ni probatoria de una relación causal entre la exposición a campos de baja frecuencia y cáncer en humanos. Tal consideración se basa en la existencia de estudios que no han encontrado indicios de efectos cancerígenos y en un alegado desconocimiento de los mecanismos biofísicos que, a nivel molecular, explicarían los resultados experimentales (ICNIRP 1998, ICNIRP 2010).

Por su parte, los estudios epidemiológicos, principalmente centrados en los potenciales efectos cancerígenos de la exposición a campos de frecuencia industrial, sí han coincidido en revelar una consistencia estadísticamente significativa entre la exposición residencial crónica a campos $B_{media} > 0,3 - 0,4 \mu T$ y un riesgo incrementado de leucemia en niños. Esa consistencia, que se evidenció ya en 2000 mediante dos “pooled analysis” de los estudios epidemiológicos disponibles entonces (Ahlbom et al., 2000; Greenland et al., 2000) llevó a la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, WHO) a incluir los campos magnéticos de baja frecuencia en su listado de “posibles carcinógenos en humanos”, clase 2 B; la misma que incluye, por ejemplo, agentes como el plomo, el DDT, los humos de soldadura o el tetracloruro de carbono. Desde entonces, nuevos datos epidemiológicos han confirmado la relación causal entre exposición a campos ELF y leucemia (ver, por ejemplo, Kheifets et al., 2010 o Zhao et al., 2014). Así, revisiones recientes de la literatura consideran que la evidencia epidemiológica y experimental acumulada hasta la fecha es suficientemente robusta para que IARC clasifique la exposición a campos ELF subumbral como un carcinógeno (definitivo) para humanos, Clase 1 (ver, por ejemplo, Kundi, 2012). ICNIRP discrepa también con esas conclusiones sobre la base de los mismos argumentos citados anteriormente.

1.3.3. EFECTOS EN LA SALUD DERIVADOS DE CAMPOS RF

Como ya se ha comentado, la exposición a campos RF produce efectos adversos a corto plazo por estimulación del tejido nervioso o muscular o por calentamiento de los tejidos biológicos, dependiendo, entre otros factores, de la potencia o intensidad de la radiación, de la frecuencia y forma del señal, del ciclo y duración de la exposición (ICNIRP 1998, ICNIRP 2009b). En relación con posibles efectos asociados a exposiciones crónicas a RF, algunos estudios experimentales y epidemiológicos han reportado efectos a largo plazo de tipo genotóxicos o epigenéticos (Şekeroğlu et al., 2012; Avendaño et al., 2012; Karaca et al., 2012), alteraciones en el sistema reproductor (Agarwal et al. 2009; Kumar et al., 2012), en el desarrollo y la función cerebral (Trunk et al., 2013; Lustenberger et al., 2013; Mortazavi et al. 2012), y en funciones cardiovasculares (Havas et al., 2013; Yilmaz and Yildiz, 2010). En el Apéndice 3 se extractan resultados representativos de estudios recientes.

En relación con la posible toxicidad y genotoxicidad inducida por CEM RF existe una amplia literatura por exposiciones a los campos intensos del tipo de señal empleada en telefonía móvil. Y aunque se sabe que la energía de radiación no ionizante RF emitida por los teléfonos móviles es claramente insuficiente para romper los enlaces químicos, diversos autores han descrito daños en la cadena de ADN o aberraciones cromosómicas en distintos biosistemas expuestos a señales RF in vivo o in vitro (Şekeroğlu et al., 2012; Avendaño et al. 2012; Karaca et al 2012). Estos daños y aberraciones no se deberían a efectos directos en el material genético, sino a generación de radicales libres o a alteraciones en los mecanismos de reparación de daños preexistentes en la molécula de ADN o ARN.

Desde la introducción de la telefonía móvil, el número de usuarios se ha incrementado exponencialmente, lo que han llevado a la realización de numerosos estudios, la mayoría enfocados en posibles asociaciones con tumores cerebrales, cáncer testicular y linfoma. En 2011 IARC clasificó los campos electromagnéticos RF como carcinógeno grupo 2B basado en la evidencia de estudios epidemiológicos y experimentación animal (IARC, 2011). Desde entonces, estudios posteriores han ido corroborando la relación causal entre usuarios de telefonía móvil y cáncer (Coureau et al. 2014; Hardell et al. 2013; Carlberg y Hardell, 2017). Sobre esta base, Hardell et al. (2013) concluyeron que los CEM RF deberían ser clasificados definitivamente como agente carcinógeno (Clase 1, según la clasificación de IARC).

En cuanto a efectos en la reproducción, los estudios en animales han mostrado daño en el ADN, descenso en la motilidad y viabilidad y otros parámetros de daño a nivel celular o molecular en la línea masculina (Kumar et al. 2012; Agarwal et al. 2008; Agarwal et al. 2009). También se han estudiado posibles efectos en la reproducción en humanos, y los resultados de varios trabajos han llevado a sus autores a proponer que la exposición de las gónadas a radiación procedente de telefonía móvil podría afectar a la cantidad, motilidad, viabilidad y morfología de los espermatozoides (Yan et al. 2007).

Otros de los temas que WHO ha señalado como áreas de investigación prioritarias son los posibles efectos de las RF en el desarrollo, la función cerebral y el comportamiento. Aunque varios trabajos han coincidido en reportar efectos de la exposición en algunas funciones cerebrales, la evidencia disponible no permite, en conjunto, alcanzar conclusiones definitivas sobre potenciales secuelas cognitivas o neurológicas en el desarrollo del cerebro. En todo caso, los resultados de los estudios que detectaron efectos, serían indicativos de una interacción de la radiación RF con procesos implicados en el reconocimiento de objetos o que intervienen en la consolidación de proceso de memoria. Por otra parte, la mayoría de los estudios en animales que han analizado los efectos de la exposición a RF en la química cerebral y la fisiología sugieren cambios en los parámetros estudiados (Fragopoulou et al., 2012). Los efectos neurológicos y en el comportamiento también han sido estudiados en humanos, y los experimentos se han centrado en posibles efectos en el electroencefalograma (Trunk et al., 2013; Ghosn et al., 2015; Roggeveen et al., 2015;), en potenciales asociados a acontecimientos (Trunk et al., 2013), en el sueño (Lustenberger et al., 2013) y la función cognitiva (Mortazavi et al. 2012). La mayoría de ellos refieren alteraciones en distintos parámetros estudiados.

También se han llevado a cabo numerosos estudios en humanos para determinar los efectos en el sistema cardiovascular derivados de la exposición a RF. En general, los trabajos refieren efectos sutiles o ausencia de efectos significativos en la función cardíaca (Havas and Marrongelle, 2013; Yilmaz and Yildiz, 2010).

También se han realizado varios estudios in vivo en relación con el sistema inmune, aunque los datos, en su conjunto, son insuficientes para la obtención de conclusiones firmes (Grigoriev et al. 2010; Sambucci et al., 2011).

A continuación se presenta un cuadro resumen sobre situación actual del estado del conocimiento de los efectos a la salud derivados a campos electromagnéticos, a corto y largo plazo para cada uno de los rangos del espectro analizado a partir de los cuales se han establecido los estándares internacionales de protección frente a Campos Electromagnéticos.

	Corto plazo	Largo plazo
CME	Vértigos, mareos y problemas de concentración (ICNIRP 1998; 2009a)	Evidencia limitada y no concluyente (ICNIRP 1998;, 2009a)
ELF-LF	Inducción de corrientes (ICNIRP 1998; 2010)	Evidencia limitada y no concluyente. (ICNIRP 1998; 2010) Carcinógeno clase 2B (IARC-WHO 2002)
RF	Inducción de corrientes y calentamiento de tejidos y órganos (ICNIRP 1998; 2009b)	Evidencia limitada y no concluyente (ICNIRP 1998; 2009b) Carcinógeno clase 2B (IARC-WHO 2011)

Tabla T13: Resumen del estado actual de conocimiento sobre los efectos a la salud conocidos a corto y largo plazo por rango de frecuencia

1.4. ESTÁNDARES INTERNACIONALES DE PROTECCIÓN FRENTE A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS.

Para el establecimiento de los estándares de referencia para la protección ocupacional a bioefectos derivados de la exposición a campos electromagnéticos los organismos internacionales se basan generalmente en los criterios de ICNIRP (ICNIRP 2009a-b, 2010). Esta comisión considera que hasta que no existan evidencias y estén bien caracterizados los potenciales mecanismos de respuesta que subyacerían a los potenciales efectos nocivos de exposiciones crónicas y campos débiles, tales efectos no se consideran demostrados y no es preciso establecer criterios de protección. Esto ha motivado que ICNIRP establezca límites de exposición basados exclusivamente en los principios (o mecanismos) físicos básicos implicados en los efectos nocivos inmediatos a corto plazo para humanos de exposiciones a campos intensos (efectos deterministas).

Estos mecanismos de interacción de los campos electromagnéticos con los sistemas biológicos son: acoplamiento de los campos eléctricos de baja frecuencia, acoplamiento con los campos magnéticos de baja frecuencia y absorción de energía a frecuencias superiores (para una descripción más amplia de estos mecanismos, ver Apéndice 4).

1.4.1. ESTÁNDARES OCUPACIONALES PARA PREVENCIÓN DE EFECTOS NOCIVOS A CORTO PLAZO

Los criterios vigentes establecen valores de referencia basados en los citados criterios de ICNIRP, en términos de **valores límite de exposición** y **niveles de acción**. Los valores límite se clasifican asimismo en los relacionados con **efectos para la salud** y con **efectos sensoriales**. Los niveles de acción se dividen en **valores de acción inferiores** y **valores de acción superiores**. Además, para determinadas frecuencias se proponen **valores pico** o máximos de exposición.

➤ Valores límite de exposición:

Los valores límite se establecen para garantizar que los trabajadores expuestos a campos electromagnéticos estén protegidos contra efectos nocivos conocidos para la salud a corto plazo, y se corresponden con las restricciones básicas de ICNIRP

Estos valores límite se han establecido a partir de consideraciones biofísicas y biológicas, en particular sobre los efectos directos agudos a corto plazo como los efectos térmicos y la estimulación eléctrica de los tejidos. Como se detalla en la tabla TI4, los valores límite se expresan en términos de densidad de flujo magnético (B) para campo estático, de campo eléctrico interno (E) para frecuencias de entre 1 y 10 MHz, y de densidad de potencia (S), absorción localizada de energía específica (SA) y tasa de absorción específica de energía (SAR) en función de la frecuencia (para información adicional sobre las definiciones de los parámetros, ver Apéndice 4).

Frecuencia	Magnitud	Valor de referencia
0 Hz < f < 1 Hz	B	Valor límite con efectos para la salud y sensoriales
1 Hz < f < 10 MHz	E _{interno}	Valor límite con efectos para la salud
1 Hz < f < 400 Hz		Valor límite con efectos sensoriales
100 kHz < f < 6 GHz	SAR	Valor límite con efectos para la salud
0, 3 GHz < f < 6 GHz	SA	Valor límite con efectos sensoriales
6 GHz < f < 300 MHz	S	Valor límite con efectos para la salud

Tabla T14: magnitudes en término de las cuales se definen los valores límite de exposición en función de la frecuencia para exposición a CME y CEM.

Los valores límite se clasifican, a su vez en:

- *Valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud*, por encima de los cuales los trabajadores pueden sufrir efectos adversos, como el calentamiento térmico o la estimulación del tejido nervioso y muscular.
 - *Valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales*, por encima de los cuales los trabajadores pueden estar sometidos a trastornos transitorios de las percepciones sensoriales y a ligeras alteraciones en funciones cerebrales.
- *Niveles de acción:*

Los niveles de acción son valores de referencia operativos que se establecen para simplificar la demostración del cumplimiento de los correspondientes valores límite de exposición, o, en su caso, para adoptar las medidas de protección o prevención correspondientes. Como muestra la tabla T15, los niveles de acción se definen mediante magnitudes físicas del campo electromagnético, y se corresponden con parámetros susceptibles de ser medidos directamente. Los niveles de acción se corresponden con los niveles de referencia de ICNIRP, y se expresan en términos de intensidad de campo eléctrico (E), intensidad de campo magnético (H), densidad de flujo magnético o inducción magnética (B) y densidad de potencia (S). En caso de que el resultado de la medición revelase que los niveles de exposición ocupacional rebasan estos niveles de acción, se hace necesario adoptar medidas de control de la exposición (ver definiciones en Apéndice 4).

Frecuencia	Magnitud	Valor de referencia
0 Hz	B	Nivel de acción frente a interferencias con dispositivos médicos implantados y
1 Hz < f < 10 MHz	E	Nivel de acción inferior y superior
1 Hz < f < 10 M Hz	B	Nivel de acción inferior, superior y extremidades
0 Hz < f < 10000 MHz	Ic	Nivel de acción
100 kHz < f < 300 GHz	E, B	Nivel de acción
6 GHz < f < 300 GHz	S	Nivel de acción
100 kHz < f < 110 MHz	Ic	Nivel de acción
10 MHz < f < 110 MHz	I _L	Nivel de acción

Tabla T15: magnitudes en término de las cuales se definen los niveles de acción en función de la frecuencia para exposición a CME y CEM.

Algunos valores de acción se derivan de los valores límite pertinentes, considerando las condiciones de exposición más desfavorables, mientras otros se refieren a la percepción y a los efectos adversos indirectos de la exposición a campos electromagnéticos. Por ello el cumplimiento de los niveles de acción garantiza el respeto de los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud a corto plazo y efectos sensoriales (Fig. F115).

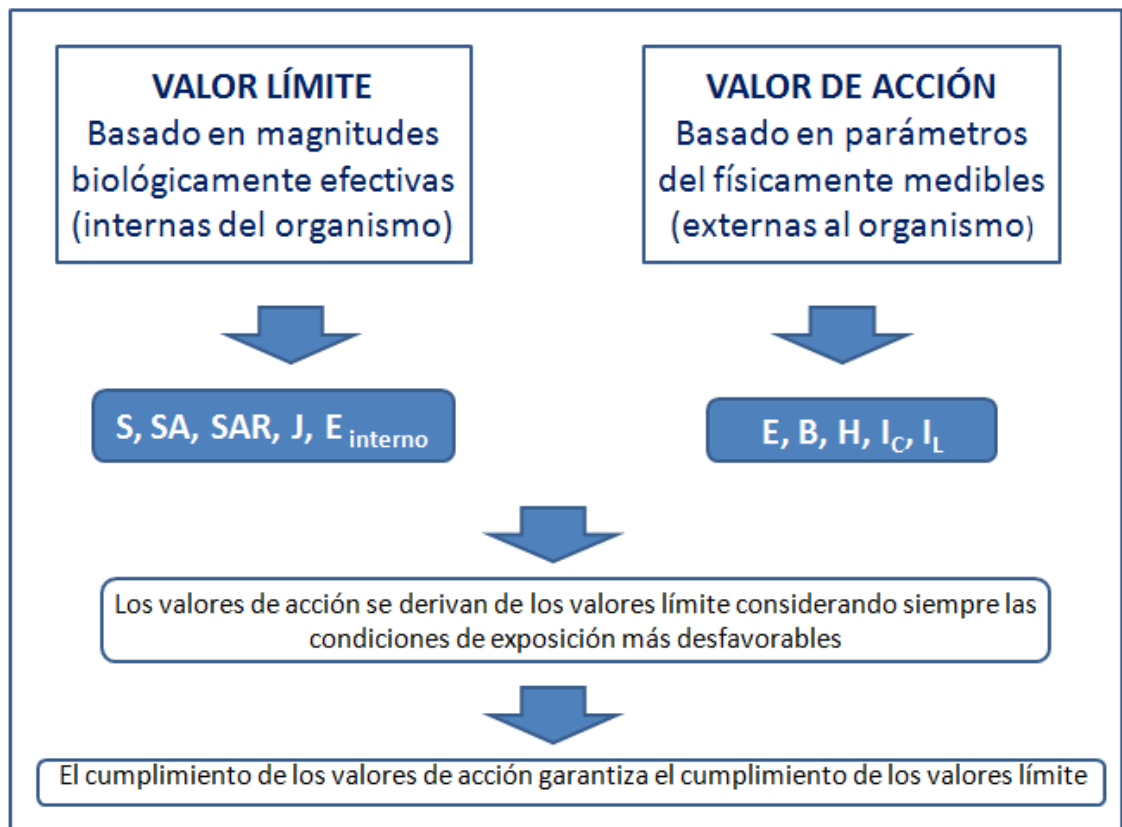


Figura F115: Definición de valores de acción y valores límite de exposición.

1.4.2. CRITERIOS PARA EFECTOS EN LA SALUD A LARGO PLAZO Y CAMPOS DÉBILES

Los organismos internacionales no han establecido hasta la fecha criterios de protección frente a efectos a largo plazo y campos débiles derivados de la exposición a campos electromagnéticos en el rango 0 Hz – 300 GHz (campos magnéticos estáticos, campos de frecuencia baja y extremadamente baja y radiación RF).

FUNDAMENTO Y OBJETIVOS

2. FUNDAMENTO Y OBJETIVOS

El conjunto de la evidencia acumulada hasta el presente confirma la existencia de efectos en la salud a corto plazo derivados de la exposición a campos electromagnéticos (inducción de corrientes y efectos térmicos por absorción de energía) pero no permite descartar la posibilidad de efectos nocivos estocásticos debidos a exposiciones repetidas o crónicas.

Los equipos de espectrometría por resonancia magnética nuclear utilizan campos electromagnéticos de radiofrecuencia y campos magnéticos estáticos de muy alta densidad, y se admite que los trabajadores especializados que operan con estos sistemas están expuestos cotidianamente a ese tipo de radiaciones no ionizantes (European Union. Non-binding guide to good practice for implementing Directive 2013/35/EU Electromagnetic Fields. Volume II: Case Studies. 2014). Sin embargo, en la actualidad no se dispone todavía de datos metrológicos precisos sobre los niveles reales de radioexposición ocupacional durante las diferentes tareas desarrolladas por el personal que opera con estos dispositivos.

El presente estudio pretende llevar a cabo una caracterización precisa y completa de la exposición a CME y a CEM RF recibida por los operarios de equipos de espectrometría por RMN. Los datos obtenidos permitirán refinar los procedimientos de medición de CEM, y servirán de orientación para diseñar eficazmente futuros estudios metrológicos, epidemiológicos y experimentales. Adicionalmente, ante la falta de estándares para la protección ante potenciales efectos nocivos de exposiciones crónicas y campos subumbral⁴, que no han sido descartados por la evidencia disponible, se desarrollan y proponen aquí criterios específicos para la valoración de la exposición considerando eventuales a efectos a largo plazo. Tales criterios pueden ser aplicables también a otros colectivos profesionales expuestos crónicamente a campos electromagnéticos.

⁴ En este documento denominaremos campos o niveles subumbral a aquellos cuya densidad, potencia o intensidad queda por debajo de los niveles o valores establecidos por la normativa internacional y nacional vigente para la protección ocupacional ante efectos nocivos o sensoriales inmediatos de campos electromagnéticos de alta densidad, potencia o intensidad

Bajo ese enfoque, el presente estudio se plantea los siguientes objetivos:

- ✓ Diseñar, aplicar y validar mediante contraste con otros datos disponibles, un procedimiento ad hoc para la caracterización de los niveles de exposición a CME y CEM RF.
- ✓ Aplicar el procedimiento diseñado a la caracterización de los niveles de exposición personal a CME y de CEM RF, mediante medición y registro de los parámetros físicos relevantes a los que se ven expuestos los operarios durante la ejecución de las diferentes tareas desarrolladas en el uso de diversos modelos de espectrómetros de RMN ubicados en centros españoles de investigación.
- ✓ Aplicar, asimismo, el procedimiento diseñado a la medición y registro in situ de parámetros de campo para la caracterización del ambiente electromagnético CME y CEM RF en laboratorios de espectrometría por RMN.
- ✓ Realizar un análisis comparativo, en términos de seguridad radiológica, de los datos metrológicos registrados de los niveles de exposición personal. Los datos obtenidos se compararán con los valores de referencia establecidos por los estándares internacionales y nacionales para la protección ocupacional ante efectos nocivos deterministas de radiaciones no ionizantes.
- ✓ Diseñar, aplicar y ensayar un procedimiento para la valoración de la seguridad radiológica ante exposición ocupacional crónica a niveles de campo subumbral, contemplando factores de prevención adicional ante potenciales efectos nocivos estocásticos susceptibles de expresarse a largo plazo.
- ✓ Proponer medidas técnicas y organizativas dirigidas a la prevención del riesgo mediante la minimización de la exposición.

MATERIAL Y MÉTODO

3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1. MATERIAL

Para la toma de mediciones instantáneas y de registros de CEM RF, tanto de valores ambientales en las salas de espectrometría, como de niveles de exposición personal en el puesto de control de los espectrómetros, se utilizó un monitor PMM8053 (EP-330 E-field probe, Narda Safety Test Solutions, Milan, Italy) con sonda triaxial de campo eléctrico (E) válida para determinaciones en el espectro 100 kHz - 3 GHz. Rango de medida: 0,01 V/m - 100 kV/m. Resolución: 0,01 – 100 V/m; 0,1 nT- 0,1 mT. Sensibilidad: 0,05-1 V/m; 10 nT-0,1 mT.

Figura FM1: equipo PMM8053, y sonda E-field probe para medición del componente eléctrico y cálculo del componente magnético de CEM RF



Las especificaciones técnicas del Monitor PMM 8053 (EP-330 E-field probe, Narda Safety Test Solutions) se detallan en la siguiente tabla:

Funciones	Mínimo, máximo y medio
Datos proporcionados	X, Y, Z en valores absolutos, porcentaje y total.
Valor medio	Aritmético, cuadrático, y espacial
Tiempo medio	Definible 30 s, 1, 2, 3, 6,10,15, 30 min o manual
Unidades	V/m, kV/m, $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, mW/cm^2 , W/m^2 , A/m, nT, μT , mT;
Rango de frecuencias	100 kHz - 3 GHz
Rango de medida	$0,01 \text{ V/m} \leq E \leq 100 \text{ kV/m}$
Resolución	0,01 – 100 V/m
Sensibilidad	0,05-1 V/m; 10 nT-0,1 mT

Tabla TM1: especificaciones técnicas del equipo PMM 8053 (EP-330 E-field probe, Narda empleado para la medición de CEM RF

Para la toma de mediciones instantáneas y de registros de campo magnético estático, tanto de valores ambientales en las salas de espectrometría, como de niveles de exposición personal en extremidades y cabeza / tórax de los espectrometristas durante la ejecución de sus tareas, se utilizó un magnetómetro efecto Hall modelo THM 1176 HF (Narda Safety Test Solutions; Pfullingen, Germany), con sonda triaxial y capacidad para medir en un rango de frecuencias desde 0 Hz a 1 kHz. El equipo mide, con una precisión del 1%, valores B de hasta 20 T, con una resolución máxima de 30 μT , empleando cuatro escalas: 100 mT, 500 mT, 3 T y 20 T, que pueden ser seleccionadas en modos manual y automático.



Figura FM2: equipo Hall THM de Narda sonda 1176 HF para medición de CME

Las especificaciones técnicas del equipo THM de Narda (con sonda 1176 HF Safety Test Solutions) se detallan en la siguiente tabla:

Escalas	100 mT, 500 mT, 3T, 20T			
Datos proporcionados	Bx, By, Bz			
Intervalo temporal	10 ms			
Unidades	T, mT, μ T, G, kG, MHz			
Ancho de banda	DC a 1 kHz			
Resolución	Escala 100 mT	Escala 500 mT	Escala 3T	Escala 20T
	300 μ T	500 μ T	3 mT	15 mT
	30 μ T	50 μ T	300 μ T	1,5 μ T
Precisión	\pm 1% de la lectura			

Tabla TM2: especificaciones técnicas del equipo THM con sonda 1176 HF de Narda empleado para la medición de CME

Las salas de espectrometría de RMN donde se efectuaron las mediciones y registro de valores ambientales en los laboratorios y los niveles de exposición personal a CEM RF y CME están localizadas en los siguientes Centros e Institutos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC):

- Centro de Investigación y Desarrollo (CID). Barcelona
- Instituto de Ciencias de Materiales de Barcelona (ICMAB). Barcelona
- Centro de Investigaciones Biológicas (CIB). Madrid
- Centro Nacional de Biotecnología (CNB). Madrid
- Centro de Química Orgánica Lora Tamayo (CENQUIOR). Madrid
- Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid (ICMM). Madrid
- Instituto Química-Física Rocasolano (IQFR). Madrid
- Instituto de Ciencias de Materiales de Sevilla (ICMS). Sevilla
- Instituto de Tecnología Química (ITQ). Valencia



Figura FM3: Localización geográfica de los Centros e Institutos del CSIC donde se ubican los equipos de RMN estudiados

La tabla TM3 presenta el listado de los modelos de espectrómetros de RMN estudiados, con los correspondientes valores de inducción magnética en el núcleo y el código de identificación asignado a cada uno de ellos en el presente documento:

Equipo	Campo núcleo (T)	Código
Bruker AC 200 MHz	4,7	1
Varian Oxford Inova 300 MHz	7,47	2
Bruker 300 MHz	7,47	3
Brüker Spectrospin300 MHz	7,47	4
Brüker Ultrashield 300 MHz	7,47	5
Brüker Ultrashield 300 MHz	7,47	6
Varian Oxford Inova 400 MHz	9,4	7
Varian Oxford 400 MHz	9,4	8
Varian Mercury Plus 400 MHz	9,4	9
Brüker400 MHz	9,4	10
Brüker Ascend 400R MHz	9,4	11
Varian INOVA Oxford 500 MHz	11,7	12
Bruker 500MHz Ultrashield	11,7	13
Brüker Ascend 500 MHz	11,7	14
Varian System 500 MHz	11,7	15
Brüker 600 MHz	14,1	16
Brüker 600 MHz Ultrashield Plus	14,1	17
Brüker Ascend 600 MHz	14,1	18
Brüker 800 MHz Ultrashield	18T	19

Tabla TM3: relación de equipos de trabajo de RMN estudiados con su correspondiente valor de campo magnético en el núcleo en tesla (T) y código asignado.

3.2 MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS.

La determinación del nivel de exposición ocupacional a campos electromagnéticos en los trabajadores que operan con espectrómetros de RMN se ha realizado mediante medición de los parámetros físicos relevantes de la radiación en las posiciones ocupadas por los operarios. De forma complementaria, para aquellos equipos de RMN en los que se disponía de información del fabricante relativa a los niveles de CME⁵ emitidos por las fuentes, se ha estimado, a partir de los datos contenidos en dicha información, el valor de campo en las posiciones ocupadas por los trabajadores.

3.2.1 PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL MEDIANTE MEDICIÓN

El procedimiento, diseñado ad hoc para este trabajo, tiene por objeto la medición sistematizada de los parámetros físicos más relevantes según la evidencia existente sobre los bioefectos de las RNI en los rangos CME y CEM RF. Para el diseño del procedimiento se han tenido en cuenta protocolos estandarizados preexistentes (ver por ejemplo el protocolo integrado en la orden para la Comprobación Técnica de Emisiones CTE/23/2002).

Como mejora a los procedimientos preexistentes, el protocolo de medición diseñado en el presente estudio toma en consideración, en su fase previa, aspectos relativos al puesto de trabajo y las tareas desempeñadas por el operario. Entre estos aspectos se incluye el análisis de la actividad laboral desarrollada por el trabajador expuesto (descripción de tareas específicas, ciclos de trabajo, etc.). En esta fase el protocolo también tiene en cuenta la posible existencia de casos de especial

⁵La documentación proporcionada por los fabricantes no incluye datos sobre niveles de CEM RF ambientales emitidos por sus equipos

sensibilidad (como trabajadores portadores de dispositivos médicos activos implantados y trabajadoras gestantes) y de hipersensibilidad electromagnética percibida (HSEMP) entre los trabajadores. La fase de medición consta de diferentes etapas, en cada una de las cuales se incluyen aspectos para la optimización de la programación y la realización de las mediciones. Finalmente, en la fase de análisis se comparan los datos numéricos proporcionados por las mediciones y registros con los valores de referencia de los estándares internacionales, basados en criterios vigentes de protección ante efectos nocivos inmediatos de exposiciones cortas a CEM y CME. En lo que se refiere a potenciales efectos por exposición ocupacional crónica a niveles subumbral de radiación, ante la actual carencia de evidencia científica adecuada que permita el establecimiento de los correspondientes estándares de protección, proponemos unos criterios específicos, basados en el principio de cautela, que son más conservadores que los citados valores de referencia para la protección ante efectos deterministas inmediatos.

1. *Fase previa:* determinación de las condiciones de exposición mediante observación directa de la actividad del trabajador y las características del lugar de trabajo (análisis de tareas, ciclos de trabajo, distribución de espacios, ubicación de los puestos de trabajo y fuentes de emisión, tipo de equipamiento, etc.)

1.1 Se programa la inspección para recopilar toda la información necesaria del entorno, con objeto de identificar las posiciones de máximo nivel de exposición y/o máxima permanencia, en los espacios ocupados o frecuentados habitualmente por los trabajadores, así como la ubicación de los puestos de trabajo. Asimismo, se recaba información sobre las características estructurales de la estancia, la distribución de espacios, incluyendo la distancia a paredes y techos, y la naturaleza absorbente o reflectante del material a las emisiones radioeléctricas.

1.2 Mediante la observación directa de las actividades y posiciones ocupadas por el trabajador durante la jornada laboral, se determinan y caracterizan los ciclos de trabajo y las tareas en las que existe o puede existir exposición a campos electromagnéticos. Eso permite categorizar las tareas en función de su duración y la distancia del trabajador a la fuente.

- 1.3 Se analizan las características físicas de las emisiones electromagnéticas de cada fuente, incluyendo la frecuencia o frecuencias de la radiación, así como cualquier otra característica de la señal (multifrecuencia, forma de la señal, emisión en pulsos o trenes, etc.).
- 1.4 Se determinan los parámetros físicos a medir en función de su interés de acuerdo con la evidencia sobre bioefectos inducidos por los campos en el rango de la frecuencia de la señal emitida por los equipos estudiados.
- 1.5 Para las distintas tareas y condiciones de exposición se determina el tiempo de ponderación de la medida, con objeto de programar la duración de la medición o registro. Para ello se adopta la cronología establecida en la dosimetría para evaluación del riesgo de efectos nocivos en función de las frecuencias de las emisiones,
- 1.6 Se tiene en cuenta, además, la evidencia disponible sobre la sensibilidad o vulnerabilidad específica de los tejidos o áreas anatómicas expuestas (tejido nervioso y muscular, cabeza, torso, etc.) a las frecuencias de la radiación emitida por los equipos.
- 1.7 Se define la situación de “campo cercano” o “campo lejano” para cada una de las posiciones de trabajo, en función de las frecuencias de emisión específicas de cada equipo (para una descripción más detallada de los criterios de campo cercano y campo lejano, ver Apéndice 5).
- 1.8 Se comprueba que el espectro de medición de la sonda abarca la frecuencia de emisión del equipo a estudiar, y que el umbral de detección del aparato son adecuados para cada caso.
- 1.9 En los casos en que resultó aconsejable, se utilizaron elementos adicionales para la medición, tales como trípodes o mástiles no conductores, que permiten alejar los equipos de medida del suelo, las paredes, el mobiliario presente o el cuerpo del operario del monitor, con objeto de evitar perturbaciones de los campos a medir, especialmente los CEM en el rango RF.
- 1.10 Se solicita información a los trabajadores sobre operarias gestantes, posibles casos de sujetos portadores de dispositivos médicos implantados

y/o especialmente sensibles a las radiaciones, así como sobre episodios de molestias o perturbaciones atribuibles a hipersensibilidad.

2. *Fase de medición: realización de las mediciones (distancias, tiempo de medición y parámetros físicos a partir de los cuales se determina la existencia de bioefectos y registro de resultados).*

- 2.1 Para cada una de las mediciones, se registran mediante telémetro óptico las distancias desde la posición ocupada por el trabajador (punto de medición) a la fuente emisora, así como a paredes y otros elementos presentes en la zona de interés.
- 2.2 Se registra el tiempo de permanencia en cada posición ocupada por el operario, con el fin de estimar el periodo medio de exposición del trabajador a la radiación.
- 2.3 En cada posición ocupada por el operario durante sus tareas, se miden los parámetros físicos de interés desde el punto de vista de los bioefectos de los CEM y CME en los rangos de frecuencia de las emisiones del equipo. De acuerdo con los criterios de “*campo lejano*” y “*campo cercano*”, se mide una o dos componentes del campo electromagnético, respectivamente.
- 2.4 La medición se efectúa a la altura del tronco del trabajador, salvo que existan zonas corporales de especial sensibilidad o de mayor proximidad a la fuente, en cuyo caso se toman mediciones adicionales de campo a nivel de dichas zonas anatómicas.
- 2.5 Cuando las condiciones de medición lo aconsejan, los equipos de medición se acoplan a su trípode no conductor, con objeto de evitar perturbaciones del capo a medir, sobre todo en el caso de señales RF.
- 2.6 Se anotan los valores registrados por los equipos de medida específicos para la frecuencia correspondiente.
- 2.7 Se considera la existencia de emisiones pulsantes o cualquier otra particularidad de la radiación que por sus especiales características necesite ser analizada de manera singular.

- 2.8 Se tiene en cuenta la posible presencia de trabajadores especialmente sensibles, como trabajadoras embarazadas, portadores de dispositivos médicos implantados o trabajadores con HSEMP.
3. *Fase de análisis de resultados: valoración del nivel de exposición mediante comparación con los estándares internacionales (valores de referencia) para la protección ante efectos nocivos o sensoriales inmediatos ante exposiciones breves y esporádicas, y con los criterios, más conservadores, propuestos aquí para una protección adicional ante potenciales efectos deletéreos por exposición crónica a niveles subumbral de campo*
- 3.1 Se comparan los resultados obtenidos de la medición con los valores de referencia establecidos en estándares internacionales para efectos a corto plazo. Para la protección frente potenciales efectos por exposición crónica, se aplica el criterio que hemos propuesto en la presente memoria.
- 3.2 Para regiones anatómicas o tejidos especialmente vulnerables a la radiación, se consideran los valores de referencia correspondientes establecidos en los estándares internacionales.
- 3.3 Para los casos de trabajadores especialmente sensibles se aplican los valores de referencia específicos.
- 3.4 En el caso de exposición señales de distintas frecuencias, se consideran los posibles efectos aditivos, y se aplican los criterios específicos a partir del sumatorio de los niveles de exposición correspondientes a cada una de las frecuencias de emisión para cada punto de medición.
- 3.5 Finalmente se propondrán las medidas preventivas correspondientes en función de los resultados. Estas medidas incluyen la adopción de soluciones técnicas para reducir la emisión como el uso de sistemas de apantallamiento o blindajes, medidas para la delimitación de acceso, como señales o marcas en el suelo, el diseño y disposición de lugares y puestos de trabajo.


1. Fase inicial  análisis de condiciones	<ul style="list-style-type: none"> - Descripción de actividad laboral (tareas posiciones ocupadas, tiempos,...) - Descripción de fuente de emisión, en particular frecuencia de radiación. - Determinación de Parámetros físicos relevantes según evidencia de bioefectos. - Determinación de tiempo de ponderación según cronología de dosimetría.
2. Fase de medición	<ul style="list-style-type: none"> - Medición de distancias de la posición del trabajador a la fuente. - Medición de tiempo de permanencia del operario. - Medición de parámetros físicos
3. Fase de análisis de resultados	<ul style="list-style-type: none"> - Comparación con estándares internacionales para efectos a corto plazo. - Comparación con criterios propuestos para efectos a largo plazo. - Propuesta de medidas preventivas.

Tabla TM4. Resumen de las fases que integran el procedimiento de medida propuesto y breve descripción de las principales actuaciones en cada una de ellas.

APLICACIÓN DEL PROTOCOLO DISEÑADO

3.3.1 Fase Previa

➤ Descripción de las Fuentes de Emisión

A partir de la descripción contenida en la sección introductoria de esta memoria, sobre la naturaleza de la técnica de espectrometría por RMN, se concluye que la radiación no ionizante generada por los espectrómetros corresponde a campos magnéticos estáticos y a campos electromagnéticos de radiofrecuencia.

En los espectrómetros de RMN de imanes superconductores, el CME está siempre presente incluso cuando el equipo no se encuentra en funcionamiento, mientras que los aparatos sólo emiten señal RF cuando se activan las bobinas para la exposición de las muestras a analizar. Por tanto, los trabajadores que operan con estos equipos de RMN están expuestos a CME durante todo el tiempo de permanencia en la sala del imán, mientras que solo están sometidos a radiación RF durante el intervalo correspondiente a la operación de irradiación y análisis de la muestra, durante el cual el operario permanece en el puesto de control del equipo (Figura FM4).

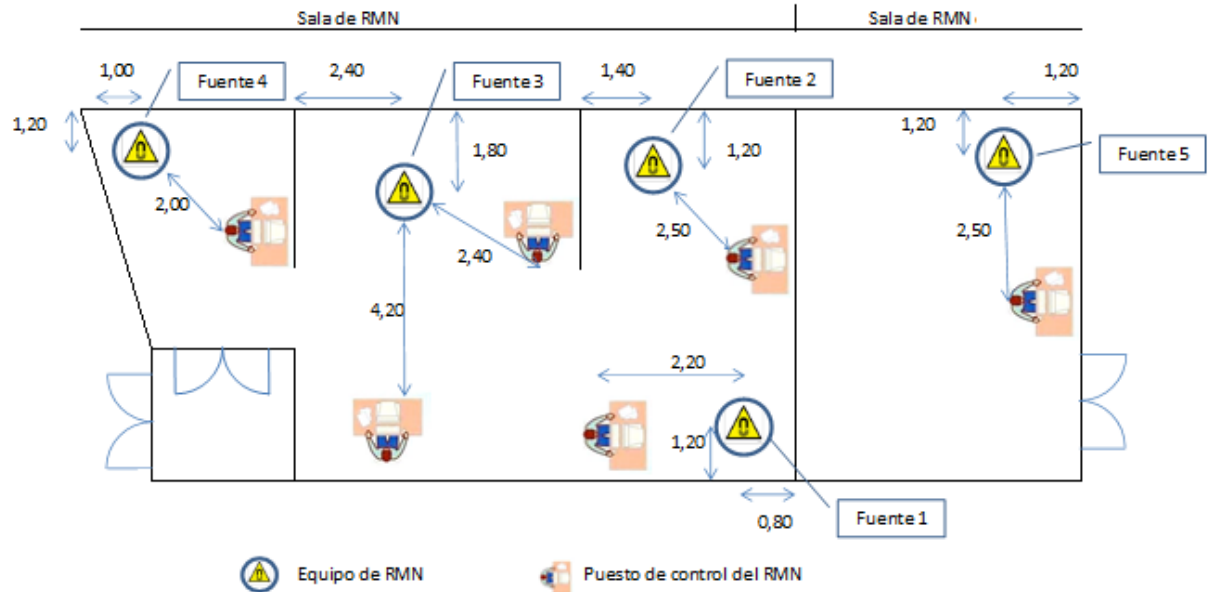


Figura FM4. Imagen representativa de un laboratorio de espectroscopia, correspondiente a una de las unidades de RMN estudiadas (Imagen elaborada por J.J Quirós)

La máxima frecuencia de la radiación RF emitida por los equipos de RMN, corresponde a la frecuencia de resonancia del átomo de hidrógeno cuando es sometido al campo magnético estático del núcleo del espectrómetro, cuya densidad de flujo magnético es específica de cada modelo.

La tabla TM5 presenta un listado de las frecuencias máximas correspondientes a los equipos estudiados identificados por códigos según tabla TM3.

Código del equipo	Frecuencia máxima
1	200 MHz
2, 3, 4, 5, 6	300 MHz
7, 8, 9, 10,11	400 MHz
12, 13, 14, 15	500 MHz
16, 17, 18	600 MHz
19	800 MHz

Tabla TM5: frecuencia máxima correspondiente a los equipos estudiados, identificados por el código asignado en la tabla TM3.

Todos los equipos estudiados son de tipo comercial y con marcado CE, lo que implica que el fabricante garantiza el cumplimiento de las normas armonizadas de seguridad del producto.

➤ *Descripción de la actividad laboral*

Aproximadamente 45 trabajadores desarrollan su actividad laboral de forma permanente en las distintas unidades de espectrometría de los Centros e Institutos mencionados, si bien sólo 19 voluntarios (uno por cada equipo estudiado) colaboraron en la toma de las mediciones de campo, a nivel de distintas regiones anatómicas, durante la ejecución de las diferentes tareas de manipulación de los espectrómetros.

Estos trabajadores permanecen toda la jornada laboral (aproximadamente 8 horas diarias) en el interior de las unidades de espectrometría. Las tareas que desarrollan incluyen:

- ✓ *Preparación de muestras.* Las muestras pueden ser sólidas, semisólidas o líquidas. Dependiendo de las características de las unidades de RMN, esta tarea se desempeña en la misma dependencia en la que se ubica el equipo de RMN o en otra separada dispuesta al efecto. En los centros estudiados la tarea se desarrolla en una sala independiente, por lo que se asume que asumir que los trabajadores no están expuestos a niveles significativos CME y CEM RF durante la preparación de las muestras.
- ✓ *Colocación de muestras:* Durante el proceso de colocación de muestras, cuya duración es inferior a 2 minutos, el operario se aproxima al equipo de RMN para introducir la muestra por su parte superior (Figura FM5 A y B), proceso que se repite de forma secuencial en función del número de muestras cuya composición se quiere determinar. . En función de la instalación y de las alturas del equipo y del operario, será preciso la utilización de escaleras manuales para acceder a la zona de entrada de las muestras (Figura FM5 A y B).
- ✓ *Ajuste manual de parámetros.* Para obtener una resolución óptima, los espectrómetros de RMN ajustan la homogeneidad del campo magnético. Aunque en algunos equipos este ajuste se realiza automáticamente desde el puesto de control, en otros se realiza manualmente por parte de los operarios. Por ello, dependiendo de las características del equipo y del tipo de muestra a analizar, el proceso puede requerir que el operador acceda al extremo inferior

del aparato para realizar la operación de ajuste manual de parámetros (Figura M6 A y B). Dependiendo de las preferencias del operario esta operación se realiza tumbado sobre el suelo, sentado o en cuclillas, pero siempre en proximidad de la fuente y tiene una duración aproximada de 2 minutos..

- ✓ *Recarga de nitrógeno y helio.* Estos equipos disponen de una cámara de helio para conseguir las bajas temperaturas a las que se desarrollan los fenómenos de superconductividad. Para mantener el helio refrigerado, los equipos disponen además de una cámara de nitrógeno líquido que rodea a la de helio. La recarga de gases consiste en la colocación de una sonda de transferencia para el trasvase del líquido criogénico por la parte superior del equipo, y en la sujeción de la misma hasta que se vuelve rígida por efecto del paso del líquido criogénico, con una periodicidad semanal o mensual para el nitrógeno y el helio, respectivamente. Dependiendo de la necesidad de recarga el proceso puede durar varias horas.
- ✓ *Análisis y control informático del proceso.* Durante el proceso de análisis, los trabajadores permanecen en el puesto de control del equipo de RMN (Figura FM7), donde se encuentra el computador, ubicado generalmente a una distancia de entre 2 y 2,5 metros del equipo. Dependiendo del servicio de RMN, se estima que se analizan de 20 a 50 muestras a la semana, cada una con una duración de entre 5 minutos y una hora dependiendo del tipo de muestra a analizar.

En la tabla TM6 de resumen las tareas desarrolladas con el equipo de RMN, así como la posición ocupada por el trabajador y el tiempo de duración de cada operación.

Tareas	Posición	Tiempo	Frecuencia
Preparación de la muestra	Sala adyacente	5 minutos/muestra	20-50/ semana
Introducción de la muestra	Parte superior del equipo	~2 minutos/muestra	20-50/ semana
Ajuste de parámetros	Parte inferior del equipo	~ 2 minutos	1/día
Recarga de gases criogénicos	Parte superior del equipo	~ 2 minutos	N ₂ semanal He mensual
Análisis y control informático	Puesto de control	Entre 5 y 60 min/muestra	20-50/ semana

Tabla TM6: Actividades desarrolladas con el equipo de RMN en la sala del imán, posición ocupada por el trabajador, tiempo de duración y frecuencia de la operación.

En las figuras FM5, FM6 y FM7 se muestra las posiciones del operario durante el desarrollo de algunas de las tareas desempeñadas con los equipos de RMN:

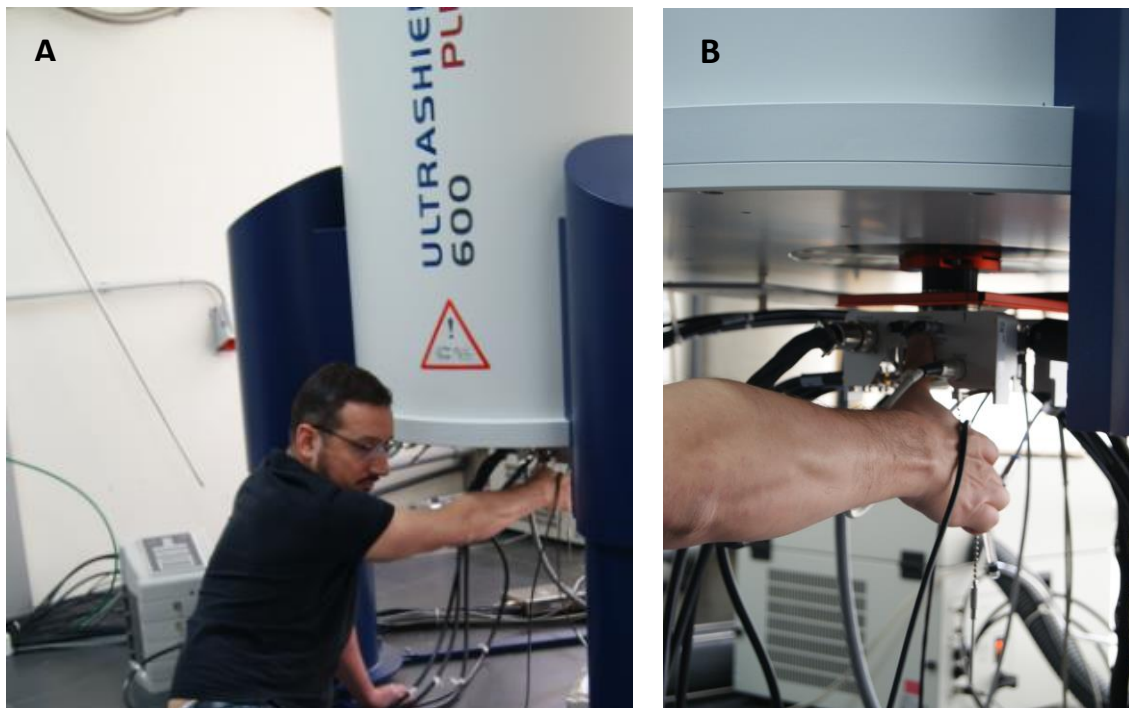


Figura FM5. (A) Imagen de la operación de ajuste de parámetros por la parte inferior del equipo con el trabajador en postura sedente. (B) Detalle de la tarea de ajuste de parámetros.

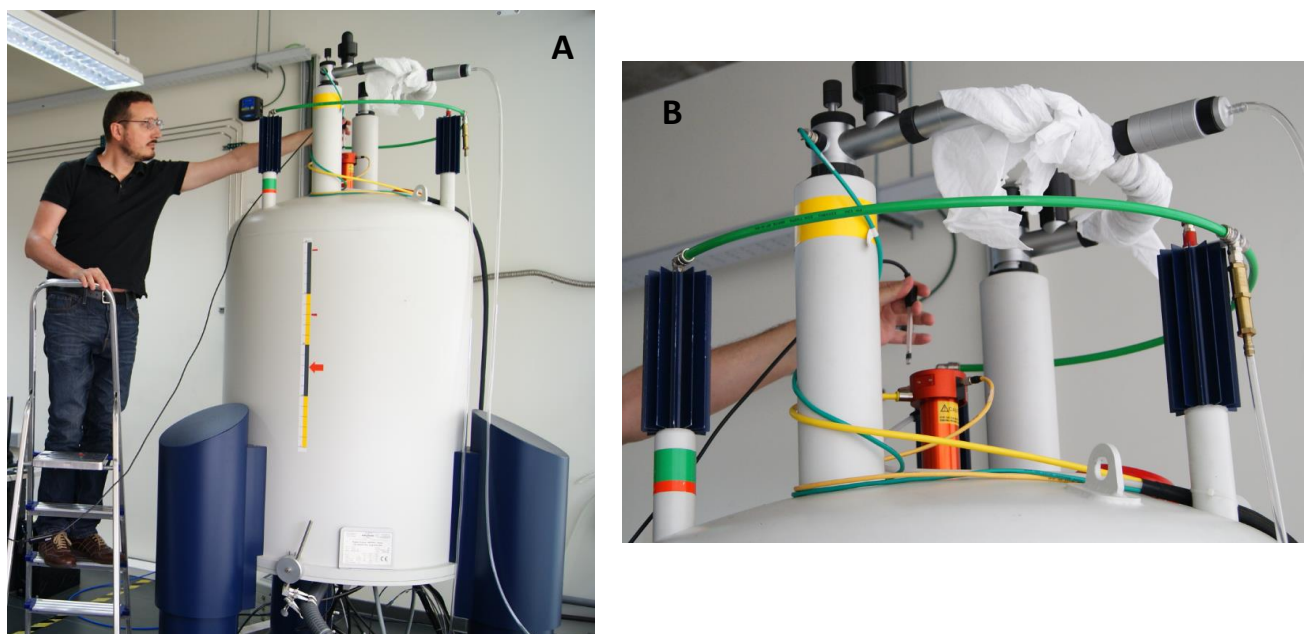


Figura FM6. (A) Imagen de la operación de introducción de la muestra por la parte superior. (B) Detalle de la tarea de introducción de la muestra



Figura FM7. Imagen de la operación de análisis de la muestra desde el puesto de control

3.2.1.2. Fase de Medición

➤ *Mediciones de campo electromagnético de radiofrecuencia*

La tabla TM7 resume los parámetros considerados en las mediciones de CEM RF utilizando el monitor PMM8053. Durante intervalos de 6 minutos se tomaron registros de valores instantáneos de campo eléctrico, en V/m, cada 5 segundos, a distancias de 0, 40 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm y 200 cm de la cubierta de los equipos, así como en la consola donde se sitúa el operario durante la generación de pulsos de RF. Los datos se ponderaron a 6 minutos. Todos los registros se tomaron durante el periodo de emisión de pulsos RF, cuya duración depende del tiempo empleado para el análisis de la muestra. En todos los casos el monitor estaba montado sobre trípode de material no conductor (Figura FM8), lo que prevenía la perturbación de la señal por la presencia de cuerpos cercanos, y quedando el elemento sensor de la sonda situado a una altura de 150 cm sobre el suelo. Según se ha descrito más arriba, no se tomaron valores de exposición personal a RF durante la realización de las tareas en proximidad

a los dispositivos de RMN, ya que la irradiación de las muestras con señal RF solo tiene lugar cuando el operario se encuentra en el puesto de control ubicado generalmente a una distancia superior a 2 metros de la fuente.



Figura FM8: Toma de valores ambientales de CEM RF, utilizando un monitor PMM8053 montado sobre un trípode de materiales no conductores (madera y teflón)

Frecuencia	RF
Equipo empleado	PMM8053+EP-330 E-field probe
Parámetros físicos (unidad)	Intensidad de campo eléctrico: E (V/m)
Intervalo registro instantáneo	5 segundos
Tiempo de registro	2 minutos
Tiempo de ponderación	6 minutos
Valoración de la exposición	Media $\pm \sigma_{n-1}$
Dosimetría personal	No
Región anatómica	No
Dosimetría ambiental	Proximidades. 150 cm del suelo

TablaTM7: Parámetros considerados para las mediciones de CEM RF

➤ *Mediciones de campo magnético estático*

La tabla TM8 resume los parámetros considerados en las mediciones de CME utilizando un magnetómetro efecto Hall modelo THM 1176 HF. Se tomaron valores de densidad de flujo magnético (B) en las posiciones ocupadas por el operario en cada una de las operaciones realizadas con el equipo de RMN: introducción de la muestra, ajuste de parámetros y análisis desde el puesto de control. No se consideró de interés tomar datos de exposición correspondientes a la operación de recarga de nitrógeno, ya que esta se realiza en la misma posición que la maniobra de introducción de la muestra. Las tareas de preparación de la muestra se realizaban siempre en una estancia anexa a la sala de espectrometría. Los datos piloto tomados en varias de esas salas confirmaron la predicción de que durante la preparación de las muestras, los niveles de exposición a CME no diferían de los niveles basales de campo geomagnético ($B < 50 \mu\text{T}$)

Los periodos e intervalos de medición se establecieron en función de las características y duración de cada una de las tareas realizadas por el operario. Para las tareas de ajuste de parámetros e introducción de la muestra, que se realizan en las inmediaciones de los equipos durante periodos de entre 30 y 120 segundos, se pidió al trabajador que se mantuviese en la posición correspondiente durante intervalos de 2 minutos, con la sonda del magnetómetro colocada al nivel de la mano o del tórax, según se deseara valorar la exposición en las extremidades o a nivel cefálico-truncal, respectivamente.

El puesto de control es la zona más habitualmente ocupada por el operario en la sala del imán. En este puesto se tomaron valores de campo B durante dos minutos, con la sonda del magnetómetro colocada al nivel del tórax del operario en posición sentado. No se consideró de interés medir específicamente en las extremidades debido a que éstas no se encontraban más próximas al equipo de RMN que el torso.

En estos registros de exposición corporal el magnetómetro fue programado para tomar valores instantáneos de densidad de flujo magnético cada 5 segundos a lo

largo de los 2 minutos de registro. La exposición de cada trabajador durante cada una de las distintas tareas realizadas fue valorada a partir del cálculo de la media y la desviación estándar de los datos instantáneos obtenidos en cada registro individual.

Adicionalmente, con el fin de estimar los niveles de campo estático ambiental en las cercanías de los espectrómetros, se seleccionaron equipos y espacios representativos y, con la sonda del magnetómetro a una altura de 150 cm sobre el suelo, se tomaron valores instantáneos de densidad de flujo de CME cada 5 segundos durante un tiempo de registro de 2 minutos a en un radio de 0 – 200 cm de la cubierta de los equipos, en intervalos de 40 cm.

En estas mediciones de campo magnético estático no se hizo uso de trípodes aislantes, ya que el CME no se ve perturbado por la presencia de objetos o personas en las proximidades.

Campo	Estático (DC)
Equipo empleado	THM 1176 HF
Parámetros físicos (unidad)	Densidad de flujo magnético B (T)
Intervalo registro instantáneo	5 segundos
Tiempo de registro	2 minutos
Tiempo de ponderación	instantáneo
Valoración de la exposición	Media $\pm \sigma_{n-1}$
Dosimetría personal	Posición del operario
Región anatómica	Tronco y extremidades
Dosimetría ambiental	Proximidades. 150 cm sobre el suelo

Tabla TM8: Parámetros considerados para las mediciones de CME

3.2.1.3 Fase de análisis de resultados

En la fase de análisis se comparan los resultados obtenidos de las mediciones con los criterios de valoración correspondientes, en función de la consideración de bioefectos a corto o largo plazo.

➤ *Criterios de valoración para efectos a corto plazo*

El diagrama de flujo de la Figura FM9 resume los criterios de valoración de riesgo de efectos nocivos a corto plazo, mediante comparación entre los datos de exposición obtenidos en las mediciones y los niveles de acción y/o los valores límite establecidos por los estándares vigentes.

Para efectos a corto plazo, la valoración de los resultados se realiza mediante comparación con los valores de referencia de estándares internacionales en términos de niveles de acción y/o valores límite. Así, cuando los parámetros de campo registrados indican que la exposición no supera los valores de acción, basados en magnitudes físicas, se considera que se cumplen los valores límite de exposición y, en consecuencia, no existe riesgo de efectos nocivos inmediatos derivados de dicha exposición, en el caso de que esta sea esporádica y de corta duración.

Si los valores medidos indican que la exposición puede superar los niveles de acción, se hace necesario comprobar si el nivel de exposición supera también los valores límite de exposición correspondientes. Dadas las dificultades de cotejar correctamente los datos obtenidos de mediciones in situ con unos valores límite basados en magnitudes y parámetros biológicos y anatómicos de los distintos tejidos y órganos humanos, como son la inducción de corrientes o la tasa de absorción específica, los estándares consideran preferible implantar estrategias preventivas y de minimización, encaminadas a lograr que nuevas mediciones permitan confirmar que se ha conseguido que los niveles de exposición queden ya por debajo de los valores de acción. Si aun así los datos revelan que la exposición supera los valores límite, se entiende que existe riesgo de efectos nocivos inmediatos.

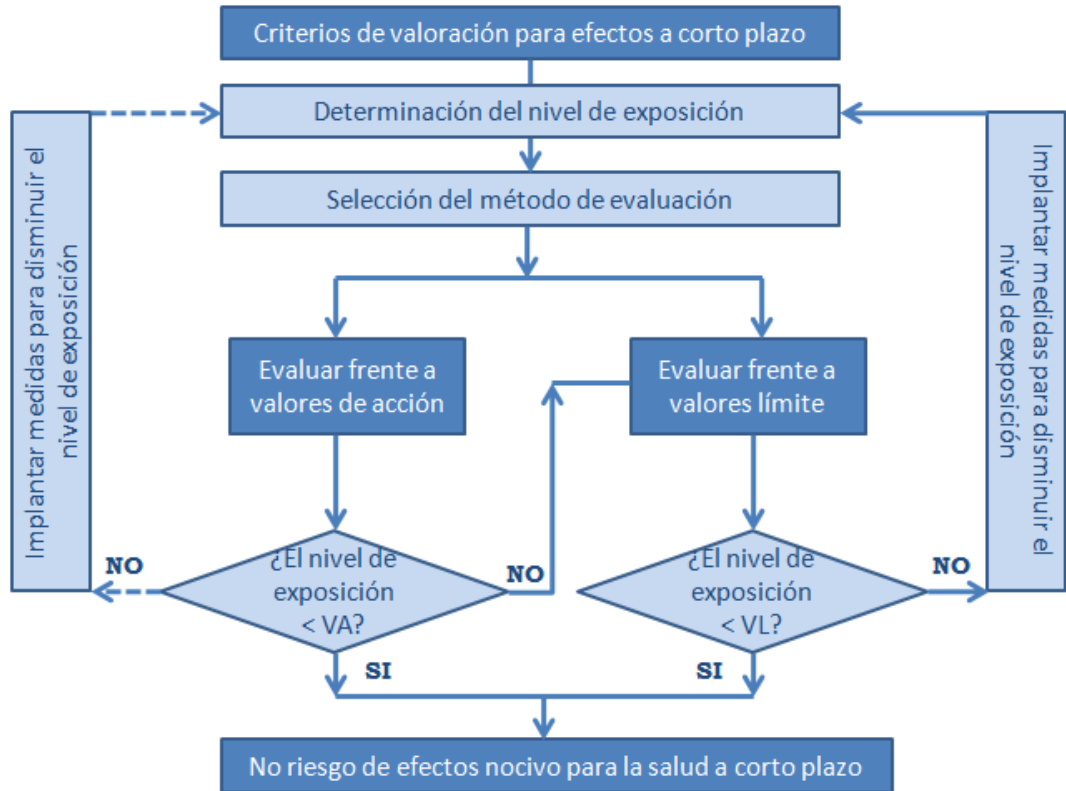


Figura FM9: criterios de valoración de la exposición a CEM y CME frente a efectos a corto plazo

- *Criterios de valoración para efectos de exposición crónica a niveles subumbral de campo electromagnético de radiofrecuencia*

En ausencia de estándares de protección ante efectos estocásticos de exposiciones subumbral crónicas a CEM RF, hemos elaborado un criterio más restrictivo que el aplicado a la protección ante efectos deterministas inmediatos. Así, se propone el establecimiento de un “valor basal” para determinar si existe un nivel de exposición significativo, que es necesario evaluar. Y, mientras no existan indicios en contra, se asume que aquellos niveles de campo que no rebasen este “valor basal” no serán nocivos en el caso de exposición ocupacional crónica. En la orden CTE/23/2002 el “valor basal” propuesto equivale al 1% de los valores de referencia para campo eléctrico (E) y magnético (H) a la frecuencia RF correspondiente, establecidos por los estándares vigentes para la protección de público general. Nosotros extrapolaremos este criterio para la protección radiológica ocupacional.

Proponemos, también, que un nivel de exposición correspondiente al 50% de los valores de referencia para campo eléctrico (E) y magnético (H) de la señal RF correspondiente, establecidos por los citados estándares, justificaría la adopción de medidas preventivas específicas (programa de mediciones periódicas). Finalmente, también proponemos como criterio adicional el valor de referencia para los estándares de protección para el público general, correspondiente aproximadamente al 10% de los valores de referencia para protección ocupacional en el rango de frecuencias correspondiente a los equipos de RMN estudiados (de 200 a 800 MHz), para la implantación de medidas de protección específicas (formación, información y vigilancia de la salud).

Estos criterios de valoración conducen al establecimiento de una clasificación del nivel de exposición RF asociada a la potencial conveniencia de adoptar unas medidas preventivas concretas en función de los datos obtenidos, que se resumen en la tabla TM9.

Valoración del riesgo a partir de los datos de RF	Medidas preventivas
Exposición < 1% Vref	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No adopción de medidas adicionales.
1% < Exposición < 10% Vref	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buenas prácticas de trabajo de la técnica al uso.
10% < Exposición < 50% Vref	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buenas prácticas de trabajo de la técnica al uso ▪ Formación / Información / Vigilancia de la salud
50% < Exposición < 100% Vref	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buenas prácticas de trabajo de la técnica al uso ▪ Formación / Información/ Vigilancia de la salud ▪ Programa periódico de mediciones para controlar el nivel de exposición
100% Vref < Exposición	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buenas prácticas de trabajo de la técnica al uso ▪ Formación / Información/ Vigilancia de la salud ▪ Medidas de control organizativas y/o técnicas y volver a evaluar comparando

Tabla TM9: Criterios de valoración para exposiciones crónicas a RF y medidas preventivas propuestas a partir de la comparación de los resultados de las mediciones de RF con los porcentajes de los valores de referencia (Vref) establecidos en los estándares para protección ocupacional ante efectos térmicos nocivos CEM RF

- *Criterios de valoración para potenciales efectos de la exposición ocupacional crónica a niveles subumbral de campo magnético estático.*

En línea con los criterios propuestos arriba, para la valoración de potenciales efectos de la exposición crónica a CEM RF proponemos como valor “basal” para exposición a CME el equivalente a la densidad media del campo geomagnético ($50 \mu\text{T} = 0,05 \text{ mT}$). De forma complementaria proponemos rangos intermedios a partir de los porcentajes de los valores de referencia para público (40 mT) y los criterios en términos de valores promediados a 8 horas de jornada laboral (200 mT) establecidos en los estándares internacionales para protección ante efectos nocivos inmediatos de CME (ICNIRP 1998). A cada uno de los intervalos se asocia la implantación de unas medidas preventivas concretas. La tabla TM10 resume estos criterios para la protección ante exposiciones crónicas:

Valoración del riesgo a partir de los datos de CME	Medidas preventivas
Exposición $<50 \mu\text{T}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No adopción de medidas adicionales.
$50 \mu\text{T} < \text{Exposición} < 40 \text{ mT}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buenas prácticas de trabajo de la técnica al uso.
$40 \text{ mT} < \text{Exposición} < 200 \text{ mT}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buenas prácticas de trabajo de la técnica al uso ▪ Formación / Información / Vigilancia de la salud
$200 \text{ mT} < \text{Exposición} < 2\text{T}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buenas prácticas de trabajo de la técnica al uso ▪ Formación / Información/ Vigilancia de la salud ▪ Programa periódico de mediciones para controlar el nivel de exposición
$2\text{T} < \text{Exposición}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buenas prácticas de trabajo de la técnica al uso ▪ Formación / Información/ Vigilancia de la salud ▪ Medidas de control organizativas y/o técnicas y volver a evaluar comparando

Tabla TM10: Criterios de valoración y medidas preventivas propuestas para la protección ante exposiciones crónicas a campo magnético estático.

➤ *Criterios de valoración para trabajadores especialmente sensibles.*

En los estándares de protección ocupacional ante la exposición a campos electromagnéticos, reciben la consideración de trabajadores especialmente sensibles los portadores de dispositivos médicos implantados, tales como marcapasos o implantes cocleares. Esto es debido a las posibles interferencias que el campo electromagnético puede producir en el funcionamiento de este tipo de dispositivos. Dado que la protección para estos trabajadores implantados se basa en propiedades de compatibilidad electromagnética y no está vinculado a efectos en la salud a corto y largo plazo, no se considera oportuno establecer aquí unos criterios de valoración diferentes. Por tanto, en consonancia con lo establecido por los estándares, consideramos aquí que es necesario garantizar que los niveles de exposición a CME de la región anatómica que alberga el implante no superen en ningún caso el valor umbral de $B = 0,5 \text{ mT}$, de seguridad para compatibilidad electromagnética⁶.

Por otro lado, aunque la actualmente escasa evidencia experimental y epidemiológica en la materia no es considerada demostrativa de riesgos para la fecundidad o en el desarrollo embrionario o perinatal humano por exposición a CME, consideramos adecuada la aplicación del “*principio de cautela*” para trabajadoras gestantes expuestas a densidades de campo elevadas. Máxime cuando es obvio que al embrión, dada su alta vulnerabilidad a agentes químicos y físicos, no le son aplicables los mismos criterios y niveles de protección que los establecidos para trabajadores. En consecuencia, destacamos aquí la necesidad de garantizar, durante la gestación, la exposiciones a CME del embrión y de su madre no superen en ningún caso el valor umbral de $B = 40 \text{ mT}$, de seguridad para el público general (Recomendación del Consejo Europeo 1999/519/CE).

⁶ Los estándares no contemplan límites de exposición a señales en el rango RF para compatibilidad electromagnética con el funcionamiento de implantes activos. Tampoco el presente trabajo propone niveles límite específicos para esa condición, aunque sí aboga por la aplicación de estrategias generales de vigilancia y minimización ALARA y ALATA de la exposición ocupacional a RF.

3.2.2 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN MEDIANTE DATOS DEL FABRICANTE

La información proporcionada por el fabricante sobre los niveles de emisión de las fuentes a diferentes distancias, permite realizar una estimación del nivel de exposición a campo magnético estático en las posiciones ocupadas por el operario dentro de la sala de espectrometría. Tal información se proporciona en forma de isolíneas de campo magnético, o de tablas con los valores numéricos de inducción magnética a distintas distancias de la fuente, en términos de distancia radial y distancia axial.

La metodología de estimación de la exposición propuesta aquí, por analogía con la metodología desarrollada para la medición de los parámetros físicos, consta de tres fases: fase previa, de estimación de la exposición y de análisis de resultados.

1. *Fase previa:* determinación de las condiciones de exposición mediante el análisis de las tareas desempeñadas en la sala del equipo de RMN, por observación directa de la actividad del trabajador.

1.1 Se solicita la curva de campos o tablas de emisión proporcionada por el fabricante. En caso de que la información se proporcione en forma de tabla a distintas distancias de la fuente, se elaboran las isolíneas de CME para determinar mediante extrapolación los valores de B en cada punto del espacio.

1.2 Se procede a caracterizar la actividad laboral del operario en la que existe exposición a campos electromagnéticos, mediante la observación directa de las posiciones ocupadas por el trabajador durante la jornada laboral.

1.3 Se miden o calculan las distancias entre la fuente de CME y el tórax del operario en las posiciones ocupadas por este durante la ejecución de sus diferentes tareas. En aquellas tareas en las que algunas regiones anatómicas (cráneo, ojos, etc.) potencialmente vulnerables a la radiación, que se sitúan más próximas a la fuente de campo que el tórax, se

considera además las posiciones ocupadas por estas regiones. Las mediciones de distancia se realizan tomando la distancia radial (paralela a la línea del horizonte) y la axial (altura con respecto al suelo).

- 1.4 Se calcula el tiempo que permanece el operario en cada una de las posiciones registradas.
- 1.5 Se investiga la posible presencia de trabajadores especialmente sensibles.

2. *Fase de estimación:* a partir de la información proporcionada por el fabricante, se estima la exposición a CME en las posiciones ocupadas por el operario.

- 2.1 En función de las distancias calculadas, que separan la fuente del tórax u otras regiones anatómicas de interés, se obtiene el valor B de densidad de flujo magnético representando en la isolínea de campo, en cada una de las posiciones ocupadas por el operario.
- 2.2 En los casos en que los datos proporcionados por el fabricante no especifican el valor de campo electromagnético en las coordenadas de la posición ocupada en una tarea determinada, se extrapola los valores tomando como referencia la isolínea de campo B más próxima.

3. *Fase de análisis de resultados:* se compara los resultados obtenidos mediante estimación con los valores propuestos aquí para la protección ante efectos deterministas o estocásticos.

RESULTADOS

4. RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN MEDIANTE MEDICIÓN

4.1.1. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN A RF

Todos los registros de señal RF tomados a diferentes distancias de los distintos equipos presentes en las salas de espectrometría proporcionaron valores inferiores a 0,01 V/m, es decir, por debajo del umbral de detección del monitor PMM8053 de campo eléctrico RF empleado en los registros. Estos datos revelan ausencia de niveles perceptibles de emisiones de CEM RF al exterior de los equipos durante los ciclos de irradiación de las muestras.

4.1.2. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN A CME

Se resumen en este punto los resultados de las mediciones de exposición a CME en la zona de cabeza-tórax y de extremidades, durante el desempeño de las tareas de introducción de la muestra y ajuste manual de parámetros, que resultaron ser las que comportaban una mayor exposición a CME.

4.1.2.1 Exposición en la mano durante la introducción de la muestra

La tabla TR1 resume los datos de CME registrados a nivel de la mano actuante durante la operación de introducción de la muestra (Fig FM6). Para la realización de esta operación el trabajador tiene que acceder a la parte superior del equipo, y dependiendo del tamaño de la fuente, emplear una escalera de mano. La postura de la extremidad actuante es en todos los casos la misma, con el brazo extendido y con la mano en las inmediaciones de la zona central de la parte superior del espectrómetro. En los equipos 9 y 12 no se tomaron mediciones de campo al nivel de la mano, dado

que en ambos aparatos la introducción de las muestras se realiza mediante brazo robotizado.

$B_{\text{núcleo}}$ (T) y tipo (\mathcal{E} /UA)	Modelo (Código)	Muestra, mano $B_{\text{med}} \pm \sigma_{n-1}$ (mT)
4,7 \mathcal{E}	Brüker AC 200 MHz (1)	4,05 ± 0,07
	Varian Innova 300 MHz (2)	15,10 ± 0,20
7,47 \mathcal{E}	Brüker 300 MHz (3)	21,75 ± 0,06
	Brüker Spectrospin 300 MHz (4)	19,60 ± 0,40
7,47 UA	Brüker 300 MHz US (5)	0,64 ± 0,07
	Brüker 300 MHz US (6)	0,41 ± 0,03
9,4 \mathcal{E}	Varian Innova 400 MHz (7)	24,80 ± 0,30
	Varian Oxford 400 Hz (8)	29,40 ± 0,80
	Varian Oxford Plus 400 MHz (9)	(R)
	Brüker 400 MHz (10)	19,50 ± 0,30
9,4 UA	Brüker Ascend 400R MHz (11)	0,40 ± 0,50
11,7 \mathcal{E}	Varian Oxford AS 500 MHz (12)	(R)
11,7 UA	Brüker 500 MHz US (13)	0,54 ± 0,03
	Brüker Ascend 500 MHz (14)	2,70 ± 0,10
	Varian System 500 MHz (15)	1,79 ± 0,05
14,1 \mathcal{E}	Brüker 600 MHz (16)	39,30 ± 0,20
14,1 UA	Brüker 600 MHz Plus US (17)	1,34 ± 0,09
	Brüker Ascend 600 MHz (18)	2,01 ± 0,06
18,1 UA	Brüker 800 MHz US (19)	7,66 ± 0,04

Tabla TR1: relación de equipos de RMN (modelo, frecuencia máxima de operación en MHz, y código asignado) cuyas emisiones se han medido, con el correspondiente valor de CME en el núcleo ($B_{\text{núcleo}}$. Tesla) y tipo de apantallamiento (Estandar (\mathcal{E}) o Ultraapantallado (UA)). Muestra mano: B media $\pm \sigma_{n-1}$ de inducción magnética en la mano, durante la operación de introducción de la muestra. (R): equipos en los que la introducción de la muestra se realiza mediante brazo robotizado.

A partir de los datos contenidos en la tabla, se muestra en los gráficos de las Figuras FR1 y FR2 los valores B máximos de la exposición a nivel de la extremidad actuante del trabajador durante la operación de colocación de la muestra en los espectrómetros con apantallamiento estándar (FR1) y en los equipos ultraapantallados (FR2). Los valores de exposición B (mT), se muestran frente a los valores de campo B (T) del núcleo magnético de los correspondientes equipos, identificados por los códigos asignados en la Tabla TR1. Los equipos 9 y 12 no están representados en la

gráfica FR1, dado que la introducción de las muestras se realiza en ambos casos mediante brazo robotizado.

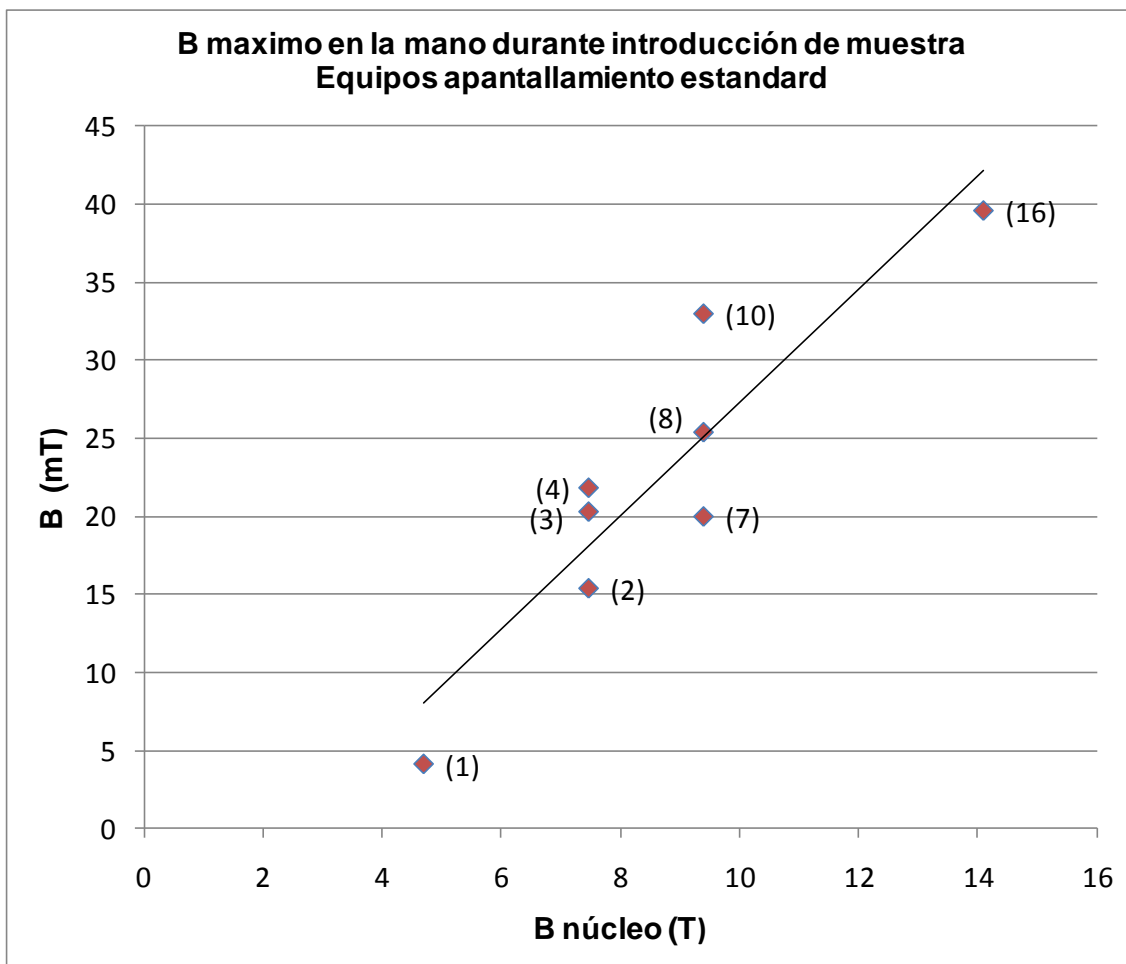


Figura FR1: Valor máximo de inducción magnética (B , mT) recibida a nivel de la extremidad actuante durante la operación de introducción de la muestra en los correspondientes equipos de RMN con apantallamiento estándar, identificados por su código respectivo según tabla TR1, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo magnético. Ecuación de la recta de ajuste: $y=3,6274x - 9,0112$ ($r^2= 0,8317$).

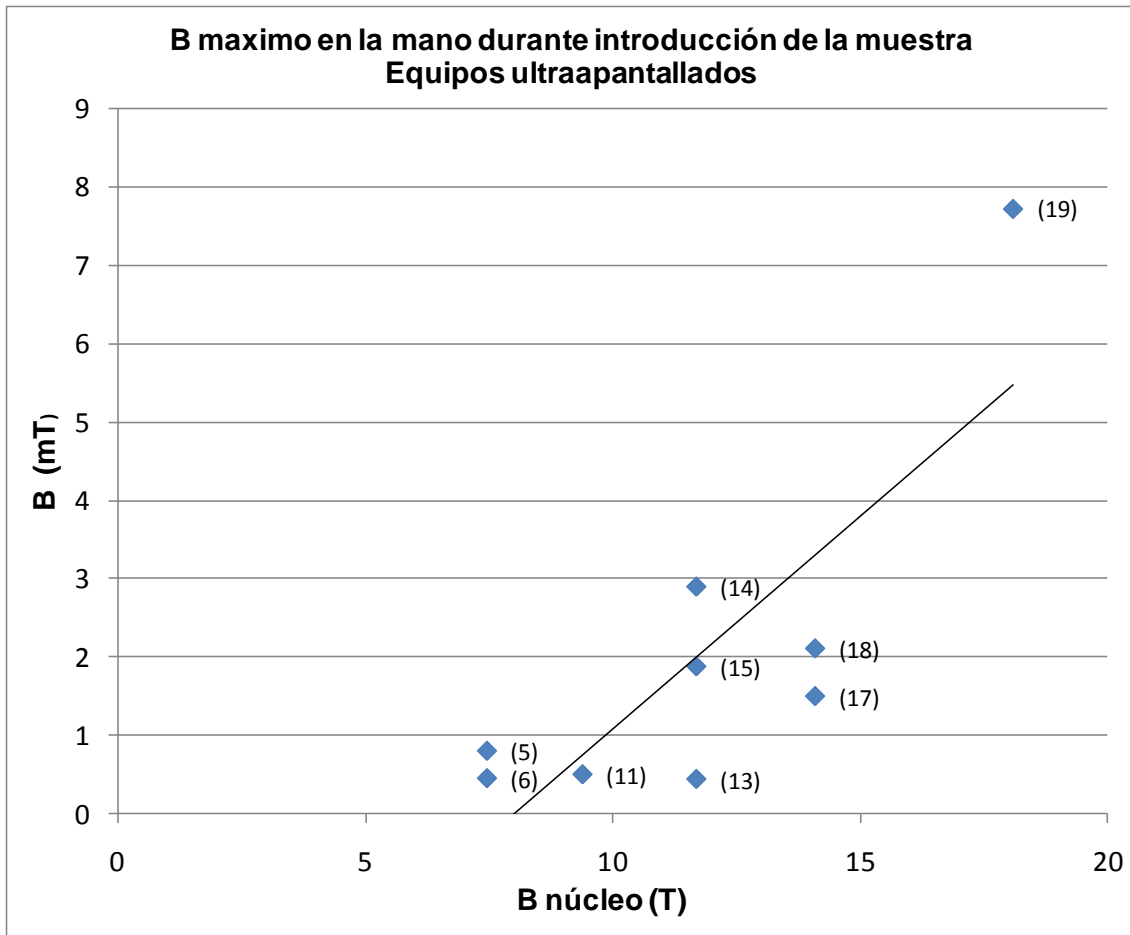


Figura FR2: Valor máximo de inducción magnética (B , mT) a nivel de la extremidad actuante durante la operación de introducción de la muestra en los correspondientes equipos ultraapantallados, identificados por su código respectivo según tabla TR1, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo magnético. Ecuación de la recta de ajuste: $y = 0,5432x - 4,347$ ($r^2 = 0,6503$)

4.1.2.2 Exposición en el cuerpo durante la introducción de la muestra

La tabla TR2 muestra los valores medios ($B_{med} \pm \sigma_{n-1}$) de densidad de flujo de CME registrados a nivel de cabeza / tórax de los espectrometristas durante la operación de introducción de la muestra. La postura del trabajador es la misma en todos los casos, con el cuerpo próximo al espectrómetro. En la tabla los valores de exposición a nivel cefálico-torácico en los equipos identificados como 9 y 12, se han tomado cuando el trabajador coloca la muestra en los brazos robotizados. En estas condiciones, la distancia entre trabajador y el núcleo magnético de los equipos es superior a aquellas en que la muestra se introduce directamente por el extremo superior del equipo.

B_{nucleo} (T) y tipo (E/UA)	Modelo (Código)	Muestra, cuerpo (mT)
4,7 E	Brüker AC 200 MHz (1)	6,70 ± 0,40
	Varian Innova 300 MHz (2)	7,50 ± 0,20
	Brüker 300 MHz (3)	13,00 ± 1,00
7,47 E	Brüker Spectrospin 300 MHz (4)	6,30 ± 0,40
7,47 UA	Brüker 300 MHz US (5)	0,30 ± 0,05
	Brüker 300 MHz US (6)	0,15 ± 0,04
9,4 E	Varian Innova 400 MHz (7)	11,70 ± 0,50
	Varian Oxford 400 Hz (8)	25,80 ± 0,20
	Varian Oxford Plus 400 MHz (9)	6,10 ± 0,50
	Brüker 400 MHz (10)	18,00 ± 1,70
9,4 UA	Brüker Ascend 400R MHz (11)	0,29 ± 0,04
11,7 E	Varian Oxford AS 500 MHz (12)	4,80 ± 0,20
11,7 UA	Brüker 500 MHz US (13)	0,37 ± 0,06
	Brüker Ascend 500 MHz (14)	0,37 ± 0,07
	Varian System 500 MHz (15)	0,62 ± 0,06
14,1 E	Brüker 600 MHz (16)	20,30 ± 0,30
14,1 UA	Brüker 600 MHz Plus US (17)	0,17 ± 0,04
	Brüker Ascend 600 MHz (18)	0,34 ± 0,03
18,1 UA	Brüker 800 MHz US (19)	1,97 ± 0,06

Tabla TR2: relación de equipos de RMN (modelo, frecuencia máxima de operación en MHz, y código) cuyas emisiones se han medido, con el correspondiente valor de campo magnético en el núcleo (B_{nucleo} . Tesla) y tipo de apantallamiento: Estandar (E) o Ultraapantallado (UA). Muestra cuerpo: B media $\pm \sigma_{n-1}$ de inducción magnética registrada a nivel del tórax, durante la operación de introducción de la muestra.

A partir de los datos contenidos en la tabla anterior, se muestra en los gráficos de las Figuras FR3 y FR4 los valores máximos de campo B de la exposición a nivel de tórax del trabajador durante la operación de colocación de la muestra en equipos con apantallamiento estándar (FR3) y en espectrómetros ultraapantallados (FR4). Los valores de exposición B (mT), se muestran frente a los valores de campo B (en T) del núcleo magnético de los correspondientes equipos, identificados por los códigos asignados en la Tabla TR2. En la figura FR4 los valores de exposición a nivel cefálico-truncal en los equipos 9 y 12 se han tomado cuando el trabajador coloca la muestra en los brazos robotizados.

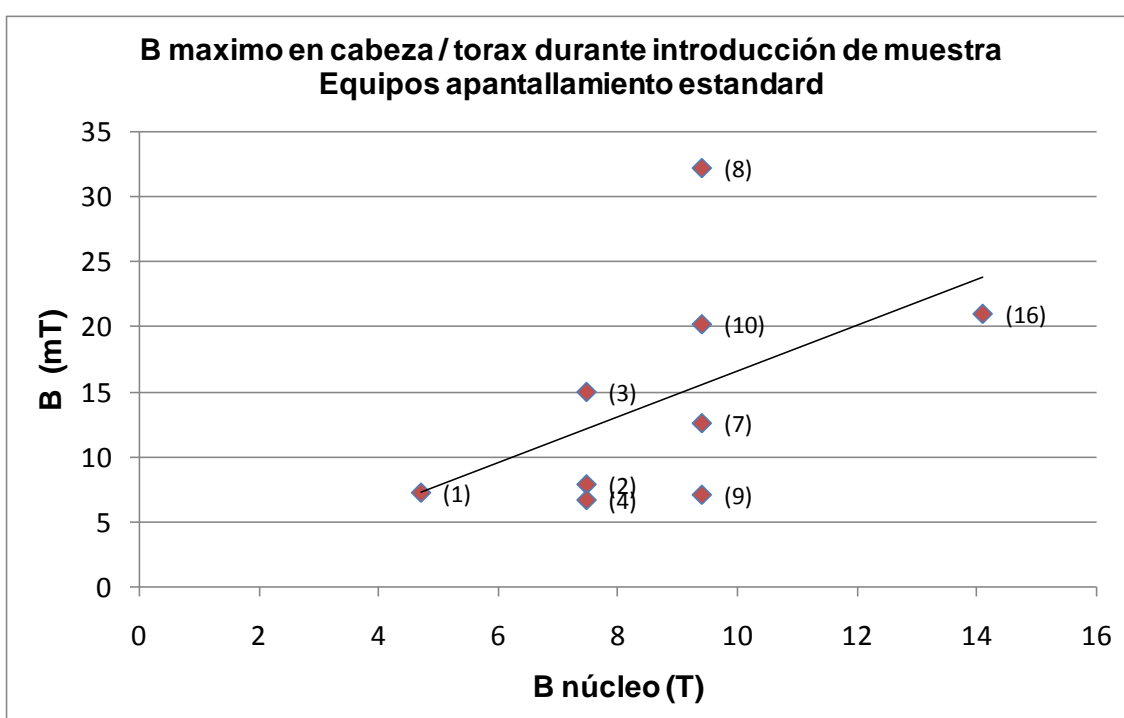


Figura FR3: Valor máximo de inducción magnética (B, mT) recibida a nivel de cabeza / tórax de los trabajadores durante la operación de introducción de la muestra en los correspondientes equipos con apantallamiento magnético estandar, identificados por su código respectivo según tabla TR2, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo magnético. Ecuación de la recta de ajuste: $y = 1,7637x - 1,0038$ ($r^2 = 0,2661$).

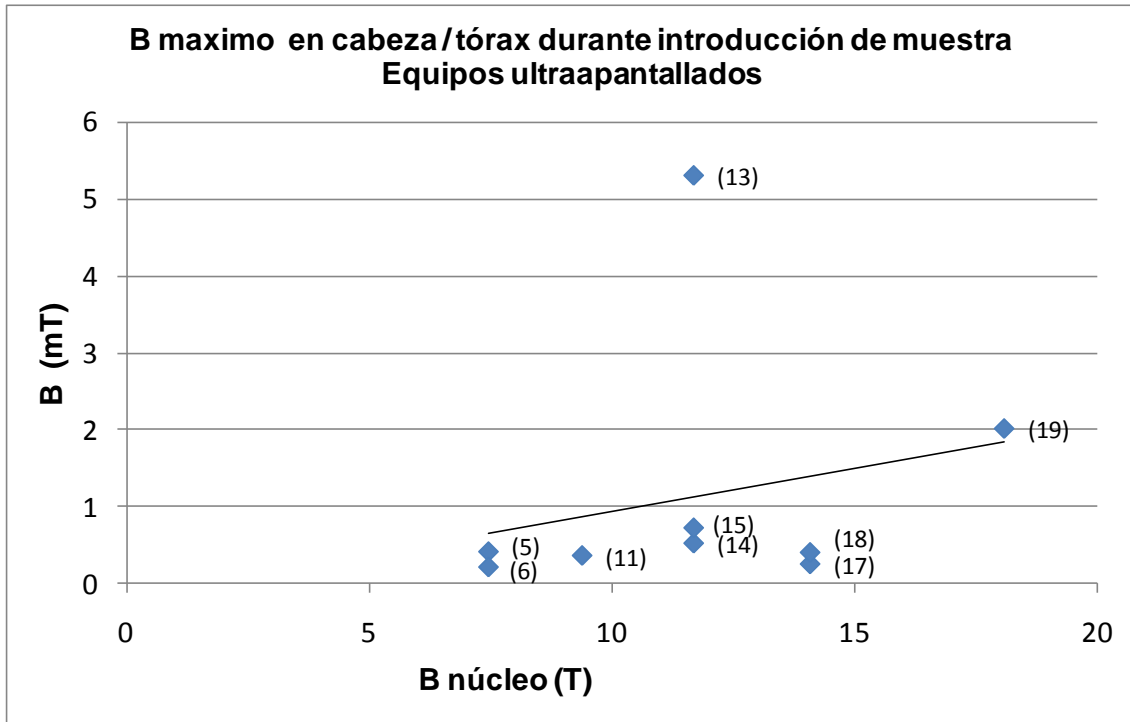


Figura FR4: Valor máximo de inducción magnética (B , mT) recibida a nivel de cabeza / tórax de los trabajadores durante la operación de introducción de la muestra en los correspondientes equipos ultraapantallados, identificados por su código respectivo según tabla TR2, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo magnético. Ecuación de la recta de ajuste: $y = 0,112x - 0,1847$ ($r^2 = 0,0534$)

4.1.2.3: Exposición en la mano durante la operación de ajuste de parámetros.

La tabla TR3 muestra los valores medios ($B_{med} \pm \sigma_{n-1}$) de densidad de flujo de CME registrados a nivel de la mano de la extremidad actuante, durante la operación de ajuste de parámetros. Para la realización de esta operación el trabajador tiene que acceder a la parte inferior del equipo, colocándose, según sus preferencias, sentado, en cuclillas o tumbado bajo el espectrómetro. La postura adoptada por el trabajador no influye en la distancia entre la mano y el equipo durante la realización de dichas tareas.

B_{nucleo} (T) y tipo (E/UA)	Modelo (Código)	Ajuste, mano $B_{med} \pm \sigma_{n-1}$ (mT)
4,7 E	Brüker AC 200 MHz (1)	-
	Varian Innova 300 MHz (2)	-
7,47 E	Brüker 300 MHz (3)	146,00 ± 2,00
	Brüker Spectrospin 300 MHz (4)	51,00 ± 4,00
7,47 UA	Brüker 300 MHz US (5)	-
	Brüker 300 MHz US (6)	-
9,4 E	Varian Innova 400 MHz (7)	54,56 ± 0,50
	Varian Oxford 400 MHz (8)	424,00 ± 22,00
	Varian Oxford AS 400 MHz (9)	-
9,4 UA	Brüker 400 MHz (10)	29,00 ± 4,00
	Brüker Ascend 400R MHz (11)	49 ± 4
11,7 E	Varian Oxford AS 500 MHz (12)	-
11,7 UA	Brüker 500 MHz US (13)	12,80 ± 0,50
	Brüker Ascend 500 MHz (14)	65,00 ± 15,00
	Varian System 500 MHz (15)	-
14,1 E	Brüker 600 MHz (16)	672 ± 10,00
14,1 UA	Brüker 600 MHz Plus US (17)	129,00 ± 7,00
	Brüker Ascend 600 MHz (18)	16,00 ± 3,00
18,1 UA	Brüker 800 MHz US (19)	261,00 ± 2,00

Tabla TR3: relación de equipos de RMN (modelo, frecuencia máxima de operación en MHz, y código) cuyas emisiones se han medido, con el correspondiente valor de campo magnético en el núcleo (B_{nucleo} . Tesla) y tipo de apantallamiento: Estandar (E) o Ultraapantallado (UA). Ajuste mano, $B_{media} \pm \sigma_{n-1}$ de inducción magnética en la mano durante las operaciones de ajuste de parámetros. (-): equipos que no requieren ajuste de parámetros.

A partir de los datos contenidos en la tabla anterior, se muestra en los gráficos de las Figuras FR5 y FR6 los valores máximos de campo B de la exposición al nivel de la extremidad actuante durante la tarea de ajuste de parámetros en aquellos equipos con apantallamiento estándar (FR4) o con ultraapantallamiento (FR5) que requerían este tipo de operaciones según tabla TR3. Los valores de exposición B (mT), se muestran frente a los valores de campo B (T) del núcleo magnético de los correspondientes equipos, identificados por los códigos asignados en la Tabla TR3.

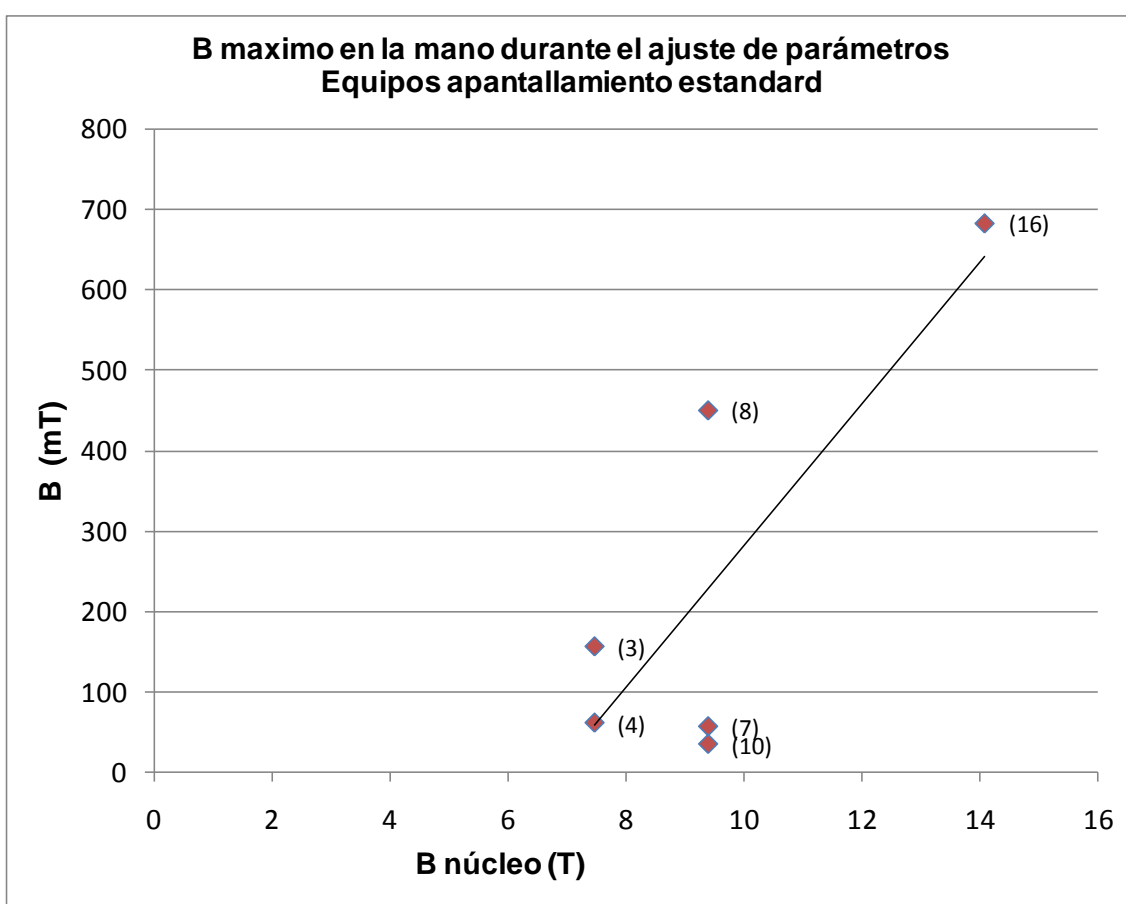


Figura FR5: Valor máximo de inducción magnética (B, mT) recibida a nivel de la extremidad “actuante” (A) durante la operación de ajuste de parámetros en los correspondientes equipos de RMN con apantallamiento estándar, identificados por su código respectivo según tabla TR3, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo. Ecuación de la recta de ajuste: $y=88,014x- 599,5$ ($r^2= 0,6413$)

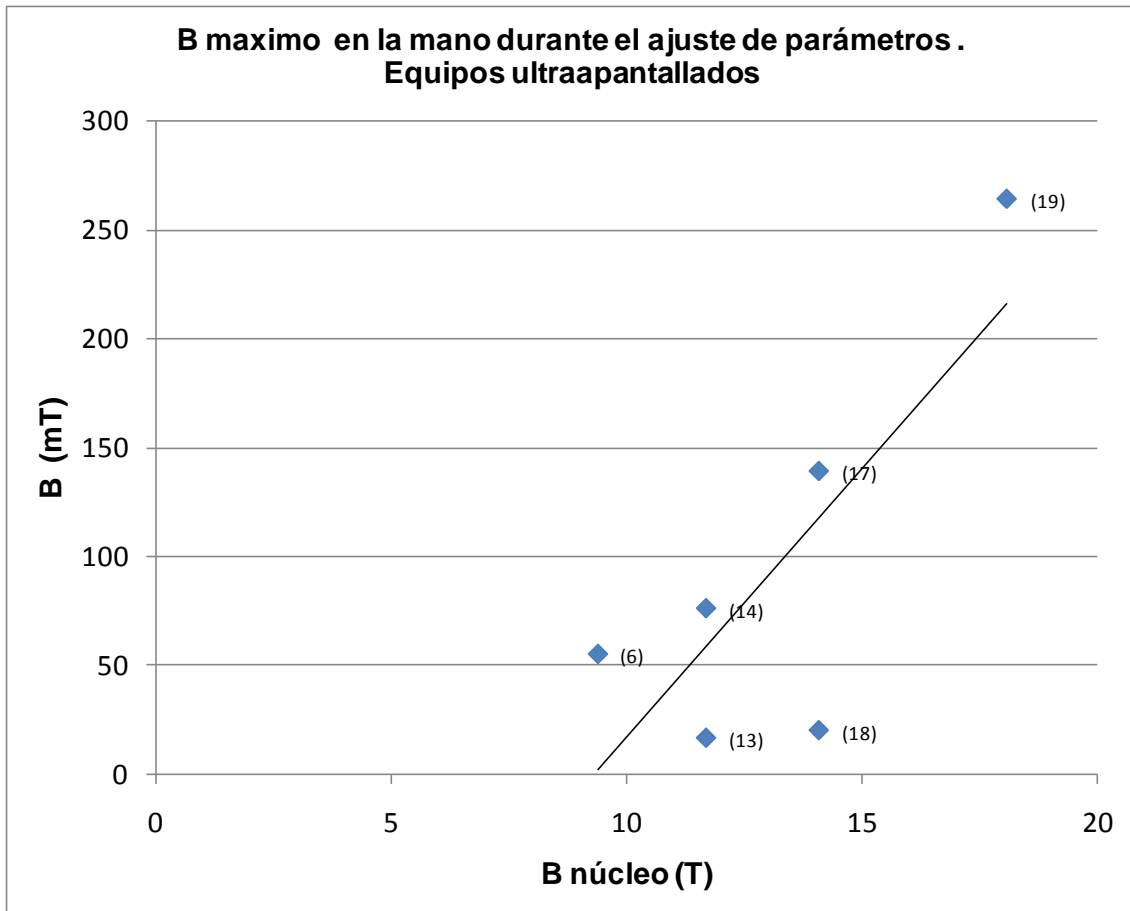


Figura FR6: Valor máximo de inducción magnética (B , mT) recibida a nivel de la mano de la extremidad actuante durante la operación de ajuste de parámetros en los correspondientes equipos ultraapantallados, identificados por su código respectivo según la tabla TR3, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo magnético. Ecuación de la recta de ajuste: $y=24,647x-229,84$ ($r^2=0,6119$)

4.1.2.4: Exposición en el cuerpo durante la operación de ajuste de parámetros.

La tabla TR4 muestra los valores de densidad de flujo de CME ($B_{med} \pm \sigma_{n-1}$) registrados a nivel del tórax del trabajador durante la operación de ajuste de parámetros en la parte inferior del espectrómetro correspondiente. En el caso de los trabajadores que tenían preferencia por adoptar una postura yacente durante la ejecución de esta tarea, la distancia que media entre el equipo y el tórax del operario, en cuya sección frontal se coloca la sonda del magnetómetro, no difiere significativamente de la distancia que separa el espectrómetro de la cabeza del sujeto.

Por el contrario, en aquellos operarios que optaron por la postura sedente o en cuclillas, su cabeza se situaba más próxima al equipo que su tórax. En estos casos, que fueron minoritarios, se tomaron mediciones adicionales, a nivel de la cabeza del trabajador, obteniéndose un valor máximo de $B_{med} \pm \sigma_{n-1} = 396 \pm 15$ mT para el operario de un equipo de $B = 14,1$ T en el núcleo y un mínimo de $B_{med} \pm \sigma_{n-1} = 2,73 \pm 0,10$ mT, a nivel de la cabeza del usuario de un dispositivo de 9,4 T. Estos datos no se muestran en la tabla.

B_{nucleo} (T) y tipo (\mathcal{E} /UA)	Modelo (Código)	Ajuste, cuerpo $B_{med} \pm \sigma_{n-1}$ (mT)
4,7 \mathcal{E}	Brüker AC 200 MHz (1)	-
	Varian Innova 300 MHz (2)	-
	Brüker 300 MHz (3)	$37,90 \pm 0,50$
7,47 \mathcal{E}	Brüker Spectrospin 300 MHz (4)	$6,00 \pm 0,20$
7,47 UA	Brüker 300 MHz US (5)	-
	Brüker 300 MHz US (6)	-
	Varian Innova 400 MHz (7)	$6,30 \pm 0,80$
	Varian Oxford 400 MHz (8)	$86,00 \pm 4,00$
9,4 \mathcal{E}	Varian Oxford AS 400 MHz (9)	-
	Brüker 400 MHz (10)	$29,00 \pm 3,00$
9,4 UA	Brüker Ascend 400R MHz (11)	$0,33 \pm 0,03$
11,7 \mathcal{E}	Varian Oxford AS 500 MHz (12)	-
11,7 UA	Brüker 500 MHz US (13)	$0,18 \pm 0,05$
	Brüker Ascend 500 MHz (14)	$0,70 \pm 0,40$
	Varian System 500 MHz (15)	-
14,1 \mathcal{E}	Brüker 600 MHz (16)	$34,90 \pm 0,30$
14,1 UA	Brüker 600 MHz Plus US (17)	$5,20 \pm 0,30$
	Brüker Ascend 600 MHz (18)	$0,31 \pm 0,04$
18,1 UA	Brüker 800 MHz US (19)	$12,45 \pm 0,07$

Tabla TR4: relación de equipos de RMN (modelo, frecuencia máxima de operación en MHz, y código) cuyas emisiones se han medido, con el correspondiente valor de campo magnético en el núcleo (B_{nucleo} . Tesla) y tipo de apantallamiento (Standard (\mathcal{E}) o Ultraapantallado (UA)). Ajuste cuerpo, $B_{media} \pm \sigma_{n-1}$ de inducción magnética en cabeza / tórax del usuario durante las operaciones de ajuste de parámetros (-): equipos que no requieren ajuste de parámetros.

A partir de los datos contenidos en la tabla anterior, se muestra en los gráficos de las Figuras FR7 y FR8 los valores máximos de campo B de la exposición a CME al nivel del tórax para equipos con apantallamiento estándar (FR7) y ultraapantallados (FR8) durante las tareas de ajuste de parámetros en aquellos equipos que requerían este tipo de operaciones según tabla TR4. Los valores de exposición B (mT), se muestran frente a los valores de campo B (T) del núcleo magnético de los correspondientes equipos, identificados por los códigos asignados en la Tabla TR4.

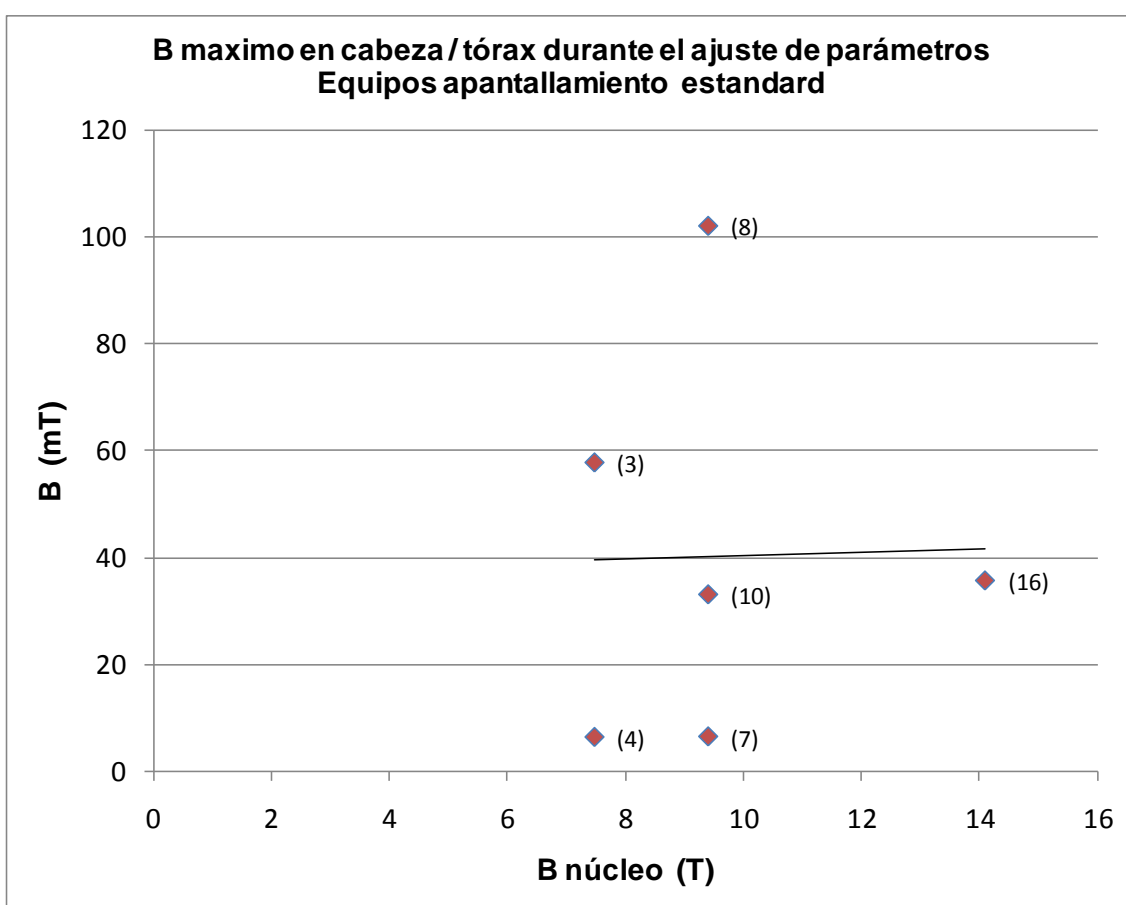


Figura FR7: Valor máximo de inducción magnética (B, mT) recibida a nivel de cabeza / tórax durante la operación de ajuste de parámetros en los correspondientes equipos de espectrometría con apantallamiento estándar, identificados por su código respectivo según tabla TR4, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo magnético. Ecuación de la recta de ajuste: $y=0,3419x +36,905$ ($r^2= 0,0005$)

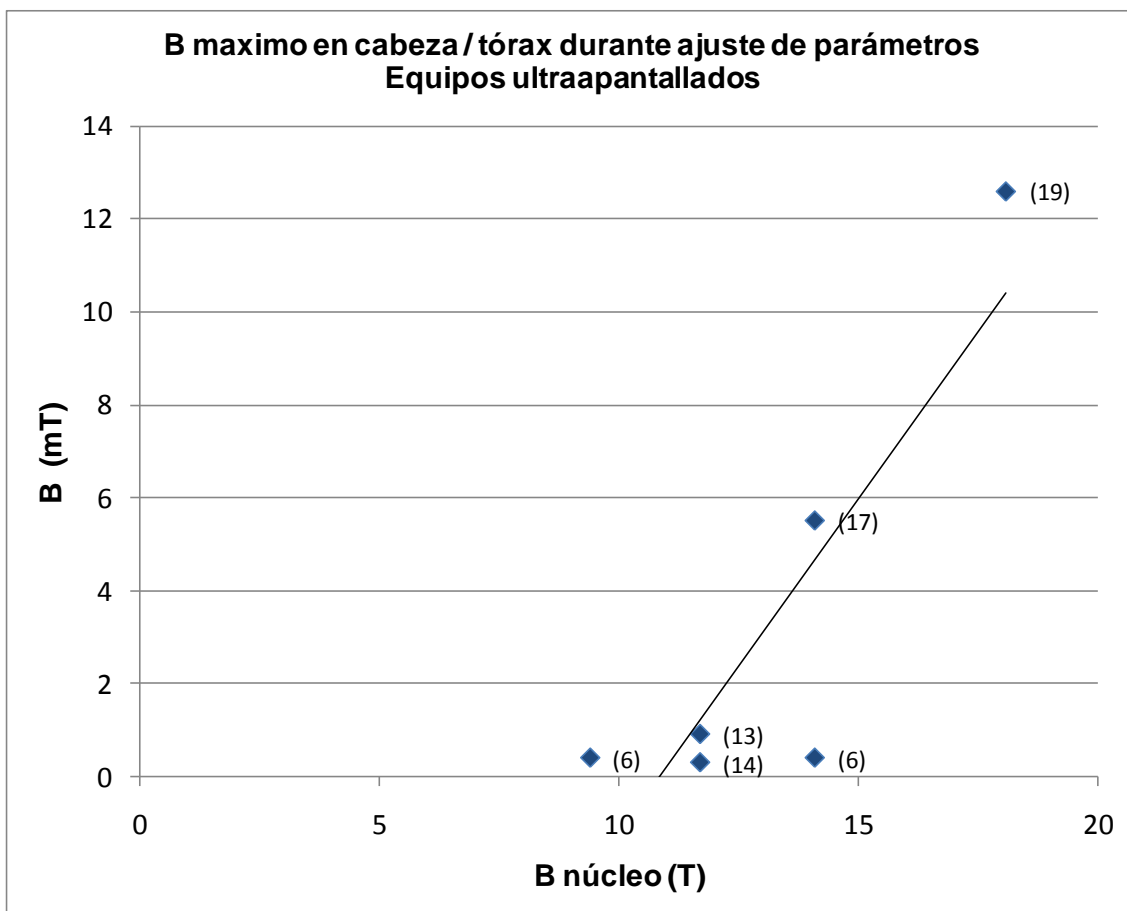


Figura FR8: Valor máximo de inducción magnética (B , mT) recibida a nivel de cabeza / tórax durante la operación de ajuste de parámetros en los correspondientes equipos de RMN ultrapantallado, identificados por su código respectivo según tabla TR4, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo magnético Ecuación de la recta de ajuste: $1,4373x - 15,605$ ($r^2 = 0,7492$).

4.1.2.5 Comparativa del nivel de exposición entre espectrómetros con apantallamiento estándar y los equipos ultraapantallados

Utilizando los datos numéricos contenidos en las tablas precedentes, los gráficos de las figuras FR9- FR12 presentan, en escala logarítmica, los valores máximos de B (μT) registrados en las extremidades y en la cabeza/tórax durante la ejecución de las tareas que comportaban mayor exposición a CME: ajuste de parámetros e introducción de la muestra. En las gráficas se agrupan por separado los valores para usuarios de equipos con apantallamiento estándar y los obtenidos para aparatos ultraapantallados. Los valores B (μT) se muestran representados a los valores de campo B (T) del núcleo de los correspondientes equipos, identificados por los códigos asignados en la Tabla TM3.

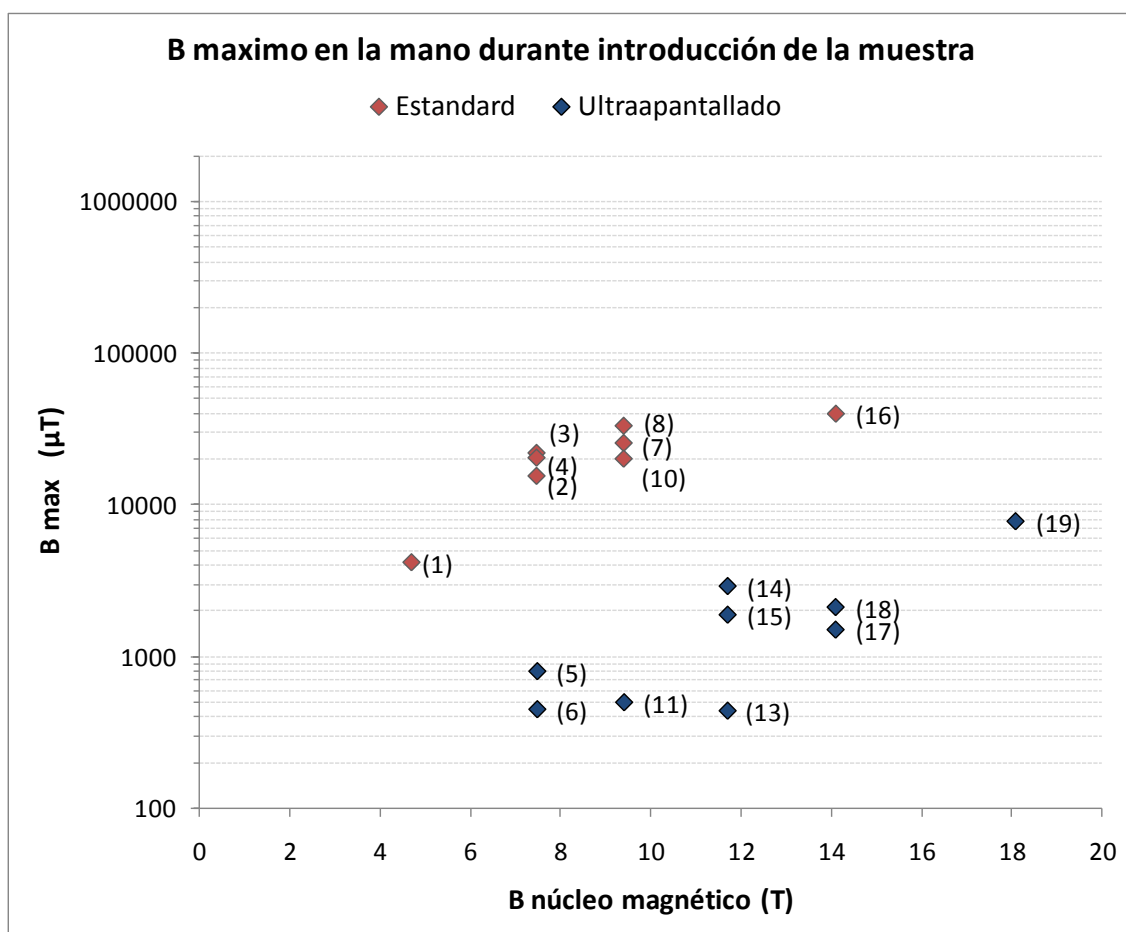


Figura FR9: Valor máximo de inducción magnética (B, μT) recibida a nivel de mano actuante durante la operación de introducción de la muestra en los correspondientes equipos de RMN clasificados según tipo de apantallamiento (estándar o ultraapantallado), identificados por su código respectivo según tabla TM3, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo magnético.

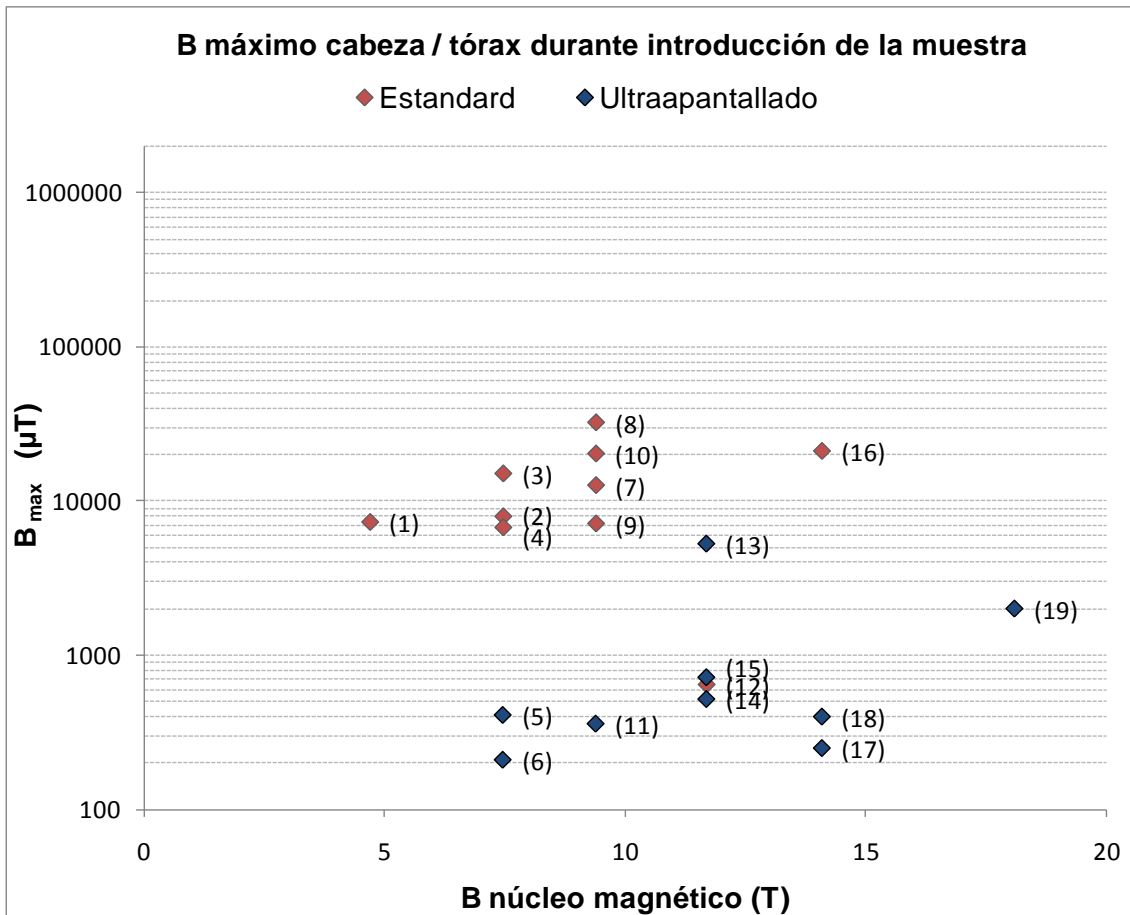


Figura FR10: Valor máximo de inducción magnética (B , μT) recibida a nivel de cabeza-tórax durante la operación de introducción de la muestra en los correspondientes equipos de RMN clasificados según tipo de apantallamiento (estándar o ultrapantallado), identificados por su código respectivo según tabla TM3, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo magnético.

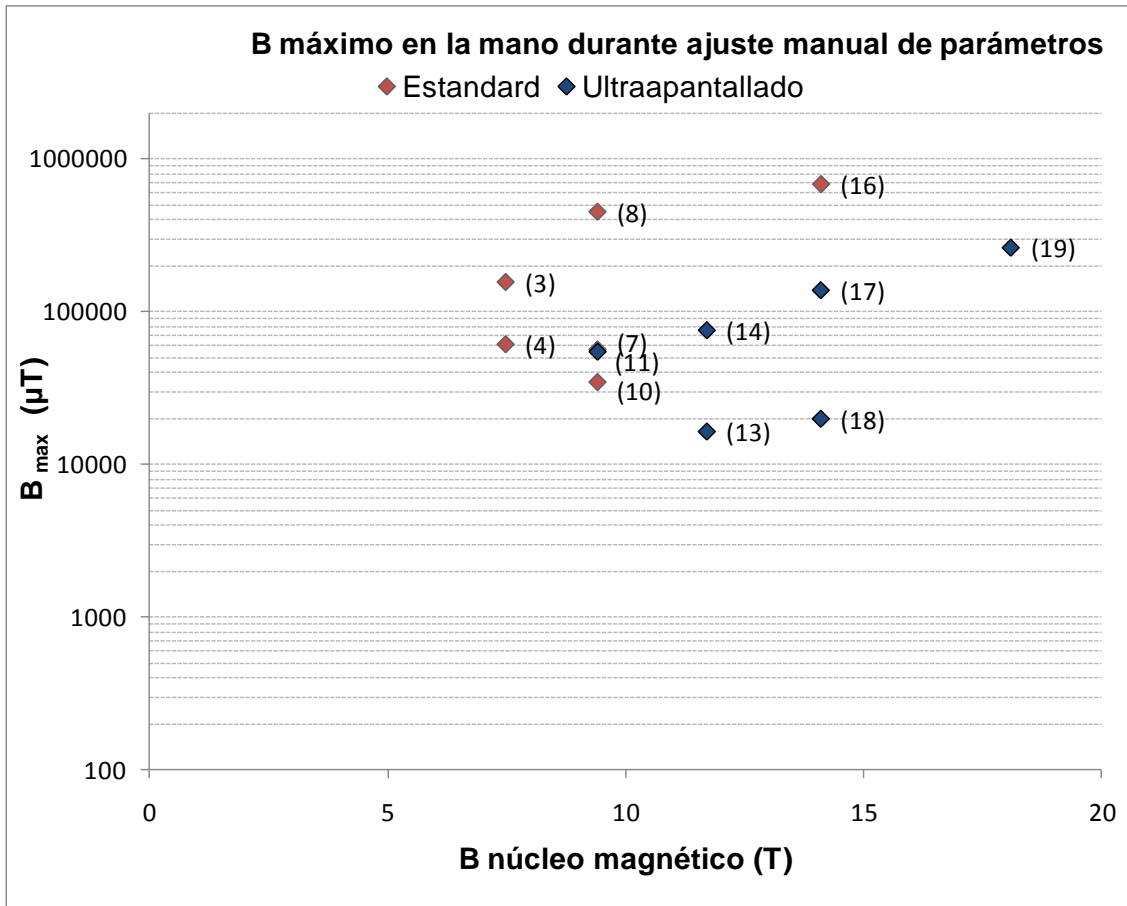


Figura FR11: Valor máximo de inducción magnética (B , μT) recibida a nivel de mano actuante durante la operación de ajuste de parámetros en los correspondientes equipos de RMN clasificados según tipo de apantallamiento (estándar o ultrapantallado), identificados por su código respectivo según tabla TM3, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo

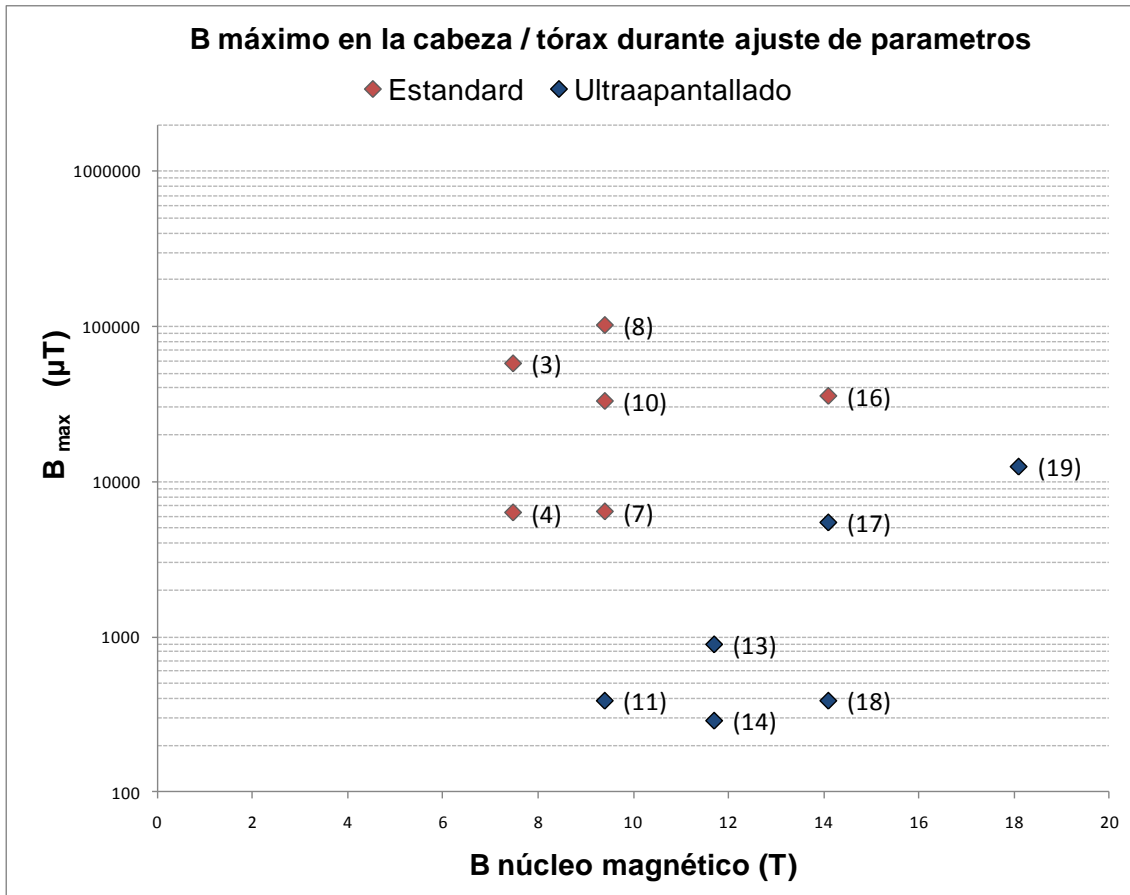


Figura FR12: Valor máximo de inducción magnética (B , μT) recibida a nivel de cabeza-tórax durante la operación de ajuste de parámetros en los correspondientes equipos de RMN clasificados según tipo de apantallamiento (estándar o ultrapantallado), identificados por su código respectivo según tabla TM3, entre paréntesis, y por el valor de B (T) de su núcleo magnético.

4.1.2.6: Exposición en la consola

El valor medio de la exposición del operario en la consola del equipo, durante las tareas de control informático de la excitación y de análisis de las muestras fue de $120 \pm 40 \mu\text{T}$, con un valor máximo y un valor mínimo de $192 \mu\text{T}$ y $50 \mu\text{T}$, respectivamente. Esta variabilidad es atribuible a las diferencias entre los valores de campo magnético del núcleo de los equipos de RMN analizados, y a las diferencias entre laboratorios en lo referente a la distancia que separa el equipo de la consola.

4.1.2.7: CME en ambientes próximos a los equipos

Los gráfico de las figuras FR13 – FR15 representan los valores de inducción magnética registrados a diferentes distancias de la cubierta del equipo (0, 40, 80, 120, 160 y 200 cm) de los equipos seleccionados (códigos 9, 12 y 17 en la tabla TM3) y a una altura de 1,5 metros sobre el suelo de la sala. Los valores de B (mT) representados corresponden a medias $\pm \sigma_{n-1}$ de B, obtenidas en los registros. Sin embargo, dado que la sonda del magnetómetro se mantenía estática durante los registros, y que los campos estáticos no presentan fluctuaciones, las desviaciones de los datos respecto de la media resultaron despreciables y no destacan sobre los puntos de las gráficas. Los resultados muestran una caída de la densidad de flujo magnético en función de la distancia, que en general era más pronunciada en los equipos ultraapantallados y en los emplazados en un foso en comparación con los no apantallados y situados a distintas alturas sobre el suelo, respectivamente. Dependiendo de estas condiciones y la densidad de flujo magnético del núcleo, los niveles de CME alcanzaban valores de aproximadamente $50 \mu\text{T}$, equivalente al valor del campo geomagnético local, a distancias del equipo inferiores 4 metros.

B ambiental en las proximidades del equipo 9

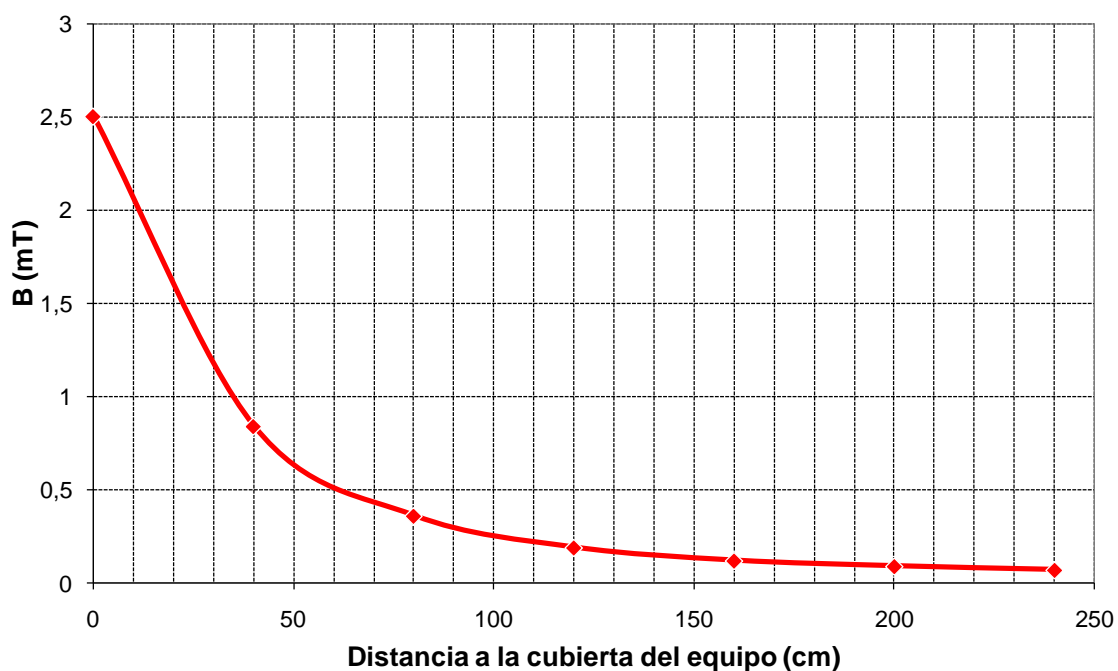


Figura FR13 Valores B (mT) de campo estático ambiental medidos a una altura de 150 cm sobre el suelo, en las inmediaciones del equipo 9: con apantallamiento estándar y $B = 9,4$ T en el núcleo, emplazado en foso.

B ambiental en las proximidades del equipo 12

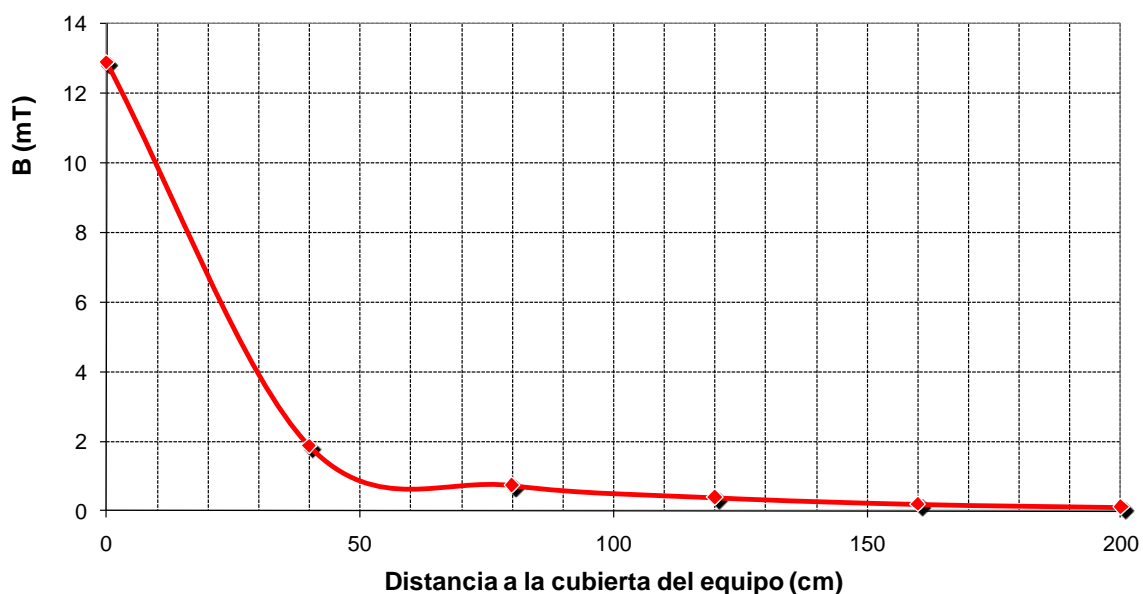


Figura FR14 Valores B (mT) de campo estático ambiental medidos a una altura de 150 cm sobre el suelo, en las inmediaciones del equipo 12: con apantallamiento estándar y $B = 11,7$ T en el núcleo, emplazado en foso

B ambiental en las proximidades del equipo 17

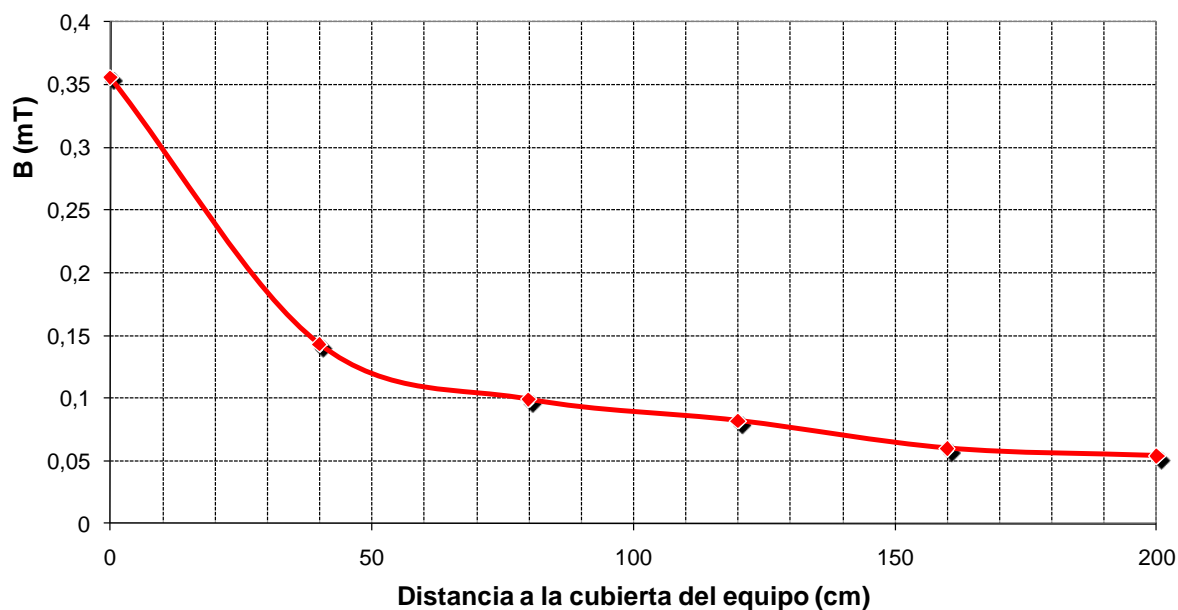


Figura FR15 Valores medidos B (mT) de campo estático ambiental medidos a una altura de 150 cm sobre el suelo, en las inmediaciones del equipo 17: ultraapantallado, con $B = 11,7$ T en el núcleo, emplazado sobre el suelo.

La figura FR16 muestra una representación comparativa, en escala logarítmica, de los valores mostrados arriba, de inducción magnética ambiental en las proximidades de los tres espectrómetros seleccionados.

Comparativa de los valores de B ambientales en las proximades de espectrómetros representativos: códigos 9, 12 y 17

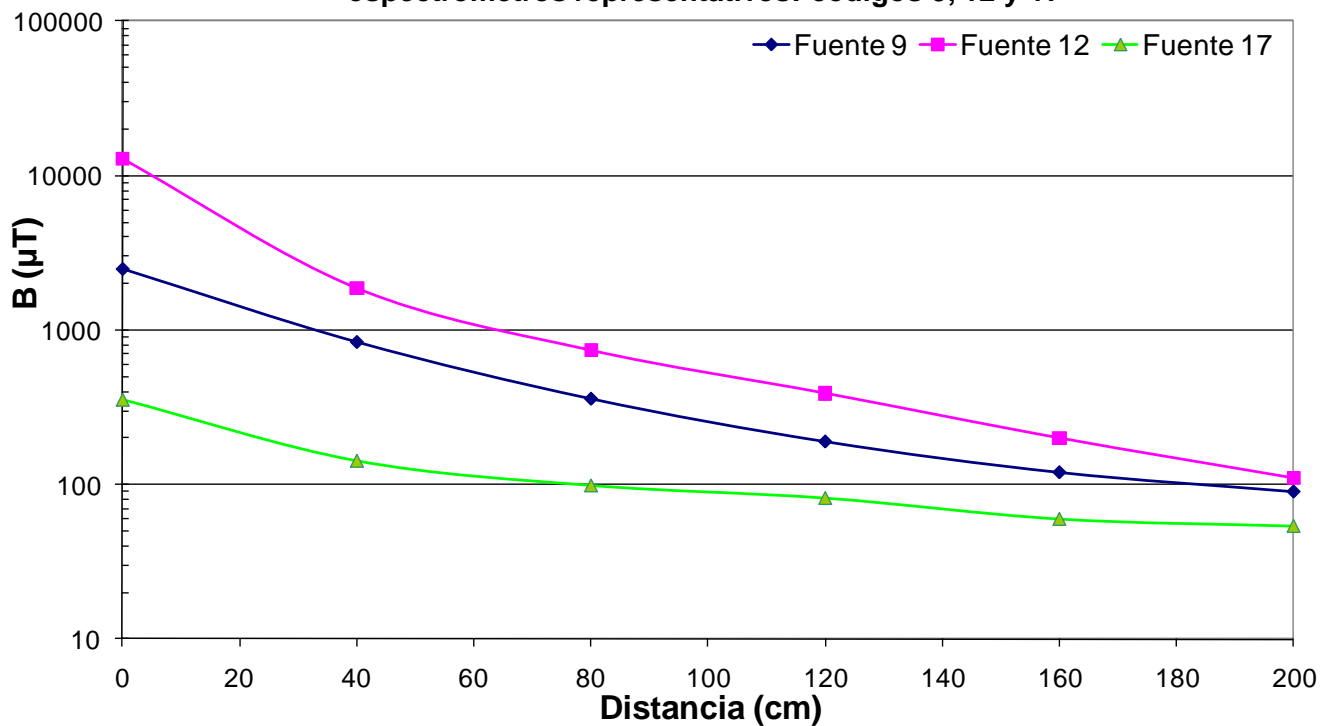


Figura FR16: Valores B (μT) ambiental en función de la distancia a la cubierta de los equipos de RMN. Equipos 9 y 12: con núcleos de 9,4 T y 11,7 T, respectivamente, con apantallamiento estándar y emplazados en foso. Equipo 17, con núcleo de 14,1 T, ultraapantallado y elevado sobre el suelo.

4.2. RESULTADOS DE ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A PARTIR DE LOS DATOS DEL FABRICANTE

Para 7 de los 19 modelos de espectrómetros incluidos en el presente estudio se obtuvieron datos de emisión de CME proporcionados por el fabricante. Para los equipos identificados con los códigos 9, 12 y 17, esa información se facilitó en forma de mapas de isolíneas de emisión (figura FR 17-FR 19). , Para los equipos codificados como 2, 6, 7 y 15, el fabricante proporcionó tablas de los valores de inducción magnética (B) a diferentes distancias de las fuentes, que hemos utilizados para elaborar los correspondientes mapas de isolíneas de emisión (FR 20-FR 23).

De acuerdo con la metodología de estimación de la exposición, propuesta en la sección correspondiente de esta memoria, se han calculado las distancias radiales y axiales que median entre el núcleo de los espectrómetros y la mano y la cabeza / tórax del espectrometrista durante las operaciones de introducción de la muestra y de ajuste de parámetros. Para la determinación de dichas distancias se ha empleado a modo orientativo la figura FR 17 donde están representadas isolíneas de campo B a distintas distancias del núcleo del equipo. La tabla TR5 muestra las distancias aproximadas calculadas entre el núcleo del equipo y la posición de las zonas anatómicas mencionadas para cada una de las tareas contempladas. Para la operación de ajuste de parámetros se ha calculado la distancia en dos posturas posibles adoptadas por los operarios: yacente y sedente.

Tareas de mayor exposición (zona anatómica expuesta)	Distancia radial (m)	Distancia axial (m)
Introducción muestra (mano)	0	1
Introducción muestra (cabeza-tórax)	~ 0,75	~ 0,5
Ajuste de parámetro (mano)	0	~ 0,5
Ajuste de parámetro (cabeza-tórax)	~ 0 / 0,5 ^(*)	~1 / 0,5 ^(*)

Tabla TR5: distancia radial y axial entre núcleo del equipo y la posición de las manos y la cabeza-tórax del operario durante las tareas de introducción de la muestra y ajuste de parámetros. Para la tarea de ajuste de parámetros se ha considerado dos posiciones posibles del operario: sedente y yacente. ^() postura sedente.*

4.2.1. ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A PARTIR DE ISOLÍNEAS DE EMISIÓN

4.2.1.1. Estimación de la inducción para el equipo código 17

La figura FR17 muestra el mapa de isolíneas de emisión (B, mT) a distintas distancias (metros) radiales y axiales del núcleo del espectrómetro, proporcionado por el fabricante del equipo con código 17.

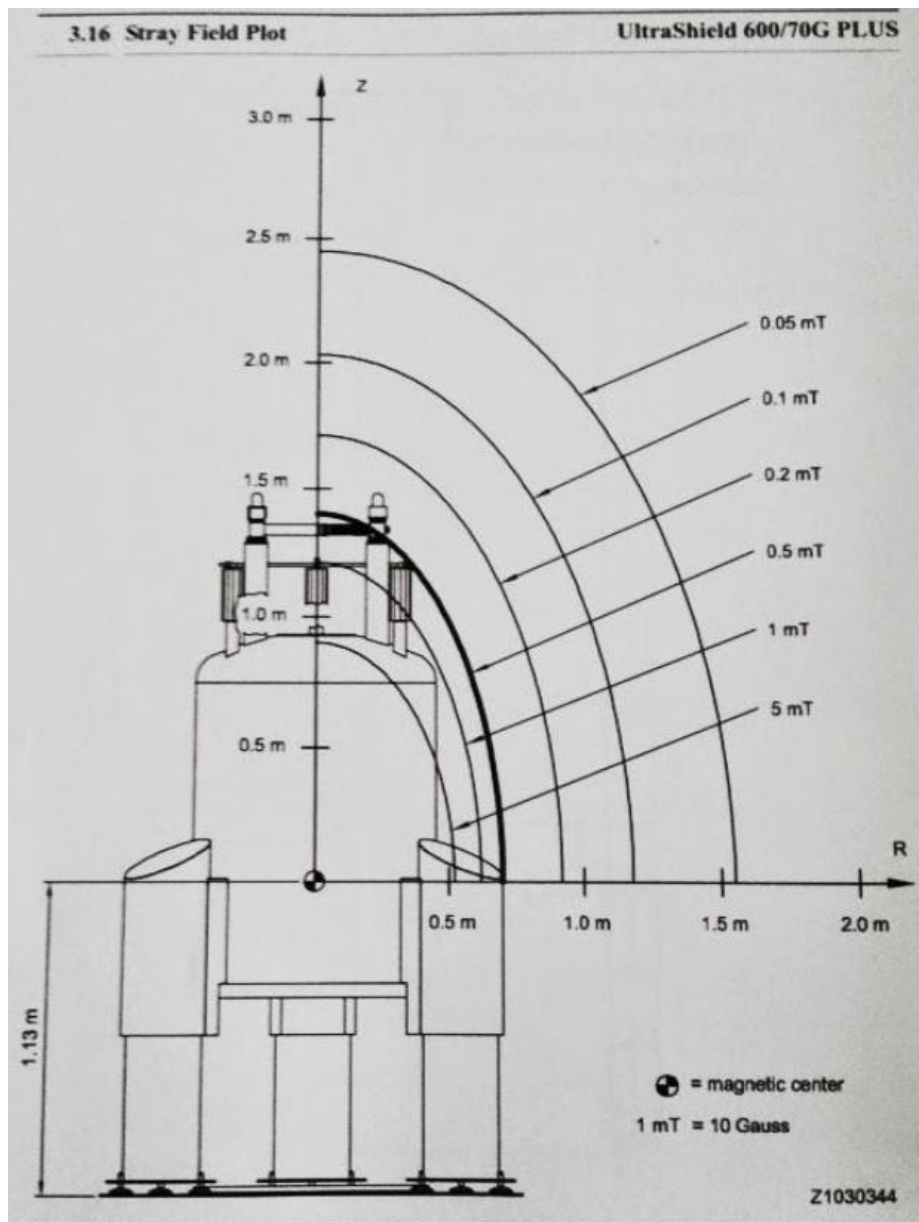


Figura FR17: isolíneas de emisión de B (mT) a diferentes distancias radiales (eje de ordenadas) y axiales (eje de abscisas) en metros, del equipo 17 (núcleo de 14,1 T, ultraapantallado y elevado sobre el suelo)

Para la estimación de la inducción magnética se han considerado las distancias entre el núcleo magnético y la cabeza / tórax o la extremidad del trabajador durante la realización de las diferentes tareas en proximidad al equipo de RMN, recogidas en la tabla TR5, y se han representado sobre el correspondiente mapa de isolíneas de la figura FR17. La tabla TR6 resume los resultados obtenidos ($B_{\text{fabricante}}$, mT). En este caso no ha sido posible estimar los niveles de exposición durante el ajuste de parámetros, ya que en el gráfico proporcionado por el fabricante, solo se representan las isolíneas a partir de la altura del núcleo magnético, situado a 1,3 m sobre el suelo de la sala.

Tareas equipo código 17	B fabricante (mT)
Introducción muestra (mano)	~2
Introducción muestra (cabeza-tórax)	~ 0,5
Ajuste de parámetros (mano)	Sin datos
Ajuste de parámetros (cabeza-tórax)	Sin datos

Tabla TR6: valores de inducción a partir de los datos del fabricante ($B_{\text{fabricante}}$, en mT) en dos zonas corporales (mano y cabeza-tórax) durante tareas realizadas en proximidad al equipo 17 (14,1 T, apantallamiento estándar y emplazado en foso)

4.2.1.2. Estimación de la inducción en el equipo código 9

La figura FR18 muestra el mapa de isolíneas de inducción magnética (B, Gauss) a distintas distancias (metros) radiales y axiales del núcleo del espectrómetro, que fue proporcionado por el fabricante del equipo con código 9.

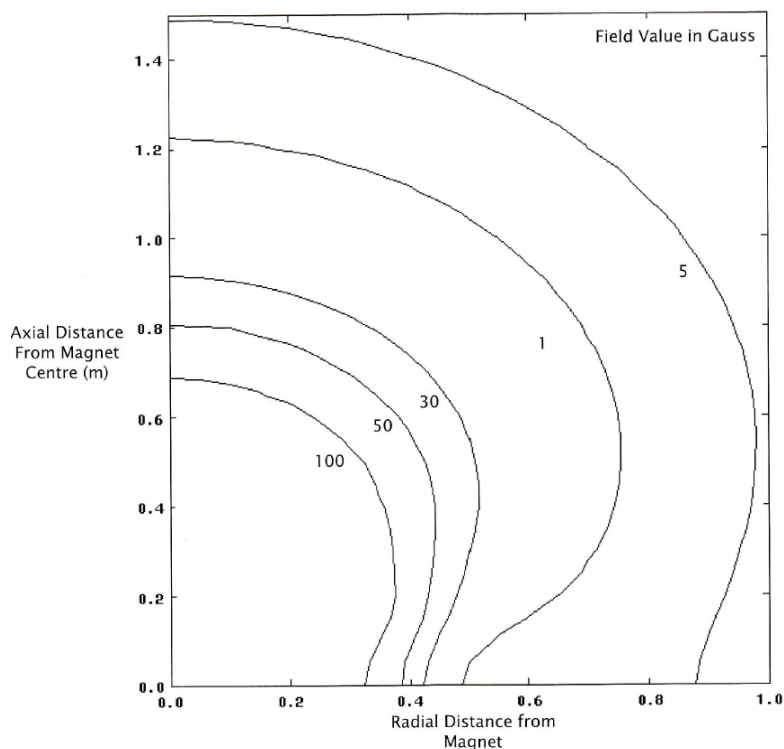


Figura FR 18: mapa de isólinas de B (en Gauss; 1 Gauss=0,1 mT) a diferentes distancias radiales (eje de ordenadas) y axiales (eje de abcisas) en metros, proporcionado por el fabricante del equipo 9 (9,4 T, apantallamiento estándar, emplazado en foso).

El equipo 9 se encuentra ubicado en un foso de aproximadamente un metro de profundidad (distancia axial) y a una distancia radial aproximada de 0,5 metros con respecto a la posición del trabajador. Por tanto, para calcular la distancia total del operario al núcleo del espectrómetro se han sumado estos valores de distancia axial y radial a las distancias expuestas en la tabla TR5 durante la realización de las diferentes tareas en las proximidades del equipo de RMN. El equipo 9 dispone además de brazo robotizado para la introducción de la muestra, por lo que no procede la estimación de la inducción magnética en la zona de la mano durante esa tarea. Tampoco ha sido posible estimar la exposición correspondiente a la operación de ajuste de parámetros, ya que el fabricante no proporciona el trazado de las isólinas por debajo del núcleo magnético del equipo. La tabla TR7 contiene los resultados obtenidos.

Tareas equipo código 9	B fabricante
Introducción muestra (mano)	No aplica
Introducción muestra (cabeza-tórax)	<5 Gauss (<0,5 mT)
Ajuste de parámetros (mano)	Sin datos
Ajuste de parámetros (cabeza-tórax)	Sin datos

Tabla TR7: valores de inducción del fabricante $B_{fabricante}$ (en Gauss y mT; 1 Gauss= 0,1 mT) a partir de los datos de emisión durante las tareas de introducción de la muestra y ajuste de parámetros en dos zonas corporales (mano y cabeza-tórax) para la fuente 9 (9,4 T, apantallamiento estándar, emplazado en foso.)

4.2.1.3. Estimación de la inducción en el equipo código 12

La figura FR19 muestra el mapa de isólinas de inducción magnética (B, Gauss) a distintas distancias (metros) radiales y axiales del núcleo del espectrómetro, que fue proporcionado por el fabricante del equipo con código 12.

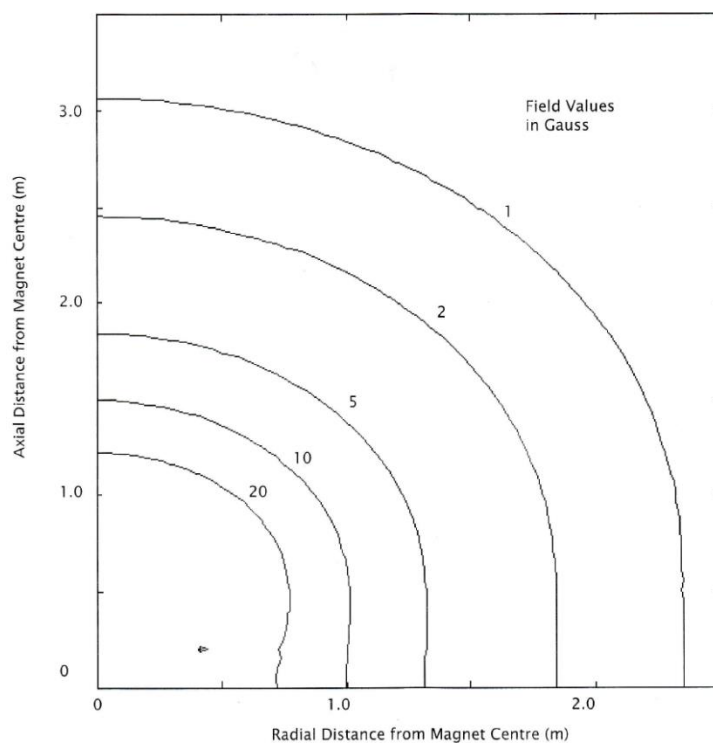


Figura FR 19: mapa de isólinas de B (en Gauss; 1 Gauss=0,1 mT) a diferentes distancias radiales (eje de ordenadas) y axiales (eje de abscisas) en metros, proporcionado por el fabricante del equipo 12 (11,7 T, apantallamiento estándar y emplazado en foso)

El equipo 12 también se encuentra ubicado en un foso de aproximadamente un metro de profundidad (distancia axial) y a una distancia radial aproximada de 0,5 metros con respecto a la posición del trabajador. Por tanto, para calcular la distancia total del operario al núcleo del espectrómetro se han sumado estos valores de distancia axial y radial a las distancias expuestas en la tabla TR5 durante la realización de las diferentes tareas con el equipo de RMN. El equipo 12 dispone además de brazo robotizado por lo que no procede estimar la inducción magnética en la zona de la mano durante la tarea de introducción de la muestra. En relación con la operación de ajuste de parámetros, no se ha podido estimar la inducción magnética debido a que el fabricante no proporciona el valor de las isóneas en dicha posición de trabajo. La tabla TR8 recoge los resultados obtenidos de la estimación realizada a partir de los cálculos descritos.

Tareas equipo código 12	B fabricante
Introducción muestra (mano)	No aplica
Introducción muestra (cabeza-tórax)	~4 Gauss (~0,4 mT)
Ajuste de parámetro (mano)	Sin datos
Ajuste de parámetro (cabeza-tórax)	Sin datos

Tabla TR8: valores de inducción a partir de los datos de emisión proporcionados por el fabricante $B_{fabricante}$ (en Gauss y mT; 1 Gauss= 0,1 mT) correspondientes a la exposición durante tareas realizadas en las proximidades del equipo 12 (11,7 T, apantallamiento estándar y emplazado en foso)

4.2.2. ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A PARTIR DE TABLAS DE EMISIÓN

La estimación de la inducción magnética para los equipos codificados como 2, 6, 7 y 15 se ha realizado a partir de tablas proporcionadas por los fabricantes respectivos, en las que se detalla el valor de B a diferentes distancias de la fuente. La tabla TR9 recoge el conjunto de los datos proporcionados correspondientes a los 4 equipos. De acuerdo con la metodología propuesta, la información contenida en dichas tablas se ha utilizado para elaborar los mapas de isóneas que permitirán el correspondiente análisis comparativo de exposiciones.

Equipo	Imán		Distancia axial al centro del imán (m)			Distancia axial al centro del imán (m)			Distancia al suelo del imán
	MHz	Tesla	5 Gauss	10 Gauss	25 Gauss	5 Gauss	10 Gauss	25 Gauss	
2	300	7,04	2,20	1,75	1,26	1,70	1,30	0,97	0,78
6	300	7,04	0,89	0,76	-	0,60	0,50	-	0,93
7	400	9,39	2,89	2,31	-	2,22	1,76	-	1,17
15	500	11,7	1,25	1,09	0,93	0,80	0,73	0,65	1,02

Tabla TR9: datos numéricos proporcionados por los fabricantes. Valor de inducción magnética (B en Gauss; 1 Gauss= 0,1 mT), a diferentes distancias (m) radiales y axiales de la fuente, y la distancia al suelo del centro del imán (m) para los equipos codificados en la presente memoria como 2, 6, 7 y 15, con su correspondiente frecuencia máxima y valor de inducción magnética del núcleo expresados en la segunda y tercera columna de la tabla, respectivamente

Para la elaboración de los correspondientes mapas de isóneas se han representado los valores de distancia radial y axial en los ejes de abscisas y ordenadas, respectivamente, y para cada uno de los equipos se han trazado las isóneas que unen los puntos geográficos que presentan un mismo valor de inducción magnética (5 Gauss, 10 Gauss y 15 Gauss), de acuerdo con los datos que figuran en la tabla TR9. Las figuras FR20, FR21, FR22 y FR23 muestran los mapas de isóneas correspondientes, obtenidos aplicando el método descrito.

Curva fabricante Equipo Innova 300 (código 2)

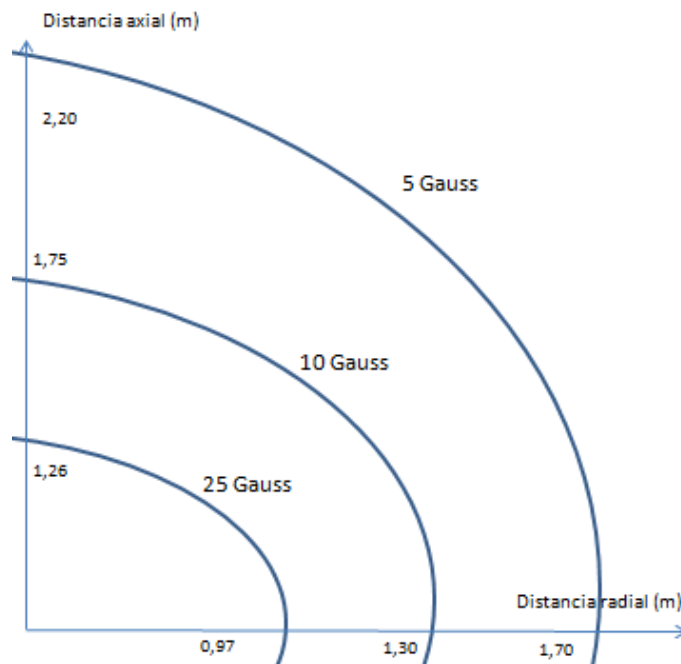


Figura FR20: mapa de isóneas de inducción magnética (B , Gauss; 1 Gauss= 0,1 mT) a diferentes distancias radiales (eje ordenadas, m) y axiales (eje de abcisas, m) del equipo 2 (7,47 T, apantallamiento estándar). Mapa elaborado a partir de los datos del fabricante (Tabla TR9)

Curva fabricante Equipo Bruker 300 (código 6)

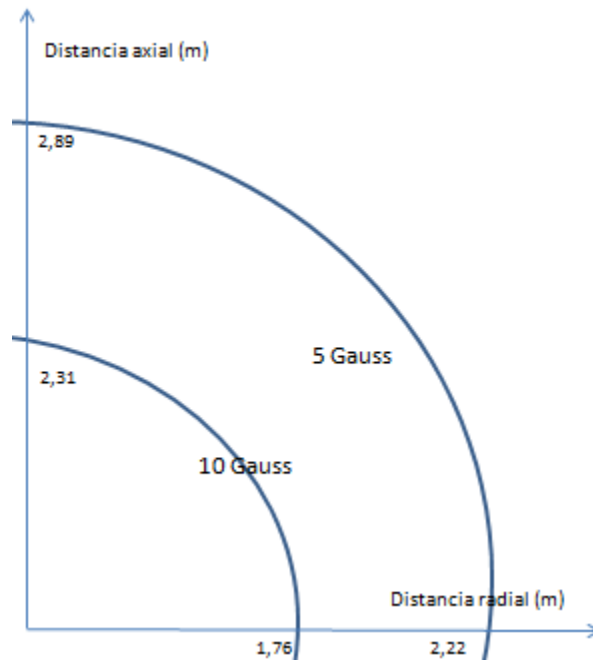


Figura FR21: mapa de isóneas de inducción magnética (B , Gauss; 1 Gauss= 0,1 mT) a diferentes distancias radiales (eje ordenadas, m) y axiales (eje de abcisas, m) del equipo 6 (7,47 T, ultraapantallado). Mapa elaborado a partir de los datos del fabricante (Tabla TR9)

Curva fabricante Equipo Innova 400 (código 7)

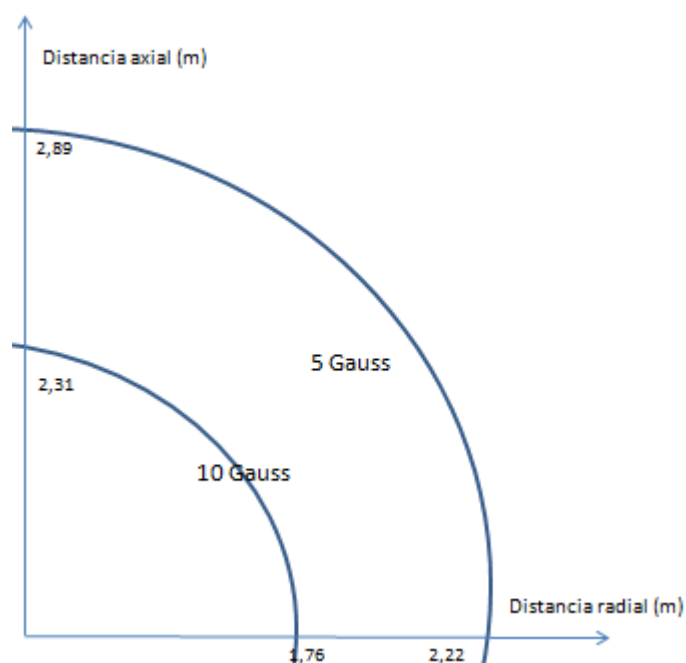


Figura FR22: mapa de isóneas de inducción magnética (B , Gauss; 1 Gauss= 0,1 mT) a diferentes distancias radiales (eje ordenadas, m) y axiales (eje de abscisas, m) del equipo 7 (9,4 T, apantallamiento estándar). Mapa elaborado a partir de los datos del fabricante (Tabla TR9)

Curva fabricante Equipo Varian 500 (código 15)

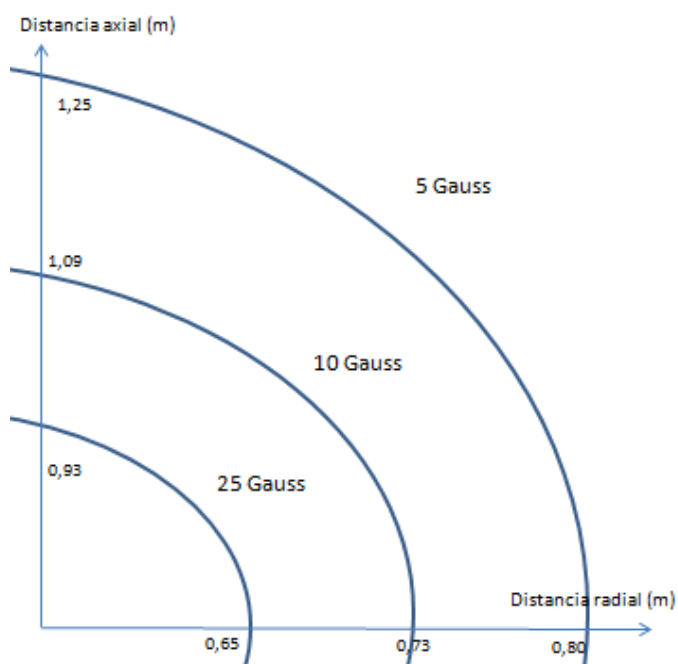


Figura FR23: mapa de isóneas de inducción magnética (B , Gauss; 1 Gauss= 0,1 mT) a diferentes distancias radiales (eje ordenadas, m) y axiales (eje de abscisas, m) del equipo 15 (11,7 T, ultraapantallado). Mapa elaborado a partir de los datos del fabricante (Tabla TR9)

Los resultados de inducción magnética estimados a partir de los datos numéricos proporcionados por los fabricantes ($B_{\text{fabricante}}$, mT) se presentan en la tabla TR10. La estimación se ha realizado considerando las distancias del núcleo del equipo a cabeza / tórax y a la extremidad actuante del operario expuestas en la tabla TR5, para las operaciones realizadas en las inmediaciones de los equipos. Los datos de distancias se han extrapolado al valor de inducción magnética de la curva más próxima a la región anatómica del trabajador considerada. En ningún caso ha sido posible estimar el valor de inducción magnética durante la operación de ajuste de parámetros, ya que los fabricantes no proporcionan datos numéricos de inducción magnética en los espacios que quedan por debajo de la altura del núcleo magnético. Información en dicha posición de trabajo, ubicada en la parte inferior del equipo.

B fabricante (mT)				
Operación	Código 2	Código 6	Código 7	Código 15
Introducción muestra (mano)	>2,5	> 1	2	< 0,5
Introducción muestra (cabeza-tórax)	>2,5	> 1	1,5	< 0,5
Ajuste de parámetro (mano)	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Ajuste de parámetro (cabeza-tórax)	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos

Tabla TR10: Valores de inducción magnética en las áreas anatómicas de interés ($B_{\text{fabricante}}$, mT) estimados usando mapas de isolíneas elaborados a partir de las tablas de datos numéricas proporcionadas por los fabricantes de los equipos 2, 6, 7 y 15.

4.2.3. ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA AMBIENTAL A PARTIR DE LOS DATOS PROPORCIONADOS POR LOS FABRICANTES

Con el fin de realizar un análisis comparativo entre los datos de exposición ambiental obtenidos en nuestros registros tomados a 1,5 metros sobre el suelo y los proporcionados por los fabricantes, a partir de estos se ha representado los gradientes de inducción magnética en el ambiente, en función de la distancia a los equipos. Los gráficos de las figuras FR24 y FR25 muestran los gradientes de inducción magnética B (mT), calculados a una altura de 1,50 metros sobre suelo, para los equipos con códigos 12 y 17, respectivamente. No ha sido posible obtener el mismo tipo de representación por los equipos 2, 6, 7, 9 y 15, ya que en estos casos los fabricantes no proporcionan datos de inducción magnética a la altura de 1,50 metros.

$B_{\text{fabricante}}$ en las proximidades del equipo 12

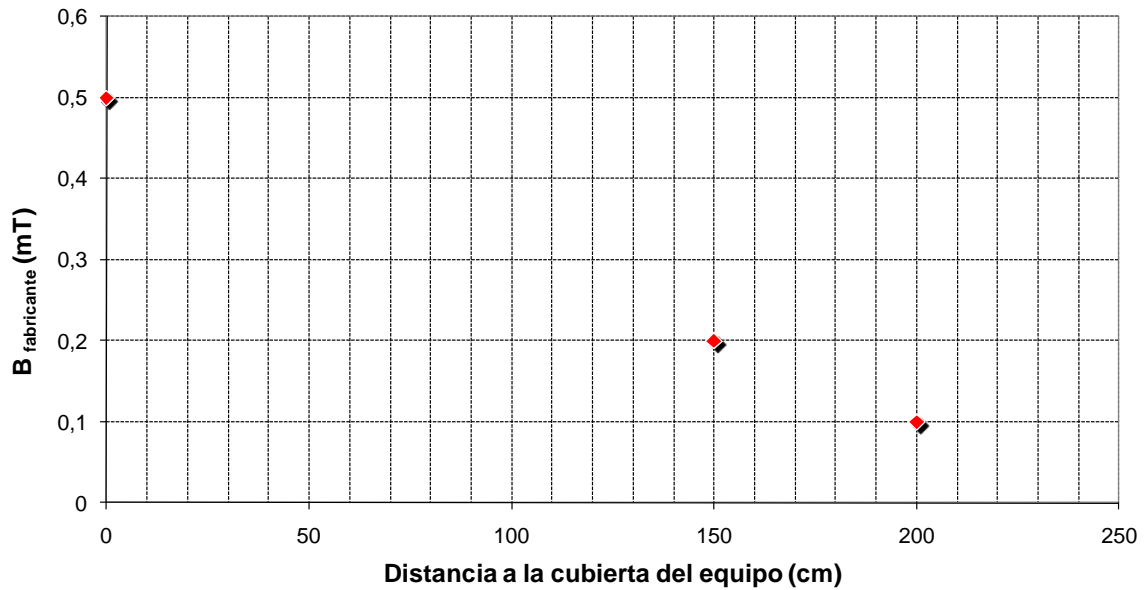


Figura FR24 Valores de inducción magnética ($B_{\text{fabricante}}$, en mT) en el ambiente, a una altura de 1,50 m sobre el suelo, estimados a partir de los datos del fabricante proporcionados por el fabricante del equipo 12 (11,7 T, apantallamiento estándar y emplazado en foso)

$B_{\text{fabricante}}$ en las proximidades del equipo 17

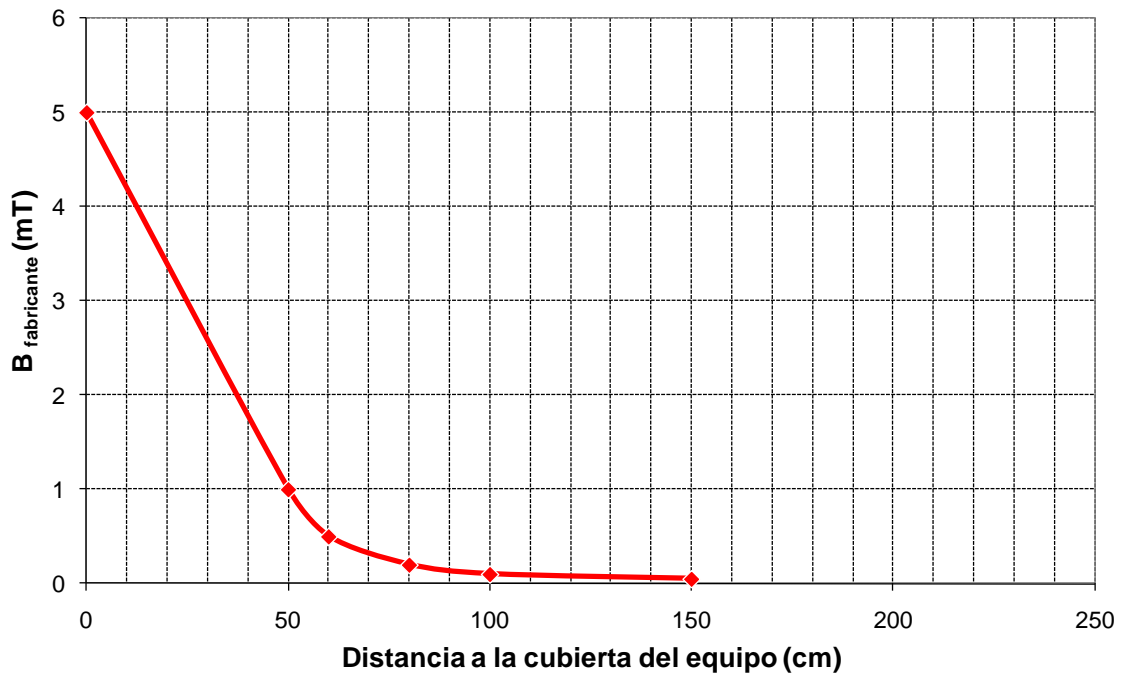


Figura FR25 Valores de inducción magnética ($B_{\text{fabricante}}$, en mT) en el ambiente, a una altura de 1,50 m sobre el suelo, estimados a partir de los datos proporcionados por el fabricante del equipo 17 (núcleo de 14,1 T, ultraapantallado, y elevado sobre el suelo)

4.3. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS REGISTRADOS MEDIANTE MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS VERSUS ESTIMACIÓN DE LA INDUCCIÓN MAGNÉTICA A PARTIR DE LA INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL FABRICANTE

4.3.1 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN EN REGIONES ANATÓMICAS DE INTERÉS DURANTE LA MANIPULACIÓN DE LOS EQUIPOS

La tabla TR11 compara, los resultados del nivel de exposición a CME (B, mT) obtenidos mediante medición de los parámetros físicos (B medición) con los resultados de la estimación realizada a partir de los datos proporcionados por el fabricante (B fabricante). Los equipos 9 y 12 disponen de brazo robotizado, por lo que no se ha medido ni estimado la exposición a nivel de la mano durante la operación de introducción de la muestra. Para esos equipos, el valor de inducción magnética en la región de la cabeza / tórax durante la operación de introducción de la muestra, se ha medido y estimado en la posición ocupada por el operario cuando coloca la muestra en el brazo robotizado. A falta de los datos necesarios proporcionados por el fabricante, no es posible hacer una comparativa entre $B_{\text{medición}}$ y $B_{\text{fabricante}}$ para la exposición corporal durante operación de ajuste de parámetros.

Tareas equipo código 2	B medición (mT)	B fabricante (mT)
Introducción muestra (mano)	15,1 ± 0,2	>2,5
Introducción muestra (cabeza-tórax)	7,5 ± 0,2	>2,5
Tareas equipo código 6	B medición (mT)	B fabricante (mT)
Introducción muestra (mano)	0,41 ± 0,03	>1
Introducción muestra (cabeza-tórax)	0,15 ± 0,04	>1
Tareas equipo código 7	B medición (mT)	B fabricante (mT)
Introducción muestra (mano)	24,8 ± 0,3	~2

Introducción muestra (cabeza-tórax)	11,7 ±0,5	~1,5
Tareas equipo código 9	B medición (mT)	B fabricante (mT)
Introducción muestra (mano)	(-)	(-)
Introducción muestra (cabeza-tórax)	0,006	<0,5
Tareas equipo código 12	B medición (mT)	B fabricante (mT)
Introducción muestra (mano)	(-)	(-)
Introducción muestra (cabeza-tórax)	0,005 mT	~0,4
Tareas equipo código 15	B medición (mT)	B fabricante (mT)
Introducción muestra (mano)	1,79 ±0,05	<0,5
Introducción muestra (cabeza-tórax)	0,62 ± 0,06	<0,5
Tareas equipo código 17	B medición (mT)	B fabricante (mT)
Introducción muestra (mano)	1,34 ± 0,09	~ 2
Introducción muestra (cabeza-tórax)	0,17 ± 0,04	~ 0,5

Tabla TR11: resultados de exposición a CME obtenidos mediante medición (B_{medido} , mT) versus los estimados a partir de la información proporcionada por el fabricante ($B_{fabricante}$, mT) durante la tarea de introducción muestra en los equipos 2, 6, 7, 9, 12, 15 y 17. Para la tarea de ajuste de parámetros no se dispone de datos del fabricante. (-): equipos con brazo robotizado

En las figuras FR 26 y FR 27 se representan gráficamente los datos de la tabla TR11 correspondientes a la comparación entre los valores de exposición corporal medidos ($B_{medición}$, mT) y estimados ($B_{fabricante}$, mT) durante la tarea de introducción de la muestra en los equipos 2, 6, 7, 9, 12, 15 y 17. En figura FR26, correspondiente a la exposición de la mano durante la operación de introducción de la muestra, no se han representado los equipos 9 y 12, que disponen de brazo robotizado para la realización de esa tarea.

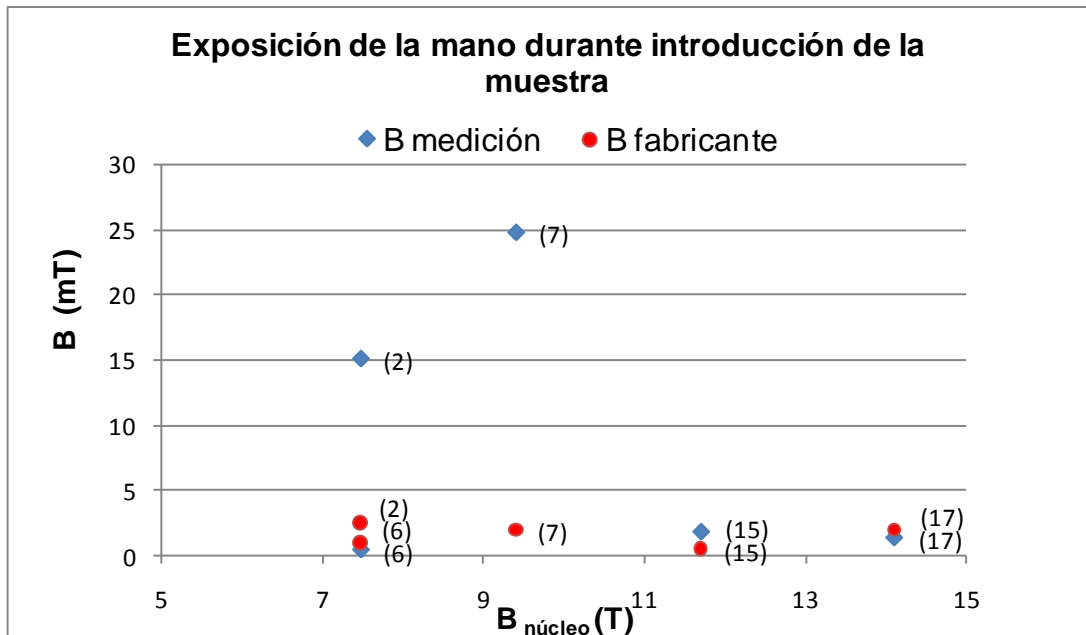


Figura FR26: valor de inducción magnética en la mano durante la operación de introducción de la muestra en los equipos, identificados por su número de código entre paréntesis, y por el valor de B de su núcleo (B_{nucleo} , T). Resultados de las mediciones (B_{medido} , mT) versus datos del fabricante ($B_{fabricante}$, mT)

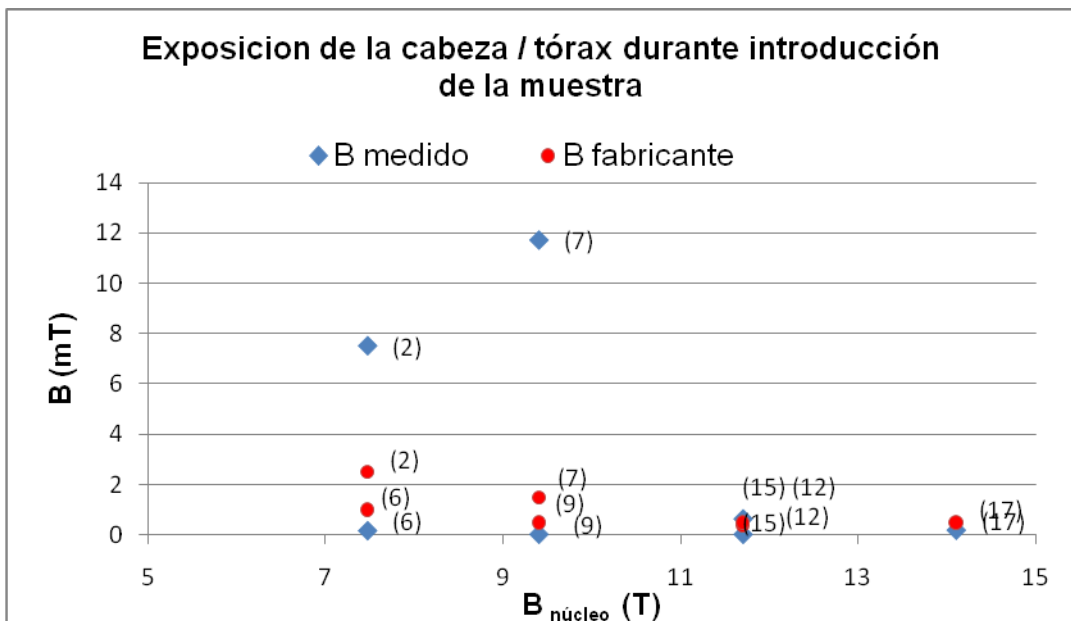


Figura FR27: valor de inducción magnética en la cabeza-tórax durante la operación de introducción de la muestra en los equipos, identificados por su número de código entre paréntesis, y por el valor de B de su núcleo (B_{nucleo} , T). Resultados de las mediciones (B_{medido} , mT) versus datos del fabricante ($B_{fabricante}$, mT)

4.3.2. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL NIVEL DE CME AMBIENTAL EN LAS PROXIMIDADES DE LOS EQUIPOS DE ESPECTROMETRÍA

Los gráficos de las figuras FR28 y FR29 muestran la comparativa entre los valores de B (mT) medidos a diferentes distancias de los equipos 12 y 17 y los valores estimados a partir de los mapas de isolíneas de inducción magnética proporcionados por el fabricante de dichos equipos. Como se ha indicado antes, las mediciones de CME se tomaron a la altura de 1,50 metros sobre el suelo a las distancias de 0, 40, 80, 120, 160 y 200 cm de la cubierta de los equipos. A partir de los datos obtenidos del fabricante se calcularon también los valores a 1,50 metros. No ha sido posible establecer el mismo tipo de comparación en el caso del equipo 9, ya que el fabricante no proporciona los datos que permiten calcular los valores de CME a la altura de 1,50 metros.

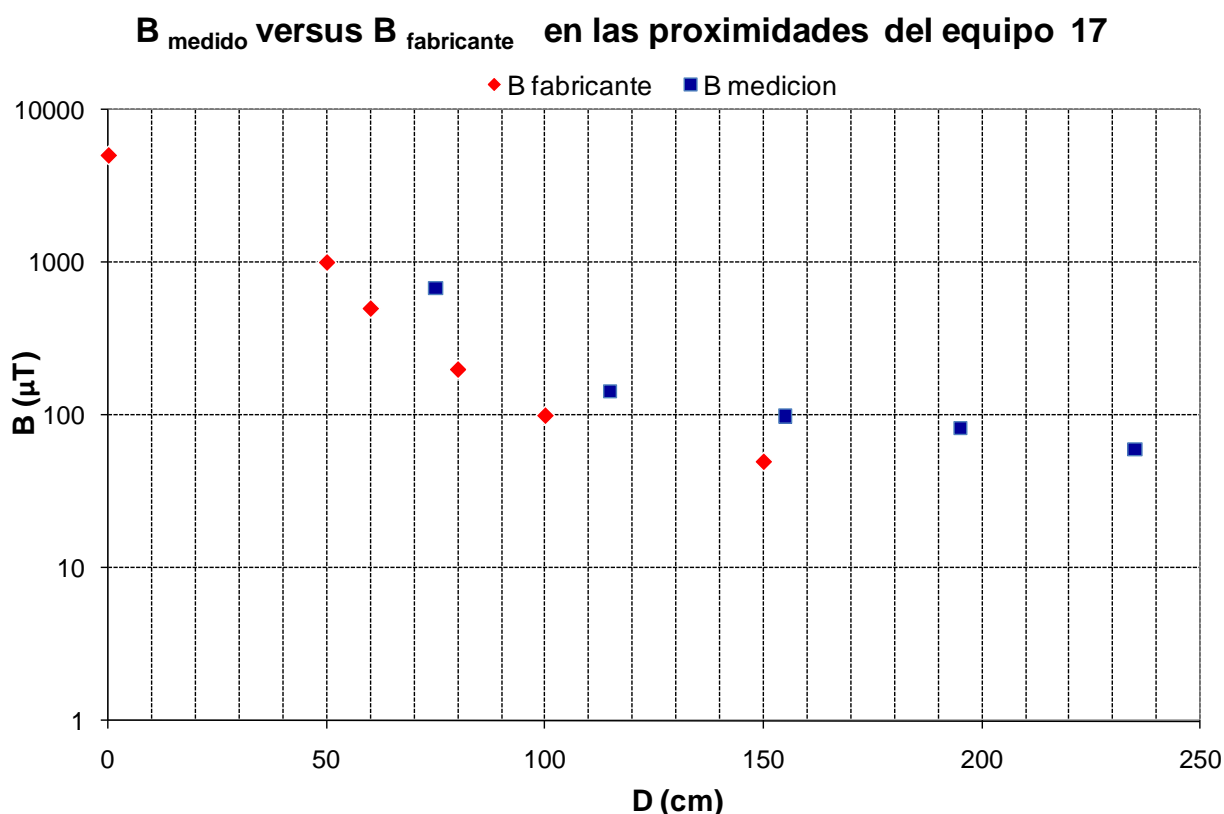


Figura FR28 : comparativa del gradiente de inducción magnética (B, μT) en escala logarítmica obtenido de las mediciones y el calculado a partir de los datos del fabricante del equipo 17: (núcleo de 14,1 T, ultraapantallado, y elevado sobre el suelo) a una altura de 150 cm del suelo. D: distancia (cm) al núcleo del equipo.

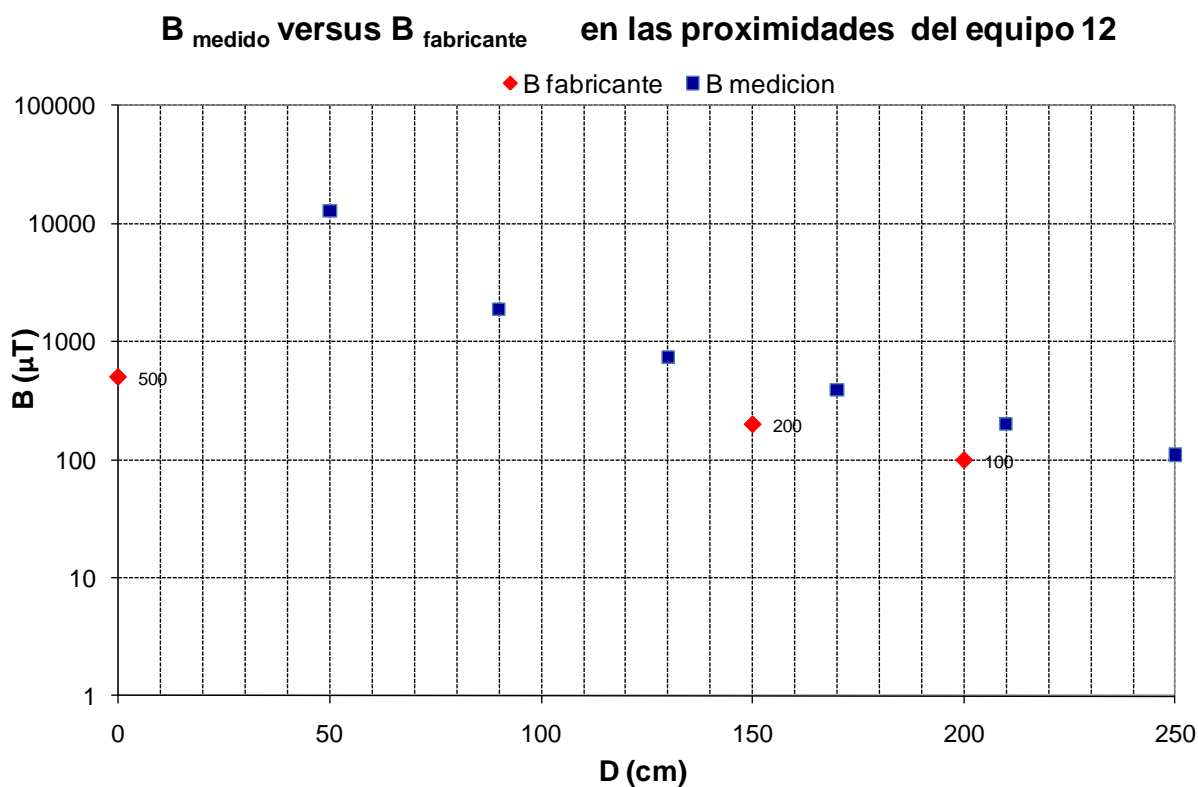


Figura FR 29: Comparativa del gradiente de inducción magnética (B , μT) en escala logarítmica obtenido de las mediciones y el calculado a partir de los datos del fabricante del equipo 12: (11,7 T en el núcleo, apantallamiento estándar, emplazado en foso). D : distancia (cm) a al núcleo del equipo.

DISCUSIÓN

5. DISCUSION

Se admite que, teniendo en cuenta las características de los equipos de espectrometría por resonancia magnética, los usuarios de estos aparatos están expuestos a radiaciones no ionizantes en los rangos CME y CEM RF. Sin embargo, hasta la fecha se carece de información precisa y fiable sobre la exposición personal y ambiental en las unidades de espectrometría. En general, la única información disponible, en forma de tablas o de mapas, es la proporcionada por los fabricantes de algunos de los equipos, que describe los valores de campo estático a distancias discretas del núcleo magnético de sus aparatos. En este escenario, y ante la posibilidad de que la citada información del fabricante resulte insuficiente a la hora de evaluar correctamente la exposición ocupacional, existe un consenso, generalizado entre expertos y autoridades, en el sentido de que es necesario contar con datos fiables de exposición, basados en la toma de mediciones de campo in situ haciendo uso de metodologías y equipos de medición adecuados.

Para dar respuesta a esa necesidad, y con el fin de caracterizar los niveles y condiciones de exposición ocupacional a campos magnéticos y electromagnéticos emitidos por equipos de espectrometría por RMN en el sector de la investigación, en este trabajo se han realizado mediciones de CME y RF durante la ejecución de las diferentes tareas desarrolladas por personal investigador en el uso de 19 espectrómetros ubicados en 9 centros diferentes de investigación en España.

VALORACIÓN DE LA EXPOSICIÓN OCUPACIONAL Y AMBIENTAL A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

Los resultados de las mediciones revelaron que los CEM de radiofrecuencia generados por los equipos de RMN quedaron en todos los casos confinados en el interior de los aparatos, no registrándose en ningún caso emisiones mensurables ($E \geq 0,01$ V/m) hacia el exterior. En contraste, los datos sí revelaron niveles elevados de CM estático (muy superiores a los basales: $B \gg 0,05$ mT) en las inmediaciones de los equipos. Los niveles de exposición de los trabajadores a estos campos estáticos dependían de varios factores, incluyendo el valor de B en el núcleo,

específico de cada equipo, el blindaje del aparato (estándar o ultraapantallado), el tipo de tarea realizado por el operario y el montaje (foso o pedestal) o instalación del equipo en la sala.

Tal como cabe esperar, y según lo revelan los resultados de las mediciones resumidos en las tablas y figuras correspondientes, a igualdad de otras variables, como el tipo de tareas y el apantallamiento, los niveles de CME registrados en las proximidades de los equipos de RMN eran más elevados cuanto más alto era el valor de densidad de flujo magnético del núcleo del aparato. En lo referente a las tareas, los valores de exposición más altos se alcanzaron en aquellas que requerían una mayor proximidad a los equipos.

En concreto, la tarea con los mayores niveles registrados se corresponde con la operación de ajuste de parámetros, en la que el trabajador accede a la parte inferior del equipo (Fig. FM5), debido a la disposición de los blindajes y a la proximidad al núcleo del imán, ubicado en el tercio inferior del espectrómetro. Así, durante la realización de esta tarea, los valores máximos de inducción magnética fueron 683,00 mT en la mano y 135,70 mT en el tórax para dos equipos con apantallamiento estándar de 14,1 T y 7,47 T en el núcleo, respectivamente. Según se ha descrito en el apartado metodológico, estas tareas se hacían preferentemente en postura yacente, de forma que el tórax y la cabeza se encontraban a distancias similares del equipo. Sin embargo, cuando el procedimiento se realizaba en postura sedente o en cuclillas, los niveles de exposición eran más elevados en la cabeza, situada más próxima al equipo que el tórax, llegándose a alcanzar en la cabeza valores máximos de 396,00 mT para un equipo con apantallamiento estándar y de 14,1 T en el núcleo.

La otra tarea que comportaba elevados niveles de exposición es la operación de introducción de la muestra, con un valor máximo de inducción de campo magnético de 39,60 mT en la mano y 32,20 mT en la cabeza-tórax para espectrómetros de 14,1 T y 9,4 T en el núcleo, respectivamente. Aunque el núcleo magnético está ubicado en el tercio inferior del equipo, los valores medios de campo registrados durante la operación de introducción de la muestra en la zona del tórax del trabajador (a una altura media del equipo) son inferiores a los valores medios

registrados en la zona de las manos (al nivel de la parte superior del equipo). Esto revela que, en general, el apantallamiento es más eficaz en la sección intermedia del equipo, que en su porción superior. Solo el equipo (1), el más antiguo de los estudiados con apantallamiento estándar, representa una excepción a la norma general, ya que en este caso el valor de B medido a nivel del tórax es superior al registrado en la zona de la mano.

La eficacia del apantallamiento en los diferentes modelos estudiados se ha investigado también mediante el análisis comparativo de los niveles de exposición en las proximidades de equipos con valores equivalentes de campo B en el núcleo. Para ello son particularmente útiles los datos de exposición en la mano durante la tarea de introducción de la muestra, ya que estos valores presentan una baja variabilidad, debido a la homogeneidad en la posición adoptada por los distintos operarios y en el protocolo operacional. En este caso, los resultados revelan que en los espectrómetros con apantallamiento estándar los niveles de exposición a CME en la mano del operario eran entre 20 y 65 veces superiores a los correspondientes equipos ultraapantallados, con idéntico valor de B en el núcleo (Figuras FR9- FR12.) De ahí que los resultados de las mediciones revelen que los niveles de exposición en las inmediaciones de fuentes ultraapantalladas con valores de inducción muy altos en el núcleo, pueden ser considerablemente inferiores a los recibidos en trabajos con dispositivos con apantallamiento estándar cuyo núcleo tiene valores de inducción magnética más bajos.

En relación con el diseño de las instalaciones, los datos muestran que los operarios de los equipos (9) y (12) recibieron niveles de exposición considerablemente inferiores que los que trabajaban con equipos con el mismo valor de campo en el núcleo. Estas diferencias son atribuibles al hecho de que los aparatos (9) y (12) estaban ubicados en fosos de aproximadamente un metro de profundidad y estaban dotados de brazo robotizado (Figura FD1). En consecuencia, la cabeza y torso del trabajador se mantenían en una posición elevada y alejada con respecto al núcleo magnético y, además, el operario no necesitaba aproximarse a los equipos para realizar la tarea de colocación de la muestra, que era depositada en el receptáculo del brazo robótico. De lo anterior se deduce que, junto con el apantallamiento, la dotación de un brazo robotizado y la ubicación en foso son estrategias técnicas eficaces para la

minimización de la exposición ocupacional a los CME emitidos por los equipos de espectrometría por RMN.



Figura FD1: brazo robotizado para la inserción de la muestra en un espectrómetro ubicado en foso.

VALORACIÓN, MEDIANTE COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES, DE LOS DATOS DEL FABRICANTE SOBRE LOS NIVELES DE CAMPO ESTÁTICO GENERADOS POR SUS EQUIPOS

El análisis comparativo entre los niveles de exposición obtenidos mediante medición de los parámetros físicos y los estimados a partir de los datos del fabricante revela que para algunos de los equipos (6 y 17) y durante la operación de introducción de la muestra existe una consistencia aceptable entre los resultados obtenidos por ambos métodos (tabla TR11 y figuras FR26 y FR27). Consistencia que también se observa entre los niveles ambientales a la altura de 1,5 m en las proximidades de los equipos 12 y 17, cuyo fabricante había proporcionado la información necesaria (Figuras FR28 y FR29). Sin embargo, para otros espectrómetros (2 y 7) las diferencias entre ambas series de resultados son demasiado significativas y revelan que los datos del fabricante pueden infravalorar en un orden de magnitud los niveles reales, medidos, de exposición del trabajador (figura FD2).

Además, conviene destacar aquí el hecho de que en ningún caso los fabricantes proporcionaron datos válidos sobre valores de CME en zonas situadas por debajo del núcleo magnético de sus equipos. Esta carencia ha impedido realizar los cálculos pertinentes para estimar la exposición de los trabajadores durante la tarea de ajuste de parámetros, en la que los datos de las mediciones revelaron los máximos valores de exposición registrados.

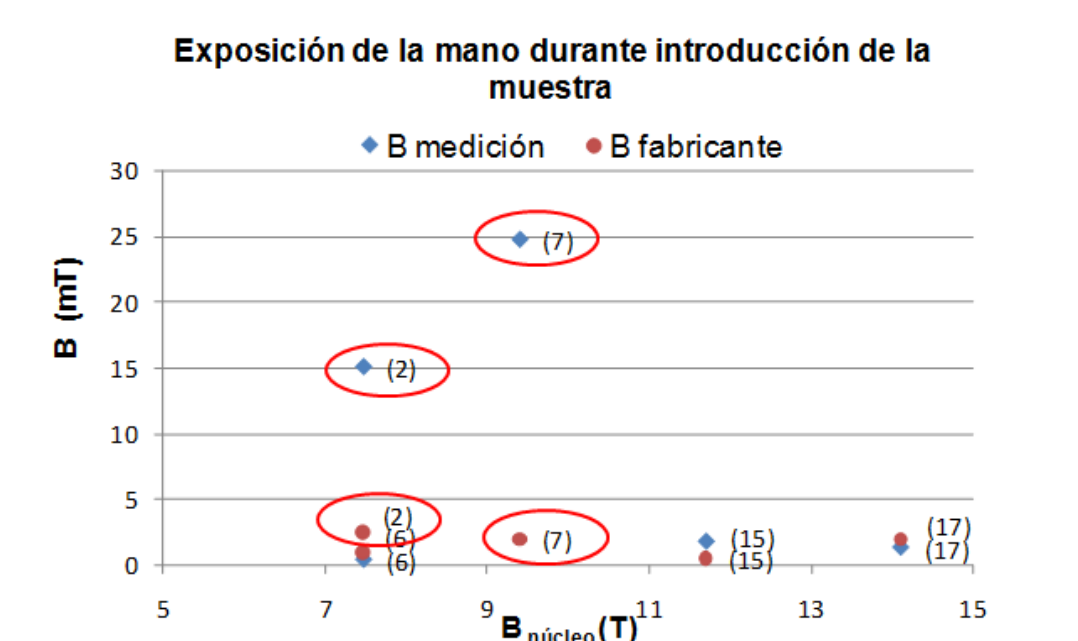


Figura FD2: Comparativa de resultados del valor de inducción magnética medido ($B_{medición}$, mT) versus, el valor estimado a partir de los datos del fabricante ($B_{fabricante}$, mT), de la exposición de la mano durante la operación de introducción de la muestra en los equipos identificados por su código respectivo (entre paréntesis) y por el valor de $B_{núcleo}$ (T) de su núcleo magnético. Los valores $B_{medición}$ y $B_{fabricante}$, de los equipos 2 y 7, destacados mediante círculos rojos, ponen de manifiesto la tendencia de los datos del fabricante a subestimar los niveles de exposición en algunos equipos y tareas.

De lo anterior se concluye que, para algunos modelos de espectrómetros los datos del fabricante pueden ser útiles para evaluar los niveles de CME en las proximidades, sobre todo en lo que se refiere al ambiente del laboratorio. Sin embargo para cubrir la necesidad de determinar con precisión la exposición real de los trabajadores durante la ejecución de sus diversas tareas, es preciso, en general, realizar mediciones de inducción magnética in situ. En este sentido el procedimiento

de medición propuesto en el presente estudio se ha revelado útil para caracterizar con precisión la exposición en todas las tareas realizadas por el operario, conforme a lo propuesto por la norma legal vigente.

EVALUACIÓN DE RADIOPROTECCIÓN OCUPACIONAL BASADA EN LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES, SEGÚN LOS CRITERIOS DE LA NORMATIVA VIGENTE PARA LA PREVENCIÓN DE EFECTOS DETERMINISTAS

En lo que concierne a la protección de los trabajadores expuestos a campos magnético y electromagnéticos en el rango de los analizados en el presente estudio, los estándares internacionales para la protección ocupacional a radiaciones no ionizantes en el espectro 0 Hz – 300 GHz establecen niveles de acción y valores límite de exposición que, de ser rebasados durante intervalos breves, del orden de minutos o segundos, pueden tener efectos nocivos inmediatos (Directiva de Europea 2013/35/UE). Tales criterios y estándares han sido adoptados por la legislación española mediante la publicación del Real Decreto 299/2016, de 29 de julio, “sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos.” Este Real Decreto transpone la citada Directiva Europea 2013/35/UE “sobre las disposiciones mínimas de salud y seguridad relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de agentes físicos (campos electromagnéticos)”, la cual adopta a su vez los criterios de ICNIRP (2009 a-b, 2010).

En el caso de los valores de referencia para CME, el RD 299/2016 establece valores límite instantáneos para la prevención de efectos sensoriales bajo condiciones de trabajo normales, de 2 T para exposiciones del cuerpo del trabajador, y de 8 T para exposiciones localizadas en las extremidades. Para efectos en la salud y en condiciones controladas de trabajo, el límite de exposición instantáneo del cuerpo asciende a 8 T. Adicionalmente el RD establece niveles de acción para prevenir interferencias con dispositivos médicos activos implantados (0,5 mT) y frente al riesgo de proyección de materiales ferromagnéticos (3 mT). Los valores de referencia del Real Decreto se resumen en la tabla TD1:

Características de la exposición	Densidad de flujo magnético
Valor límite relacionado con efectos sensoriales	
Condiciones de trabajo normales	2 T
Exposición localizada en extremidades	8 T
Valor límite relacionado con efectos para la salud	
Condiciones de trabajo controladas	8 T
Nivel de acción	
Interferencias con dispositivos médicos activos implantados, por ejemplo marcapasos cardíacos	0,5 mT
Riesgo de atracción y proyección en campo periféricos de fuentes de campos intensos	3 mT

Tabla TD1: valores de referencia en términos de valores límite de exposición y niveles de acción para campo magnético estático establecidos en el RD 299/2016

Los resultados de las mediciones de CME descritas en esta memoria muestran que, para las diferentes tareas realizadas con los distintos modelos de espectrómetros por RMN estudiados, los niveles máximos registrados se encontraban en todos los casos por debajo de los valores límite instantáneos para cuerpo y extremidades relacionados con efectos sensoriales y efectos para la salud establecidos en el RD (Fig. FD3). Por lo tanto, en lo que se refiere a la prevención de efectos a corto plazo los niveles de exposición ocupacional registrados cumplen, en términos generales, las exigencias establecidas en la normativa legal vigente, y no es necesario adoptar medidas preventivas adicionales en este caso. No obstante, los resultados resumidos en la misma figura revelan también que durante las operaciones de introducción de la muestra o de ajuste de parámetros, que se realizan en proximidad al equipo, los operarios pueden verse expuestos a niveles $B \geq 500 \mu\text{T}$ (figura FD3). Estos niveles incumplirían los valores de acción específicos para trabajadores portadores de dispositivos médicos activos implantados, establecidos en el RD 299/2016, cuyo objetivo es prevenir posibles efectos indirectos debidos a disfunciones de los implantes por problemas de compatibilidad electromagnética.

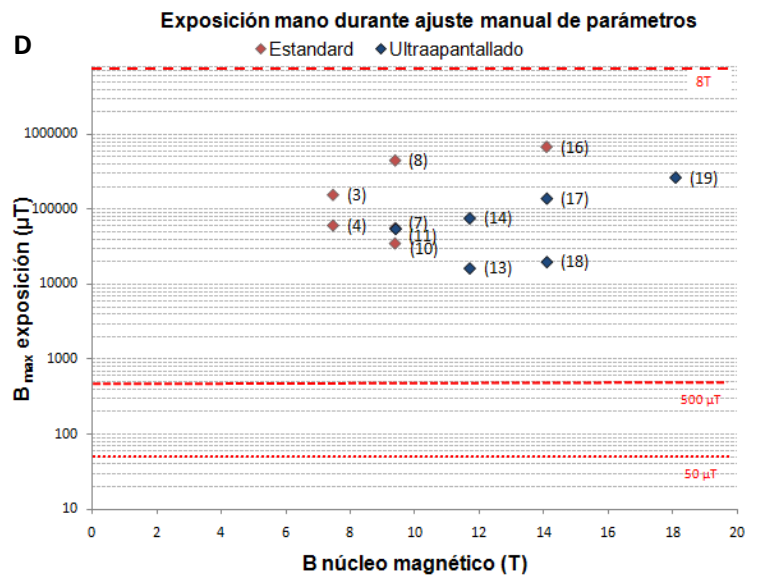
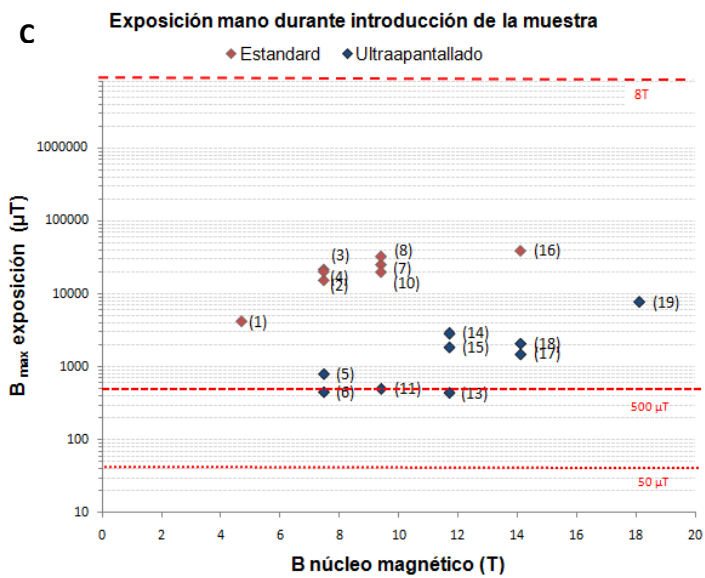
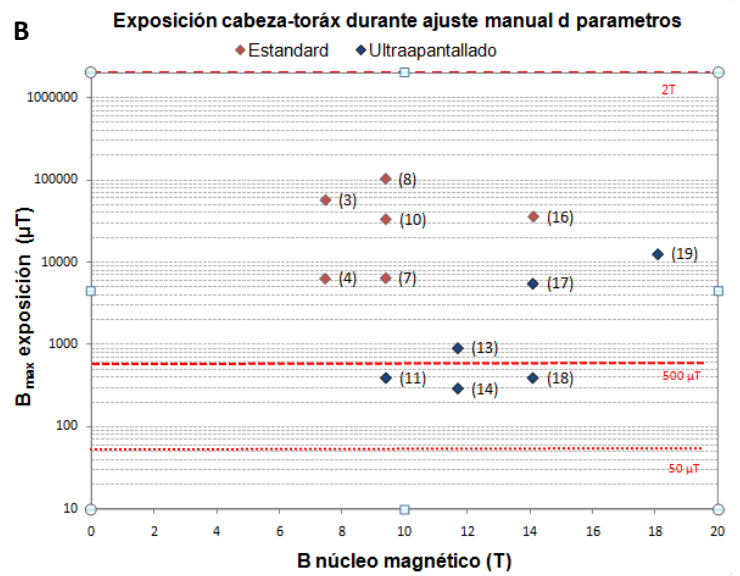
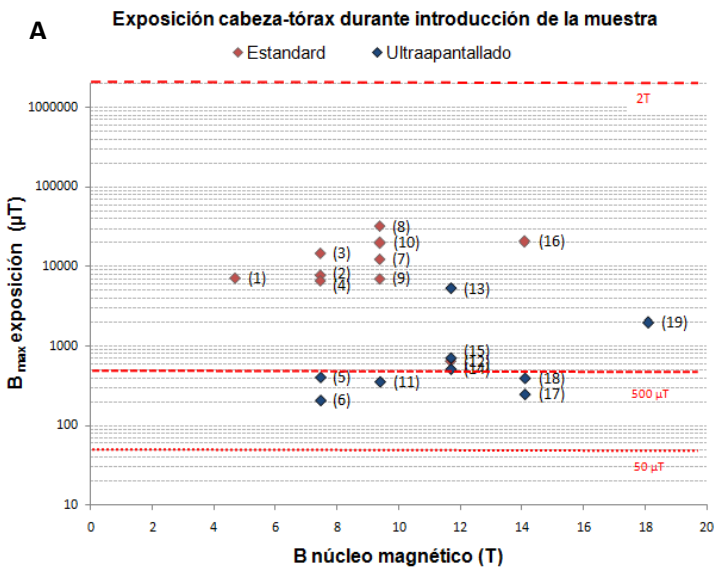


Figura FD3: Valor máximo de inducción magnética (B , μT) recibida a nivel de cabeza-tórax durante la operación de introducción de la muestra (A) y durante las operaciones de ajuste de parámetro (B) y a nivel de la mano actuante durante la operación de introducción de la muestra (C) y durante las operaciones de ajuste de parámetro (D). Las líneas rojas discontinuas se corresponden con los valores de referencia para trabajadores (2T), portadores de dispositivos médicos activos implantados (500 μT) y nivel basal correspondiente con el campo geomagnético terrestre (50 μT). Los números entre paréntesis son los códigos asignados a cada equipo según la tabla TM3, cuyo valor de B (T) en el núcleo aparece en el eje X, de abcisas.

Por otra parte, conviene tener en cuenta que algunos niveles de exposición registrados en las mediciones sí superarían el valor de referencia establecidos en el estándar europeo D.2004/40/CE para la protección ante la exposición ocupacional a campos electromagnéticos, que estaba vigente cuando se inició la campaña de mediciones descrita aquí. Dicha Directiva, actualmente derogada y que no llegó a transponerse a los Estados Miembros, adoptaba los criterios originales de ICNIRP (Guidelines 1998), con valores límite de 200 mT para exposiciones a campo magnético estático. La Directiva 2004/40/CE fue sustituida por el texto actual debido a las dificultades que el cumplimiento de los valores establecidos podría suponer para el desarrollo de determinadas técnicas. Tal como expone la Directiva 2013/35/UE en sus considerandos *“las partes interesadas, en particular el colectivo médico, se mostraron muy preocupadas en cuanto a la posible incidencia de la aplicación de dicha Directiva en la utilización de procedimientos médicos basados en imágenes médicas. Se manifestó también preocupación en cuanto a la incidencia de la Directiva en determinadas actividades industriales”*. Esta preocupación manifestada por determinados sectores impulsó la revisión de los estándares internacionales establecidos hasta la fecha. Así, ICNIRP revisó sus criterios de 1998 y publicó en 2009 y 2010 nuevos valores de referencia para campo magnético estático (ICNIRP 2009a) y campos electromagnéticos variables (ICNIRP 2009b, 2010), que para determinadas frecuencias de interés, incrementaban hasta en dos órdenes de magnitud los niveles de exposición que no debían rebasarse. Los nuevos criterios y valores propuestos por ICNIRP fueron adoptados por el estándar europeo de 2013, que derogó y sustituyó al estándar previo, vigente desde 2004. Para la protección ante efectos deterministas nocivos por exposición ocupacional a campo magnético estático, esta modificación de los valores de referencia supuso un incremento de un orden de magnitud (de 0,2 a 2 T) en los límites de exposición ocupacional establecidos por los estándares, admitiéndose niveles de exposición de hasta 8T en condiciones de trabajo controladas o en la zona de las extremidades).

Adicionalmente la Directiva 2013/35/UE incorpora otras modificaciones en relación con el texto del estándar anterior, como la identificación de colectivos profesionales exentos del cumplimiento de los valores límite y de acción. Estos colectivos lo componen el personal sanitario o técnico que trabaja con resonancia magnética para diagnóstico por imagen médica, trabajadores en instalaciones militares, así como cualquier sector o actividad en que la exposición esté debidamente

justificada. Para estos colectivos la superación de los niveles de exposición establecidos está permitida, si se adoptan medidas preventivas específicas. Además de estos supuestos de exención, con carácter general para todos los trabajadores expuestos a campos electromagnéticos, la norma permite la superación de los valores límite para efectos sensoriales, si lo justifica el proceso. También se pueden superar los valores límite para efectos deterministas en la salud si, además, se implanta una serie de medidas específicas, y siempre y cuando la superación sea sólo temporal y se limiten los movimientos del trabajador en el seno del campo magnético, para prevenir la inducción de corrientes en los tejidos y órganos expuestos.

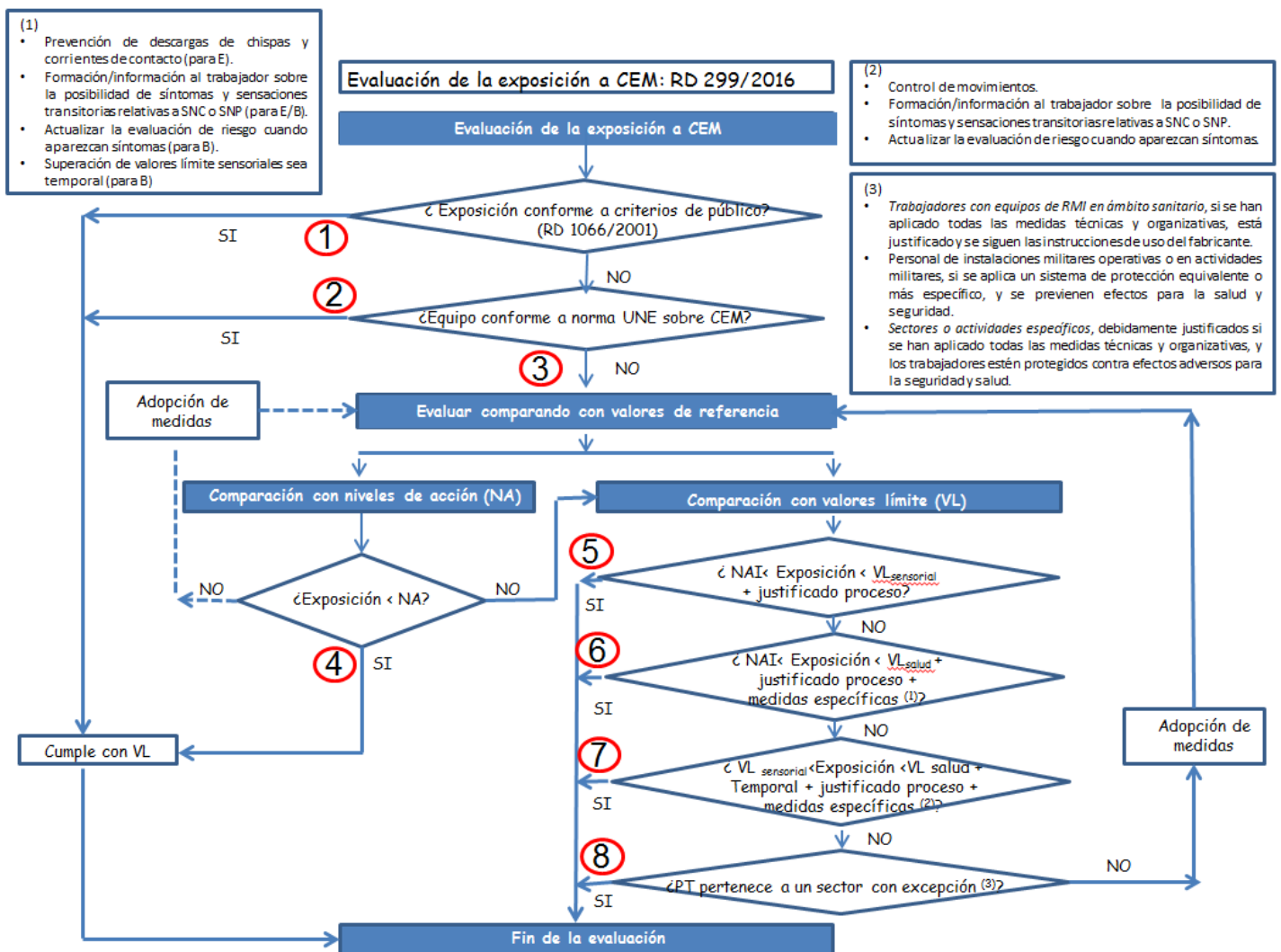


Figura FD4: criterios de actuación para la evaluación de la exposición, según el estándar europeo de 2013 y el RD español de 2016

LA RADIOPROTECCIÓN OCUPACIONAL SEGÚN LOS CRITERIOS PROPUESTOS AQUÍ PARA LA PREVENCIÓN DE EFECTOS DETERMINISTAS

La exenciones al cumplimiento de los valores límite contempladas por el RD 299/2016 constituyen la principal diferencia entre la normativa legal vigente y la metodología de valoración de la exposición propuesta en el presente trabajo para la protección ante efectos deterministas (figura FM9). La discrepancia se basa primordialmente en que una revisión actualizada de la literatura en la materia indica que, para algunas de las condiciones en las que la norma permite la superación de los valores límite de exposición a CME, la necesaria garantía de seguridad ocupacional carece de un respaldo firme por parte de la evidencia científica disponible. Y, en consecuencia, el objetivo principal de algunas de dichas exenciones para determinados colectivos profesionales sería facilitar el cumplimiento de la normativa.

En todo caso, ateniéndonos a los criterios propuestos aquí para la valoración del nivel de exposición frente a efectos a la salud conocidos a corto plazo, mediante comparación con los estándares establecidos, representado en la figura FM9, concluiremos que, dado que los niveles de exposición ocupacional registrados son en todos los casos inferiores a los valores de acción, no es necesario adoptar medidas preventivas adicionales.

EVALUACIÓN DE RADIOPROTECCIÓN OCUPACIONAL BASADA EN LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES, SEGÚN LOS CRITERIOS PROPUESTOS AQUÍ PARA LA PREVENCIÓN DE POTENCIALES EFECTOS ESTOCÁSTICOS

1: Los potenciales efectos estocásticos de la exposición ocupacional a niveles subumbral de CME.

El conjunto más amplio de evidencia sobre potenciales efectos estocásticos proviene de estudios epidemiológicos, metrológicos y experimentales relacionados con la exposición de los trabajadores y pacientes a los campos recibidos durante las

exploraciones para el diagnóstico basado en imágenes médicas obtenidas por resonancia magnética (RMI).

Los datos recogidos en la tabla TD2 revelan que el colectivo profesional que opera con equipos de RMI con núcleos magnéticos de 0,6T; 1,5 y 3 T presentan niveles máximos de exposición en un rango aproximado de 0,3 T – 0,8 T, respectivamente

B núcleo (T)	Equipo RMI	B max (mT)
0,6	Fonar open-bore	380
1,5	GE Signa, Twinspeed	320
1,5	GE Signa Echospeed	518
1,5	Siemens Symphony	554
1,5	Siemens Sonata	477
3	Siemens Trío	822

Tabla TD2: datos de exposición ocupacional en operarios de RMI en términos del máximo valor de inducción magnética B_{max} (mT), con el correspondiente modelo y su valor de inducción magnética en el núcleo $B_{núcleo}$ (T) (Fuente: Bradley et al., 2007)

La comparación de estos datos con los resultados de nuestras mediciones permite concluir que, en general, los niveles de exposición ocupacional en usuarios de equipos de RMI superan a los correspondientes en los espectrometristas de RMN. Ello a pesar que estos últimos manejan equipos con valores más elevados de inducción magnética en el núcleo. En la diferencia intervienen múltiples factores, como el tipo de tareas, la posición ocupada por el trabajador en el desarrollo de la actividad y las características y diseño de los equipos, entre otros. En lo que se refiere a las diferencias en el tipo de tareas realizadas por estos colectivos, conviene recordar que en el caso de los espectrometristas, los valores máximos de exposición se registraron durante la operación de ajuste de parámetros (hasta 400 mT en la cabeza de un operario en posición sedente) en aquellos equipos en los que este proceso no estaba automatizado. Y que esta tarea, y la exposición correspondiente, se realizan de forma ocasional, aunque periódica. Por el contrario, los máximos niveles de exposición registrados en operadores de RMI se corresponden con tareas rutinarias en contacto

con los pacientes explorados. En cuanto a las operaciones rutinarias, la comparación entre datos muestra que los niveles máximos de exposición entre los espectrometristas durante la tarea de introducción de la muestra (39,60 mT en mano y 32,20 mT en cabeza-tórax), equivalen a un 5 – 12% de los máximos representados en la tabla de exposición en los trabajadores de RMI.

Este tipo de comparación es de utilidad a la hora de valorar el nivel de seguridad de los espectrometristas ante los posibles efectos de su exposición a los CME. Así, entre la evidencia revisada y comentada en la sección introductoria de esta memoria, existen diversos estudios en trabajadores de RMI y en pacientes sometidos pruebas de resonancia, que han reportado correlaciones dosis - respuesta en episodios de vértigo, náusea, sabor metálico, mareo, somnolencia, dolor de cabeza y trastornos en el sueño, que han sido atribuidos a los campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo inducidos en el sistema nervioso de los sujetos cuando se desplazan en el seno de un campo magnético intenso. (Chakeres, 2005; De Vocht, et al., 2006 a,b ; Zanotti et al., 2015; Schaap et al., 2014a,b; 2016).

Durante la realización de nuestras tareas de medición 4 trabajadores de los 45 que colaboraron en el estudio manifestaron espontáneamente haber sufrido en alguna ocasión episodios transitorios de vértigo o mareos durante las operaciones de ajuste de parámetros. Es precisamente esa operación la que conlleva los niveles más elevados de exposición cefálico-truncal registrados en nuestro estudio, con máximos citados, de aproximadamente 400·mT. Eso indicaría que, en algunos sujetos y bajo determinadas condiciones, los niveles de exposición ocupacional a CME en los ambientes de laboratorio de espectrometría estudiados están por encima del umbral de densidad de flujo magnético capaz de inducir los síntomas descritos. No obstante, lo anterior no permite descartar la posibilidad de que la postura forzada adoptada por los trabajadores durante el ajuste de parámetros pueda ser la causa de los episodios referidos.

Otro punto de interés son los efectos derivados de la exposición ocupacional a gradientes de campo estático, presentes tanto en las salas de RMI como en las unidades de espectrometría. Aunque el efecto más sólidamente

establecido derivado de este tipo de exposición es la generación de corrientes inducidas en los tejidos biológicos sometidos a ella, muy pocos estudios se han enfocado en esta materia. Por ejemplo, algunos estudios *in vitro* no han detectado alteraciones en la progresión del ciclo celular en líneas de células humanas expuestas a condiciones de campo similares a las existentes en exámenes rutinarios de RMI (Schiffer et al., 2003). Una revisión de Schaefer et al. (2000) analizó los posibles efectos en los pacientes debidos a la variación temporal de los gradientes de campo en los escáneres de RMI y concluyó que mientras la estimulación cardiaca era improbable, a determinadas intensidades sí podía darse una estimulación nerviosa (sensación de hormigueo) causante de molestias para la persona expuesta. Por su parte, Ali et al. (2007) refirieron un descenso significativo en la permeabilidad de la membrana de los glóbulos rojos, si bien se trataba de efectos transitorios que revierten después de la exposición.

Bajo estas consideraciones, los estándares vigentes han establecido valores de referencia específicos para la prevención de efectos asociados a la inducción de corrientes derivadas de la exposición a gradientes de campo en el seno de CME. Sin embargo, a la hora de comprobar el cumplimiento de la norma, es necesario determinar con precisión los niveles de exposición personal, tarea que puede resultar extremadamente compleja, debido a que los cálculos deben contar con datos de magnitudes físicas y biológicas del cuerpo humano que no siempre están bien caracterizadas. Por este motivo, se han desarrollado métodos computacionales basados en la modelización de los parámetros del cuerpo humano, que usan maniqués físicos o numéricos. Estas técnicas permiten obtener valores de las corrientes y campos eléctricos inducidos por la exposición al CME, y conocer su distribución espacial. Esa información contribuye, además, a prever diferentes escenarios de exposición, así como a identificar los movimientos y las posiciones en las proximidades de los equipos en las que se inducen mayores niveles campos eléctricos y corrientes.

Los resultados de las simulaciones, que hasta la fecha se han enfocado casi exclusivamente en los sistemas de RMI, muestran que en trabajadores moviéndose en las inmediaciones de equipos de 1,5 T; 4 T y 7 T (Crozier et al., 2007) puede darse inducción de densidades de corrientes y campos eléctricos por encima de los niveles

propuestos por ICNIRP. Li et al. (2007) realizaron simulaciones numéricas de campo eléctrico inducido y densidad de corriente en estructuras nerviosas centrales de modelos humanos localizados en proximidad a los núcleos de equipos de RMI. Obtuvieron así densidades de corriente de hasta 20,6 mA/m² y campos eléctricos inducidos de hasta 4,1 V/m, para gradientes de campo de 10 mT/m y ratios de 10 mT/ms. Estos valores rebasarían los límites propuestos para corrientes y campos eléctricos inducidos.

En su conjunto, la información resumida en los párrafos anteriores es en parte indicativa de posibles efectos relacionados con la exposición ocupacional a niveles subumbral de densidad de flujo magnético, B, de campo magnético estático. Aunque tales efectos sean veniales y transitorios, y algunos de ellos pueden no ser percibidos por el sujeto expuesto, no sabemos qué tipo de consecuencias puede tener a largo plazo la reiteración de estos efectos en el caso de exposición crónica ocupacional.

En efecto ya se ha comentado en la sección introductoria que la evidencia experimental disponible actualmente sobre el potencial cancerígeno o genotóxico de la exposición ocupacional CME se ha considerado demasiado escasa para poder emitir conclusiones válidas al respecto. También vienen siendo materia de interés los potenciales efectos reproductivos en gestantes que trabajan en las proximidades de equipos de resonancia magnética. De hecho, tanto los operadores de equipos médicos de RMI, como los espectrometristas pueden estar sometidos regular y crónicamente a exposiciones corporales a CME por encima del límite de 40 mT recomendado para la protección del público general (ICNIRP, Guidelines 1998; Recomendación 1999/519/CE del Consejo Europeo; RD 1066/2001). Y mientras algunos estudios han reportado indicios de incremento de riesgo de aborto espontáneo en trabajadoras de RMI, (Evans, J.A. 1993), otros trabajos no han encontrado relación entre exposición a CME y alteraciones en el peso del recién nacido (Strizek et al., 2015) o en respuestas funcionales o deficiencia auditiva en edad escolar (Bouyssi-Kobar et al., 2015). El hecho es que en general, la epidemiología sobre problemas reproductivos presenta las mismas limitaciones que la epidemiología de cancericidad. En consecuencia, la evidencia disponible tampoco permite obtener conclusiones definitivas sobre potenciales riesgos reproductivos para trabajadoras gestantes expuestas a los niveles de CME registrados en el presente estudio.

2. Evaluación de radioprotección ocupacional basada en los resultados de las mediciones, según los criterios propuestos aquí para la prevención de potenciales efectos estocásticos.

Como venimos diciendo, los límites establecidos por la normativa de exposición ocupacional adoptan los criterios de ICNIRP, cuyo objetivo es la protección ante efectos deterministas de exposiciones agudas. La ausencia de estándares para efectos estocásticos por exposición crónica ha motivado nuestra propuesta de criterios de valoración de exposición ocupacional crónica para el caso que nos ocupa, considerando el tipo, frecuencia y duración de las exposiciones recibidas por los espectrometristas. Los valores propuestos son más conservadores que los establecidos por la norma legal, con el fin de prevenir potenciales efectos estocásticos, susceptibles de expresarse a largo plazo.

Aplicando los niveles propuestos para prevención de efectos por exposición crónica a los resultados de las mediciones obtenidos a nivel de cabeza-tórax (Figura FD5), se concluye que el 93,5% de los registros presenta valores promedio de densidad de flujo magnético $0,05 \text{ mT} \ll B < 40 \text{ mT}$, por lo que de acuerdo con el criterio propuesto bastaría con informar a los trabajadores de los niveles de exposición recibidos durante sus tareas e implantar estrategias de buenas prácticas de la técnica al uso. En cuanto a los registros restantes, en el 6,5% de los casos, $40 \text{ mT} \leq B < 200 \text{ mT}$, y por tanto además de las actuaciones a seguir en el caso anterior, habría que proporcionar formación e información adicionales y específicas a los trabajadores y garantizar una vigilancia de la salud mediante la aplicación de protocolos médicos específicos. Si bien actualmente el Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad no ha publicado el protocolo médico específico para trabajadores expuestos a radiaciones no ionizantes, a la vista de los posibles bioefectos mencionados éstos deberían incluir una especial atención al historial médico de los trabajadores en relación con posibles dolencias y un examen de la función cardiovascular mediante la realización de electrocardiogramas, entre otros. Del análisis de los resultados se concluye que no se registraron mediciones que superaran el valor de 200 mT a nivel del cuerpo.

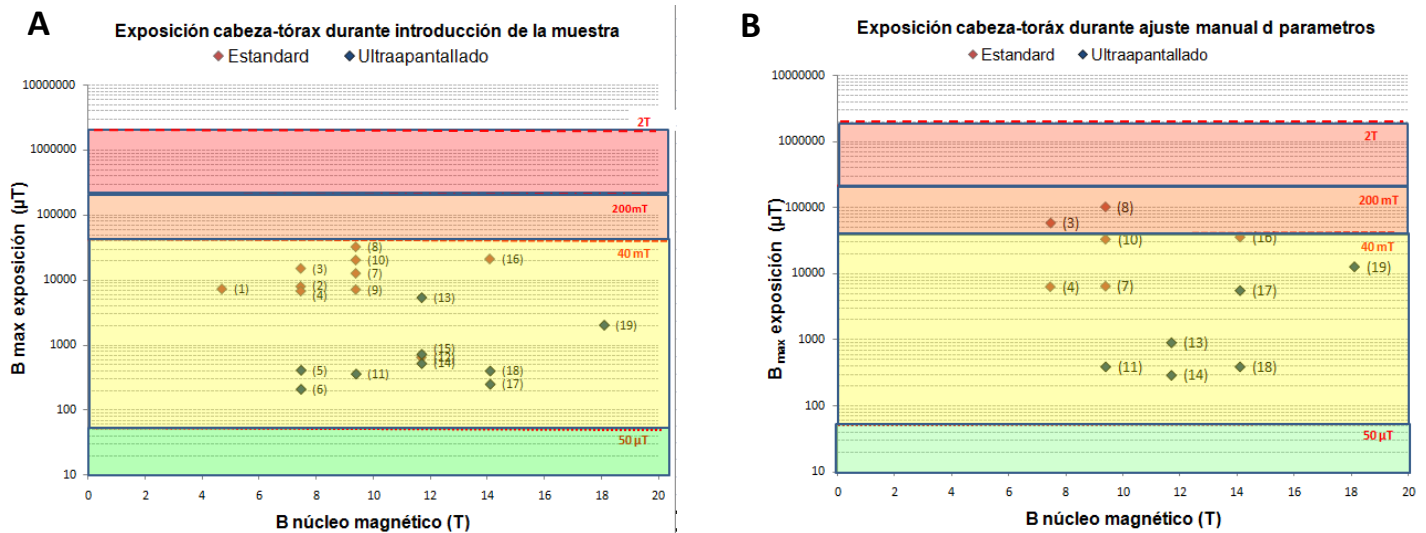


Figura FD5: Valor máximo de inducción magnética (B , μT) recibida a nivel de cabeza / tórax durante la operación de introducción de la muestra (A) y durante las operaciones de ajuste de parámetro (B). Las bandas de colores se corresponden con los intervalos propuestos para el criterio de valoración para potenciales efectos estóxicos (ver Figura T10). Los números entre paréntesis son los códigos asignados a cada equipo según la tabla TM3. cuyo valor de B (T) en el núcleo aparece en el eje X, de abcisas

En el caso de las trabajadoras embarazadas los datos muestran que el nivel de exposición puede superar los valores de referencia propuestos (40 mT), coincidente con los niveles de público en general establecidos por la recomendación de la Unión Europea 1999/519/CE (UE 1999/519/CE) y por el RD 1066/2001. La operación donde mayoritariamente se alcanza este valor a nivel de cabeza y torso, (25% de los registros) es durante el ajuste de parámetros (figura FD5). Los resultados muestran también que durante las operaciones que se realizan en proximidad al equipo, los operarios pueden verse expuestos a niveles $B \geq 500 \mu T$ (figura FD4). Estos niveles rebasan los valores de acción específicos para trabajadores portadores de implantes médicos activos. Por ello, además de las estrategias descritas anteriormente en lo referente a tipo de apantallamiento de los equipos y el diseño de las instalaciones incorporando fosos y brazos robotizados en los equipos de espectrometría, se recomienda que las operaciones con los equipos de RMN no sean llevadas a cabo por gestantes, y señalizar la línea de contorno correspondiente a 0,5 mT (500 μT) en los laboratorios de RMN (figura FD6). Esta medida para limitar el acceso de portadores de dispositivos médicos activos implantados está recogida también en la Guía de buenas prácticas para la implementación de la Directiva 2013/35/UE (European Commission, 2014) y en el artículo 4 del RD 299/2016.



Figura FD6: Espectrómetro ultraapantallado, con la línea de contorno de $B \geq 0,5$ mT marcada en el suelo, para prevenir riesgos de disfunción de implantes activos debidos a la proximidad de sus portadores al equipo.

Desde el punto de vista de formación de los trabajadores, además de una información precisa en lo que se refiera a sus niveles de exposición a campos electromagnéticos, es de especial interés que los trabajadores reciban el entrenamiento específico adecuado sobre protocolos operacionales de buenas prácticas que, permitan minimizar la exposición. Por ejemplo, en el caso que nos ocupa, la adopción de la postura yaciente frente a la postura sedente durante la operación de ajuste de parámetros, permitiría reducir significativamente el nivel de exposición en la zona de la cabeza, y por tanto reducir el riesgo de sufrir efectos del tipo descrito, como los mareos y vértigos. Por otro lado, las corrientes inducidas debidas al desplazamiento de los operarios en la proximidad al imán pueden minimizarse con movimientos lentos, especialmente los relativos a la rotación de la cabeza durante la tarea de ajuste de parámetros.

Respecto a la información proporcionada por los fabricantes, la integridad y precisión de los datos contenidos en los mapas de emisión de los espectrómetros puede resultar especialmente útil en condiciones de exposición que precisan

estrategias de medición más complejas, como el caso de la exposición simultánea a CEM de diversas fuentes y frecuencias, o la presencia de diversos equipos en una misma área de trabajo. Respecto a esto último y en el caso de los centros estudiados en este trabajo, cabe mencionar la caída observada en los valores de inducción magnética en función de la distancia a los equipos, alcanzándose valores de campo geomagnético ($B \leq 0,05$ mT) a distancias $d \geq 3$ metros. Lo anterior implica que, con carácter general, la exposición de los trabajadores a campos electromagnéticos en los espacios incluidos en este estudio está dominada por uno, o en el peor de los casos, unos pocos espectrómetros ubicados en la proximidad del puesto de trabajo. Es así, ya que las mediciones de CEM en un amplio espectro de frecuencias RF (de hasta 3 GHz) no pudieron detectar en ningún caso la presencia en el ambiente de señales significativas procedentes de fuentes emisoras funcionando en las proximidades. Los resultados de los registros también revelan que una adecuada ubicación de los puestos de trabajo permitirá que el trabajador se vea expuesto a los CME emitidos por un único espectrómetro en las proximidades, reduciendo así los niveles de exposición.

En cuanto a los protocolos de medición, y en línea con las exigencias requeridas para demostrar el cumplimiento con las disposiciones en materia de compatibilidad electromagnética, cabe proponer la implantación de procedimientos normalizados para caracterizar, desde un punto de vista de exposición ocupacional, los niveles de emisión de las fuentes de campo. Por ello es importante que los comités de normalización refuercen el desarrollo de normas técnicas que establezcan los criterios de determinación de las emisiones de manera que, además de proporcionar información de los niveles de inducción magnética a distintas distancias de la fuente, los datos permitan conocer con precisión los niveles de exposición del trabajador en las posiciones de uso normal del equipo. Como muestran los trabajos descritos en esta memoria, ese tipo de información permitirá identificar y señalar las posiciones en las que se alcanza los valores de inducción magnética correspondiente a los niveles de acción establecidos por la legislación vigente, especialmente en zonas accesibles alrededor del equipo.

En definitiva, los procedimientos de medición y evaluación de exposición ocupacional a CME y CEM RF desarrollados en el presente trabajo, aportan una estrategia metodológica eficaz, y una información definida como necesaria y de

utilidad para incrementar la protección laboral, a corto y largo plazo, del colectivo de investigadores usuarios de espectrómetros por resonancia magnética. Estas aportaciones permiten identificar condiciones y pautas de trabajo que pueden dar lugar a niveles innecesariamente elevados de exposición, y desarrollar así estrategias operacionales y organizativas encaminadas a minimizar la exposición. Con ello, el presente estudio contribuye al avance en la línea marcada por el Tratado de Maastrich de 1993, en el que se insta a los Estados que forman parte de la Unión Europea a tomar acciones preventivas para impedir daños antes de contar con evidencias científicas, y se urge a la industria a invertir esfuerzos adicionales para el desarrollo de nuevas tecnologías con las que reducir la exposición a las ondas electromagnéticas.

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

1. El análisis de los datos metrológicos revela que los procedimientos de medición instantánea y de registro diseñados “*ad hoc*” y aplicados en el presente trabajo, permiten la caracterización eficiente y precisa de los niveles y condiciones de exposición ocupacional en unidades de espectrometría.
2. Los valores obtenidos de las mediciones instantáneas y de los registros ambientales de señal RF a diferentes distancias de los equipos y en el puesto de control correspondiente, revelan que los niveles de emisiones de radiofrecuencia hacia el exterior de los equipos eran siempre inferiores a 0,01 V/m. Estos datos indican que todos los equipos estudiados estaban adecuadamente diseñados y blindados para evitar la emisión a su exterior de campos RF. Los citados niveles de $E < 0,01\text{V/m}$ se consideran propios de ambientes ocupacionales normales, e inocuos desde el punto de vista de la salud laboral, ya sea aguda o crónica la exposición a estas señales.
3. Los datos de mediciones instantáneas y de registros ambientales y personales de CME a diferentes distancias de los equipos y durante la ejecución de las distintas tareas, permitieron identificar valores significativos de densidad de flujo magnético procedentes de los equipos de RMN. Del análisis del conjunto de los datos metrológicos y de la información sobre las condiciones, tiempo y frecuencia de la duración de las distintas tareas, se puede concluir que los espectrometristas de RMN están expuestos crónicamente a CME del orden de militeslas, en promedio, que son netamente superiores a los niveles basales (de 3 – 5 decenas de microteslas) típicos de la gran mayoría de los ambientes ocupacionales.
4. Los datos de mediciones personales resultaron estar en todos los casos y condiciones estudiadas, por debajo de los valores umbral de referencia, establecidos por la normativa europea y por el Real Decreto español para la

protección ante efectos inmediatos sensoriales o sobre la salud, de exposiciones ocupacionales agudas a radiaciones no ionizantes.

5. No obstante, en algunas de las condiciones estudiadas se registraron niveles de exposición que superaban el umbral de 0,5 mT para compatibilidad electromagnética con implantes médicos, y se aproximaban al límite de 40 mT recomendado para la protección del público general ante la exposición a CME. Estas condiciones de rebasamiento de los estándares deben ser tenidas en cuenta y evitadas en el caso de trabajadoras gestantes y de portadores de implantes médicos activos.
6. Los datos de CME en función de la distancia a la fuente mostraron algunas discrepancias con los correspondientes datos numéricos o gráficos proporcionados por los fabricantes de los equipos. Así, en los casos en que la información del fabricante resultó válida para un análisis comparativo, las estimaciones del fabricante tendían a infravalorar, en mayor o menor medida, los niveles reales de exposición, determinados mediante nuestros registros in situ.
7. Los registros de niveles de exposición personal, permitieron detectar diferencias notables de exposición en diversas áreas anatómicas en trabajadores que, realizando una misma tarea en equipos de características similares, aplicaban procedimientos o aproximaciones posturales distintas. Así, por ejemplo, la preferencia por realizar en postura yacente la tarea de cambio de parámetros, podía suponer, según el modelo de espectrómetro, una reducción de hasta un orden de magnitud en los niveles de exposición de la cabeza/tórax, con respecto a la exposición recibida ejecutando la misma tarea en postura sedente o en cuclillas.
8. Los registros de mediciones personales y ambientales permitieron constatar que para valores idénticos de campo en el núcleo magnético, los niveles medidos eran entre 20 y 65 veces más bajos en los equipos ultraapantallados y ubicados en foso, que en los de apantallamiento estándar y emplazados directamente sobre el suelo de la sala, respectivamente. Los datos metrológicos permiten determinar que, considerando el eje vertical del

equipo, el apantallamiento de la región central del espectrómetro es más eficiente que en sus zonas superior e inferior.

9. El procedimiento propuesto para la valoración de los niveles de exposición desde el punto de vista de la protección ocupacional ante potenciales efectos de exposiciones crónicas a CME ofrece un conjunto de estrategias de tipo ALARA y ALATA, respondiendo a las recomendaciones de minimización de la exposición, y en línea con el principio de precaución en protección radiológica. Tales estrategias incluyen: realizar mediciones ambientales y registros personales de CME e informar a los trabajadores sobre las condiciones y niveles de exposición recibidos, proporcionar a los trabajadores formación sobre posibles riesgos de sobreexposición y adiestramiento en procedimientos operacionales para minimizar su exposición, señalar las zonas de mayor exposición, evitar la presencia de mesas y puestos de trabajo fijos en las inmediaciones de las fuentes de campo, dar preferencia a la adquisición de equipos ultraapantallados y de aparatos con brazo robotizado, y emplazar los equipos en localizaciones como los fosos, que contribuyen a minimizar la exposición durante la realización de tareas específicas. Si bien aplicadas en bloque estas estrategias son específicas para espectrometristas, por separado pueden aplicarse a la protección en otros ámbitos profesionales expuestos a radiaciones no ionizantes.

APÉNDICE 1

APÉNDICE 1: PARÁMETROS DE LAS RADIACIONES

Los parámetros que definen las radiaciones son:

Frecuencia (f, ν): es el número de ciclos completos que describe la onda por unidad de tiempo. En el Sistema Internacional se mide en Hercios (Hz) o ciclos por segundo (1/s), aunque habitualmente se emplean múltiplos de éste debido a la diferencia de órdenes de magnitud existente en el espectro de la radiación.

La frecuencia de los campos electromagnéticos está comprendida entre 0 y 300 GHz.

La interacción de la materia con las radiaciones electromagnéticas depende de la frecuencia de emisión, por eso existen diferentes efectos sobre la salud y se establecen valores de referencia específicos para cada frecuencia, a fin de considerar las diferentes respuestas del cuerpo humano a cada una de ellas.

Longitud de onda (λ): Es la distancia entre dos puntos consecutivos de la onda que están en fase. En el Sistema Internacional se mide en metros (m), aunque habitualmente se emplean múltiplos y submúltiplos. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia y se relacionan a través de la velocidad de la luz mediante la ecuación: $\lambda = c/f$.

La longitud de onda en los campos electromagnéticos varía desde 1 mm para la frecuencia de 300 GHz hasta el infinito para los campos estáticos.

Energía (E): la energía es la capacidad que tiene la radiación de realizar un trabajo, es decir la capacidad de transformar el estado de la materia con la que interacciona.

En el Sistema Internacional de Unidades se mide en Julios (J), aunque para describir la energía de las radiaciones habitualmente se emplea el electrón-voltio (eV), que es la energía equivalente a la energía cinética que adquiere un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de un voltio, siendo la relación entre el Julio y el electrón-voltio la siguiente: $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

La energía que transporta la onda es proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional a la longitud de onda.

La relación entre los tres parámetros que definen las radiaciones se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$E = hf = c\hbar/\lambda,$$

donde $c = 3 \times 10^8$ m/s y $\hbar = 6,63 \times 10^{-34}$ Js

APÉNDICE 2

APÉNDICE 3: MECANISMOS DE INTERACCIÓN DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS CON LA MATERIA

Mecanismos de interacción del campo electromagnético variable con la materia viva

Hay tres mecanismos de acoplamiento básicos establecidos a través de los cuales interactúan los campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo con la materia viva (UNEP/OMS/IRPA 1993):

- **Acoplamiento a los campos eléctricos de baja frecuencia**

El acoplamiento a los campos eléctricos de baja frecuencia produce una interacción electrodinámica con los electrolitos en movimiento, es decir, la interacción de campos eléctricos variables en el tiempo con el cuerpo humano origina un flujo de cargas eléctricas (corriente eléctrica), la polarización de la dirección de las cargas (formación de dipolos eléctricos), y la reorientación de dipolos eléctricos ya presentes en el tejido.

Las magnitudes relativas de estos diferentes efectos dependen de las propiedades eléctricas del cuerpo, la conductividad eléctrica (que determina el flujo de corriente eléctrica) y la permitividad (que determina la magnitud del efecto de polarización). La conductividad eléctrica y la permitividad varían con el tipo de tejido y también dependen de la frecuencia del campo aplicado. Los campos eléctricos externos al cuerpo inducen una carga superficial en el cuerpo; esto produce corrientes inducidas en el cuerpo, cuya distribución depende de las condiciones de exposición, del tamaño y forma del cuerpo, y de la posición del cuerpo frente al campo.

- **Acoplamiento a campos magnéticos de baja frecuencia**

La interacción física de los campos magnéticos variables en el tiempo con el cuerpo humano genera campos eléctricos inducidos y la circulación de corrientes eléctricas.

Las magnitudes de los campos inducidos y de la densidad de corriente son proporcionales al radio de la espira, la conductividad eléctrica del tejido, y la tasa de

cambio y la magnitud de la densidad de flujo magnético. Para una magnitud y frecuencia dada del campo magnético, los campos eléctricos inducidos son más fuertes cuando las dimensiones de la espira son mayores. La trayectoria exacta y la magnitud resultante de las corrientes inducidas en cualquier parte del cuerpo dependerán de la conductividad eléctrica del tejido.

El cuerpo no es eléctricamente homogéneo; sin embargo la densidad de las corrientes inducidas puede ser calculada usando modelos anatómicamente y eléctricamente del cuerpo y métodos computacionales, los cuales tienen un alto grado de resolución anatómica.

- **Absorción de energía de los campos electromagnéticos**

La exposición a los campos eléctricos y magnéticos de muy baja frecuencia produce una absorción de energía insignificante y un incremento no mensurable de temperatura en el cuerpo. Sin embargo la exposición a los campos electromagnéticos a frecuencias por encima de los 100 kHz puede producir una absorción de energía y un incremento de temperatura significativos. En general, la exposición a campos electromagnéticos uniformes (onda plana) ocasiona una deposición y una distribución de la energía dentro del cuerpo altamente no uniformes, las cuales deben ser evaluadas mediante mediciones dosimétricas y cálculos matemáticos.

Mecanismos de interacción del campo magnético estático con la materia viva

El establecimiento de los criterios de referencia para campo magnético estático propuestos por ICNIRP se basan en los mecanismos de interacción del citado campo con la materia viva.

Los efectos derivados de la exposición a campos magnéticos estáticos pueden ir desde un rápido movimiento del cuerpo o los ojos en el interior de un fuerte campo estático, hasta vértigo, dificultad en el equilibrio, náuseas, dolores de cabeza, efectos fosfenos y sensaciones atípicas en el gusto.

Existen tres mecanismos físicos de interacción mediante los cuales los campos magnéticos estáticos interactúan con la materia viva, que son: *inducción magnética*, *efectos magnetomecánicos* e *interacción del spin electrónico*.

- **Inducción magnética:**

Este mecanismo se origina debido a las interacciones electrodinámicas con electrolitos en movimiento o las corrientes y los campos eléctricos inducidos.

Esto es debido a que tanto en el interior de las células como en el líquido extracelular hay iones en movimiento, es decir, partículas cargadas eléctricamente que se mueven con una cierta velocidad. Ahora bien, cuando una partícula cargada eléctricamente se mueve a una cierta velocidad en un campo magnético se produce una fuerza sobre ella que es proporcional a la velocidad de la partícula, a su carga eléctrica y al campo magnético, denominada "*Fuerza de Lorentz*". En el caso de que la dirección de la velocidad sea perpendicular al campo magnético la fuerza es máxima. Por ejemplo, en las células nerviosas la transmisión del impulso nervioso se realiza por medio del intercambio de iones sodio y potasio que se pasan a través de la membrana de la célula nerviosa, las cuales se experimentarían una fuerza en presencia de campos electromagnéticos variables en el tiempo.

Por tanto, los campos magnéticos estáticos ejercen fuerzas de Lorentz sobre las partículas cargadas en movimiento que originan corrientes y campos eléctricos inducidos

Asimismo, los campos magnéticos variables en el tiempo inducen corrientes eléctricas en los tejidos vivos, de acuerdo con la Ley de inducción de Faraday. Estas corrientes también pueden ser inducidas por el movimiento de partículas cargadas en el seno del campo magnético estático. La magnitud de estas corrientes inducidas y los campos eléctricos debido al movimiento lineal en el interior de un gradiente de campo se incrementan con la velocidad del movimiento y la amplitud del gradiente.

- **Efectos magnetomecánicos**

Los efectos magnetomecánicos pueden ser el origen de orientaciones y traslaciones sobre la materia biológica.

En un campo estático, las moléculas paramagnéticas experimentan un torque que las orientan de manera que se minimice su configuración energética en el seno del campo. Este efecto también ha sido estudiado en los conjuntos de macromoléculas con diferentes susceptibilidades magnéticas a lo largo de los principales ejes de simetría. Estas fuerzas generalmente son muy pequeñas como para afectar a la materia biológica debido a los valores bajos de susceptibilidad magnética (del orden de 10^{-5}), debido a la cantidad limitada de material magnético en la mayoría de los tejidos vivos. Esto implica que la influencia de este efecto en las funciones biológicas es despreciable, aunque es muy importante en los mecanismos de orientación de muchos animales.

Sin embargo, en presencia de gradientes de campo magnético se originan fuerzas de traslación sobre materiales paramagnéticos y diamagnéticos, proporcionales al producto de la densidad de flujo magnético y su gradiente. Esta fuerza ejercida sobre objetos ferromagnéticos, tales como metales de alta susceptibilidad magnética, pueden originar grandes aceleraciones en el seno de fuertes gradientes de campo magnético. La dirección de la fuerza es la misma u opuesta al gradiente de campo, según se trate de materiales paramagnéticos o diamagnéticos, respectivamente.

Por tanto, cuando hay un campo magnético estático que posee un gradiente espacial de intensidad, entonces se produce una fuerza sobre los materiales que tienen un momento magnético neto, es decir, sobre los materiales paramagnéticos y ferromagnéticos. Si existen este tipo de materiales en el tejido vivo entonces las fuerzas que ejercen sobre ellos el campo magnético variable espacialmente conduce a un movimiento de traslación en la dirección de la variación del campo magnético.

- **Interacción con el spin electrónico**

Ciertas clases de reacciones químicas involucran estados electrónicos intermedios en los cuales las interacciones con un campo magnético estático produce un efecto sobre los estados de spin electrónico, de manera que los pares radicales de spin correlacionados se recombinan para formar productos de reacción.

Por tanto, la presencia de un campo magnético interfiere en la proporción y extensión de los pares radicales convertidos en estado triplete (spines paralelos) de manera que no se producen más recombinaciones.

APÉNDICE 3

APÉNDICE 3: ESTUDIOS DE EFECTOS BIOLÓGICOS DERIVADOS DE LA EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

TABLA RESUMEN DE ESTUDIOS SOBRE EFECTOS DE CAMPOS MAGNÉTICOS ESTÁTICOS:

Autor	Breve descripción	Conclusiones
Exposición a niveles de estándares ocupacionales de referencia		
Estudios en voluntarios		
Chakeres et al., 2005	Revisión de 3 estudios que evalúan efectos fisiológicos o de función neurocognitiva bajo exposición a CME de RMN con $B \leq 8$ T	Sin efectos neurocognitivos adversos relevantes. Sin cambios en signos vitales. Efectos adversos en la memoria a corto plazo,
Kangarlu et al. (1999)	Estudio de efecto de 1 hora de exposición a un CME $B = 8,0$ T sobre parámetros fisiológicos y / o cognitivos en voluntarios y en cerdos.	Sin cambios detectables en la temperatura corporal, frecuencia cardíaca y respiratoria, presión arterial y el EEG
Efectos in vivo: Fisiología, metabolismo, parámetros sanguíneos, reproducción, desarrollo		
High, W.B. et al., (2000)	Estudio de potenciales efectos biológicos adversos de la exposición durante 10 semanas a $B = 9,4$ T en ratas adultas ♀ y ♂ y su progenie. En adultos: memoria espacial, frecuencia cardíaca, peso, o parámetros bioquímicos y urinarios de la sangre. En reproducción: período de gestación, el número de nacidos vivos, proporción ♀ y ♂, parámetros de desarrollo postnatal.	Sin efectos biológicos adversos detectados
Ichioka et al (2000)	Estudio de efecto de CME $B \leq 8$ T en el flujo sanguíneo de la piel y la temperatura corporal en ratas anestesiadas.	Reducción significativa reversible en el flujo sanguíneo y temperaturas cutánea y rectal
Saunders (2005)	Revisión de estudios sobre efectos comportamentales, fisiológicos, reproductivos o tumorales de exposición in vivo de CME $B > 1$ T	Sin efectos nocivos consistentes
Estudio in vitro: Fisiología celular: proliferación, ciclo celular, viabilidad		
Valiron et al. (2005)	Estudio de efectos de exposición in vitro a $B = 7 - 17$ T sobre el citoesqueleto y organización celular en diferentes tipos de células humanas y de roedores	Alteraciones en el citoesqueleto, con efectos deletéreos en viabilidad organización y diferenciación. celular,
Efectos in vitro: Genotoxicidad, estrés oxidativo		
Lee et al. (2011b)	Estudio de efecto genotóxico en linfocitos humanos por exposición in vitro a $B = 3$ T durante 22, 45, 67 y 89 min de barrido en MRI	Inducción de efectos genotóxicos (aberraciones cromosómicas y micronúcleos)
Nakahara et al.	Estudio de efectos de 4 días de exposición in vitro a	Potencial genotóxico en

(2002)	B = 10 T en proliferación, ciclo y formación de micronúcleos en células CHO-K1 de ovario de hámster	sinergia con rayos X de 4 Gy
Suzuki et al., (2001)	Estudio de efectos genotóxicos de 24 – 72 h de exposición in vitro a B = 2,3 o 4,7 T en células de médula ósea de ratón.	Incremento significativo de micronúcleos. Efecto de dosis (B y tiempo)
Exposición a niveles subumbral ocupacionales		
Estudios en voluntarios		
Wilén et al. (2011)	Estudio basado en un cuestionario para analizar las quejas de salud en 59 enfermeras de RMI en el norte de Suecia	La prevalencia de efectos adversos en la salud aumenta con la intensidad del campo.
Zanotti et al. (2015)	Estudio mediante cuestionario de efectos en 17 radiólogos durante los trabajos con equipos de RMI	16 sujetos refirieron síntomas : cansancio (88%), problemas de concentración (82%), dolores de cabeza (76%), alteraciones en el sueño (47%), náuseas (47%), vértigo (35%)
De Vocht et al. (2006a)	Estudio sobre los efectos sensoriales o en la salud, reportados por trabajadores con imanes de RMI. Exposición media en cabeza: B = 0,6 T y 1,0 T en equipos de 1,5 T y 3,0 T, respectivamente	Efectos cognitivos agudos y reversibles. En función de B, duración de la exposición y velocidad de desplazamiento en zona de influencia del CME.
De Vocht et al. (2006b)	Tests de efectos neurocomportamentales en 20 voluntarios moviéndose en presencia de CME de RMI de 1,5 y 3,0 T	Cambios en la memoria de trabajo visual y auditiva, velocidad de coordinación ojo-mano y tareas de seguimiento visual. En función de B
Heinrich et al. (2013)	Tests de efectos en funciones cognitivas, de memoria, coordinación ojo-mano, atención, tiempo de reacción y discriminación visual y percepciones sensoriales subjetivas en 41 sujetos trabajando con RMI de 1,5 T, 3,0 T y 7,0 T)	Sin efectos cognitivos significativos. Percepciones sensoriales: mareos o fosfenos, en función de B
Efectos in vivo: Fisiología, metabolismo, parámetros sanguíneos, reproducción, desarrollo		
Elferchichi et al. (2011)	Estudio sobre los efectos conductuales (motricidad) y bioquímicos de la exposición in vivo (rata) a B = 128 mT, 1 hora/día, 5 días consecutivos	Inducción de deficiencia de hierro en sangre. Sin efectos en motricidad
Gafeey y Tenforde (1981)	Estudio de efectos de la exposición a B = 0.3 - 2 T en el EEG de 24 ratas adultas ♂ y ♀	Incremento en amplitud de señal EEG, sin alteración de frecuencias cardíaca y respiratoria
Lahbib et al. (2010)	Estudio sobre los efectos de B = 128 mT, 1 h / día durante 5 o 15 días consecutivos, sobre metabolismo de glucosa y lípidos en ratas	Alteraciones tiempo-dependientes en metabolismo de glucosa y lípidos
Miryam et al. (2010)	Estudio sobre el efecto de B = 128 mT, 1 h / día, 5 días consecutivos, en la composición iónica de la médula espinal de ratas ♂	Inducción de alteraciones en el equilibrio de electrolitos plasmáticos y .la

		composición iónica de la médula
Tenforde et al. (1983)	Estudio de efectos de la exposición aguda a B ≤ 1,5 T en ECG y presión arterial de macacos ♂ adultos	Sin alteraciones detectables
Efectos in vivo: Genotoxicidad, estrés oxidativo		
Ghodbane et al. (2011)	Estudio sobre el efecto de la exposición a B = 128 mT, 1 h / día, 5 días, en niveles de selenio en hígado, riñón, músculo y cerebro de rata.	Alteración de la respuesta antioxidante por disminución de niveles de selenio en riñón, músculo y cerebro
Efectos in vitro: Genotoxicidad, estrés oxidativo		
Amara et al. (2009)	Estudio de efectos de exposición in vivo a B = 128 mT, 1 h / día, 30 días consecutivos sobre proteínas de estrés oxidativo en el cerebro de rata ♂	Inducción de estrés oxidativo en hipocampo y corteza frontal

TABLA RESUMEN DE EFECTOS DE EXPOSICIÓN A CAMPOS DE FRECUENCIA BAJA Y EXTREMADAMENTE BAJA

Autor	Breve descripción	Conclusiones
Exposición a niveles de estándares ocupacionales internacionales		
Efectos in vivo: Fisiología, metabolismo, parámetros sanguíneos, reproducción, desarrollo		
Coskun y Comlekci (2011)	Estudio de efectos de la exposición a campo eléctrico de 10 kV/m (50 Hz) durante 10 o 30 días, durante sobre niveles de colesterol y triglicéridos en plasma de ratas adultas ♂.	Disminución significativa de niveles plasmáticos de colesterol y triglicéridos. Función del tiempo
Lahijani et al. (2011)	Estudio de efectos de exposición a B = 1,33 - 7,32 mT (50 Hz) durante 14 días en desarrollo embrionario de pollo	Inducción de hemorragias extensas en cuerpo e hígado
Tenorio et al. (2011)	Estudio de efectos de exposición a B = 1 mT (60 Hz) 30 m/día, desde día 13 de gestación hasta día 21 postnatal, en el desarrollo testicular de rata	Retardo en el desarrollo testicular.
Efectos in vivo: Cáncer, genotoxicidad, estrés oxidativo		
Cui et al. (2012)	Estudio de los efectos de la exposición al B = 1 mT (50 Hz) en parámetros de estrés oxidativo y en aprendizaje en ratones	Inducción de estrés oxidativo en hipocampo, asociada a deterioro en aprendizaje
Ciejka et al. (2011)	Estudio de efectos de B = 7 mT (40 Hz), 30 o 60 min/día durante 10 días, en tejidos cerebrales de ratas ♂	Generación de radicales libres. Respuesta adaptativa con el tiempo.
Chu et al. (2011)	Estudio de efectos de la exposición a 2,3 mT (60 Hz) durante 3 horas, en inducción de peroxidación de lípidos y de las especies reactivas del oxígeno en cerebelo de ratón	Inducción de estrés oxidativo
Exposición a niveles subumbral ocupacional		
Epidemiología		
Ahlbom et al. (2000)	Metaanálisis de estudios epidemiológicos sobre incidencia de leucemia en niños y exposición residencial a campos ELF	Asociación positiva entre la exposición residencial a B ≥ 0,3 μT e incidencia de leucemia
Carlberg et al. (2017)	Estudio de caso control realizado durante 1997-2003 y 2007-2009 sobre incidencia de cáncer en ocupaciones con exposición a ELF	Sin aumento significativo de incidencia de glioma. Incremento de incidencia de astrocitoma en estadio tardío (promoción / progresión)
Greenland et al. (2000)	Metaanálisis de 15 estudios epidemiológicos relativos a campos magnéticos procedentes de líneas eléctricas y leucemia infantil	Asociación significativa entre exposición residencial a campo magnético y leucemia
Kheifets et al. (2010)	Análisis de estudios relativos a campos magnéticos y leucemia infantil publicados después del 2000 con 10 865 casos y 12 853 control	Asociación significativa entre exposición residencial a campos y leucemia

Koeman et al. (2014)	Estudio de cohorte prospectivo sobre asociación entre exposición ocupacional e incidencia de cáncer en 120.852 hombres y mujeres de 55 a 69 años evaluados durante 17 años	Indicios de un mayor incidencia de leucemia mieloide aguda y linfoma folicular entre los hombres con exposición ocupacional
Wertheimer et al (1979)	Epidemiología de cáncer en niños de Colorado (USA)	exceso de cableado eléctrico cerca de los hogares de los niños que desarrollaron cáncer, en comparación con los hogares de los niños de control
Zhang Y et al. (2014)	Análisis integrado de 42 estudios caso-control sobre exposición y e incidencia de cáncer, a partir de bases de datos con un total de 13.259 casos y 100.882 controles	Incidencia incrementada de cáncer, principalmente en los Estados Unidos y en exposiciones residenciales
Zhao et al. (2014)	Meta-análisis sobre incidencia de leucemia y exposición residencial en niños (11.699 casos y 13.194 controles) entre 1997 y 2013	Asociación positiva entre la exposición residencial a $B \geq 0,2 \mu T$ e incidencia de leucemia
Efectos in vivo: Fisiología, metabolismo, parámetros sanguíneos, reproducción, desarrollo		
Borhani et al. (2011)	Estudio sobre efectos de la exposición $B = 0,5 \text{ mT}$ (50 Hz) 4 h/día, 6 d/semana, durante 2 semanas, en fragmentación del ADN en blastómeros de 40 ratones ♀	Disminución del número de blastocistos y aumento de la fragmentación del ADN en la fase de preimplantación
Efectos in vivo: Cáncer, genotoxicidad, estrés oxidativo		
Emre et al. (2011)	Estudio de efectos de $B = 1,5 \text{ mT}$ (1 – 40 Hz) sobre tasa de apoptosis y necrosis en hígado y riñón de rata adulta	Niveles de indicadores de estrés oxidativo incrementados. Potencial inducción de necrosis
Efectos in vitro: Genotoxicidad, estrés oxidativo		
Luukkonen et al. (2011)	Estudio de efectos de la preexposición a $B = 100 \mu T$ (50 Hz) 24 horas en daño en el ADN, tasa de reparación del ADN o la frecuencia de micronúcleos en células humanas de neuroblastoma	Incremento en genotoxicidad en interacción con menadiona
Markkanen et al. (2008)	Estudio de efectos de la exposición a $B = 100 \mu T$ (50 Hz) sobre el daño del ADN en células de roedor expuestas en presencia o ausencia de radiación UVB o de menadiona	Influencia del CM en la respuesta celular a otros agentes genotóxicos
Mattsson et al. (2014)	Revisión de 41 estudios in vitro sobre los efectos de ELF de baja densidad de flujo magnético y los cambios en el estado oxidativo.	La exposición a $B > 1 \text{ mT}$ puede influir en el estado oxidativo en una amplia gama de tipos de células, sin dependencia lineal de la duración de la exposición

TABLA RESUMEN DE EFECTOS DE CAMPOS RF

Autor	Breve descripción	Conclusiones
Exposición a niveles de estándares ocupacionales internacionales		
Efectos in vivo: Fisiología, metabolismo, parámetros sanguíneos, reproducción, desarrollo		
Sambucci et al. (2011)	Efectos de exposición 2 h/d, 5 d/s durante 5 semanas consecutivas, a una señal de 2,45 GHz y 0,08 o 4 W/kg, en peso, desarrollo y parámetros inmunológicos en ratones ♂ y ♀ recién nacidos	Sin efectos detectables
Efectos in vivo: Neurológicos, cognitivos, comportamentales, sensoriales		
Prochnow et al. (2011)	Efectos de 120 minutos de exposición a RF UMTS de 2 o 10 W/kg sobre la síntesis de proteínas de estrés implicadas en almacenamiento y consolidación de la memoria en ratas	Sin efectos detectables a SAR de 2 W/kg, pero no es descartable la posibilidad de efectos a 10 W / kg
Efectos in vivo: Cáncer, genotoxicidad, estrés oxidativo		
Paulraj y Behari (2011)	Estudio de efectos carcinógenos en ratones albinos y transplantados para carcinoma, expuestos 2 h/d, 3 d/s durante 16 semanas a RF de 112 MHz modulada con 16 Hz y SAR de 0,75 W/kg, o de 2,45 GHz y SAR de 0,1 W/kg	Sin efectos observables en el desarrollo y crecimiento tumoral
Şekeroğlu et al. (2012)	Estudio de efectos genotóxicos en células de médula ósea de ratas expuestas a RF de 1800 MHz a SAR de 0,37 W / kg y 0,49 W / kg, 2 h/d durante 45 días	Diferencias significativas en el índice de aberraciones cromosómicas, frecuencia de micronúcleos, e índice mitótico
Efectos in vitro: Genotoxicidad, estrés oxidativo		
De Lullis et al. (2009)	Estudio de efectos en espermatozoides humanos expuestos a RF de 1,8 GHz y SAR de 0,4 -27,5 W/kg	Inducción de daños en el ADN, generación de especies reactivas de oxígeno y motilidad reducida de los espermatozoides
Diem et al. (2005)	Estudio de efectos de exposición intermitente o continua a RF de telefonía móvil 1800 MHz, con SAR 1,2 – 2 W/kg, en cultivos de fibroblastos humanos y células de roedor	Mayor inducción de ruptura de ADN en exposición intermitente que continua.
Hong et al. (2012),	Estudio de niveles de especies reactivas del oxígeno (ERO) en células de epitelio mamario humano expuestas durante 2 horas a RF monofrecuencia (837 MHz o 1950 MHz) y multifrecuencia (837 MHz y 1950 MHz) con SAR = 4 W/kg	Sin alteraciones estadísticamente significativas
Poullietier de Gannes et al. (2011)	Estudio de niveles de ERO en células humanas de cerebro expuestas durante 1 y 24 horas a RF de 1800 MHz a SAR de 2 o 10 W/kg	Sin incremento significativo en niveles de ROS.

Exposición a niveles subumbral ocupacionales

Epidemiología

Ahlbom et al (2004)	Revisión de estudios epidemiológicos sobre los efectos de los campos de radiofrecuencia (RF) en la salud	Sin evidencia consistente de efectos adversos, pero los estudios tienen demasiadas deficiencias para poder descartar una asociación.
Baste et al. (2008)	Estudio de efectos adversos de la reproducción entre miembros varones de la Marina Real noruega expuestos a RF de radar a bordo de lanchas rápidas	Incremento de mortalidad perinatal en la progeñie,
Bortkiewicz et al. (2017)	Metaanálisis de resultados publicados hasta marzo de 2014 sobre incidencia de tumores intracraneales y uso de telefonía móvil	El uso a largo plazo del teléfono móvil aumenta el riesgo de tumores intracraneales, especialmente en tumores ipsilaterales al hemisferio expuesto
Carlberg et al. (2013)	Estudio caso-control sobre asociación entre el uso de teléfonos celulares y el meningioma en sujetos de ambos sexos, de 18-75 años de edad y diagnosticados en 2007-2009	No evidencia concluyente de una asociación entre el uso de teléfonos móviles o inalámbricos y riesgo de meningioma
Carlberg et al. (2017)	Estudio de caso control realizado durante 1997-2003 y 2007-2009 sobre incidencia de cáncer en ocupaciones con exposición a ELF	Sin aumento significativo de incidencia de glioma. Incremento de incidencia de astrocitoma en estadio tardío (promoción / progresión)
Coureau et al. (2014)	Epidemiología de tumores primarios del sistema nervioso central (gliomas y meningiomas) en adultos usuarios de teléfonos celulares	Posible asociación entre el uso de teléfonos móviles e incidencia de tumores
Morgan et al. (2015)	Revisión de un estudio nacional francés, que evalúa el uso de teléfonos móviles y el riesgo de tumores cerebrales.	La radiación del teléfono móvil causa tumores cerebrales y debe clasificarse como un posible carcinógeno humano (Clase 2A de la clasificación de IARC)
Hardell et al. (2013a)	Análisis integrado de estudios caso-control sobre neuroma de nervio acústico diagnosticados entre 1997-2003 y 2007-2009 en usuarios de teléfonos móviles e inalámbricos	Asociación entre el uso del teléfono móvil e inalámbrico y riesgo de neuroma de nervio acústico
Hardell et al. (2013b)	Epidemiología de riesgo de incidencia de tumores cerebrales en usuarios de teléfonos móviles e inalámbricos	Asociación entre el uso del teléfono móvil e inalámbrico y riesgo de glioma y neuroma de nervio acústico. Proponen que RF de telefonía sean considerados carcinógenos

		para humanos, (Clase 1 en la clasificación del IARC)
Lönn et al. (2005)	Estudio caso-control de glioma o meningioma en usuarios suecos de teléfonos celulares (intervalo 2000-2002)	Sin incremento significativo de riesgo de glioma o meningioma en usuarios.
Muscat et al. (2000)	Estudios mediante cuestionario sobre posibles efectos carcinógenos por exposición a telefonía móvil en 469 sujetos con cáncer y 422 sin cáncer	Sin incremento significativo de tumores cerebrales en usuarios
Prasad et al. (2017)	Revisión de estudios sobre uso de teléfono móvil e incidencia de tumores cerebrales, considerando la calidad del estudio, la fuente de financiación y los resultados de la investigación	Asociación entre el uso del teléfono móvil y el riesgo de tumores cerebrales, especialmente en los usuarios a largo plazo (≥ 10 años)
Schutz et al (2006)	Estudio de cohorte nacional en Dinamarca con 420.095 personas cuya primera suscripción de telefonía celular fue entre 1982 y 1995 y que fueron seguidos durante 2002 por la incidencia de cáncer	Sin evidencia de asociación con incidencia de tumores
Wdowiak et al. (2007)	Estudio del efecto del tiempo de uso de teléfonos celulares sobre la fertilidad de los varones sometidos a la terapia de infertilidad conyugal	Incremento en la tasa de dismorfogénesis espermática y disminución en la motilidad espermática en función de tiempo y frecuencia de uso del teléfono GSM.
Yildirim et al. (2010)	Estudio sobre los efectos de RF emitidas por estaciones base de telefonía móvil en la frecuencia del micronúcleo (MN) y las aberraciones cromosómicas en la sangre de habitantes de viviendas a diferentes distancias de las estaciones	Sin relación entre daño genético y distancia (exposición residencial) a las estaciones base
Estudios en voluntarios		
Agarwal et al. (2008)	Estudio sobre efecto del uso del teléfono celular en diversos marcadores de la calidad del semen en 361 hombres	Disminución en número, motilidad y viabilidad espermática. Dismorfogénesis
Agarwal et al. (2009)	Estudio sobre efectos de la señal RF de telefonía en modo "conversación" en diversos parámetros espermáticos en 23 donantes sanos y 9 infértiles .	Inducción de estrés oxidativo
Bak (2010)	Estudio del efecto de la exposición a señal de telefonía GSM en funciones del cerebro humano en 15 voluntarios	Inducción de cambios en potenciales asociados a eventos
Barth et al. (2011)	Revisión y análisis integrado de 17 estudios sobre el efecto de la exposición a RF de telefonía en la cognición humana	Sin efectos cognitivos significativos
Booberly et al. (1999)	Estudio sobre efectos de exposición a SAR ≤ 1 W/kg (900 MHz) en EEG durante el sueño en voluntarios	Cambios en la actividad EEG durante el sueño
Cinel et al. (2007)	Estudio del efecto de la exposición experimental (sesión única) a RF de telefonía en el umbral	No se detectaron efectos significativos

	auditivo de 168 voluntarios	
Croft et al. (2002)	Estudio sobre efectos de la exposición a la señal de telefonía celular en el EEG de 24 voluntarios.	Efectos significativos en funciones neurológicas, en función de la duración de la exposición.
Danker-Hopfe et al. (2016)	Estudios sobre los efectos de RF sobre la macroestructura del sueño en treinta hombres jóvenes sanos	Cambios en el sueño REM e Indicios de mecanismo térmico subyacente
Curcio et al. (2004)	Estudio sobre efectos de la exposición, previa o simultánea al test, a RF de 902,40 MHz en parámetros cognitivos y comportamentales en voluntarios	Acortamiento significativos en tiempos de reacción, e incremento de la temperatura de la región expuesta
Erogul et al. (2006)	Estudio de efectos del uso del teléfono móvil en parámetros espermáticos de 27 voluntarios.	Alteraciones en la motilidad espermática
Fejes et al. (2005)	Estudio sobre posible relación entre el uso regular del teléfono móvil y alteraciones del semen en voluntarios que rellenaron un formulario sobre sus hábitos de uso del teléfono	Potenciales efectos negativos sobre la motilidad espermática
Ghosn et al. (2015)	Estudio para efectos de la exposición en reposo a señal GSM sobre el EEG de 26 voluntarios	Cambios significativos en la amplitud de la banda α del EEG
Lowden et al. (2011)	Estudio sobre los efectos de 3 horas de exposición vespertina a GSM 884 MHz, SAR 1,4 W/kg, en el EEG durante el sueño de 48 voluntarios	Incremento significativo en la amplitud de la señal α del EEG
Hamblin et al. (2004)	Estudio sobre efectos de la exposición a RF de teléfono celular en potenciales relacionados con eventos auditivos en 12 voluntarios	Cambios en la actividad neuronal
Hietanen et al. (2000)	Estudio de análisis de la actividad del EEG en 19 voluntarios expuestos a 5 diferentes teléfonos celulares (modelos analógicos y digitales) que operan a una frecuencia de 900 MHz o 1800 MHz	Sin anomalías detectables en el EEG
Hubber et al. (2002)	Estudio de efectos de exposición a RF 900 MHz en el flujo sanguíneo cerebral y en el EEG de voluntarios durante el sueño y la vigilia	Alteraciones en el flujo sanguíneo
Hubber et al. (2005)	Estudio de efectos RF 900 MHz con modulación de teléfono móvil y estaciones base, en funciones cerebrales de 12 voluntarios	Alteraciones en la función cerebral dependiendo de la modulación de la señal
Koivisto et al. (2000)	Estudio de la influencia RF pulsada GSM en la memoria de trabajo en voluntarios sanos	Cambios significativos en el rendimiento cognitivo
Krause et al. (2000a)	Estudio sobre la función cognitiva mediante el análisis del EEG en 16 voluntarios mientras realizaban una tarea de memoria auditiva. con y sin exposición a RF 902 MHz	Sin cambios en el EEG en reposo. Pero cambios significativos por exposición a RF durante la tarea de memoria.

Krause et al (2000b)	Estudio de efectos en la sincronización de la respuesta asociada a acontecimientos en el proceso cognitivo en 24 voluntarios expuestos a RF de 902 MHz	Modulación por RF de la actividad oscilatoria EEG durante los procesos cognitivos
Leung et al. (2011)	Estudio de efectos de la exposición a RF de telefonía 2G y 3G sobre el procesamiento sensorial y cognitivo en 61 voluntarios en un rango amplio de edades	Cambios en la función cognitiva
Loughran et al. (2005)	Efecto de 30 m de exposición a señal RF de telefonía antes de dormir, en el EEG de 50 voluntarios	Cambios en el EEG durante el primer período no REM.
Luria et al. (2009)	Estudio de los efectos, en función del tiempo de exposición, de RF GSM sobre las funciones cognitivas en 48 voluntarios ♂ durante la realización de una tarea de memoria espacial	Efectos detectables sobre el rendimiento, en función del tiempo de exposición
Lustenberger et al. (2013)	Efectos de la exposición a RF en el sueño de 16 voluntarios	Interacción con la renormalización de la excitabilidad cortical durante el sueño. Impacto negativo en el rendimiento del sueño
Parrazzini et al. (2013)	Estudio de efectos de RF GSM 900 MHz en la función cardíaca de 26 voluntarios.	Sin efectos estadísticamente significativos
Preece et al. (1999)	Estudio de efectos de exposición a RF de 915 MHz y 0,6 mT en funciones cognitivas de 36 voluntarios	Aumento en la capacidad de respuesta. Sin cambios en la memoria de palabras, números o imágenes, ni en la memoria espacial
Reiser et al. (1995)	Estudio de efectos de la exposición a señal GSM sobre la actividad cerebral en 36 voluntarios	Incremento en la amplitud EEG en las bandas $\alpha 2$, $\beta 1$ y $\beta 2$ durante y después de la exposición
Roggeveen et al. (2015)	Estudio de efectos de 15 m de exposición a señal RF 3G en la actividad EEG de 31 mujeres	Alteraciones del EEG. El efecto depende del lugar de apoyo del teléfono durante la exposición
Ros-Llor et al. (2012)	Estudio de cohorte de daño genético en muestras de células de 50 voluntarios usuarios de teléfonos móviles	Sin efectos genotóxicos detectables
Sauter et al. (2011)	Estudio de efectos a largo plazo de la exposición a RF de telefonía en la función cognitiva (atención y memoria) en 30 voluntarios sanos	Sin evidencia de efectos cognitivos
Schmid et al. (2012)	Estudio de efectos de la exposición durante el sueño a RF de 900 MHz, modulados a 14 Hz o 217 Hz, en el EEG de 30 voluntarios	Alteraciones en el EEG a corto plazo
Trunk et al. (2013)	Estudio de efectos de 30 min de exposición a señal RF 3G en el EEG (17 voluntarios) y en potenciales relacionados con eventos auditivos (26 voluntarios)	Cambios significativos en el EEG y en los potenciales evocados
Vecchio et al. (2010)	Estudio sobre efectos de la exposición a señal GSM en la función cognitiva y el EEG en 16 voluntarios de edad avanzada y 5 jóvenes	Efectos en la sincronización inter-hemisférica de los ritmos EEG dominantes (α) en función del envejecimiento

		fisiológico
Vecchio et al. (2012)	Estudio de los efectos de 45 min de exposición a señal GSM en la función cognitiva y el EEG en 11 voluntarios sanos	Cambios en la amplitud de la onda α y en el tiempo de reacción a los estímulos
Wagner et al. (2000)	Estudio sobre los efectos de la exposición nocturna a RF GSM de 900 MHz con modulación de 217 Hz, en el patrón de EEG durante el sueño de 20 voluntarios sanos	Sin efectos significativos en el EEG
Wallace et al. (2012)	Estudio de la exposición aguda a una señal de estación base de telefonía en la función cognitiva y/o en respuestas fisiológicas en 51 sujetos que referían electrosensibilidad y en 132 control	Sin diferencias en la respuesta fisiológica o en el rendimiento cognitivo entre la exposición simulada y la exposición real, en ninguno de los dos grupos
Efectos en vivo: Fisiología, metabolismo, parámetros sanguíneos, reproducción, desarrollo		
Aldad et al. (2012)	Estudio de los efectos en el desarrollo neuronal y el comportamiento en ratones con exposición fetal a señal RF de telefonía (800 MHz y 1900 MHz)	Inducción de alteraciones en desarrollo neuronal y el comportamiento en ratones
Bartsch et al. (2010)	Estudio de efectos relativos a largo plazo en ratas expuestas a RF de 900 MHz modulada a 217 Hz, y SAR entre 38 y 80 mW/kg)	Sin efectos nocivos detectables, pero reducción significativa de la vida media de los ratas expuestos
Colak et al. (2012)	Estudio de efectos de la exposición 40 m/d durante 22 días a señal RF 3G sobre la frecuencia cardíaca, la presión arterial el EKG de 36 ratas	Sin efectos significativos
Dasdag et al. (1999)	Estudio de efectos de la exposición a RF emitidas por teléfonos celulares ubicadas bajo las jaulas de 18 ratas ♂	Reducción del diámetro de los canales seminíferos e incremento de la temperatura rectal
Grigoriev et al. (2010)	Estudio de efectos reproductivos e inmunológicos en ratas expuestas 7 h/d, 5 d/s durante 30 días a RF de 2450 MHz y SAR de cuerpo completo de 0,16 W/kg	Efectos en parámetros plasmáticos susceptibles de afectar a la gestación y al desarrollo embrionario
Kaprana et al. (2008)	Estudio de cambios electrofisiológicos durante 60 m de exposición a señal GSM-900 en 30 conejos	Inducción de alteraciones en la actividad electrofisiológica normal del sistema auditivo,
Kumar et al. (2012)	Estudio sobre el efecto de la exposición 2 h/d durante 45 días a RF 10 GHz en el sistema reproductor de rata ♂ adulta	Efectos negativos en la fertilidad
Kumar et al. (2010)	Estudio de efectos genotóxicos en ratas expuestas 2 h/d durante 45 días a RF de 10 GHz y SAR = 0,014 W/kg o de 50 GHz y SAR = $8,0 \times 10^{-4}$ W/kg)	Efectos genotóxicos y de potencial promoción tumoral, por sobreproducción de especies reactivas del oxígeno
Shirai et al. 2014	Estudio de los efectos de la exposición durante 20 h/d a señales de 2,14 GHz (W-CDMA), y SAR <0,24 W/kg o SAR <0,08 W/kg en tres generaciones de ratas	Sin efectos adversos en la descendencia F1, F2 y F3
Yang et al.	Estudio de efectos de dos sesiones de 3 h/d de	Alteraciones en la

(2007)	exposición a RF de teléfonos celulares en la espermatogénesis de 16 ratas	espermatogénesis. Los autores advierten contra la costumbre de portar el teléfono en las inmediaciones de las gónadas
Efectos in vivo: Efectos neurológicos, cognitivos, comportamentales, sensoriales		
Bodera et al. (2012)	Estudio de los efectos de exposición a 1500 MHz y 90 V/m o de 1800 MHz y 20 V/m, en la percepción del dolor agudo o crónico en ratas tratadas con analgésicos	La RF no influye significativamente en la percepción del dolor por sí sola, pero bloquea parcialmente el efecto analgésico
Fragopoulou et al. (2010)	Estudio de los efectos de RF GSM 900MHz en el aprendizaje espacial y la memoria en ratones expuestos durante 4 días a valores SAR de 0,41-0,98 W / kg	Déficit en consolidación y / o recuperación de la memoria espacial
Ntzouni et al. (2011)	Estudio de efectos en el desarrollo y la función cerebral en ratas expuestas a RF 1800 MHz y SAR = 0,22 W/kg	Interacción significativa con la fase de consolidación de procesos de memoria de reconocimiento.
Sharma et al. (2014)	Estudio sobre los efectos de la exposición a microondas en la memoria espacial y la concentración de proteínas totales en el cerebro de ratones	Disminución en los niveles de proteína cerebral total, acompañada de capacidad reducida en el aprendizaje de la tarea de memoria espacial
Sienkiewicz et al. (2000)	Estudio sobre efectos de la exposición 45 m/d durante 10 días a RF de 900 MHz pulsado a 217 Hz y SAR 0.05 W/kg, en el desarrollo de una tarea de aprendizaje espacial y de memoria de trabajo motivada por el apetito en ratones ♂ adultos	Sin efectos significativos en la adquisición de la respuesta
Sokolovic et al. (2012)	Estudio de efectos de una exposición crónica a microondas y de melatonina en la masa corporal y el comportamiento de ratas	Cambios comportamentales y disminución de la masa corporal (reversibles mediante tratamiento con melatonina), relacionados con ansiedad inducida por la irradiación
Efectos in vivo: Cáncer, genotoxicidad, estrés oxidativo		
Aitken et al. (2005)	Estudio de los efectos en el semen de ratones expuestos a RF de 900 MHz y SAR 90 mW/kg durante 7 días 12 h/día	Efecto genotóxico significativo sobre los espermatozoides
Atasoy et al. (2012)	Estudio de los efectos en los testículos de rata expuesta a RF emitida por dispositivos de acceso a Internet Wi-Fi	Daño en el DNA
Fragopoulou et al. (2012)	Estudio de efectos en el proteoma del cerebelo, hipocampo y lóbulo frontal en ratones expuestos 3	Alteraciones en la expresión de proteínas del sistema

	h/d durante 8 meses a RF con SAR de 0.17 - 0.37 W/kg durante 3 horas/día y 8 meses, o bien 8 h/d durante 8 meses a señal DECT con SAR de 0,012-0,028 W/kg	nervioso, relacionadas con estrés oxidativo y/o implicadas en apoptosis
Kumar et al. (2013)	Estudio de efectos en la fertilidad en ratas expuestas 2 h/d durante 45 días a RF de 10 GHz y SAR de 0,014 W / kg.	RF 10 GHz tiene un efecto perjudicial sobre el potencial de fertilidad de los animales expuestos al macho Contradictorio: confirma
Efectos in vitro: Fisiología celular: proliferación, ciclo celular, viabilidad		
Maskey et al. (2012)	Estudio de efectos de la exposición durante 8 horas a RF a 835 MHz y 1,6 o 4 W/kg en la química y fisiología cerebral de ratas.	Alteraciones en expresión de proteínas implicadas en la homeostasis de calcio, lo que puede inducir muerte celular y daño cerebral
Efectos in vitro: genotoxicidad, estrés oxidativo		
Avendaño et al. (2012)	Estudio sobre los efectos de la exposición a señal Wi-Fi emitida por ordenadores portátiles, en espermatozoides de 29 donantes sanos	Disminución de la motilidad de los espermatozoides e incremento en la fragmentación del ADN
Karaca et al. (2012)	Estudio de efectos genotóxicos en cultivos de células cerebrales de ratón expuestas 6 h/d durante 3 días a RF de 10,715 GHz y SAR = 0,725 W/kg	Potencial genotóxico y alteraciones en la expresión génica.

APÉNDICE 4

APÉNDICE 4: PARÁMETROS PARA LA EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

De acuerdo con los criterios del RD 299/2016 las magnitudes empleadas para definir la exposición a campos electromagnéticos, relacionadas con los parámetros que definen la interacción de los campos con la materia y los efectos en la salud, son:

- **Corriente de contacto (I_C)**, es la corriente que aparece cuando una persona entra en contacto con un objeto en un campo electromagnético; Se produce una corriente de contacto en estado estacionario cuando una persona está en contacto continuo con un objeto en un campo electromagnético. En el proceso del establecimiento de dicho contacto, puede producirse una descarga de chispas con corrientes transitorias asociadas. Se expresa en amperios (A).
- La **densidad de corriente (J)**, se define como la corriente que fluye por unidad de sección transversal perpendicular a la dirección de la corriente en un cuerpo volumétrico, como puede ser el cuerpo humano o parte de éste, expresada en amperios por metro cuadrado (A/m^2).
- La **intensidad de campo eléctrico (E)**, es una magnitud vectorial que corresponde a la fuerza ejercida sobre una partícula cargada independientemente de su movimiento en el espacio. Se expresa en voltio por metro (V/m).
- La **intensidad de campo magnético (H)**, es una magnitud vectorial, que describe el campo magnético en una región del espacio a partir de sus fuentes (las corrientes eléctricas). La intensidad del campo magnético, junto con la inducción magnética, determina un campo en cualquier punto del espacio. Se expresa en amperio por metro (A/m).
- La **densidad de flujo magnético o inducción magnética (B)**, es una magnitud vectorial que expresa el flujo magnético por unidad de área. La densidad de flujo magnético representa la fuerza ejercida sobre una partícula cargada en movimiento, y se expresa en teslas (T). En un espacio libre y en materiales biológicos, la densidad de flujo magnético o inducción magnética y la intensidad de campo magnético están relacionadas mediante la equivalencia $1A/m = 4\pi \cdot 10^{-7} T$.

- La **densidad de potencia** (S), es la potencia radiante que incide perpendicularmente a una superficie por unidad de área de la superficie. Es la magnitud adecuada para frecuencias muy altas, cuya profundidad de penetración en el cuerpo es baja. Se expresa en vatios por metro cuadrado (W/m^2).
- La **absorción específica de energía** (SA o AE), se define como la energía absorbida por unidad de masa de tejido biológico, expresado en julio por kilogramo (J/kg). Se utiliza para limitar los efectos no térmicos de radiación de microondas pulsátil.
- La **tasa de absorción específica de energía** (SAR), cuyo promedio se calcula en la totalidad del cuerpo o en partes de éste, se define como la energía que es absorbida por unidad de masa de tejido corporal y se expresa en vatios por kilogramos (W/kg). El SAR de cuerpo entero es una medida ampliamente aceptada para relacionar los efectos térmicos adversos con la exposición a campos de radiofrecuencias (RF). Junto al SAR medio de cuerpo entero, los valores SAR locales son necesarios para evaluar y limitar una acumulación excesiva de energía en pequeñas partes del cuerpo como consecuencia de unas condiciones especiales de exposición. Como ejemplo de esas condiciones pueden citarse la exposición de una persona a campos de radiofrecuencias en la gama baja de los MHz o la exposición de una persona en las inmediaciones de una antena.

La SAR es la base de los límites para exposición a radiofrecuencias propuestos por ICNIRP, dependiente de la Organización Mundial de la Salud (OMS). La cantidad de energía térmica absorbida por un determinado órgano o tejido es función de su tamaño, profundidad y morfología, pero también depende en gran medida de su conductividad térmica y de su irrigación. Así, la rótula y el cristalino son particularmente susceptibles a las radiofrecuencias debido a su pobre irrigación sanguínea; por el contrario, el corazón, los pulmones y la piel son menos sensibles debido a su elevado volumen de sangre.

APÉNDICE 5

APÉNDICE 5: CRITERIOS DE CAMPO CERCANO Y CAMPO LEJANO

En la región de “*campo lejano*”, el modelo de onda plana es una buena aproximación de la propagación del campo electromagnético, de manera que para conocer la exposición es suficiente con medir las dos componentes del campo. En esta situación de campo lejano las características de onda plana, son:

- Los frentes de onda tienen una geometría plana.
- Los vectores **E** y **H** son perpendiculares entre sí, y a la dirección de propagación.
- Los campos eléctrico y magnético están en fase, y el cociente de las amplitudes E/H es constante a través del espacio. En espacio libre, la relación entre el campo eléctrico y campo magnético es $E/H = 377$ ohmios, que es la impedancia característica del espacio libre.
- La densidad de potencia S, es decir la potencia por unidad de área normal a la dirección de propagación, está relacionada con los campos eléctricos y magnéticos por la expresión: $S = E \cdot H = E^2 / 377 = H^2 \times 377$.

Por el contrario, la situación en el “*campo cercano*” es más complicada ya que los máximos y mínimos del campo eléctrico y magnético no coinciden a lo largo de la dirección de propagación. En la región de “*campo cercano*”, la estructura del campo electromagnético puede ser altamente heterogénea y habrá variaciones sustanciales de la impedancia de onda plana, por lo que será necesario medir las dos componentes del campo electromagnético para conocer la exposición. Las exposiciones en el “*campo cercano*” son más difíciles de valorar porque se deben medir independientemente el campo eléctrico y el campo magnético y porque los patrones de los campos son mucho más complicados. En esta situación, y en contraste con la condición de “*campo lejano*”, la densidad de potencia ya no es un parámetro apropiado para expresar las restricciones a la exposición.

Para establecer el límite entre “*campo cercano*” y “*campo lejano*”, la **orden CTE/23/2002**, de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones para operadores de servicios

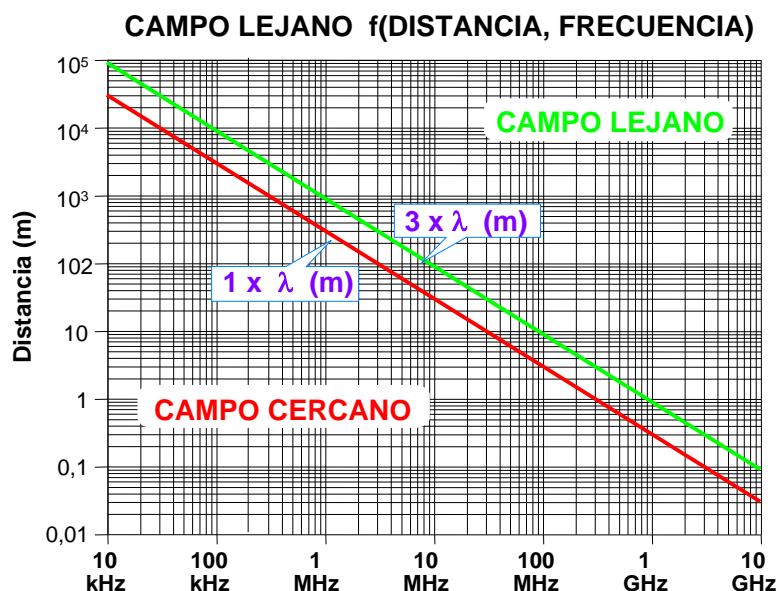
de radiocomunicaciones, adoptando la práctica empleada tradicionalmente en el ámbito de las telecomunicaciones, propone el siguiente criterio aproximativo:

Campo cercano	Campo lejano
$R \leq 3\lambda$	$R > 3\lambda$

Siendo R la distancia de la fuente al punto de medida y λ la longitud de onda de la radiación.

“Si el punto de medida estuviese en “campo cercano”, sería necesario verificar las intensidades de campo eléctrico E y magnético H , a fin de comparar con los valores establecidos en cada caso. Si el punto de medida se encontrase en “campo lejano”, sólo sería necesario medir una de las magnitudes de intensidad de campo, deduciéndose la otra por la expresión $E/H = 377$ ” (Orden CTE/23/2002).

Por tanto, cuando la distancia a la fuente es suficientemente lejana en relación con la longitud de onda (superior a 3 longitudes de onda) como para que la transmisión se realice en campo libre, es decir sin interferencias, se cumple la condición de onda plana, cumpliéndose la siguiente relación entre ellos: $S = E \times H$.



BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- Aldad TS, Gan G, Gao XB, Taylor HS. 2012. Fetal radiofrequency radiation exposure from 800–1900 MHz-rated cellular telephones affects neurodevelopment and behavior in mice. *Sci Re* 2012;2:312
- AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). <http://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/radiacionuv>
- Agarwal A, Deepinder F, Sharma RK, Ranga G, Li J. 2008. Effect of cell phone usage on semen analysis in men attending infertility clinic: an observational study. *Fertil Steril* 2008;89(1):124–8
- Agarwal A, Desai NR, Makker K, Varghese A, Mouradi R, et al. 2009. Effect of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMF) from cellular phones on human ejaculated semen: an in vitro study. *Fertil Steril* 2009;92(4):1318–25.
- Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, et al. 2000. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer* 2000;83(5):692–8
- Ahlbom, A., Green, A., Kheifets, L., Savitz, D., Swerdlow, A., & Epidemiology, I. S. C. 2004. Epidemiology of health effects of radiofrequency exposure. *Environ Health Perspect*, 2004; 112(17), 1741-1754.
- Aitken RJ, Bennetts LE, Sawyer D, Wiklendt AM, King BV. 2005. Impact of radio frequency electromagnetic radiation on DNA integrity in the male germline. *Int J Androl* 2005;28(3):171–9
- Ali, M.A. 2007. Magnetic resonance imaging and associated alteration in some biophysical properties of blood. *Rom. J. Biophys.* 2007, 17, 277-286.
- Amara, S., Douki, T., Garel, C., Favier, A., Sakly, M., Rhouma, K. B. & Abdelmelek, H. 2009. Effects of static magnetic field exposure on antioxidative enzymes activity and DNA in rat brain. *Gen Physiol Biophys*, 2009; 28, 260-5.
- Atasoy, H.I, Gunal M.Y., Atasoy P., Elgun S., Bugdayci G. 2013. Immunohistopathologic demonstration of deleterious effects on growing rat testes of radiofrequency waves emitted from conventional Wi-Fi devices. *Journal of Pediatric Urology* Volume 9, Issue 2, April 2013, Pages 223–229.

- Avendaño, C., Mata, A., Sanchez Sarmiento, C. A. and Doncel, G. F. 2012. Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *Fertility and sterility*. 2012; 97(1), 39-45.e2.
- Bak M, Dudarewicz A, Zmyślony M, Sliwinska-Kowalska M. 2010; Effects of GSM signals during exposure to event related potentials (ERPs). *Int J Occup Med Environ Health* 2010;23(2):191–9
- Barth, A., Ponocny, I., Gnambs, T. & Winker, R. 2011. No effects of short-term exposure to mobile phone electromagnetic fields on human cognitive performance: A metaanalysis. *Bioelectromagnetics*, 2011; 33, 159-65.
- Bartsch, H., Kupper, H., Scheurlen, U., Deerberg, F., Seebald, E., Dietz, K., Bartsch, C. 2010. Effect of chronic exposure to a GSM-like signal (mobile phone) on survival of female Sprague-Dawley rats: Modulatory effects by month of birth and possibly stage of the solar cycle. *Neuroendocrinology Letters*, 2010; 31(4), 457-473.
- Baste, V., Moen, B. E., Oftedal, G., Strand, L. A., Bjorge, L., & Mild, K. H. 2012. Pregnancy outcomes after paternal radiofrequency field exposure aboard fast patrol boats. *Journal of Occupational & Environmental Medicine*, 54(4), 431-438. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/JOM.0b013e3182445003>.
- Baste V, Riise T, Moen BE. 2008. Radiofrequency electromagnetic fields; male infertility and sex ratio of offspring. *Eur J Epidemiol* 2008; 23 (5): 369-377.
- Belyaed I., Dean A., Eger H., Hubmann G., Jandrisovits R., Kern M., Kundi M., Moshammer H., Lercher P., Müller K., Oberfeld G., Ohnsorge P., Pelzmann P., Scheingraber C. and Thill R. 2016. EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. *Rev Environ Health* 2016; 31(3): 363–397. DOI 10.1515/reveh-2016-0011.
- Blackman C. Cell phone radiation: 2009. Evidence from ELF and RF studies supporting more inclusive risk identification and assessment. *Pathophysiology*. 2009 Aug;16(2-3):205-16.
- Boder, P., Stankiewicz, W., Antkowiak, B., Paluch, M., Kieliszek, J., Sobiech, J., Zdanowski, R., Wojdas, A., Siwicki, A. K. & Skopinska-Rozewska, E. 2012.

Suppressive effect of electromagnetic field on analgesic activity of tramadol in rats. *Pol.J Vet.Sci*, 2012; 15, 95-100.

- Borbely A.A, Huber R:, Graf T., Fuchs B., Gallmann E., Achermann P. 1999. Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram, *Neuroscience Letters* 275 (3) (1999) 207–210.
- Borhani, N., Rajaei, F., Salehi, Z. & Javadi, A. 2011. Analysis of DNA fragmentation in mouse embryos exposed to an extremely low-frequency electromagnetic field. *Electromagn Biol Med*, 30, 246-52.
- Bortkiewicz A. , Gadzicka E., and Szymczak W. 2017. Mobile phone use and risk for intracranial tumors and salivary gland tumors – a meta-analysis. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 2017;30(1):27 – 43 <https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.00802>
- Bouyssi-Kobar, M., du Plessis, A. J., Robertson, R. L. and Limperopoulos, C. 2015. Fetal magnetic resonance imaging: exposure times and functional outcomes at preschool age. *Pediatric radiology*. 45(12), 1823-30 (2015).
- Bradley, J. K., Nyekiova, M., Price, D. L., López, L. D. and Crawley, T. 2007. Occupational exposure to static and time-varying gradient magnetic fields in MR units. *Journal of Magnetic Resonance Imaging: JMRI*. 26(5), 1204-9 (2007).
- Brown, P. 1933. *American Martyrs to Science through the Roentgen Rays*. Springfield, Illinois: Charles C Thomas
- Caraglia M., Marra M., Mancinelli F., D'ambrosio G., Massa R., Giordano A., Budillon A., Abbruzzese A., Bismuto E. 2005. Electromagnetic fields at mobile phone frequency induce apoptosis and inactivation of the multi-chaperone complex in human epidermoid cancer cells. *Journal of Cellular Physiology*. Volume 204, Issue 2, pages 539–548, August 2005-
- Carlberg M, Söderqvist F, Hansson Mild K, Hardell L. 2013. Meningioma patients diagnosed 2007-2009 and the association with use of mobile and cordless phones: a case-control study. *Environ Health*. 2013 Jul 19;12(1):60. doi: [10.1186/1476-069X-12-60](https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-60).
- Carlberg M, Hardell L. 2017. Evaluation of Mobile Phone and Cordless Phone Use and Glioma Risk Using the Bradford Hill Viewpoints from 1965 on Association or

Causation. *Biomed Res Int.* 2017;2017:9218486. doi: [10.1155/2017/9218486](https://doi.org/10.1155/2017/9218486).
Epub 2017 Mar 16

- Carlberg M, Koppel T, Ahonen M, Hardell L. 2017. Case-control study on occupational exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields and glioma risk. *Am J Ind Med.* 2017 May;60(5):494-503. doi: [10.1002/ajim.22707](https://doi.org/10.1002/ajim.22707).
Epub 2017 Apr 10.
- Chakeres, D.W.; De Vocht, F. 2005. Static magnetic field effects on human subjects related to magnetic resonance imaging systems. *Prog.Biophys.Mol.Biol.*2005, 87, 255-265.
- Chu, L. Y., Lee, J. H., Nam, Y. S., Lee, Y. J., Park, W. H., Lee, B. C., Kim, D., Chung, Y. H. & Jeong, J. H. 2011. Extremely low frequency magnetic field induces oxidative stress in mouse cerebellum. *Gen Physiol Biophys*, 2011; 30, 415-21.
- Ciejka, E., Kleniewska, P., Skibska, B. & Goraca, A. 2011. Effects of extremely low frequency magnetic field on oxidative balance in brain of rats. *J Physiol Pharmacol*, 2011; 62, 657-61.
- Cinel C, Boldini A, Russo R, Fox E. 2007. Effects of mobile phone electromagnetic fields on an auditory order threshold task. *Bioelectromagnetics* 2007;28(6):493–6
- CIPR. Comisión Internacional para la Protección Radiológica. 1984. Nonstochastic effects of ionizing radiation. *Ann ICRP* 14(3):1-33.
- CIPR. Comisión Internacional para la Protección Radiológica 1991. recomendaciones de la Comisión Internacional para la Protección Radiológica. *Ann ICRP* -21:1-3
- Colak C., Parlakpınar H., Ermis N., Tagluk M.E., Colak C., Sarihan E., Dilek O.F., Turan B., Bakir S., Acet A.2012 . Effects of electromagnetic radiation from 3G mobile phone on heart rate, blood pressure and ECG parameters in rats. *Toxicology and Industrial Health.* Vol 28, Issue 7, 2012
- Coskun, O. & Comlekci, S. 2011. Effect of ELF electric field on some on biochemistry characters in the rat serum. *Toxicol Ind Health*, 2011; 27, 329-33.
- Coureau G, Bouvier G, Lebailly P, Fabbro-Peray P, Gruber A, et al. 2014. Mobile phone use and brain tumours in the CERENAT case-control study. *Occup Environ Med* 2014;71(7):514–22

- Croft R, Chandler J, Burgess A, Barry R, Williams J, et al. 2002. Acute mobile phone operation affects neural function in humans. *Clin Neurophysiol* 2002;113(10):1623–32.
- Crozier, S.; Wang, H.; Trakic, A.; Liu, F. 2007. Exposure of workers to pulsed gradients in MRI. *J. Mag. Res. Imaging* 2007, 26, 1236-1254.
- CSIC. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Radiofrecuencias y Salud. Colección Debates Científicos. Hernando A. y Úbeda-Maeso A. 2010. ISBN 978-84-00-09047-0.
- CSN. Consejo de Seguridad Nuclear. (<https://www.csn.es/centrales-nucleares-de-espana>)
- Cui, Y., Ge, Z., Rizak, J. D., Zhai, C., Zhou, Z., Gong, S. & Che, Y. 2012. Deficits in water maze performance and oxidative stress in the hippocampus and striatum induced by extremely low frequency magnetic field exposure. *PLoS One*, 7, e32196.
- Curcio G, Ferrara M, De Gennaro L, Cristiani R, D'Inzeo G, et al. 2004. Time-course of electromagnetic field effects on human performance and tympanic temperature. *Neuroreport* 2004; 15(1):161–4
- Cvetkovic, D. & Cosic, I. 2009. Alterations of human electroencephalographic activity caused by multiple extremely low frequency magnetic field Exposures. *Med Biol Eng Comput*, 2009; 47, 1063-73.
- Danker-Hopfe H, Dorn H, Bolz T, Peter A, Hansen ML, et al. 2015. Effects of mobile phone exposure (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on polysomnography based sleep quality: An intra- and inter-individual perspective. *Environ Res* 2015;145:50–60
- Dasdag S. 1999. Whole-body microwave exposure emitted by cellular phones and testicular function of rats. *Urol Res* 1999;27(3):219–23
- De Iuliis GN, Newey RJ, King BV, Aitken RJ. 2009. Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro. *PLoS One* 2009;4(7):e6446

- De Vocht, F.; van Drooge, H.; Engels, H.; Kromhout, H. (2006 a). Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners manufacturing department. *J.Magn.Reson.Imaging* 2006, 23, 197-204.
- De Vocht, F.; Stevens, T.; van Wendel De Joode, B.; Engels, H.; Kromhout, H. (2006 b). Acute neurobehavioral effects of exposure to static magnetic fields: analyses of exposure-response relations. *J.Magn.Reson.Imaging* 2006, 23, 291-297.
- De Vocht, F., Wilen, J., Hansson Mild, K., Van Nierop, L. E., Slottje, P. and Kromhout, H. 2012. Health effects and safety of magnetic resonance imaging. *Journal of Medical Systems*. 2012; 36(3), 1779-80
- Diem, E.; Schwarz, C.; Adlkofer, F.; Jahn, O.; Rudiger, H. 2005. Non-thermal DANN breakage by mobile phone radiation (1800 MHz) in human fibroblasts and in transformed GFSH-R17 rat granulosa cells in vitro. *Mutat.Res.*2005, 583, 178-183.
- Elferchichi, M., Ammari, M., Maaroufi, K., Sakly, M. & Abdelmelek, H. 2011. Effects of exposure to static magnetic field on motor skills and iron levels in plasma and brain of rats. *Brain Inj*, 2011; 25, 901-8.
- Emre, M., Cetiner, S., Zencir, S., Unlukurt, I., Kahraman, I. & Topcu, Z. 2011. Oxidative stress and apoptosis in relation to exposure to magnetic field. *Cell Biochem Biophys*,2011; 59, 71-7.
- Erogul O, Oztas E, Yildirim I, Kir T, Aydur E, et al. 2006. Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility:an in vitro study. *Arch Med Res* 2006;37(7):840–3
- España. RD 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas. BOE nº. 234, de 29/09/2001, páginas 36217 a 36227. (2001).
- España. Orden CTE/23/2002, de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones. BOE nº. 11, de 12/01/2002, páginas 1528 a 1536. (2002).

- España. Real Decreto 299/2016, de 22 de julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos. BOE nº 182 de 29/7/2016 (2016).
- European Union. Tratado de Maastrich. 1993. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM:xy0026>
- European Union. Council recommendation 1999/519/CE of 12 July 1999 on the limitation of the exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). Official Journal. L 199 of 30/7/1999 (1999).
- European Union. Directive 2004/40/CE of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). L 159 of 30/04/ 2004.
- European Union. Directive 2013/35/EU of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). Official Journal of the European Union (2013). L 179/1 of 29/6/2013.
- European Union. Non-binding guide to good practice for implementing Directive 2013/35/EU Electromagnetic Fields. Volume I: Practical Guide. ISBN: 978-92-79-45869-9 (2014).
- European Union. Non-binding guide to good practice for implementing Directive 2013/35/EU Electromagnetic Fields. Volume II: Case Studies. ISBN: 978-92-79-45937-5 (2014).
- Evans, J.A.; Savitz, D.A.; Kanal, E.; Gillen, J. 1993. Infertility and pregnancy outcome among magnetic resonance imaging workers. J.Occup.Med.1993, 35, 1191-1195.Int. J. Environ. Res. Public Health 2009, 6 1794
- Fejes I, Zavacki Z, Szollosi J, Koloszar Daru J, Kovacs L, et al. 2005. Is there a relationship between cell phone use and semen quality? Arch Androl 2005;51(5):385–93
- Feychting, M. 2005. Health effects of static magnetic fields—a review of the epidemiological evidence. Prog.Biophy.Mol.Biol.2005, 87, 241-246

- Fragopoulou AF, Miltiadous P, Stamatakis A, Stylianopoulou F, Koussoulakos SL, et al. 2010. Whole body exposure with GSM 900 MHz affects spatial memory in mice. *Pathophysiology* 2010;17(3):179–87.
- Fragopoulou, A. F., Samara, A., Antonelou, M. H., Xanthopoulou, A., Papadopoulou, A., Vougas, K., Koutsogiannopoulou, E., Anastasiadou, E., Stravopodis, D. J., Tsangaris, G. T. & Margaritis, L. H. 2012. Brain proteome response following whole body exposure of mice to mobile phone or wireless DECT base radiation. *Electromagn Biol Med*, 2012; 31, 250-74.
- Gafeey C.T., Tenforde T.S.1981. Alterations in the rat electrocardiogram induced by stationary magnetic fields. [DOI: 10.1002/bem.2250020407](https://doi.org/10.1002/bem.2250020407)
- Ghodbane, S., Amara, S., Garrel, C., Arnaud, J., Ducros, V., Favier, A., Sakly, M. & Abdelmelek, H. 2011. Selenium supplementation ameliorates static magnetic fieldinduced disorders in antioxidant status in rat tissues. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2011. 31, 100-6.
- Ghosn R, Yahia-Cherif L, Hugueville L, Ducorps A, Lemarechal JD, et al. 2015. Radiofrequency signal affects alpha band in resting electroencephalogram. *J Neurophysiol* 2015;113(7):2753–9
- González F. Miguez E.; Tavares M. 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282008000100010>
- Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA. 2010. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. Childhood Leukemia-EMF Study Group. *Epidemiology* 2000;11(6):624–34
- Grigoriev, Y. G., Grigoriev, O. A., Ivanov, A. A., Lyaginskaya, A. M., Merkulov, A. V., Shagina, N. B., Maltsev, V. N., Leveque, P., Ulanova, A. M., Osipov, V. A. & Shafirkin, A. V. 2010. Confirmation studies of Soviet research on immunological effects of microwaves: Russian immunology results. *Bioelectromagnetics*, 2010; 31, 589- 602.
- Hamblin DL, Wood AW, Croft RJ, Stough C. 2004. Examining the effects of electromagnetic fields emitted by GSM mobile phones on human event-related potentials and performance during an auditory task. *Clin Neurophysiol* 2004;115(1):171–8

- Hardell L, Carlberg M, Soderqvist F, Mild KH. 2013. Pooled analysis of case-control studies on acoustic neuroma diagnosed 1997–2003 and 2007–2009 and use of mobile and cordless phones. *Int J Oncol* 2013;43(4):1036–44
- Hardell L, Carlberg M. 2013. Using the Hill viewpoints from 1965 for evaluating strengths of evidence of the risk for brain tumors associated with use of mobile and cordless phones. *Rev Environ Health* 2013;28:97–106
- Hartwig V., Giovannetti G., Vanello N., *et al.* 2009. Biological Effects and Safety in Magnetic Resonance Imaging: A review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2009; 6: 1778-1798
- Havas, M., & Marrongelle, J. 2013. Replication of heart rate variability provocation study with 2.4-GHz cordless phone confirms original findings. *Electromagnetic Biology & Medicine*, 2013; 32(2), 253-266.
- Heinrich, A., Szostek, A., Meyer, P., Nees, F., Rauschenberg, J., Grobner, J., Gilles, M., Paslakis, G., Deuschle, M., Semmler, W. & Flor, H. 2013. Cognition and sensation in very high static magnetic fields: a randomized case-crossover study with different field strengths. *Radiology*, 2013; 266, 236-45.
- Hietanen M, Kovala T, Hamalainen AM. 2000. Human brain activity during exposure to radiofrequency fields emitted by cellular phones. *Scand J Work Environ Health* 2000;26(2):87–92
- High, W.B.;Sikora, J.;Ugurbil, K.;Garwood, M. 2000. Subchronic in vivo effects of a high static magnetic field (9.4 T) in rats. *J.Magn.Reson.Imaging* 2000, 12, 122-139.
- Hong, M. N., Kim, B. C., Ko, Y. G., Lee, Y. S., Hong, S. C., Kim, T., Pack, J. K., Choi, H. D., Kim, N. & Lee, J. S. 2012. Effects of 837 and 1950 MHz radiofrequency radiation exposure alone or combined on oxidative stress in MCF10A cells. *Bioelectromagnetics*, 2012; 33, 604-11.
- Huber R, Treyer V, Borbély AA, Schuderer J, Gottselig JM, *et al.* 2002. Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG. *J Sleep Res* 2002;11:289–95.
- Huber R., Schuderer J., Graf T., Jutz K., Borbely A.A., Kuster N., Achermann P. 2003. Radio frequency electromagnetic field exposure in humans: estimation of sar

distribution in the brain, effects on sleep and heart rate, *Bioelectromagnetics* 2003; 24 (4) 262–276.

- Huber R, Treyer V, Schuderer J, Berthold T, Buck A, Kuster N, Landolt HP, Achermann P. 2005. Exposure to pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields affects regional cerebral blood flow. *Eur J Neurosci.* 2005 Feb;21(4):1000-6.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). 2002. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Non-Ionising Radiation. Part 1: Static and Extremely Low Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields, vol. 80; IARC:Lyon, France, 2002.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). 2011. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans. Press Release nº 208. 31 de mayo de 2011.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). 2013. Non-ionizing Radiation, Part 2: Radiofrequency Electromagnetic Fields, International Agency for Research on Cancer (IARC) Monograph, volume 102. Retrieved 27 June, 2013, from <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol102/index.php>
- Ichioka S, Minegishi M, Iwasaka M, Shibata M, Nakatsuka T, Harii K, Kamiya A, Ueno S. 2000. High-intensity static magnetic fields modulate skin microcirculation and temperature in vivo. *Bioelectromagnetics.* 2000 Apr;21(3):183-8.
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). 1998. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 74(4), 494-522.
- ICNIRP (International Commission on Non-ionizing Radiation) 2003. Exposure to static and low frequency electromagnetic fields. In: *Biological Effects and Health Consequences (0–100 kHz)*. Matthes, R.,McKinlay, A.F., Bernhardt, J.H.,Vecchia, P., Veyret, B., Eds.;ICNIRP: Munich, Germany, 2003.
- ICNIRP (International Commission on Non-ionizing Radiation Protection). 2009 a :Guidelines on limits of exposure to static magnetic field. *Health Phys.*2009 ,96,504-514.

- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). 2009b. Review of the scientific evidence on dosimetry, biological effects, epidemiological observations, and health consequences concerning exposure to high frequency electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Retrieved 23 April, 2013, from <http://www.icnirp.de/documents/RFReview.pdf>
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). 2010. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz).[Erratum appears in Health Phys. 2011 Jan;100(1):112]. Health Physics, 99(6), 818-836. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>.
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). 2014. Guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz. HEALTH PHYSICS 106(3):418-425; 2014.
- INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo). Guía Técnica de Radiaciones Ópticas. <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/GuiasTecnicas/Guias%20Normativa/guia%20radiaciones%20opticas.pdf>
- INHST (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo). Capítulo 48 Radiaciones Ionizantes. <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/48.pdf>.
- INSHT. 2002. Curso Superior en Prevención de Riesgos Laborales. V2.0. Unidad didáctica: Campos electromagnéticos. NIPO 211-02-028-8. Editado INSHT
- Kangarlu, A.; Burgess, R.E.; Zhu, H.; Nakayama, T.; Hamlin, R.L.; Abduljalil, A.M.; Robataille, P.M.L. 1999. Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultra high field magnetic resonance imaging. Magn.Reson.Imaging1999, 17, 1407-1416.
- Kaprana, A. E., Chimona, T. S., Papadakis, C. E., Velegrakis, S. G., Vardiambasis, I. O., Adamidis, G. & Velegrakis, G. A. 2011. Auditory brainstem response changes during exposure to GSM-900 radiation: an experimental study. *Audiol Neurootol*, 2011; 16, 270-6.
- Karaca, E., Durmaz, B., Aktug, H., Yildiz, T., Guducu, C., Irgi, M., Koksai, M. G., Ozkinay, F., Gunduz, C. and Cogulu, O. 2012. The genotoxic effect of

- radiofrequency waves on mouse brain. *Journal of neuro-oncology*. 2012; 106(1), 53-8.
- Kheifets L, Ahlbom A, Crespi CM, Draper G, Hagihara J, et al. 2010. Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer* 2010;103(7):1128–35
 - Koeman T, Van den Brandt PA, Slottje P, Schouten LJ, Goldbohm RA, Kromhout H, Vermeulen R. 2014. Occupational extremely low-frequency magnetic field exposure and selected cancer outcomes in a prospective Dutch cohort. *Cancer Causes Control*. 2014 Feb;25(2):203-14. doi: 10.1007/s10552-013-0322-x. Epub 2013 Nov 16
 - Koivisto M., Revonsuo A., Krause C., Haarala C., Sillanmaki L., Laine M., Hamalainen H. 2000b. Effects of 902 mhz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans, *Neuroreport* 2000;11 (2) 413–415.
 - Krause C.M., Sillanmaki L., Koivisto M., Haggqvist A., Saarela C., Revonsuo A., Laine M., Hamalainen H. 2000a. Effects of electromagnetic field emitted by cellular phones on the eeg during a memory task, *Neuroreport* 2000; 11 (4) 761–764.
 - Krause C.M., Sillanmaki L., Koivisto M., Haggqvist A., Saarela C., Revonsuo A., Laine M., Hamalainen H. 2000b. Effects of electromagnetic fields emitted by cellular phones on the electroencephalogram during a visual working memory task, *International Journal of Radiation Biology* 2000; 76 (12) 1659–1667.
 - Kumar, S., Kesari, K. K. & Behari, J. 2010. Evaluation of genotoxic effects in male Wistar rats following microwave exposure. *Indian J Exp Biol*, 2010; 48, 586-92.
 - Kumar S, Behari J, Sisodia R. 2012. Impact of Microwave at X-Band in the aetiology of male infertility. *Electromagnetic Electromagn Biol Med* 2012;31(3):223–32
 - Kumar, S., Behari, J. and Sisodia, R. 2013. Influence of electromagnetic fields on reproductive system of male rats. *International journal of radiation biology*. 2013. 89(3), 147-54.
 - Kundi M. 2012. Evidence for childhood cancers (Leukemia). In: Sage C, Carpenter DO, editors. *The BioInitiative Report 2012. A Rationale for a Biologically-based Public Exposure Standard for Electromagnetic Fields (ELF and RF)*

- Lahbib, A., Elferchichi, M., Ghodbane, S., Belguith, H., Chater, S., Sakly, M. & Abdelmelek, H. 2010. Time-dependent effects of exposure to static magnetic field on glucose and lipid metabolism in rat. *Gen Physiol Biophys*, 2010; 29, 390-5.
- Lahijani, M. S., Farivar, S. & Khodaeian, M. 2011. Effects of 50 Hz electromagnetic fields on the histology, apoptosis, and expression of c-Fos and beta-catenin on the livers of preincubated white Leghorn chicken embryos. *Electromagn Biol Med*, 2011; 30, 158-69.
- Lee JW, Kim MS, Kim YJ, Choi YJ, Lee Y, Chung HW. 2011. Genotoxic effects of 3 T magnetic resonance imaging in cultured human lymphocytes. *Bioelectromagnetics*. 2011 Oct;32(7):535-42. doi: 10.1002/bem.20664. Epub 2011 Mar 15.
- Leung S, Croft RJ, McKenzie RJ, Iskra S, Silber B, et al. 2011. Effects of 2G and 3G mobile phones on performance and electrophysiology in adolescents, young adults and older adults. *Clin Neurophysiol* 2011;122(11):2203–16
- Li Y., Hand J.W., Wills T., Hajnal J.V. 2007. Numerically-Simulated Induced Electric Field and Current Density Within a Human Model Located Close to a z-Gradient Coil. *Journal of magnetic resonance imaging* 2007; 26:1286–1295 (2007).
- Lonn, S.; Ahlbom, A.; Hall, P.; Feychting, M. 2005. Long-term mobile phone use and brain tumour risk. *Am.J.Epidemiol.*2005, 161, 526-535.
- Loughran S.P., Wood A.W, Barton J.M., Croft R.J., Thompson B., Stough C. 2005. The effect of electromagnetic fields emitted by mobile phones on human sleep, *Neuroreport* 2005; 16 (17) 1973–1976.
- Loughran SP, McKenzie RJ, Jackson ML, Howard ME, Croft RJ. 2012. Individual differences in the effects of mobile phone exposure on human sleep: rethinking the problem. *Bioelectromagnetics* 2012;33(1):86–93.
- Lowden A, Akerstedt T, Ingre M, Wiholm C, Hillert L, et al. 2011. Sleep after mobile phone exposure in subjects with mobile phone-related symptoms. *Bioelectromagnetics* 2011;32(1):4–14.
- Luria R, Eliyahu I, Hareuveny R, Margalioth M, Meiran N. 2009. Cognitive effects of radiation emitted by cellular phones: the influence of exposure side and time. *Bioelectromagnetics* 2009;30(3):198–204

- Lustenberger, C., Murbach, M., Durr, R., Schmid, M., Kuster, N., Achermann, P., & Huber, R. 2013. Stimulation of the brain with radiofrequency electromagnetic field pulses affects sleep-dependent performance improvement. *Brain Stimul*, 2013; 6(5), 805-811. [doi: 10.1016/j.brs.2013.01.017](https://doi.org/10.1016/j.brs.2013.01.017)
- Luukkonen, J., Liimatainen, A., Hoyto, A., Juutilainen, J. & Naarala, J. 2011. Pre-exposure to 50 Hz magnetic fields modifies menadione-induced genotoxic effects in human SHSY5Y neuroblastoma cells. *PLoS One*, 6, e18021.
- Markkanen, A., Juutilainen, J. & Naarala, J. 2008. Pre-exposure to 50 Hz magnetic fields modifies menadione-induced DNA damage response in murine L929 cells. *Int J Radiat Biol*, 2008; 84, 742-51.
- Maskey, D., Kim, H. J., Kim, H. G. & Kim, M. J. 2012. Calcium-binding proteins and GFAP immunoreactivity alterations in murine hippocampus after 1 month of exposure to 835 MHz radiofrequency at SAR values of 1.6 and 4.0 W/kg. *Neurosci Lett*, 2012; 506, 292-6.
- Mattsson M. and Simkó M. 2014. Grouping of experimental conditions as an approach to evaluate effects of extremely low-frequency magnetic fields on oxidative response in in vitro studies. *Frontier in public Health*. www.frontiersin.org September 2014 | Volume 2 | Article 132 | 1
- Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. (<http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/NivelesExposicion/Paginas/niveles.aspx>)
- Miryam, E., Aida, L., Samira, M., Mohsen, S. & Hafedh, A. 2010. Effects of acute exposure to static magnetic field on ionic Composition of rat spinal cord. *Gen Physiol Biophys*, 2010. 29, 288-94.
- Muscat, J.E.; Malkin, M.G.; Thompson, S.; Shore, R.E.; Stellman, S.D.; McRee, D.; Neugut, A.I.; Wynder, E.L. 2000. Handheld cellular telephone use and risk of brain cancer. *JAMA* 2000, 284, 3001-3007.
- Morgan LL, Miller AB, Sasco A, Davis DL. 2015. Mobile phone radiation causes brain tumors and should be classified as a probable human carcinogen (2A) (review). *Int J Oncol*. 2015 May; 46(5):1865-71. doi: 10.3892/ijo.2015.2908. Epub 2015 Feb 25

- Mortazavi SM, Rouintan MS, Taeb S, Dehghan N, Ghaffarpanah AA, et al. 2012. Human short-term exposure to electromagnetic fields emitted by mobile phones decreases computer-assisted visual reaction time. *Acta Neurol Belg* 2012;112(2):171–5.
- Muscat JE, Malkin MG, Thompson S, Shore RE, Stellman SD, McRee D, Neugut AI, Wynder EL. 2000. Handheld cellular telephone use and risk of brain cancer. *JAMA*. 2000 Dec 20;284(23):3001-7
- Nakahara, T.; Yaguchi, H.; Yoshida, M.; Miyakoshi, J. 2002. Effects of Exposure of CHO-K1 Cells to a 10-T Static Magnetic Field. *Radiology* 2002, 224, 817-822.
- National Academy of Sciences (NAS) y National Research Council (NRC). 1990. Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Washington, DC: National Academy Press.
- Ntzouni, M. P., Stamatakis, A., Stylianopoulou, F. & Margaritis, L. H. 2011. Short-term memory in mice is affected by mobile phone radiation. *Pathophysiology.*, 2011; 18, 193-199.
- Parazzini, M., Ravazzani, P., Thuroczy, G., Molnar, F., Ardesi, G., Sacchetti, A., & Mainardi, L. 2013. Nonlinear heart rate variability measures under electromagnetic fields produced by GSM cellular phones. *Electromagnetic Biology & Medicine*, 2013; 32(2), 173-181. [doi: 10.3109/15368378.2013.776424](https://doi.org/10.3109/15368378.2013.776424)
- Paulraj, R., & Behari, J. 2011. Effects of low level microwave radiation on carcinogenesis in Swiss Albino mice. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2011; 348(1-2), 191-197.
- Poullietier de Gannes, F., Haro, E., Hurtier, A., Taxile, M., Ruffie, G., Billaudel, B., Veyret, B. & Lagroye, I. 2011. Effect of exposure to the edge signal on oxidative stress in brain cell models. *Radiat Res*, 2011; 175, 225-30.
- Prasad M, Kathuria P, Nair P, Kumar A, Prasad K. 2017. Mobile phone use and risk of brain tumours: a systematic review of association between study quality, source of funding, and research outcomes. *Neurol Sci*. 2017 Feb 17. doi: 10.1007/s10072-017-2850-8.

- Preece A.W., Iwi G., Davies-Smith A., Wesnes K., Butler S., Lim E., Valey A., 1999. Effect of a 915-mhz simulated mobile phone signal on cognitive function in man, *International Journal of Radiation Biology* 1999; 75 (4) 447–456.
- Prochnow, N., Gebing, T., Ladage, K., Krause-Finkeldey, D., El Ouardi, A., Bitz, A., Streckert, J., Hansen, V. & Dermietzel, R. 2011. Electromagnetic field effect or simply stress? Effects of UMTS exposure on hippocampal longterm plasticity in the context of procedure related hormone release. *PLoS One*, 6, e19437.
- Reiser H, Dimpfel W, Schober F. 1995. The influence of electromagnetic fields on human brain activity. *Eur J Med Res* 1995;1(1):27–32
- Roggeveen S, van Os J, Viechtbauer W, Lousberg R. 2015. EEG changes due to experimentally induced 3G mobile phone radiation. *PLoS One* 2015;10(6):e0129496
- Ros-Llor, I., Sanchez-Siles, M., Camacho-Alonso, F., & Lopez-Jornet, P. 2012. Effect of mobile phones on micronucleus frequency in human exfoliated oral mucosal cells. *Oral Diseases*, 2012; 18(8), 786-792.
- Sambucci, M., Laudisi, F., Nasta, F., Pinto, R., Lodato, R., Lopresto, V., Altavista, P., Marino, C. & Pioli, C. 2011. Early life exposure to 2.45GHz WiFi-like signals: effects on development and maturation of the immune system. *Prog.Biophys.Mol Biol*, 2011; 107, 393-398.
- Santini M., Rainaldi G., Indovina P.L. 2009. Cellular effects of extremely low frequency (ELF) electromagnetic fields. *Int. J. Radiat. Biol.*, Vol. 85, No. 4, April 2009, pp. 294–313
- Saunders, R. Static magnetic fields: animal studies. 2005. *Prog.Biophys.Mol.Biol.*2005, 87, 225-239.
- Sauter, C., Dorn, H., Bahr, A., Hansen, M.-L., Peter, A., Bajbouj, M. & Danker-Hopfe, H. 2011. Effects of exposure to electromagnetic fields emitted by GSM 900 and WCDMA mobile phones on cognitive function in young male subjects. *Bioelectromagnetics*, 2011; 32, 179-190.
- Schaap, K., Christopher-De Vries, Y., Crozier, S., de Vocht, F. and Kromhout, H. 2014a. Exposure to static and time-varying magnetic fields from working in the static magnetic stray fields of MRI scanners: a comprehensive survey in the Netherlands. *The Annals of occupational hygiene*. 2014; 58(9), 1094-110.

- Schaap, K., Christopher-de Vries, Y., Mason, C. K., de Vocht, F., Portengen, L. and Kromhout, H. 2014b. Occupational exposure of healthcare and research staff to static magnetic stray fields from 1.5-7 Tesla MRI scanners is associated with reporting of transient symptoms. *Occupational and environmental medicine*. 2014; 71(6), 423-9.
- Schaap, K., Portengen, L. and Kromhout, H. 2016. Exposure to MRI-related magnetic fields and vertigo in MRI workers. *Occupational and environmental medicine*. 2016; 73(3), 161-6.
- Schaefer, D.J.; Bourland, J.D.; Nyenhuis, J.A. 2000. Review of patient safety in time-varying gradient fields. *J. Magn. Reson. Imaging* 2000; 12, 20-29.
- Schiffer, I.B.; Schreiber, W.G.; Graf, R.; Schreiber, E.M.; Jung, D.; Rose, D.M.; Hehn, M.; Gebhard, S.; Sagemüller, J.; Spiess, H.W.; Oesch, F.; Thelen, M.; Hengstler, J.G. 2003. No influence of magnetic fields on cell cycle progression using conditions relevant for patients during MRI. *Bioelectromagnetics* 2003; 24, 241-250.
- Schmid, M., Loughran, S., Regel, S., Murbach, M., Bratic Grunauer, A., Rusterholz, T., et al. 2012. Sleep EEG alterations: effects of different pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields. *J Sleep Res*, 2012; 21(1), 50-58. doi: 10.1111/j.1365-2869.2011.00918.x
- Schmid, M., Murbach, M., Lustenberger, C., Maire, M., Kuster, N., Achermann, P., & Loughran, S. P. 2012. Sleep EEG alterations: effects of pulsed magnetic fields versus pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields. *J Sleep Res*, 2012; 21(6), 620-629. doi: [10.1111/j.1365-2869.2012.01025.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2012.01025.x)
- Schuz, J., Jacobsen, R., Olsen, J., Boice, J., McLaughlin, J., & Johansen, C. 2006. Cellular telephone use and cancer risk: update of a nationwide Danish cohort. *Journal of the National Cancer Institute*, 2006; 98(23), 1707-1713
- Şekeroğlu, V., Akar, A. and Şekeroğlu, Z. A. 2012. Cytotoxic and genotoxic effects of high-frequency electromagnetic fields (GSM 1800 MHz) on immature and mature rats. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2012; 80, 140-4
- Sharma A, Sisodia R, Bhatnagar D, Saxena VK. 2013. Spatial memory and learning performance and its relationship to protein synthesis of Swiss albino mice exposed to 10 GHz microwaves. *Int J Radiat Biol* 2013;90(1):29–35.

- Shirai T, Imai N, Wang J, Takahashi S, Kawabe M, et al. 2014. Multigenerational effects of whole body exposure to 2.14-GHz W-CDMA cellular phone signals on brain function in rats. *Bioelectromagnetics* 2014;35(7):497–511.
- Sienkiewicz ZJ, Blackwell RP, Haylock RG, Saunders RD, Cobb BL. 2000. Low-level exposure to pulsed 900 MHz microwave radiation does not cause deficits in the performance of a spatial learning task in mice. *Bioelectromagnetics* 2000;21(3):151–8
- Sokolovic D, Djordjevic B, Kocic G, Babovic P, Ristic G, et al. 2012. The effect of melatonin on body mass and behaviour of rats during an exposure to microwave radiation from mobile phone. *Bratisl Lek Listy* 2012;113(5):265–9
- Stone, RS. 1959. Maximum permissible exposure standards en Protection in Diagnostic Radiology, dirigido por BP Sonnenblick. New Brunswick: Rutgers Univ. Press.
- Strizek, B., Jani, J. C., Mucyo, E., De Keyzer, F., Pauwels, I., Ziane, S., Mansbach, A. L., Deltenre, P., Cos, T. and Cannie, M. M. 2015. Safety of MR Imaging at 1.5 T in Fetuses: A Retrospective Case-Control Study of Birth Weights and the Effects of Acoustic Noise. *Radiology*. 2015; 275(2), 530-7.
- Surur A., Cabral J.F., Marangoni A., Marchegiani S., Palacios C., Herreras, Julio Suárez E. 2010. *Rev. argent. radiol.* vol.74 no.3 Ciudad Autónoma de Buenos Aires jul./set. 2010
- Suzuki, Y.;Ikehata, M.; Nakamura, K.; Nishioka, M.; Asanuma, K.; Koana, T.; Shimizu, H. 2001. Induction of micronuclei in mice exposed to static magnetic fields. *Mutagenesis* 2001, 16, 499-501.
- Tatarov, I., Panda, A., Petkov, D., Kolappaswamy, K., Thompson, K., Kavirayani, A., Lipsky, M. M., Elson, E., Davis, C. C., Martin, S. S. & DeTolla, L. J. 2011. Effect of magnetic fields on tumor growth and viability. *Comp Med* 2011; 61, 339-45. 2011
- Tenforde, T.S.; Gaffey, C.T.; Moyer, B.R.; Budinger, T.F. 1983. Cardiovascular alterations in Macaca monkeys exposed to stationary magnetic fields: experimental observations and theoretical analysis. *Bioelectromagnetics* 1983, 4, 1-9.

- Tenorio, B. M., Jimenez, G. C., Morais, R. N., Torres, S. M., Albuquerque Nogueira, R. & Silva Junior, V. A. 2011. Testicular development evaluation in rats exposed to 60 Hz and 1 mT electromagnetic field. *J Appl Toxicol*,2011; 31, 223-30.
- Trunk A, Stefanics G, Zentai N, Kovács-Bálint Z, Thuróczy G, et al. 2013. No effects of a single 3G UMTS mobile phone exposure on spontaneous EEG activity, ERP correlates, and automatic deviance detection. *Bioelectromagnetics* 2013;34(1):31–42
- UNSCEAR (Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas). 1988. Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation. Informe remitido a la Asamblea General, con Anexos. Nueva York: Naciones Unidas.
- Valiron, O.; Peris, L.; Rikken, G.;Schweitzer,A.; Saoudi,Y.;Remy,C.;Job,D. 2005. Cellular disorders induced by high magnetic fields. *J.Magn.Reson.Imaging* 2005, 22, 334-340.
- - Vecchio F, Babiloni C, Ferreri F, Curcio G, Fini R, et al. 2007. Mobile phone emission modulates interhemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms. *Eur J Neurosci* 2007;25(6):1908–13.
- - Vecchio F, Babiloni C, Ferreri F, Buffo P, Cibelli G, et al. 2010. Mobile phone emission modulates inter-hemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms in elderly compared to young subjects. *Clin Neurophysiol* 2010;121(2):163–71.
- - Vecchio F, Buffo P, Sergio S, Iacoviello D, Rossini PM, et al. 2012. Mobile phone emission modulates event-related desynchronization of α rhythms and cognitive-motor performance in healthy humans. *Clin Neurophysiol* 2012;123(1):121–8.
- Wagner P. Röschke J. Mann K. Fell J. Hiller W. Frank C. Grözinger M. 2000. Human Sleep EEG under the Influence of Pulsed Radio Frequency Electromagnetic Fields. *Neuropsychobiology* 2000;42:207–212.
- Wallace D, Eltiti S, Ridgewell A, Garner K, Russo R, et al. 2012. Cognitive and physiological responses in humans exposed to a TETRA base station signal in relation to perceived electromagnetic hypersensitivity. *Bioelectromagnetics* 2012;33(1):23–39

- Wdowiak A, Wdowiak L, Wiktor H. 2007. Evaluation of the effect of using mobile phones on male fertility. *Ann Agric Environ Med* 2007;14(1):169–72
- Wertheimer N, Leeper E. 1979. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol* 1979;109(3):273–84
- Wilen, J. and de Vocht, F. 2011. Health complaints among nurses working near MRI scanners--a descriptive pilot study. *European Journal of Radiology*. 2011; 80(2), 510-3 (2011).
- WHO (World Health Organization). 2006 a Environmental Health Criteria 232. Static fields. World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2006.
- WHO (World Health Organization). 2006 b. Electromagnetic fields and public health. (2006).
- Yan JG, Agresti M, Bruce T, Yan YH, Granlund A, et al. 2007. Effects of cellular phone emissions on sperm motility in rats. *Fertil Steril* 2007;88(4):957–64
- Yildirim, M. S., Yildirim, A., Zamani, A. G., & Okudan, N. 2010. Effect of mobile phone station on micronucleus frequency and chromosomal aberrations in human blood cells. *Genetic Counseling*, 2010; 21(2), 243-251.
- Yilmaz, D., & Yildiz, M. 2010. Analysis of the mobile phone effect on the heart rate variability by using the largest Lyapunov exponent. *J Med Syst*, 2010; 34(6), 1097-1103. doi: [10.1007/s10916-009-9328-z](https://doi.org/10.1007/s10916-009-9328-z)
- Zhang Y, Lai J, Ruan G, Chen C, Wang DW. 2015. Meta-analysis of extremely low frequency electromagnetic fields and cancer risk: a pooled analysis of epidemiologic studies. *Environ Int*. 2016 Mar;88:36-43. doi: [10.1016/j.envint.2015.12.012](https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.012). Epub 2015 Dec 15
- Zanotti, g., Ligabue, g. and Gobba, f. 2015. Subjective symptoms and their evolution in a small group of magnetic resonance imaging (MRI) operators recently engaged. *Electromagnetic biology and medicine*. 2015; 34(3), 262-4.
- Zhao L, Liu X, Wang C, Yan K, Lin X, et al. 2014. Magnetic fields exposure and childhood leukemia risk: a meta-analysis based on 11,699 cases and 13,194 controls. *Leuk Res* 2014;38(3):269–74

PUBLICACIONES

OCCUPATIONAL EXPOSURE OF NMR SPECTROMETRISTS TO STATIC AND RADIOFREQUENCY FIELDS

Tania Berlana^{1,*} and Alejandro Úbeda²

¹Servicio Prevención, Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, 28047 Madrid, Spain

²Servicio BEM, Hospital Ramón y Cajal—IRYCIS, 28034 Madrid, Spain

*Corresponding author: tania.berlana@gmail.com

Received 15 March 2017; revised 8 April 2017; editorial decision 11 April 2017; accepted 13 April 2017

Occupational exposure to static and radiofrequency fields emitted by nuclear magnetic resonance spectrometers was assessed through systematic field metering during operation of 19 devices in nine research centers. Whereas no measurable levels of radiofrequency radiation were registered outside the spectrometers, significant exposure to static field was detected, with maximum values recorded at the user's hand ($B = 683.00$ mT) and head–thorax ($B = 135.70$ mT) during spectrometer manipulation. All values were well below the exposure limits set by the European standard for workers protection against the effects of acute field exposure only. As for potential effects of chronic exposure, waiting for more complete knowledge, adoption of technical and operational strategies for exposure minimizing is advisable. In this respect, the data revealed that compared with standard magnetic shielding, ultrashield technology allows a 20–65-fold reduction of the field strength received by the operator.

INTRODUCTION

The levels of occupational exposure to static magnetic fields (SMF) and radiofrequency (RF) fields have grown considerably in working environments related to the use of magnetic resonance as analytical technique in medicine and research. This has prompted interest in the study of potential adverse effects of the exposure to those fields.

Indeed, working activities in the vicinity of resonance equipment may entail daily exposure to relatively strong magnetic and electromagnetic fields (EMF). Such exposure type, which has been characterized in detail for health care staff working with magnetic resonance imaging (MRI) scanners, can result in acute exposure to strong SMF^(1–5). Episodes of vertigo, metallic taste and concentration problems often reported by these exposed workers have been attributed to motion-induced time varying electric or magnetic fields in the nervous system^(6–9). These symptoms are transient and generally tend to revert, indicating existence of adaptation mechanisms⁽¹⁰⁾. As for chronic occupational exposure, available epidemiological and experimental evidence on potential adverse effects of SMF has been considered limited and insufficient to reach definitive conclusions^(11, 12).

Regarding exposure to RF fields, short-term adverse effects due to nerve or muscle stimulation, or to biological tissue heating, have been described (see reviews by ICNIRP 1998, 2009)^(13, 14). Concerning prolonged exposure, several experimental and epidemiological studies have reported possible genotoxic or epigenetic effects of RF radiation^(15–20) as well as alterations in the reproductive system^(21–23) or in cardiovascular

functions^(24–26). However, the available set of experimental and epidemiological evidence on possible effects of chronic exposure to subthermal RF has been defined as incomplete and inconclusive by a number of reports and review articles^(14, 27–29). Anyhow, at least part of this evidence has been considered relevant enough by the International Agency for Research on Cancer (IARC, WHO), which has included certain RF exposure conditions in its list of possible carcinogens, Class 2B⁽³⁰⁾.

Thereby, within the current framework of limited knowledge on potential long-term effects, international standards establishing safety limit levels for occupational exposure to electric, magnetic and EMF within the 0 Hz–300 GHz range, are designed exclusively for protection against short-term exposure, and not against potential middle-to-long term effects⁽³¹⁾. Under these circumstances, the need for precise metrological studies on exposure levels and conditions for people working with strong EMF sources, becomes evident^(32, 33). The obtained data will allow identification of workplaces or practices that could compromise the occupational safety regarding immediate effects of acute exposures, in addition to generating information relevant for experimental and epidemiological studies on potential long-term effects.

This characterization of exposure levels and conditions is particularly necessary in the case of highly specialized workers from industrial or research environments that are not yet sufficiently studied. One of these occupational groups is composed of the researchers working with nuclear magnetic resonance

(NMR) spectrometers that employ SMF with magnetic flux densities (B) up to 23.5 T and RF EMF with frequencies up to 1 GHz.

NMR is a non-destructive technology that provides quantitative data on the chemical structure, dynamics and molecular interactions in solid, semi-solid or diluted materials. This technology is based on the alignment of the magnetic moments of a given material when it is exposed to a static field with a sufficiently high magnetic flux density. Under these conditions, the application of a RF field, perpendicular to, and of lower intensity than the imposed SMF, will cause deviation of the polarization vector as the field parameters approach the specific resonance conditions of the exposed atomic nucleus, which allows characterizing the element. Briefly, NMR spectrometers consist of the following components (Figure 1).

- A magnet that generates a static magnetic field with a single B value that characterizes the equipment. The strength, homogeneity and stability of the field determine the sensitivity and accuracy of the spectrometer. All devices included in this study were large, stand-alone apparatuses having helium cooled superconducting magnets that must remain constantly energized for field stability.
- A probe located inside the magnet, into which the sample is inserted. The probe contains one or more RF coils tuned to the specific resonance frequency of the atomic nucleus to be studied.
- An external frequency synthesizer that generates the RF pulses. The maximum RF frequency that can be tuned, corresponding to that of hydrogen atom resonance, is determined by the B value of the SMF and is specific to each device.

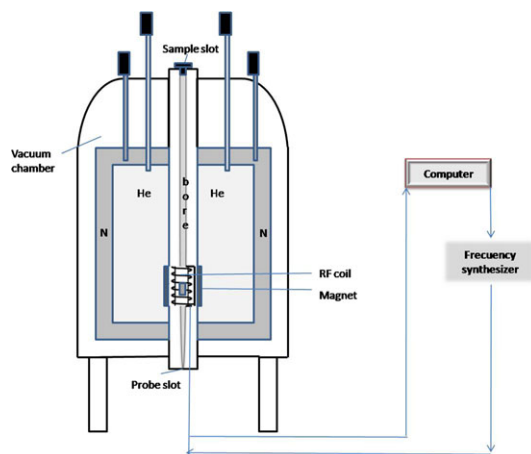


Figure 1. Components of an NMR spectrometer: N, nitrogen chamber; He, helium chamber.

- A control station with a computer that acts as interface with the equipment and allows analyzing the obtained information.

Given the characteristics of these equipment and taking into account that part of the tasks related to their handling require direct manipulation of the devices, it is assumed that researchers working in spectrometry units may be daily exposed to relatively high levels of magnetic and/or EMF⁽³⁴⁾. However, these exposure levels and conditions are not yet sufficiently characterized and need to be assessed through specific, *in situ* metering. The present study addresses such need through systematic measurement of static and RF fields carried out in nine research centers having a total of 19 NMR spectrometers with magnet bore ranging from 4.7 to 18.1 T, and RF fields up to 800 MHz.

MATERIAL AND METHODS

Work tasks description

The standard tasks performed by the workers in the NMR units include the starting-up of the system and the sample loading, as well as the analysis of the results from the control station. During the loading process the operator remains close to the NMR spectrometer to insert the sample trough its top end (Figure 2A and B). This process is sequentially repeated at a weekly rate ranging 20–50 times, depending on the number of samples whose composition is to be determined. The RF exposure of the sample and the data analysis are conducted from the control station (Figure 2C). In order to obtain proper resolution, NMR spectrometers use shims to adjust the magnetic field homogeneity. Although in modern NMR equipment shimming adjusts automatically, in some cases the operator has to manually optimize the shim parameters. Thus, depending on the characteristics of the equipment and the type of sample to be analyzed, the process may require the operator to access the lower end of the apparatus to perform manual parameters shimming (Figure 2D and E). This task, as well as the sample loading, is performed in close proximity to the equipment, which may involve repeated exposure of the worker to relatively high B values during the 30–120 s intervals corresponding to each run of these operations. As for the tasks of RF pulse generation and computer control of the process, both performed from the control console, they may take 5–60 min approximately, depending on the type of sample. Additionally, once a week and once a month the devices must be recharged with nitrogen and helium, respectively. These cryogenic gases allow maintaining the low temperature at which the NMR phenomena take place. The recharge processes can take several hours, but within that period the lapse during

which the worker stays close to the equipment does not exceed 2 min.

modes: 100 and 500 mT, 3 and 20 T. Resolution ranges were from 30 μ T to 1.5 mT, depending on the selected scale. For personal exposure assessment, 2 min recordings were taken during each of the different tasks conducted by the workers. For tasks performed in close proximity to the spectrometers, the magnetometer probe was placed at the worker's hand or chest level, according to the aim of assessing the limbs or the head–thorax exposure, respectively. At the control console the field values were recorded with the probe located at the height of the chest of the seated worker. The magnetometer was programmed to take instant B values every 5 s throughout the 2-min recordings. Occupational exposure during each of the different tasks was estimated by the mean and standard deviation of the instant B values obtained in each individual record.

Additionally, in order to assess the ambient static field in the laboratories, representative equipment (standard shielding and ultrashield) and locations (pit or ground level) were selected and, with the magnetometer probe at a height of 150 cm above the

Measurement protocols

All measurements were taken during normal working hours. Although a total of 45 daily users of NMR systems voluntarily collaborated in the study, only 19 workers (one worker per spectrometric device) were selected to carry out the herein described measurements of personal exposure. The chosen measurement parameters and intervals are summarized in Table 1.

Smf measurements

Magnetic flux density was measured using a Hall magnetometer model THM1176 HF (Narda Safety Test Solutions, Pfullingen, Germany), equipped with high field, triaxial probe, able of measuring fields within the 0 Hz–1 kHz frequency range. The device measures B values up to 20 T with a 1% accuracy, using four scales selectable in manual or automatic

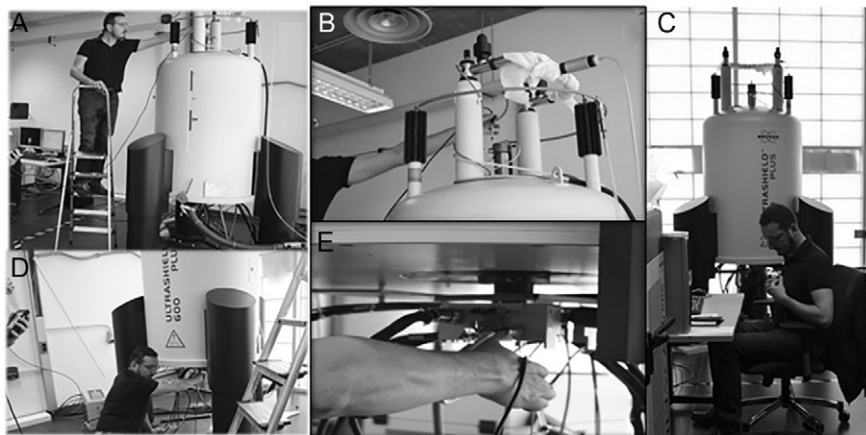


Figure 2. (A and B) Sample loading through a slot at the top of the NMR spectrometer. (C) System control console. (D and E) An operator in a sedentary position performs manual parameter shimming from the bottom of the equipment.

Table 1. Measurement parameters and procedures.

Field	SMF	RF
Meter	THM1176 HF	PMM8053 + EP-330 E-field probe
Physical parameter (unit)	Magnetic flux density B (T)	Electric field intensity, E (V/m)
Interval between instant measurements	5 s	5 s
Recording interval	2 min	2 min
Averaged time	instant	6 min
Exposure assessment	Mean $\pm \sigma_{n-1}$	Mean $\pm \sigma_{n-1}$
Personal exposure	At worker's locations	No
Anatomical region	Head–thorax, hand	No
Ambient measurements	Equipment vicinity. 150 cm high	Equipment vicinity. 150 cm high

ground, instant B values were recorded every 5 s. Recordings were taken during 2-min intervals at points spaced 40 cm, along a 0–200 cm stretch from the cover of the resonance devices.

RF measurements

Following the same procedure, ambient RF field measurements were taken with a PMM8053 monitor (E-field probe, Narda Safety Test Solutions, Milan, Italy) with triaxial electric field (E) probe, valid for signals within the 100 kHz–3 GHz spectrum. Measuring range: 0.03 V/m–100 kV/m. Resolution: 0.01–100 V/m; 0.1 nT–0.1 mT. Sensitivity: 0.05–1 V/m; 10 nT–0.1 mT. In order to avoid field disturbances due to close presence of conductive objects, the monitor was mounted on a tripod of nonconducting material, locating the sensor of the probe at 150 cm above the ground. All recordings were taken during the RF pulse emission.

During 2-min intervals, instant RF electric field values, in V/m, were recorded every 5 s, at 0, 40, 80, 120, 160 and 200 cm from the spectrometer, as well as at the control console. The data were averaged over 6-min intervals. No RF exposure values were taken during the execution of tasks in the vicinity of the NMR devices, since the RF coil is activated only when the operator stays at the control workstation.

RESULTS

SMF exposure

Table 2 summarizes the information on the models and characteristics of the studied spectrometers, as well as the mean B values of the SMF recorded in the two anatomical areas considered (acting hand and head–thorax) during the execution of the tasks carried out in the vicinity of the devices: sample loading and manual parameter shimming.

Exposure during sample loading

The graphs in Figure 3A and B depict the maximum B values (in μT) at the levels of the workers' acting hand and head–thorax, respectively, during loading. Data are represented in logarithmic scale against the B field values (in T) in the magnet bore of the corresponding spectrometers.

Exposure during manual parameter shimming

Figure 3C and D shows the maximum instant B values recorded at the workers' hand and head–thorax levels, respectively, during manual parameter shimming in spectrometers requiring this task (Table 2). In order to carry out the corresponding operation, the worker has to access the lower part of the NMR device, sitting, squatting or lying under it,

according to the operator's preferences. Concerning the operating distance, in contrast with workers adopting a lying position, those who chose to sit or squat (approximately one out of five operators) kept their head closer to the equipment than their thorax (Figure 2D). In these cases additional measurements were taken at the worker's head level, obtaining mean exposure values up to $B = 2.73 \pm 0.10$ mT, for a 9.4 T ultrashield equipment, and $B = 396.00 \pm 15$ mT, for a 14.1-T magnet bore device with standard shielding (data not included in Table 2). These differences were attributable to the characteristics of the equipment and the operating method. All instant B values recorded at the head level were lower than those in the hands.

Exposure at the control workstation

The mean exposure value of the operator at the console during the computerized control of the samples excitation and analysis was $B = 120 \pm 40$ μT , with a maximum instant value of 192 μT and a minimum of 50 μT . This variability is attributable to the differences between the field values of the magnet bore of the devices studied, and to the differences between laboratories concerning to the distance separating the equipment from the console.

Ambient SMF in the devices vicinity

Figure 4 shows the environmental B as a function of the distance to the NMR equipment. These data, together with those in Table 2, reveal that in general, for a given distance, the measured field levels for devices that are ultrashield and/or located inside a pit, were lower than those recorded for spectrometers with standard shielding and/or those located at different heights above the ground. Depending on these conditions and on the magnetic flux density of the magnet bore, the environmental B values at a 2–4 m distance from the devices were within the range of the local geomagnetic field.

RF exposure

None of the RF recordings taken at different distances from the various devices showed electric field (actually measured) and magnetic field (calculated by the meter) values strong enough to be detected by the PMM8053 monitor and E-field probe. That is, no RF emissions with values above the 0.03 V/m detection level of the meter were recorded outside the NMR spectrometers.

DISCUSSION

In order to characterize the levels and conditions of occupational exposure to magnetic and EMF emitted by NMR spectrometers, measurements of SMF

Table 2. List of NMR spectrometers studied (model, maximum frequency in MHz and code figure assigned in the present study), with the corresponding magnetic flux density in the magnet bore (B_{bore} , mT) and magnetic shielding type: Standard (S) or UltraShield (US). Sample loading: hand or head–thorax, $B_{\text{mean}} \pm \sigma_{n-1}$ recorded at the workers acting hand and head–thorax, respectively, during the operation of sample loading. Shimming: hand or head–thorax: $B_{\text{mean}} \pm \sigma_{n-1}$ at the acting hand and head–thorax, respectively, during manual parameter shimming.

B_{bore} (T) and shielding (S/US)	Model and maximum frequency (Code figure)	Sample loading : hand $B_{\text{mean}} \pm \sigma_{n-1}$ (mT)	Sample loading: head–thorax $B_{\text{mean}} \pm \sigma_{n-1}$ (mT)	Shimming: hand $B_{\text{mean}} \pm \sigma_{n-1}$ (mT)	Shimming: head–thorax $B_{\text{mean}} \pm \sigma_{n-1}$ (mT)
4.7 S	Brüker AC 200 MHz (1)	4.05 ± 0.07	6.70 ± 0.40	(–)	(–)
7.47 S	Varian Innova 300 MHz (2)	15.10 ± 0.20	7.50 ± 0.20	(–)	(–)
7.47 S	Brüker 300 MHz (3)	21.75 ± 0.06	13.00 ± 1.00	146.00 ± 2.00	37.90 ± 0.50
7.47 S	Brüker Spectrospin 300 MHz (4)	19.60 ± 0.40	6.30 ± 0.40	51.00 ± 4.00	6.00 ± 0.20
7.47 US	Brüker 300 MHz US (5)	0.64 ± 0.07	0.30 ± 0.05	(–)	(–)
7.47 US	Brüker 300 MHz US (6)	0.41 ± 0.03	0.15 ± 0.04	(–)	(–)
9.4 S	Varian Innova 400 MHz (7)	24.80 ± 0.30	11.70 ± 0.50	54.56 ± 0.05	6.30 ± 0.80
9.4 S	Varian Oxford 400 MHz (8)	29.40 ± 0.80	25.80 ± 0.20	424.00 ± 22.00	86.00 ± 4.00
9.4 S	Varian Oxford AS 400 MHz (9)	(R)	6.10 ± 0.50	(–)	(–)
9.4 S	Brüker 400 MHz (10)	19.50 ± 0.30	18.00 ± 1.70	219.20 ± 3.00	29.00 ± 3.00
9.4 US	Brüker Ascend 400R MHz (11)	0.40 ± 0.50	0.29 ± 0.04	29.00 ± 4.00	0.33 ± 0.03
11.7 S	Varian Oxford AS 500 MHz (12)	(R)	4.80 ± 0.20	(–)	(–)
11.7 US	Brüker 500 MHz US (13)	0.54 ± 0.03	0.37 ± 0.06	12.80 ± 0.50	0.18 ± 0.05
11.7 US	Brüker Ascend 500 MHz (14)	2.70 ± 0.10	0.37 ± 0.07	65.00 ± 15.00	0.70 ± 0.40
11.7 US	Varian System 500 MHz (15)	1.79 ± 0.05	0.62 ± 0.06	(–)	(–)
14.1 S	Brüker 600 MHz (16)	39.30 ± 0.20	20.30 ± 0.30	672.00 ± 10.00	34.90 ± 0.30
14.1 US	Brüker 600 MHz Plus US (17)	1.34 ± 0.09	0.17 ± 0.04	129.00 ± 7.00	5.20 ± 0.30
14.1 US	Brüker Ascend 600 MHz (18)	2.01 ± 0.06	0.34 ± 0.03	16.00 ± 3.00	0.31 ± 0.04
18.1 US	Brüker 800 MHz US (19)	7.66 ± 0.04	1.97 ± 0.06	261.00 ± 2.00	12.45 ± 0.07

(–): models that do not require manual parameter shimming. (R): models with robotic arm for sample loading.

and RF electric fields were conducted during the execution of the various tasks performed by research staff working in nine NMR spectrometry units.

The results of the RF recordings revealed no measurable emissions to the close environment, indicating that the electromagnetic radiation generated by the equipment remained confined inside the devices. By contrast, the data did reveal high levels of SMF in the vicinity of the source. These exposure levels depended on several factors, including the B value of the magnet bore, the magnetic shielding of the model, the type of task performed by the operator and the installation or location of the equipment in the room.

As expected, the data revealed that, under equal conditions for other variables, the higher the B of the magnet bore, the stronger the SMF levels recorded in the vicinity of the spectrometers. In terms of tasks, the highest exposure values were reached during those requiring the closest proximity to the equipment. Indeed, during the processes of manual parameter shimming, in which the worker accesses the lower part of the equipment (Figure 2D and E) the maximum B values were 683.00 mT in the hand and 135.70 mT in the chest for two devices with standard shielding and magnet bore of 14.1 and 7.47 T, respectively. As described above, this task was preferably

performed in lying position, so that the chest and head stayed at similar distances from the equipment. However, when the procedure was carried out in a sedentary or squatted position, exposure levels were higher in the head, located in the vicinity of the spectrometer, with values of up to 396.00 mT recorded during the manual parameter shimming of a model with standard shielding and a 14.1 T magnet bore. Another task involving high exposure levels is sample loading, with maximum B values of 39.60 mT at the hand level, and of 32.20 mT at the head–thorax, for models with magnet bores of 14.1 and 9.4 T, respectively.

As shown in Figure 1, the magnet bore is located at the lower third of the spectrometers. It is likely that the proximity to the magnet is the cause of the high exposure levels recorded during shimming. Moreover, although during the sample loading the distance separating the magnet from the worker's chest is shorter than that between the magnet and his/her hand, the mean field values recorded at the chest are lower than the average values measured at the hands. This reveals that, in general, the magnetic shielding is more effective in the intermediate section of the equipment than in its upper and lower portions. Only the oldest studied device (model 1 in Table 2), with standard shielding, represents an

60

65

70

75

80

85

90

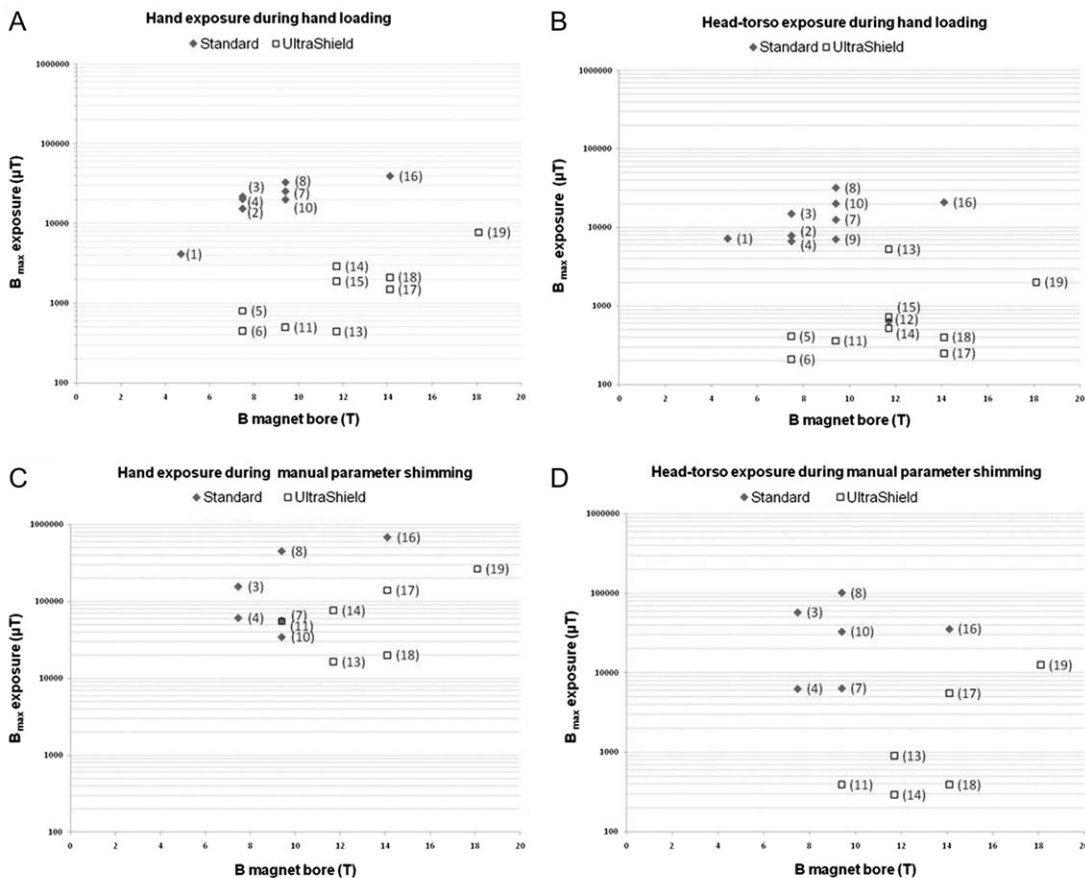
95

100

105

110

115



Q3 35 Figure 3. Maximum instant B values (μT) recorded at the hand or the head–thorax during sample loading (A and B, respectively) and during manual parameter shimming (C and D). The figures in parentheses are the codes assigned in Table 2 to each of the spectrometers, whose corresponding B (T) value in the magnet bore is represented on the abscissa axis. Graph A does not include data from spectrometers 9 and 12, since they are equipped with a robotic arm for sample loading. In graph B the values at the head–thorax in the vicinity of devices 9 and 12 were recorded when the worker placed the sample in the robotic arm.

40

exception to the general trend, since in this case the B value measured at the chest level was higher than that at the hand.

45 The shielding efficacy was also evaluated by comparative analysis of the data on hand exposure during sample loading, since these values have a low variability due to homogeneity of the operational protocol and of the operator location. In this case, the results show that the exposure levels at the worker’s hand were between 20 and 65 times higher when working with standard shield devices than when operating ultrashield models with equivalent bore values (Table 2 and Figure 3). For this reason the exposure levels in the vicinity of ultrashield sources with strong bore fields may be considerably lower than those received when working with standard shield devices having low field bores.

As for the design of the facilities, the data show that operators of models (9) and (12) received exposure levels considerably lower than those working with equipment with the same bore field value. These differences could be attributed to the fact that spectrometers (9) and (12) were located inside pits $\sim 1\text{ m}$ deep and were equipped with a robotic arm. As a result, the worker’s head and chest stayed above the magnet level and, in addition, the operator could insert the sample without supporting his body against the device. From the above it is concluded that, together with shielding, a robotic arm and a pit location are effective technical strategies for minimizing occupational exposure to SMF emitted by NMR equipment.

As regards the regulations for occupational radiation protection, workers’ exposure must comply with

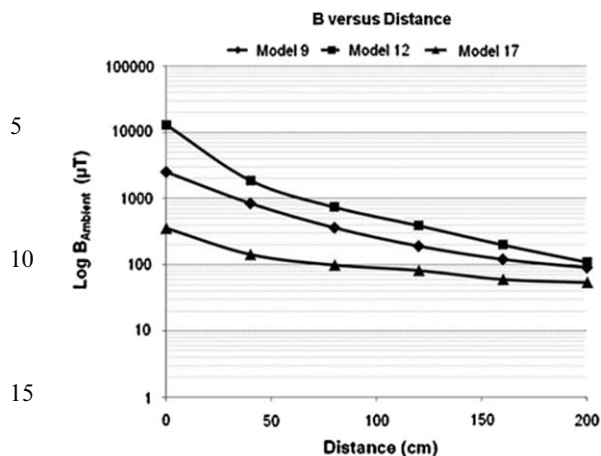


Figure 4. Environmental B values (μT) as a function of the distance to the NMR equipment. Measurements were taken with the magnetometer probe located at a 150 cm above ground. Equipment 9 and 12, with magnet bores of 9.4 and 11.7 T, respectively, are standard shield models placed inside pits. Device 17, with a 14.1 T magnet bore, is ultra-shield and placed on a support above the ground.

the limits in Directive 2013/35/EU⁽³¹⁾ of the European Parliament and the Council, on the minimum health and safety requirements for exposure of workers to risks arising from physical agents (EMF). This Directive has been transposed to the state legislations of several European countries (see, for instance, Real Decreto 299/2016)⁽³⁵⁾. In the case of SMF and for protection against sensory effects under normal working conditions, the Directive establishes 2 and 8 T as the exposure limit values (ELV) for peak external B at the worker's body and limbs, respectively. For health effects under controlled working conditions, the limit value for body exposure is 8 T. The results of the B measurements summarized in Table 2 and Figure 3 show that for the diverse tasks performed with the different equipment, the recorded values were always below the ELV established by the Directive. However, the results also reveal that during execution of tasks performed in close proximity to the equipment, the user can be exposed to fields $B \geq 0.5$ mT. These exposure conditions would exceed the action levels for workers with implanted medical devices, laid down for preventing potential indirect effects due to implant dysfunction because of electromagnetic compatibility. Therefore, in addition to the exposure minimization strategies described above concerning equipment and facilities, it is advisable to clearly mark the 0.5 mT contour line in NMR laboratories, in order to limit access to implant carriers⁽³⁴⁾.

In any case, the exposure limits set by the Directive after the ICNIRP guidelines^(36, 37) are aimed to

protect the workers against known, short-term effects of acute exposures to EMF. The Directive is not intended for protection against potential effects of chronic occupational exposure to fields below the limits, as it adopts ICNIRP view that the evidence on long-term effects remains incomplete. Indeed, concerning SMF, several articles reviewing the available literature have concluded that, as a whole, the experimental evidence on the effects of static fields below the limits established by international standards is scarce, inconclusive and not sufficiently demonstrative of harm to humans^(36, 38). Nor epidemiological studies have found a link between chronic occupational exposure to SMF and increased risk of cancer. However, most of these studies have used small samples and generally lack a good estimate of the exposure, which prevents reliable conclusions about its potential carcinogenicity^(12, 39).

As for other evidence on the potential effects of occupational exposure to SMF, the best studied group is health care staff, usually radiographers, serving in MRI units. Maximum exposure levels of around 550 mT have been reported for personnel working with equipment of <2 T^(1, 2, 40), and of about 820 mT when using 3 T devices.⁽¹⁾ As said above, several studies in these workers and in patients undergoing MRI have reported time- and dose-correlated episodes of vertigo, nausea, metallic taste, dizziness, drowsiness, headache or sleep disorders, which have been attributed to time varying electric or magnetic fields induced in the nervous system of the subject when moving through the strong, stray field in the vicinity of the magnet^(6-8, 10, 41). During the recording tasks in the present study, 4 out of the 45 collaborating workers spontaneously reported having suffered transient episodes of dizziness when conducting manual parameter shimming. In fact, this maneuver is the one carrying the highest levels of cephalic exposure recorded in the present study, with maxima of approximately 396 mT. This might indicate that, in some individuals and under certain conditions, the SMF exposure levels registered in the environments described herein overstep the threshold capable of inducing the said symptoms. However, the possibility cannot be ruled out that the strained posture usually adopted by the worker during the performance of this task is also involved in the reported episodes of dizziness.

Another topic of interest in relation to chronic occupational exposure is the potential reproductive outcomes in pregnant women working in the vicinity of MRI scanners. While some epidemiological studies have reported evidence of increased miscarriage risk in MRI workers⁽⁴²⁾, other studies have found no relationship between prenatal exposure to 1.5-T MRI scanning and alterations in birth weight or neonatal hearing⁽⁴³⁾ or in functional outcomes or hearing impairment at preschool age⁽⁴⁴⁾. In general,

epidemiology of reproductive problems in this topic has the same limitations as the epidemiology of cancer regarding sample size and exposure estimation. Thus, the available evidence does not allow reaching valid conclusions on potential reproductive risks for pregnant workers exposed to relatively strong SMF as those recorded in the present study. Anyhow, it is obvious that exposure limits for workers are not adequate for embryo protection. In fact, MRI medical equipment operators, as well as those working with NMR spectrometry devices described in this paper, may be subject to physical exposures to SMF that exceed the 40 mT limit recommended for the protection of the general public^(13, 45). These considerations should be taken into account in order to design appropriate strategies for minimizing exposure of pregnant workers.

CONCLUSION

To assesses occupational exposure of the research staff of NMR spectrometry units, systematic measurement was conducted of static and RF field levels received by the workers during execution of different tasks in the vicinity of 19 spectrometry devices. The recordings did not detect RF emissions to the outside of the equipment. As for SMF, a broad variability was found in the mean exposure values. This variability is attributable to factors including differences between the characteristics of the devices, the task types performed by the operators and the protocols applied for task performing.

In all cases and conditions studied, body and limb exposure levels were well below the ELV established by the European Directive for protection against short-term effects, either sensory or health, of acute occupational exposures. However, in some of the conditions studied, the exposure levels exceeded the 500 μ T threshold for electromagnetic compatibility with medical implants, and approached the 40 mT limit recommended for protection of the general public. These conditions of standards overstepping must be taken into consideration and avoided in the cases of pregnant workers and medical implant carriers.

Overall, the epidemiological and experimental evidence on the potential effects of chronic occupational exposure to moderate SMF, below the protection limits against acute effects, is not considered probative of noxiousness. However, such evidence is considered incomplete since the studies on the subject are scarce, and many of them have serious methodological limitations. In the absence of deeper knowledge and firmer conclusions, application of ALARA and ALATA strategies, aimed at minimizing the workers' exposure without affecting their performance has been advised^(31, 46, 34). The

herein reported data would be of use in designing such safety strategies.

REFERENCES

- Bradley, J. K., Nyekiöva, M., Price, D. L., López, L. D. and Crawley, T. *Occupational exposure to static and time-varying gradient magnetic fields in MR units*. *J. Magn. Reson. Imaging* **26**(5), 1204–1209 (2007).
- Fuentes, M. A., Trakic, A., Wilson, S. J. and Crozier, S. *Analysis and measurements of magnetic field exposures for healthcare workers in selected MR environments*. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **55**(4), 1355–1364 (2008).
- Karpowicz, J. and Gryz, K. *The pattern of exposure to static magnetic field of nurses involved in activities related to contrast administration into patients diagnosed in 1.5 T MRI scanners*. *Electromagn. Biol. Med.* **32**(2), 182–191 (2013).
- Karpowicz, J., Gryz, K., Politanski, P. and Zmyslony, M. *Exposure to static magnetic field and health hazards during the operation of magnetic resonance scanners*. *Med. Pr.* **62**(3), 309–321 (2011).
- Yamaguchi-Sekino, S., Nakai, T., Imai, S., Izawa, S. and Okuno, T. *Occupational exposure levels of static magnetic field during routine MRI examination in 3 T MR system*. *Bioelectromagnetics* **35**(1), 70–75 (2014).
- Chakeres, D. W. and de Vocht, F. *Static magnetic field effects on human subjects related to magnetic resonance imaging systems*. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* **87**(2–3), 255–265 (2005).
- De Vocht, F., Van Drooge, H., Engels, H. and Kromhout, H. *Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners manufacturing department*. *J. Magn. Reson. Imaging* **23**(2), 197–204 (2006).
- Schaap, K., Portengen, L. and Kromhout, H. *Exposure to MRI-related magnetic fields and vertigo in MRI workers*. *Occup. Environ. Med.* **73**(3), 161–166 (2016).
- Wilen, J. and de Vocht, F. *Health complaints among nurses working near MRI scanners—a descriptive pilot study*. *Eur. J. Radiol.* **80**(2), 510–513 (2011).
- Zanotti, G., Ligabue, G. and Gobba, F. *Subjective symptoms and their evolution in a small group of magnetic resonance imaging (MRI) operators recently engaged*. *Electromagn. Biol. Med.* **34**(3), 262–264 (2015).
- De Vocht, F., Wilen, J., Hansson Mild, K., Van Nierop, L. E., Slotje, P. and Kromhout, H. *Health effects and safety of magnetic resonance imaging*. *J. Med. Syst.* **36**(3), 1779–1780 (2012).
- Feychting, M. *Health effects of static magnetic fields—a review of the epidemiological evidence*. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* **87**(2–3), 241–246 (2005).
- 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.* **74**(4), 494–522 (1998).
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). *Statement on the 'Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)'*. *Health Phys.* **97**(3), 257–258 (2009).

15. Şekeroğlu, V., Akar, A. and Şekeroğlu, Z. A. *Cytotoxic and genotoxic effects of high-frequency electromagnetic fields (GSM 1800 MHz) on immature and mature rats*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **80**, 140–144 (2012).

16. Avendaño, C., Mata, A., Sanchez Sarmiento, C. A. and Doncel, G. F. *Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation*. *Fertil. Steril.* **97**(1), 39–45. e2 (2012).

17. Karaca, E., Durmaz, B., Aktug, H., Yildiz, T., Guducu, C., Irgi, M., Koksal, M. G., Ozkinay, F., Gunduz, C. and Cogulu, O. *The genotoxic effect of radiofrequency waves on mouse brain*. *J. Neurooncol.* **106**(1), 53–58 (2012).

18. Lerchl, A., Klose, M., Grote, K., Wilhelm, A. F., Spathmann, O., Fiedler, T., Streckert, J., Hansen, V. and Clemens, M. *Tumor promotion by exposure to radiofrequency electromagnetic fields below exposure limits for humans*. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **459**(4), 585–590 (2015).

19. Barnes, F. and Greenbaum, B. *Some effects of weak magnetic fields on biological systems: RF fields can change radical concentrations and cancer cell growth rates*. *IEEE Power Electron. Mag.* **3**(1), 60–68 (2016).

20. Wyde, M. *et al. Report of partial findings from the National Toxicology Program Carcinogenesis Studies of Cell Phone Radiofrequency Radiation in Hsd: Sprague Dawley® SD rats (Whole Body Exposure)*. bioRxiv (2016).

21. Baste, V., Moen, B. E., Oftedal, G., Strand, L. A., Bjorge, L. and Mild, K. H. *Pregnancy outcomes after paternal radiofrequency field exposure aboard fast patrol boats*. *J. Occup. Environ. Med.* **54**(4), 431–438 (2012).

22. Kumar, S., Behari, J. and Sisodia, R. *Influence of electromagnetic fields on reproductive system of male rats*. *Int. J. Radiat. Biol.* **89**(3), 147–154 (2013).

23. Stral Säkerhets Myndigheten (SSM—Swedish Radiation Safety Authority). Eighth report from SSM:s Scientific Council on Electromagnetic Fields. (2013). ISBN 2000-0456.

24. Havas, M. and Marrongelle, J. *Replication of heart rate variability provocation study with 2.4 GHz cordless phone confirms original findings*. *Electromagn. Biol. Med.* **32**(2), 253–266 (2013).

25. Parkar, M. A., Ahmed, R., Abdullah, B. B., Patil, B. S. and Das, K. K. *Effect of cell phone exposure on physiologic and hematologic parameters of male medical students of Bijapur (Karnataka) with reference to serum lipid profile*. *J. Basic. Clin. Physiol. Pharmacol.* **21**(2), 201–210 (2010).

26. Yilmaz, D. and Yildiz, M. *Analysis of the mobile phone effect on the heart rate variability by using the largest Lyapunov exponent*. *J. Med. Syst.* **34**(6), 1097–1103 (2010).

27. Advisory Group on Non-Ionising Radiation (AGNIR). RCE-20: health effects from radiofrequency electromagnetic fields. (2012). ISBN 978-0-85951-714-0.

28. European Health Risk Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure (EFHRAN). *Deliverable report D2 of EHFRAN project: risk analysis of human exposure to electromagnetic fields*. (2012).

29. European Environment Agency (EEA). *Environment and human health*. (2013).

30. International Agency for Research on Cancer (IARC). *International Agency for Research on Cancer (IARC) Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields*. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans 102, Pt 2, 1–460 (2013).

31. European Union Directive 2013/35/EU of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). Off. J. Europ. Union (2013) L 179/1 of 29/6/2013.

32. World Health Organization (WHO). *Electromagnetic fields and public health*. (2006).

33. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). *Health Effects of Exposure to EMF* (Brussels, Belgium: European Commission) (2009).

34. European Union Non-binding guide to good practice for implementing Directive 2013/35/EU Electromagnetic Fields. Volume II: Case Studies. (2015) ISBN: 978-92-79-45937-5.

35. Real Decreto 299/2016, de 22 de julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos. BOE no 182 de 29/7/2016 (2016).

36. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) *Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields*. *Health Phys.* **96**(4), 504–514 (2009).

37. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)*. *Health Phys.* **99**(6), 818–836 (2010).

38. Vijayalaxmi, Fatahi, M. and Speck, O. *Magnetic resonance imaging (MRI): a review of genetic damage investigations*. *Mutat Res Rev Mutat Res* **764**, 51–63 (2015).

39. Hartwig, V., Giovannetti, G., Vanello, N., Lombardi, M., Landini, L. and Simi, S. *Biological effects and safety in magnetic resonance imaging: a review*. *Int. J. Environ. Res. Public. Health.* **6**(6), 1778–1798 (2009).

40. Schaap, K., Christopher-De Vries, Y., Crozier, S., de Vocht, F. and Kromhout, H. *Exposure to static and time-varying magnetic fields from working in the static magnetic stray fields of MRI scanners: a comprehensive survey in the Netherlands*. *Ann. Occup. Hyg.* **58**(9), 1094–1110 (2014).

41. Schaap, K., Christopher-de Vries, Y., Mason, C. K., de Vocht, F., Portengen, L. and Kromhout, H. *Occupational exposure of healthcare and research staff to static magnetic stray fields from 1.5–7 Tesla MRI scanners is associated with reporting of transient symptoms*. *Occup. Environ. Med.* **71**(6), 423–429 (2014).

42. Evans, J. A., Savitz, D. A., Kanal, E. and Gillen, J. *Infertility and pregnancy outcome among magnetic resonance imaging workers*. *J. Occup. Med.* **35**(12), 1191–1195 (1993).

43. Strizek, B., Jani, J. C., Mucyo, E., De Keyzer, F., Pauwels, I., Ziane, S., Mansbach, A. L., Deltrenre, P., Cos, T. and Cannie, M. M. *Safety of MR imaging at 1.5 T in fetuses: a retrospective case-control study of birth weights and the effects of acoustic noise*. *Radiology* **275**(2), 530–537 (2015).

44. Bouyssi-Kobar, M., du Plessis, A. J., Robertson, R. L. and Limperopoulos, C. <i>Fetal magnetic resonance imaging: exposure times and functional outcomes at pre-school age</i> . <i>Pediatr. Radiol.</i> 45 (12), 1823–1830 (2015).	60
5 45. European Union. <i>Council recommendation 1999/519/CE of 12 July 1999 on the limitation of the exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)</i> . <i>Off. J.</i> (1999) L 199 of 30/7/1999.	65
10	70
15	75
20	80
25	85
30	90
35	95
40	100
45	105
50	110
55	115

Nueva Directiva de Protección Ocupacional ante Campos Electromagnéticos

Tania Berlana Llorente¹ y Alejandro Úbeda Maeso²

¹Servicio de Prevención, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
²Servicio BEM-Investigación, Hospital Universitario Ramón y Cajal – IRYCIS

RESUMEN: Las preocupaciones manifestadas por ciertos sectores tecnológicos e industriales sobre el impacto que la aplicación de los criterios de la Directiva 2004/40/CE tendría en sus actividades, han motivado la derogación de tal Directiva y su sustitución por otra más permisiva, la Directiva 2013/35/UE. Esta nueva regulación sobre las disposiciones mínimas de salud y seguridad relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de agentes físicos (campos electromagnéticos) se basa en las modificaciones que la Comisión Internacional sobre Protección frente a Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) ha introducido recientemente en sus directrices originales, que sirvieron de base a la Directiva ahora derogada.

ABSTRACT: Concerns on the potential impact that the application of Directive 2004/40/EC would have on the activities of some industrial and technological sectors, have led to the repeal of that Directive and its replacement by the more permissive Directive 2013/35/EU. This new regulation on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to risks arising from physical agents (electromagnetic fields) is based on the modifications that the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) recently made on its original guidelines.

Palabras claves: Radiación No Ionizante, campos electromagnéticos, Directiva Europea, ocupacional
Keywords: Non Ionizing Radiation, electromagnetic fields, European Directive, occupational

ANTECEDENTES

La exposición a campos electromagnéticos (CEM) y sus posibles efectos en la salud han sido una fuente constante de preocupación que ha ido en aumento a medida que se ha ido incorporando a la vida cotidiana un mayor número de equipos e instalaciones que emiten radiaciones electromagnéticas. Este creciente interés de la sociedad ha impulsado en los últimos años diversas investigaciones sobre los efectos en la salud derivados de la exposición a CEM.

La interpretación que la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) hizo de los resultados de varios estudios recientes ha llevado a dicha Comisión a relajar los criterios y niveles de protección propuestos en sus Directrices de 1998 [1]. En virtud de ello, ICNIRP publicó entre 2009 y 2010 nuevas directrices para la protección ante la exposición a campos magnéticos estáticos [2] y a CEM de baja frecuencia [3], respectivamente. Esta relajación en los criterios de referencia de ICNIRP ha permitido a la Unión Europea derogar en 2013 su Directiva 2004/40/CE para la protección ante la exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos [4], cuyo plazo de transposición a las legislaciones estatales se había venido posponiendo en ocasiones sucesivas (2008 y 2012), y sustituirla por la nueva Directiva 2013/35/UE [5].

Las causas de la demora en la transposición de la Directiva 2004/40/CE, tal como se desprende de los consideran-

dos del texto actual, se encuentra en el hecho de que ciertas partes interesadas, en particular determinados colectivos y grupos de presión relacionados con la industria y la medicina, se mostraron abiertamente contrarios a la Directiva original, dadas las potenciales dificultades para la aplicación de los valores de referencia en determinadas actividades industriales y en los procedimientos médicos de imágenes por resonancia (Tabla I).

El texto de la Directiva 2013/35/UE, al igual que el de su antecesora, establece que su objetivo es la protección de la seguridad y salud de los trabajadores frente a los efectos físicos directos conocidos y los efectos indirectos provocados por los CEM. Es importante subrayar que este concepto de protección se aplica exclusivamente a efectos inmediatos, de exposiciones cortas y esporádicas. En efecto, tanto la presente Directiva como la derogada advierten que no están diseñadas para la protección contra potenciales efectos a largo plazo, derivados de las exposiciones ocupacionales crónicas que incluyen posibles efectos cancerígenos, neurodegenerativos, reproductivos, etc. En ambas Directivas la decisión de no abordar los posibles efectos a largo plazo se justifica por una alegada inexistencia de datos científicos comprobados que establezcan una relación causal entre la exposición crónica a campos subumbral y un riesgo incrementado de padecer cualquier daño o dolencia. Este argumento ha sido muy contestado desde diversos sectores de expertos e investigadores que, entre otros argumentos,

AÑO	NORMATIVA PARA PÚBLICO	OTROS AGENTES DE ÁMBITO INTERNACIONAL	NORMATIVA OCUPACIONAL
1998	Directrices ICNIRP para público y trabajadores. No aplicables a efectos a largo plazo (NLP)		
1999	Recomendación Europea 1999/5 19/CE. Adopta límites ICNIRP, pero los considera aplicables a efectos a largo plazo (LP)		
2000			
2001	Real Decreto RD 1066/2001. Adopta los criterios de la Recomendación, solo señales de telecomunicación (LP)		
2002	IARC-WHO clasifica los CEM de muy baja frecuencia como Posibles Cancerígenos 2B (LP)		
2003			
2004			Directiva 2004/40/CE. Adopta los límites de ICNIRP (NLP)
2005			
2006		Entran en acción grupos de presión contra Directiva 2004 (Alliance for MRI)	
2007			
2008			Estados Miembros incumplen el plazo de trasposición: Prórroga a 2012
2009	El Parlamento Europeo propone aplicación del Principio de Precaución ante RNI (LP). ICNIRP relaja sus límites y criterios para campo estático (NLP)		
2010	ICNIRP relaja sus límites para RNI de frecuencias bajas e intermedias (NLP)		
2011	IARC-WHO clasifica las RNI de radiofrecuencia como Posibles Cancerígenos 2B (LP). El Consejo de Europa propone aplicación ALARA para RNI, campañas informativas y que ICNIRP clarifique mejor sus criterios (LP)		
2012			Se incumple el plazo de trasposición
2013			Directiva 2013/35/UE deroga Directiva de 2004, adopta los nuevos límites ICNIRP y admite excepciones al cumplimiento (NLP)
2014			
2015			
2016			1 de julio, plazo límite de trasposición. Los Estados pueden promulgar normas más estrictas que en la Directiva vigente

Tabla 1: Cronología de los cambios registrados en los criterios y las normativas europeas para la protección del público y de los trabajadores ante la exposición a radiaciones no ionizantes de f<300 GHz.

Directiva 2004/40/CE versus Directiva 2013/35/UE	
Directiva 2004/40/CE	Directiva 2013/35/UE
Valores de referencia en términos de: • Valores de acción • Valores límite	Establece nuevas magnitudes para expresar los valores de referencia. • Valores de actuación - valor de actuación superior - valor de actuación inferior • Valores límite - valor límite relacionado con efectos para la salud - valor límite relacionado con efectos sensoriales
No incluye valores de referencia específicos para determinadas zonas corporales (las extremidades)	Incluye valores de referencia específicos para determinadas zonas corporales
Establece dos tablas de valores de referencia en términos de valores de acción y valores límite, independientemente de los efectos	Establece varias tablas de valores de referencia diferenciando entre efectos térmicos y no térmicos (coexistiendo valores diferenciados en el rango intermedio de frecuencias)
No incluye sectores específicos exentos	Incluye sectores exentos (trabajadores con RMI ámbito sanitario, personal en instalaciones militares operativas y actividades militares, otras actividades debidamente justificadas)
En ningún caso se podrán superar los valores límite	Especifica situaciones en que se podrán superar valores límite sensoriales y/o con efectos para la salud
No establece valores de referencia específicos para trabajadores sensibles	Establece valores de referencia específicos para casos de trabajadores especialmente sensibles (portadores de dispositivos médicos activos implantados)
No contempla procedimiento de urgencia	Procedimiento de urgencia para que la Comisión incorpore cambios ante situaciones de riesgo inminente para los trabajadores
Valores de referencia basados en ICNIRP 1998	Nuevos valores de referencia basados en documentos de ICNIRP 1998, 2009 y 2010 (más permisivos para determinadas frecuencias)

Tabla 2: Principales diferencias entre la Directiva vigente y la derogada.

subrayan que ya en 2002 la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, perteneciente a la Organización Mundial de Salud (IARC, WHO) incluyó los campos electromagnéticos débiles de frecuencia extremadamente baja, que abarcan a la frecuencia industrial de 50/60 Hz, en su clasificación de "Posibles Cancerígenos", Clase 2B (Tabla I). Y en 2011 la misma Agencia incluyó los campos de radiofrecuencias en la misma categoría, 2B, basándose en evidencias epidemiológicas y experimentales (ver detalles en [6]).

En cualquier caso, tanto la Directiva derogada como la vigente reconocen el derecho que asiste de los Estados Miembros de adoptar disposiciones más exigentes para la protección de los trabajadores, con valores de referencia más restrictivos de exposición a CEM.

CRITERIOS DE REFERENCIA

Los efectos de los CEM en el cuerpo humano dependen de la frecuencia de la radiación electromagnética. Para campos de frecuencias comprendidas entre 0 y 10 MHz se consideran los efectos físicos directos de tipo no térmico, tales como la estimulación de los músculos, del sistema nervioso central y periférico o de los órganos sensoriales. La estimulación de los órganos sensoriales

podría dar lugar a síntomas transitorios, como vértigos o fosfenos, mientras que en el sistema nervioso la estimulación podría dar lugar a disfunciones cognitivas o motoras inmediatas y reversibles. Para las radiaciones electromagnéticas en el intervalo de frecuencias entre 100 kHz y 300 GHz se contemplan los efectos físicos directos de tipo térmico, como el calentamiento de los tejidos por la absorción de energía. Por ello, las magnitudes físicas, los valores límite de exposición y los niveles de actuación establecidos en los anexos de la Directiva, están diferenciados en función de la frecuencia de la radiación y el nivel de exposición.

De forma complementaria se consideran otros efectos de tipo indirecto causados por la presencia de un objeto en un campo

electromagnético que pueda entrañar un riesgo para la salud o la seguridad. Estos posibles riesgos incluyen interferencias con equipos y dispositivos médicos, proyección de objetos ferromagnéticos, activación de dispositivos electroexplosivos, incendios y explosiones resultantes de la ignición de materiales inflamables mediante chispas causadas por campos inducidos, corrientes de contacto o descargas eléctricas.

Para la protección ocupacional frente a estos posibles efectos directos e indirectos derivados de la exposición a CEM, la Directiva mantiene el criterio de establecer unos

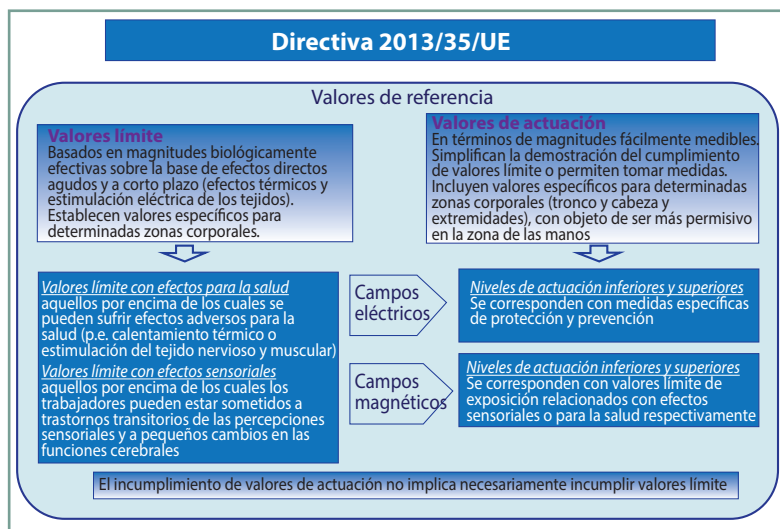


Figura 1 Conceptos de Valores Límite y Niveles de Actuación en la Directiva 2013/35/UE.

B (μ T)	2004		2013		
	VA	NA min	NA max	NA extrem	
Frecuencia					
0 Hz	2·10 ⁵	2·10 ⁶	8·10 ⁶	8·10 ⁶	
1 Hz	2·10 ⁵	2·10 ⁵	3·10 ⁵	9·10 ⁵	
5 Hz	8·10 ³	8·10 ³	6·10 ⁴	18·10 ⁴	
10 Hz	25·10 ²	25·10 ²	3·10 ⁴	9·10 ⁴	
50 Hz	5·10 ²	10 ³	6·10 ³	18·10 ³	
100 Hz	250	10 ³	3·10 ³	9·10 ³	
1 Hz	30.7	3·10 ²	3·10 ²	9·10 ²	
5 Hz	30.7	10 ²	10 ²	3·10 ²	
10 Hz	30.7	10 ²	10 ²	3·10 ²	
100 Hz	20	10 ²	10 ²	3·10 ²	
1 Hz	2	10 ²	10 ²	3·10 ²	
5 Hz	0.4	10 ²	10 ²	3·10 ²	
10 Hz	0.2	10 ²	10 ²	3·10 ²	

Tabla 3: Niveles de Actuación Mínimos (NA min), Máximos (NA max) y en Extremidades (NA extrem) para exposiciones a campos magnéticos de entre 0Hz y 10MHz, establecidos por la nueva Directiva (2013), comparados con los Valores de Acción (VA) de la Directiva derogada (2004). Tanto los NA como los VA se expresan en μ T rms.

niveles de referencia en términos de valores límite de exposición y niveles de actuación en la línea de las recomendaciones recientes de la ICNIRP citadas anteriormente (Figura 1 y Tabla II). En general estos nuevos valores son más permisivos que los de la Directiva derogada, y en consecuencia, admiten un mayor nivel de exposición ocupacional a campos electromagnéticos de la frecuencia correspondiente (Tabla III).

Como novedad, la Directiva incorpora otros parámetros adicionales, denominados valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud y valores límite de exposición con efectos sensoriales. Los valores límite de

exposición relacionados con efectos para la salud, se definen como aquellos “por encima de los cuales los trabajadores pueden sufrir efectos adversos para la salud, tales como calentamiento térmico o estimulación del tejido nervioso y muscular”. Por otro lado, define valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales como aquellos “por encima de los cuales los trabajadores pueden estar sometidos a trastornos transitorios de las percepciones sensoriales y a pequeños cambios en las funciones cerebrales” (Figura 1). En relación con el cumplimiento de estos valores de referencia la Directiva establece que “Los Estados miembros exigirán al empresario que garantice que la exposición de los trabajadores a campos electromagnéticos no supere los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud y con efectos sensoriales”.

Al igual que la Directiva derogada, para simplificar la demostración del cumplimiento de los valores límite de exposición correspondientes o, en su caso, para aplicar las medidas de protección o prevención establecidas en la Directiva, se definen los niveles de actuación. Asimismo, el texto vigente incorpora niveles de actuación superior y niveles de actuación inferior, cuya consideración difiere según se trate de campo eléctrico o magnético. Para los campos eléctricos se entiende por “nivel de actuación inferior” y “nivel de actuación superior”, los niveles relacionados con medidas específicas de protección o prevención establecidas en la Directiva. Por el contrario, para los campos magnéticos, se entiende por “nivel de actuación inferior”, el correspondiente al valor límite de exposición para efectos sensoriales, en cada uno de los distintos rangos de frecuencia, siendo el “nivel de actuación superior” el correspondiente a los valores límite de exposición para efectos sobre la salud (Figura 1).

En relación con los valores de referencia para trabajadores especialmente sensibles, la Directiva incluye una especial protección para grupos específicos de trabajadores que presenten un riesgo particular, a fin de evitar problemas de interferencia con dispositivos médicos, tales como prótesis metálicas, marcapasos, desfibriladores cardíacos e implantes cocleares, y de otro tipo (Tabla IV). Tales interferencias por incompatibilidad electromagnética pueden darse por exposición de los equipos electrosensibles a valores de campo por debajo de los niveles de actuación establecidos en la Directiva. Por ello, el nuevo texto incorpora unos niveles de actuación más restrictivos, por ejemplo para exposiciones a campos magnéticos estáticos, en la línea de los valores propuestos recientemente por ICNIRP.

CARACTERÍSTICAS DE LA EXPOSICIÓN	DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO
Valor límite relacionado con efectos sensoriales	
Condiciones de trabajo normales	2T
Exposición localizada en extremidades	8T
Valor límite relacionado con efectos para la salud	
	8T
Nivel de actuación	
Interferencias con dispositivos médicos activos implantados, por ejemplo, marcapasos cardiacos	0,5mT
Riesgo de atracción y proyección en campo periférico de fuentes de campos intensos	3mT

Tabla 4. Valores límite y niveles de actuación para campo magnético estático.

PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE RIESGOS

De acuerdo con la Directiva 2013/35/UE el empresario deberá evaluar todos los riesgos para los trabajadores que se deriven de la exposición a CEM en el lugar de trabajo y, si resultase necesario, deberán medirse o calcularse los niveles de exposición ocupacional. Para ello el empresario podrá,

cuando proceda, basarse en los niveles de emisión y en otros datos relacionados con la seguridad, facilitados por el fabricante o distribuidor, de acuerdo con la correspondiente normativa de la Unión.

Esta obligación de realizar la evaluación debe ser proporcional a las características de la exposición. Así, la Directiva establece que “es necesario llevar a cabo una evaluación de los riesgos efectiva y eficiente (...) que debe ser proporcional a la situación en que se encuentra el lugar de trabajo”. Para ello se propone la necesidad de “diseñar un sistema de protección que agrupe diferentes riesgos de forma sencilla, gradual y fácilmente comprensible”.

A este respecto la Directiva contempla una serie de condiciones eximentes de una evaluación específica cuando se disponga de información fiable y suficiente. En particular:

- Los lugares de trabajo abiertos al público, siempre que ya se haya procedido a una evaluación conforme a las disposiciones sobre limitación de la exposición del público general a los CEM, se respeten las limitaciones especificadas en las mismas con respecto a los trabajadores y se descarten los riesgos para la salud y seguridad. En este sentido, se considerará que estos requisitos se cumplen cuando los equipos destinados a uso público se utilicen conforme a su finalidad y a la normativa de la Unión relativa a productos que establezca niveles de seguridad más restrictivos que los previstos en la Directiva, y no se utilice ningún otro equipo (Figura 2, punto 1).
- El material de trabajo que es conforme a los requisitos establecidos en la correspondiente normativa de la Unión sobre Productos en la que se fijen unos niveles de seguridad más estrictos que los de la Directiva. Esto permite simplificar la evaluación en un gran número de casos (Figura 2, punto 2).

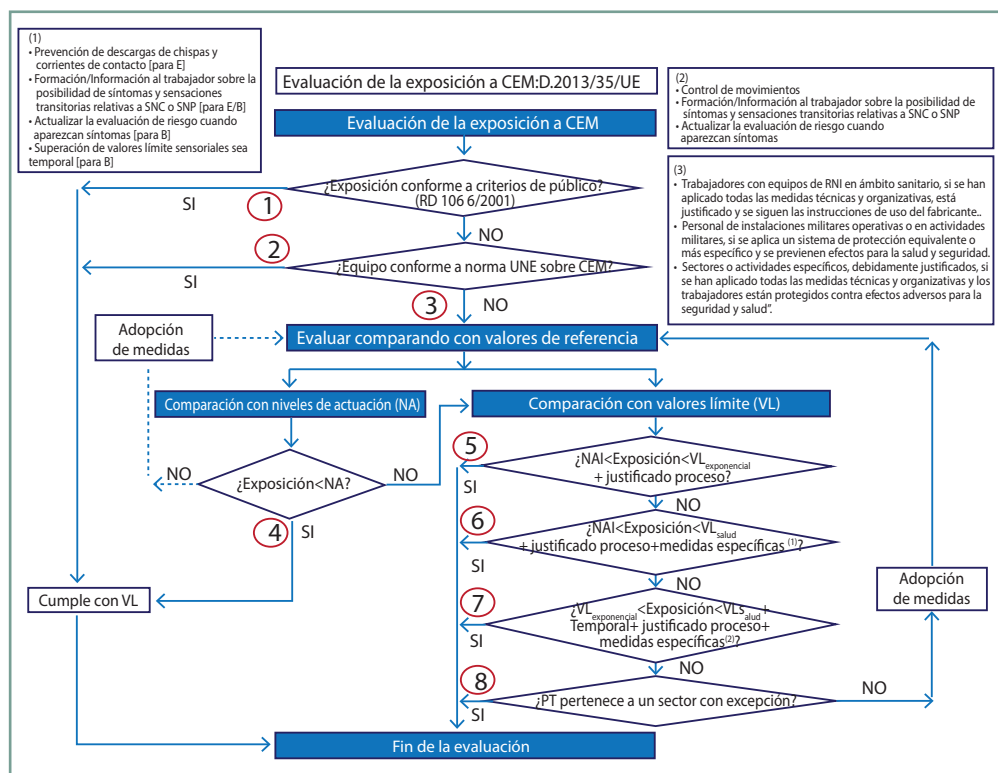


Figura 2. Procedimiento de evaluación en la Directiva 2013/35/UE. Los dos primeros pasos del diagrama recogen los supuestos en los que, considerando la naturaleza y el alcance de los riesgos relacionados con la exposición a CEM, la evaluación no requiere una valoración más detallada. Los pasos del 3 al 7 se refieren a evaluaciones detalladas de la exposición y describen las actuaciones a seguir en función de los resultados de la comparación del nivel de exposición medido y/o calculado con los valores de referencia establecidos por la Directiva.

considerará que estos requisitos se cumplen cuando los equipos destinados a uso público se utilicen conforme a su finalidad y a la normativa de la Unión relativa a productos que establezca niveles de seguridad más restrictivos que los previstos en la Directiva, y no se utilice ningún otro equipo (Figura 2, punto 1).

El material de trabajo que es conforme a los requisitos establecidos en la correspondiente normativa de la Unión sobre Productos en la que se fijen unos niveles de seguridad más estrictos que los de la Directiva. Esto permite simplificar la evaluación en un gran número de casos (Figura 2, punto 2).

En el caso de que no se cumplan ninguno de los supuestos anteriores o no se disponga de información fiable, la evaluación de la exposición se realizará mediante una estimación deta-



llada de la exposición basada en mediciones y/o cálculos (modelización de fuentes, geometría espectral y propiedades eléctricas de tejidos y materiales). Realizadas las tareas de medición y/o cálculo, se procederá a la evaluación comparando los valores obtenidos con los de referencia establecidos: niveles de actuación y/o valores límite, según proceda (Figura 2, puntos del 3 al 7).

La evaluación detallada de la exposición a CEM prestará especial atención a los siguientes aspectos:

- Los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud y con efectos sensoriales, así como los niveles de actuación.
- La frecuencia, el nivel, la duración y el tipo de exposición, incluida la distribución en el cuerpo de los trabajadores y en el espacio de trabajo
- Cualquier efecto sobre la salud o la seguridad de los trabajadores que presenten un riesgo particular, en especial las gestantes y los portadores de dispositivos médicos activos o pasivos, implantados o no, incluyendo marcapasos cardíacos y bombas de insulina.
- Cualquier efecto físico directo o indirecto.
- La exposición a fuentes que emiten múltiples frecuencias.
- La exposición simultánea a campos emitidos por fuentes distintas de frecuencias diferentes.
- La información facilitada por el fabricante del equipo, la información apropiada obtenida de la vigilancia de la salud, así como cualquier otra información pertinente sobre salud y seguridad.

COMPARACIÓN CON VALORES DE REFERENCIA

La Directiva 2013/35/UE establece que: “Deberá demostrarse el cumplimiento de los valores límite de exposición (...) mediante procedimientos pertinentes de evaluación de la exposición”. En este sentido la Directiva añade que “cuando se demuestre que no se supera los niveles de actuación correspondientes, se considerará que el empresario cumple los valores límite relacionados con efectos para la salud y efectos sensoriales” (Figura 2, punto 4).

Alternativamente “si la exposición supera los niveles de actuación deberá tomarse medidas, a menos que la evaluación demuestre que no se superan los valores límite de exposición y puedan descartarse riesgos para la seguridad”. Por tanto, la Directiva admite que en determinadas condiciones podrán rebasarse los niveles de actuación, en particular:

- Se podrá superar los niveles de actuación inferiores, cuando lo justifique la práctica o el proceso, siempre que no superen los valores límite para efectos sensoriales (Figura 2 punto 5).

O bien

- Se podrá superar los niveles de actuación inferiores, cuando lo justifique la práctica o el proceso, siempre que no superen los valores límite relacionados con efectos para la salud y se adopten los siguientes tipos de medidas de protección específicas según se trate de un campo eléctrico o magnético (Figura 2 punto 6):

o Para campo eléctrico (E): adopción de medidas o estrategias preventivas contra descargas excesivas de chispas y contra las corrientes de contacto, y proporcionar información a los trabajadores.

o Para campo magnético (B): que la superación de valores límite para efectos sensoriales sea temporal, se revise la evaluación de riesgos cuando aparezcan síntomas transitorios y se haya proporcionado información a los trabajadores.

Incluso en caso de no poder garantizar los supuestos anteriores, la Directiva admite que se rebasen los valores límite para efectos sensoriales, cuando se justifique por la práctica o el proceso siempre que (Figura 2 punto 7):

o La superación de los límites sea sólo temporal.

o No se superen los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud.

o Se hayan adoptado medidas de protección específicas (como el control de los movimientos del trabajador durante la sobreexposición).

o Se actualice la evaluación de riesgos cuando aparezcan síntomas transitorios.

o Se haya proporcionado información a los trabajadores sobre la posibilidad de que surjan síntomas y sensaciones pasajeras relacionadas con los efectos en el sistema nervioso central (SNC) o periférico (SNP).

Es más, la Directiva admite que la aplicación de los valores de referencia puede entrar en conflicto en condiciones específicas de sobreexposición en diversas actividades, como en el ámbito de la defensa militar o de la resonancia magnética. Así, la Directiva incorpora la posibilidad de exención de cumplimiento para estas actividades y para cualquier otra “debidamente justificada.” En particular (Figura 2 punto 8):

- Exposiciones relacionadas con la instalación, el ensayo, uso, desarrollo o mantenimiento de equipos para la investigación o para la obtención de imágenes por resonancia magnética (IRM) en el ámbito sanitario (Figura 3).
- Exposiciones de personal que trabaje en instalaciones militares operativas o que participe en actividades militares, incluidos los ejercicios militares internacionales conjuntos.
- Las exposiciones en sectores específicos o durante la realización de actividades específicas ajenas a los ámbitos anteriores, en “circunstancias debidamente justificadas”

MEDIDAS ENCAMINADAS A LA REDUCCIÓN DE RIESGOS

En relación con las medidas específicas de prevención y protección, la Directiva establece que “salvo que la evaluación realizada (...) demuestre que no se superan los valores límite de exposición correspondientes y que pueden descartarse los riesgos para la seguridad, el empresario elaborará y aplicará un plan de actuación que incluya medidas técnicas u organizativas”

Entre estas medidas destinadas a reducir el nivel de exposición a campos electromagnéticos, la Directiva propone:

- Métodos de trabajo que conlleven una exposición menor.
- Elección de equipos que generen CEM menos intensos.
- Uso de sistemas de bloqueo o blindaje, o mecanismos similares de protección.
- Medidas adecuadas de delimitación y acceso, como señales, etiquetas, marcas en el suelo o barreras para limitar o controlar el acceso.
- Programas adecuados de mantenimiento de los equipos.
- Disponibilidad de equipos adecuados de protección personal.
- Proporcionar al trabajador formación e información sobre los resultados de la evaluación, las medidas adoptadas y los posibles efectos de la exposición, entre otros datos.

MODIFICACIONES TÉCNICAS MEDIANTE PROCEDIMIENTO DE URGENCIA

Otra novedad que incorpora la Directiva 2013/35/UE es la posibilidad de introducir en su texto modificaciones en casos excepcionales, cuando sea necesario por razones de imperiosa urgencia de evitar posibles riesgos inminentes para la salud y la seguridad de los trabajadores. En este sentido, a fin de garantizar que se mantiene actualizada, la Directiva permite introducir modificaciones de carácter puramente técnico en sus anexos mediante procedimiento de urgencia de los actos delegados adoptados por la Comisión. Estas modificaciones tomarían en consideración nuevos reglamentos y directivas en el ámbito de la armonización y normalización técnicas, novedades tecnológicas, promulgación de normas o especificaciones más pertinentes y nuevos datos científicos relativos a los riesgos derivados de la exposición a CEM, con el fin de adaptar los niveles de actuación pertinentes. En particular la Directiva preveía que la Comisión adoptase un acto delegado para incluir, una vez fueran publicadas, las Directrices de la ICNIRP sobre los límites de exposición a los campos eléctricos inducidos por el movimiento del cuerpo humano en un campo magnético estático o en campos magnéticos variables de frecuencia $f < 1$ Hz. Tales Directrices han sido publicadas recientemente [7].

Para ello se otorgan poderes a la Comisión para adoptar estos actos delegados, que previa notificación al Parlamento y al Consejo, entrarán en vigor inmediatamente y serán aplicables en tanto no se formule ninguna objeción. Dicha notificación expondrá los motivos de salud y de protección de los trabajadores por los cuales se aplica el procedimiento de urgencia.

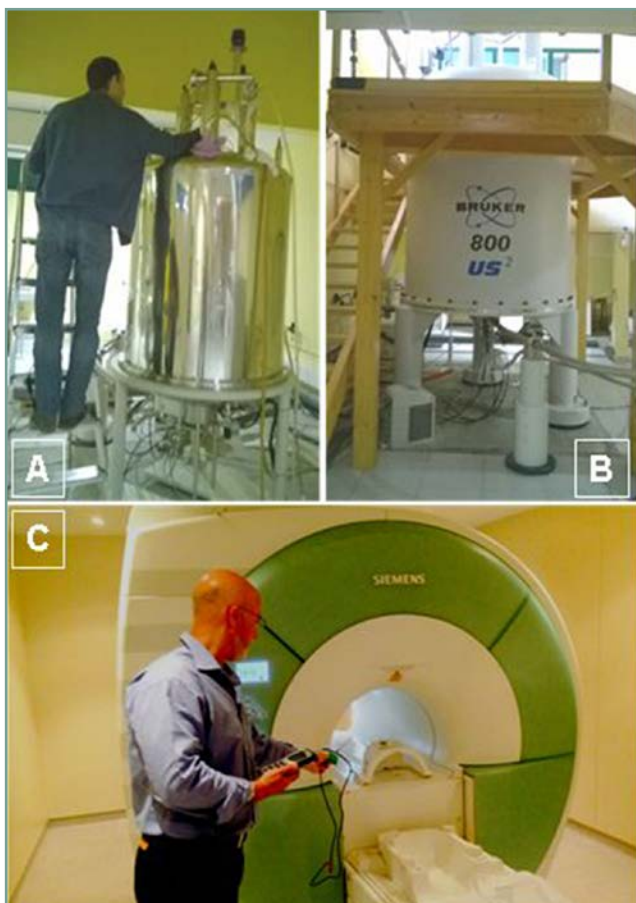


Figura 3. Los equipos de resonancia magnética para investigación y diagnóstico por imagen se encuentran entre los que generan campos DC de mayor densidad de flujo. A: Brüker 600 MHz (14,1 T en el núcleo) para análisis químico por resonancia magnética. Durante el proceso de colocación de muestras (parte superior del equipo) el operario se ve expuesto a campos DC de hasta 17 mT. B: Brüker Ultrashield 800 (ultra-apatallado; 18 T en el núcleo) para análisis químico por resonancia magnética. Durante el proceso de cambio de sonda (parte inferior del equipo) se registran campos DC de 260 mT a nivel de las extremidades y la cabeza del operario. C: Equipo Siemens de 1,5 T para diagnóstico por imagen; 0,5 – 1,1 T en cabeza y tronco del sanitario durante la colocación del paciente. La Directiva vigente establece una exención de cumplimiento para las personas que operan estos equipos.



ELABORACIÓN DE GUÍAS PRÁCTICAS

La Directiva, con el fin de facilitar la aplicación de los nuevos criterios, asigna a la Comisión la función de elaborar guías prácticas no vinculantes. Entre las guías propuestas cabe citar las referentes a:

- La determinación de la exposición, teniendo en cuenta normas europeas e internacionales pertinentes, en materia de métodos de cálculo, de obtención del promedio espacial y de directrices para el tratamiento de las incertidumbres en las mediciones y los cálculos.
- Descripción de los métodos de ponderación de picos y de la suma de campos de múltiples frecuencias, para los campos de baja frecuencia y altas frecuencias, respectivamente.
- Directrices para la demostración del cumplimiento de los límites sobre la base de una dosimetría bien establecida, en tipos especiales de exposición no uniforme en situaciones específicas.
- Realización de evaluaciones de riesgos mediante metodologías simplificadas que tengan en cuenta las necesidades específicas de las PYME.
- Evaluaciones de las exposiciones en el intervalo de frecuencias comprendido entre 100 kHz y 10 MHz cuando haya que tomar en consideración tanto los efectos térmicos como los no térmicos.
- Directrices sobre los exámenes médicos y la vigilancia de la salud.

CONCLUSIONES

La actual Directiva D 2013/35/UE establece nuevos niveles de seguridad para exposición ocupacional a CEM, que son notablemente más permisivos que los propuestos en la Directiva de 2004, ahora derogada. Este cambio da respuesta a las aspiraciones de determinados sectores médicos e industriales, preocupados por las limitaciones que el cumplimiento de la Directiva anterior podía suponer para el desarrollo de sus actividades. Los nuevos niveles y criterios de seguridad, dice el texto de la nueva Directiva, permiten además garantizar la salud de los trabajadores, preservándolos de efectos nocivos inmediatos, directos o indirectos, derivados de una potencial sobreexposición. Al igual que su predecesora, la nueva Directiva no contempla la protección ante potenciales efectos a largo plazo por exposición ocupacional crónica a campos subumbral.

La actual normativa incorpora además nuevos parámetros en los límites de exposición, como los valores límite relacionados con efectos para la salud y valores límite relacionados con efectos sensoriales; así como dos categorías,

superior e inferior, de niveles de actuación. La Directiva también contempla nuevos escenarios de exposición, como la posibilidad de admitir que en determinadas condiciones puedan superarse los niveles de actuación y/o los valores límite relacionados con efectos sensoriales. La Directiva exige de la observancia de los límites en instalaciones militares o en actividades médicas o investigadoras que requieren el manejo de equipos de imagen por resonancia magnética.

Asimismo, con el fin de agilizar la actualización y adecuación de los criterios ante la aparición de nuevos datos sobre posibles riesgos inminentes para la seguridad y salud, se contempla la posibilidad de introducir modificaciones puramente técnicas por la vía de procedimiento de urgencia mediante actos delegados de la Comisión.

Por último, con objeto de facilitar la aplicación de los nuevos criterios, en particular en puntos complejos como la determinación de valores promedio de exposición, la ponderación de los picos o el cálculo mediante dosimetría, entre otros, se asigna a la Comisión la tarea de elaborar guías técnicas no vinculantes que constituyan herramientas útiles en la homogeneización y optimización de los datos metroológicos y dosimétricos para la valoración de las exposiciones ocupacionales.

REFERENCIAS

- [1] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Heath Physics* 74: 494-522; 1998.
- [2] ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Heath Physics* 96 (4): 504-514; 2009.
- [3] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1-100 kHz). *Heath Physics* 99(6): 818-836; 2010.
- [4] Directive 2004/40/EC of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). *Official Journal of the European Union* L 159 of 30 April 2004
- [5] Directive 2013/35/EU of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). *Official Journal of the European Union* L 179 of 29 June 2013
- [6] Trillo M.A. y Úbeda A. IARC incluye las radiaciones de radiofrecuencias en la categoría de "Posibles Agentes Cancerígenos" *Radioprotección*, 69: 67-69 (2011)
- [7] ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Electric Fields Induced by Movement of the Human Body in a Static Magnetic Field and by Time-Varying Magnetic Fields below 1 Hz. *Heath Physics* 106 (3): 418-425; 2014.