

15 RESUMEN Y RECOMENDACIONES PARA MAYORES ESTUDIOS

15.1 Resumen

15.1.1 Fuentes naturales y artificiales

Los campos electrostáticos ocurren naturalmente en la atmósfera. Valores de hasta 3 kV m^{-1} pueden ocurrir bajo nubes de tormentas, de otro lado en condiciones de clima agradable están en el rango de $1\text{-}100 \text{ V m}^{-1}$. Por otro lado, la causa más común de la exposición humana es la separación de carga como resultado de la fricción. Por ejemplo, caminando sobre alfombras no conductoras, potenciales de carga de varios kilovoltios pueden ser acumulados, generando campos locales de hasta 500 kV m^{-1} . La transmisión de la energía de corriente directa (DC) puede producir campos electrostáticos de hasta 20 kV m^{-1} , sistemas de ferrocarril utilizando DC pueden generar campos de hasta 300 V m^{-1} dentro del tren, y las unidades de monitoreo visual (VDU) crean campos eléctricos de alrededor de $10\text{-}20 \text{ kV m}^{-1}$ a una distancia de 30 cm.

El campo geomagnético varía sobre la superficie de la Tierra entre $35\text{-}70 \text{ }\mu\text{T}$ y está implicado en la orientación y el comportamiento migratorio de ciertas especies de animales. Los campos magnetostáticos artificiales son generados donde quiera que las corrientes de DC sean utilizadas, tales como en algunos sistemas de transportes energizados por la electricidad, procesos industriales tales como producción de aluminio y en la soldadura a gas. Densidades de flujo magnético de hasta 2 mT han sido reportadas dentro de los trenes eléctricos y en los sistemas de levitación magnética (MagLev) en desarrollo. Los trabajadores están expuestos a grandes campos en la reducción electrolítica del aluminio de hasta alrededor de 60 mT , y en la soldadura con arcos eléctricos se producen alrededor de 5 mT a 1 cm de los cables eléctricos.

El advenimiento de los superconductores en los 1970 y 80 facilitó el uso de campos magnéticos mucho más grandes en el diagnóstico médico a través del desarrollo de la imagenología (MRI) y espectroscopia (MRS)¹ por resonancia magnética y la resonancia magnética nuclear (NMR) para investigación. Se estima que alrededor de 200 millones de escaneos de MRI han sido realizadas en todo el mundo. El campo magnetostático de los escaners de MRI es generado por los magnetos permanentes, los magnetos superconductivos y las combinaciones de ellos en el rango de $0.2\text{-}3 \text{ T}$ para los sistemas de uso clínico rutinario. En las aplicaciones para investigación campos magnéticos más grandes de hasta

¹ Este documento se refiere totalmente a MRI; exposiciones experimentadas

9.4 T son utilizados en el escaneo de todo del cuerpo del paciente. Los campos magnéticos dispersos alrededor de los magnetos para los estudios de MRI están bien definidos y pueden ser minimizados en las versiones con protectores de magneto. Con respecto a la exposición, en la consola del operador la densidad del flujo magnético es típicamente 0.5 mT, pero podría ser superior. Sin embargo, exposición ocupacional hasta y más de 1 T puede ocurrir durante la construcción y pruebas de estos dispositivos y durante los procedimientos médicos realizados para MRI intervencional. Varias investigaciones en física y tecnologías de alta energía también emplean superconductores donde los trabajadores pueden ser expuestos regularmente y por más largos periodos a campos tan altos como 1.5 T.

15.1.2 Mecanismos de Interacción

Las siguientes tres clases de interacciones físicas de los campos magnetostáticos con los sistemas biológicos han sido bien establecidas sobre la base de datos experimentales:

(1) Interacciones electrodinámicas con corrientes de conducción iónica. Las corrientes iónicas interactúan con los campos magnetostáticos como resultado de las fuerzas de Lorentz ejercidas sobre los portadores de carga en movimiento. Estos efectos conducen a la inducción de los potenciales (de flujo) eléctricos y las corrientes. Los potenciales de flujo son asociados generalmente con la contracción ventricular y la eyección de sangre en la aorta en animales y seres humanos. La interacción de Lorentz resulta también en una fuerza magnetohidrodinámica en oposición al flujo de la sangre. La reducción del flujo de sangre aórtica ha sido predicha llegar alrededor del 10% para 15 T.

(2) Efectos magnetomecánicos, incluyen la orientación de las estructuras magnéticamente anisotrópicas en campos uniformes y en la translación de los materiales paramagnéticos y ferromagnéticos en las gradientes del campo magnético. Las fuerzas y torques sobre objetos endógenos y exógenos metálicos representan el mecanismo de interacción de mayor preocupación.

(3) Efectos sobre los estados del spin electrónico de las reacciones intermedias. La química del par radical correlacionado con el spin ha sido por mucho tiempo una consideración para los efectos de campo magnético en química y biología. Varias clases de reacciones químicas orgánicas pueden ser influenciadas por campos magnetostáticos en el rango de 10 a 100 mT como resultado de los efectos sobre los estados del spin electrónico de las reacciones intermedias. El par radical correlacionado con el spin podría recombinarse y evitar la formación del producto de reacción si se cumplen dos condiciones: (a) El par, formado

en un triple estado, tiene que ser convertido en un único estado por algún mecanismo y (b) los radicales tienen que reunirse físicamente otra vez para recombinarse. El paso (a) puede ser sensible al campo magnético. Se ha realizado bastante investigación sobre el uso de los efectos del campo magnético del par radical como una herramienta para estudiar las reacciones de las enzimas. Sin embargo, no parece existir la posibilidad de efectos de consecuencia fisiológica sobre las funciones celulares o efectos mutagénicos de largo plazo provenientes de los cambios inducidos por el campo magnético en las concentraciones o flujos de radicales libres.

Dosimetría

Para comprender los efectos biológicos de los campos eléctricos y magnéticos es importante considerar los campos que directamente influyen sobre las células en diferentes partes del cuerpo y los tejidos. Una dosis puede ser definida como una función apropiada de los campos eléctricos y magnéticos en el punto de interacción. El establecimiento de la relación entre los campos externos no perturbados y los campos internos es el objetivo principal de la dosimetría. Los estudios computacionales que usan modelos de seres humanos y animales a basados en voxels, así como los estudios experimentales de exposición son aspectos importantes de la dosimetría.

Las interacciones del tejido con los campos magnetostáticos probablemente están relacionadas con las propiedades físicas del campo que incluyen: el vector del campo magnético, la gradiente del campo magnético, y/o el producto de aquellas magnitudes con frecuencia llamado el “producto fuerza”. Algunas de las grandes interacciones son caracterizadas por el movimiento a través de las magnitudes del campo tales como el movimiento del cuerpo o el flujo de sangre.

Los parámetros dosimétricos apropiados dependen del mecanismo físico para el efecto motivo de la preocupación de seguridad. Claramente, los objetos ferromagnéticos tienen que ser restringidos de la vecindad del magneto. La búsqueda de tales objetos y de implantes que pueden moverse debido a las fuerzas o torques es imperativo. Las mediciones del vector de inducción magnética pico, y el producto pico de la fuerza magnética son apropiados. Mapas del campo pueden ser utilizadas para estimar estos en varias ubicaciones cercanas de los magnetos donde los trabajadores podrían estar expuestos, pero la dosimetría personal podría ser más útil.

El movimiento de todo o parte del cuerpo, por ej. los ojos y la cabeza, en la gradiente del campo magnetostático también inducirá un campo eléctrico y corriente durante el periodo de movimiento. El cálculo dosimétrico sugiere que tales campos eléctricos inducidos estarán substancialmente durante movimiento normal alrededor o dentro de

campos > 2-3 T, y podría tomarse en cuenta para los numerosos reportes anecdóticos de vértigo y ocasionalmente los fosfenos magnéticos experimentados por pacientes, voluntarios y trabajadores durante el movimiento en el campo.

Existen muchas fuentes de exposición. Una de las más prolíficas exposiciones es aquella concerniente al equipo para imaginología por resonancia magnética (MRI). En la década pasada, ha existido un esfuerzo coordinado para permitir que el MRI opere en intensidades muy altas del campo. El sistema más común en uso clínico actual tiene un campo central de 1.5 T, sin embargo sistemas de 3.0 T ahora son aceptados para trabajo clínico rutinario y para el 2004 más de 100 sistemas estarán operando en todo el mundo. Sistemas para investigación de 4-9.4 T están siendo desarrollados ahora para imaginología clínica. Conforme la intensidad del campo del sistema de MRI se incrementa así pasa con el potencial para las interacciones tejido/campo de una variedad de tipos. Comprender las interacciones entre los campos electromagnéticos generados por los sistemas de MRI y el cuerpo humano ha llegado a ser más significativo con este empuje hacia altas intensidades de campo.

15.1.3 Estudios *in vitro*

Los resultados de los estudios *in vitro* son útiles para dilucidar los mecanismos de interacción, y para indicar los tipos de efectos que podrían ser investigados *in vivo*, pero no son suficientes para identificar los efectos a la salud sin evidencia corroborativa de los estudios *in vivo*.

Un número de diferentes efectos biológicos de los campos magnetostáticos han sido explorados *in vitro*. Los diferentes niveles de organización fueron investigados: sistemas de células libres, empleando membranas aisladas, enzimas o reacciones bioquímicas, y varios modelos de células, utilizando bacterias y células de mamíferos. Los criterios de valoración estudiados fueron la orientación celular, la actividad metabólica celular, fisiología de la membrana celular, la expresión del gen, el crecimiento celular y la genotoxicidad.

Para todos estos criterios de valoración, descubrimientos positivos y negativos han sido reportados. Sin embargo, la mayoría de datos no fueron replicados. Los efectos observados son muy diversos y fueron encontrados después de la exposición a un amplio rango de densidades de flujo magnético. Existe la evidencia que los campos magnetostáticos pueden afectar varios criterios de valoración en intensidades más bajas de 1 T, en el rango de los mT. Umbrales para algunos de los efectos fueron reportados, pero otros estudios indicaron una respuesta no lineal sin claros valores de umbral.

Los efectos de los campos magnetostáticos sobre la orientación de la célula han sido consistentemente encontrados por encima de 1 T, pero su relevancia in vivo es cuestionable. Pocos estudios sugieren que los efectos combinados del campo magnetostático con otros agentes tales como los químicos genotóxicos parecerían producir efectos sinérgicos tanto protectores como estimulantes. La presente información es inadecuada y necesita ser confirmada antes de que puedan sacarse conclusiones firmes sobre la salud humana.

Además, de la posible dependencia complicada respecto de los parámetros físicos tales como intensidad, duración, recurrencia y gradientes de exposición, las variables biológicas parecen ser importantes para los efectos de los campos magnetostáticos. Las variables tales como el tipo de célula, la activación de la célula, y otras condiciones fisiológicas durante la exposición mostraron afectar el resultado de los experimentos. Los mecanismos para estos efectos no son conocidos, pero efectos sobre los radicales y los iones podrían estar involucrados. Estudios in vitro proporcionan alguna evidencia para esto.

Los muy pocos estudios que emplean señales de MRI u otros campos combinados no muestran ningún efecto biológico diferente de aquellos causados por los campos magnetostáticos solos, si los hubiera.

En general, los experimentos in vitro no presentan un cuadro claro de los efectos específicos de los campos magnetostáticos, y a causa de ello tampoco no indican posibles efectos adversos a la salud.

15.1.4 Estudios en animales

Pocos estudios en animales han sido realizados sobre los efectos de los campos electrostáticos a la salud; ninguna evidencia de efectos adversos a la salud ha sido notada diferente de aquellos asociados con la percepción de la carga eléctrica superficial.

Un gran número de estudios en animales sobre los efectos de los campos magnetostáticos han sido realizados. Muchos de ellos considerados relevantes para la salud humana han examinado los efectos de los campos considerablemente más grandes que el campo geomagnético natural. Un número de estudios han sido realizados de los campos en la región de los militeslas, comparable a exposiciones industriales relativamente altas. Más recientemente con el advenimiento de la tecnología de magneto superconductor y la MRI, los estudios del comportamiento, los efectos fisiológicos y reproductivos han sido realizados en densidades de flujo alrededor o excediendo 1 T. Pocos estudios sin embargo, han examinado los posibles efectos de la exposición crónica, particularmente en relación a la carcinogénesis.

Las respuestas más consistentes encontradas en los estudios neurológicos del comportamiento sugirieron que el movimiento de los roedores de laboratorio en campos magnetostáticos iguales o mayores que 4 T podrían ser torpes, induciendo respuestas de aversión y evitamiento condicionado. Se piensa que tales efectos son consistentes con los efectos magnetohidrodinámicos sobre la endolinfa del aparato vestibular. Por otro lado, los datos son variables.

Existe alguna evidencia que varias especies vertebradas e invertebradas pueden utilizar los campos magnetostáticos, en niveles tan bajos como las intensidades del campo geomagnético, para orientación, sin embargo, no se piensa que estas respuestas tengan algún significado para la salud.

Existe buena evidencia de que la exposición a campos mayores que 1T (0.1 T en grandes animales) inducirán potenciales de flujo alrededor del corazón y principales vasos sanguíneos, pero las consecuencias fisiológicas de esto permanecen sin aclararse. Varias horas de exposición a densidades de flujo muy altas de hasta 8 T en la región del corazón no resultaron en ningún efecto cardiovascular en cerdos. En conejos, exposición de corto y largo plazo a campos en el rango desde los niveles geomagnéticos hasta los militeslas se reportaron que afectan el sistema cardiovascular, aunque la evidencia no es fuerte.

Los resultados de un grupo sugieren que los campos magnetostáticos de intensidades de mT podrían suprimir la elevación temprana de la presión de sangre a través del sistema regulatorio hormonal. El mismo grupo ha reportado que campos magnetostáticos de baja intensidad de hasta 0.2 T podrían inducir efectos locales sobre el flujo de sangre que podría conducir a la mejora de la microcirculación. Además, otro grupo reportó que densidades altas de flujo del campo magnetostático de hasta 10 T podrían llevar a reducir el flujo de sangre de la piel y la temperatura. En todos estos casos, sin embargo, los criterios de valoración son muy débiles, una situación que podría haber sido complicada por la manipulación farmacológica, incluyendo la anestesia en algunos casos, y la inmovilización. En general, es difícil alcanzar alguna conclusión firme sin alguna replicación independiente.

Existen varios estudios que describen los posibles efectos de exposición al campo magnético sobre las células de sangre y el sistema hematopoyético. Sin embargo, los resultados son equívocos, limitando las conclusiones que se pueden obtener. La evidencia disponible respecto de los efectos de la exposición al campo magnetostático sobre los constituyentes enzimáticos e iónicos del suero que viene primeramente de un laboratorio. Estos hallazgos necesitan ser confirmados por laboratorios independientes antes de sacar conclusiones.

Respecto a los efectos sobre el sistema endocrino, varios estudios provenientes de un laboratorio sugieren que la exposición al campo magnetostático puede afectar la síntesis pineal y el contenido de melatonina. Sin embargo, algunos estudios realizados en otros laboratorios no han podido demostrar ningún efecto. El hallazgo de un efecto supresivo sobre la producción de melatonina de la exposición al campo magnetostático necesita ser confirmada con mayor investigación antes de que puedan obtenerse conclusiones firmes. En general, pocos estudios han investigado los efectos del campo magnetostático sobre los sistemas endocrinos diferentes del pineal; ningún o efecto consistente emerge.

La reproducción y el desarrollo son temas muy importantes en la exposición proveniente de la MRI de los pacientes y del personal clínico. Al respecto solamente pocos buenos estudios de los campos magnetostáticos están disponibles para valores del campo por encima de 1 T. Los estudios de MRI per se no son informativos porque el efecto del campo estático no puede ser distinguida de los posibles efectos de los campos de radiofrecuencia y gradientes de pulsos en general. Para evaluar el riesgo a la salud se necesita urgentemente una mayor revisión.

En general, con respecto a la genotoxicidad y el cáncer, se han realizados tan pocos estudios que no es posible obtener ninguna conclusión firme.

15.1.5 Estudios de laboratorio en seres humanos

Los campos electrostáticos no penetran los objetos eléctricamente conductivos tales como el cuerpo humano; el campo induce una carga eléctrica superficial y siempre es perpendicular a la superficie del cuerpo. Una densidad de carga superficial suficientemente grande podría ser percibida a través de su interacción con el pelo del cuerpo y por otros efectos tales como descargas tipo chispas (microshocks). La percepción del umbral en las personas depende de varios factores y puede estar en el rango entre 10-45 kV m⁻¹. Los umbrales de sensaciones molestas son probablemente igualmente variables, pero no han sido sistemáticamente estudiados. Microshocks dolorosos se pueden esperar cuando una persona bien aislado de tierra toca un objeto puesto a tierra o cuando una persona conectada a tierra toca un objeto conductivo que esta bien aislado de la tierra; sin embargo, los valores del umbral del campo eléctrico estático variarán dependiendo del grado de aislamiento y otro factores.

En estudios experimentales con seres humanos los criterios de valoración investigados han sido la función nervioso periférica, la actividad del cerebro, la función neuroconductual y cognitiva, la percepción sensorial, la función cardiaca, la presión sanguínea, el ritmo

del corazón, los niveles de las proteínas del suero y hormonas, la temperatura del cuerpo y la piel, y efectos terapéuticos. Niveles de exposición de hasta 8 T han sido investigados, y los campos estáticos puros y de imagenología MRI han sido estudiados. La duración de la exposición esta en el rango de pocos segundos hasta nueve horas, pero usualmente fue menos de una hora. Los datos disponibles son limitados por varias razones; generalmente muestras convenientes de pacientes o voluntarios saludables han sido estudiadas, y el número de los sujetos ha sido usualmente pequeño.

Los resultados no indican que exista efectos de la exposición a los campos magnetostáticos sobre las respuestas neurofisiológicas y funciones cognitivas en voluntarios estacionarios; pero tampoco se pueden descartar tales efectos. Una inducción dependiente de la dosis de vértigo y náuseas se encontró en los trabajadores, pacientes u voluntarios durante el movimiento dentro campos estáticos mayores que 2 T. Un estudio sugiere que la coordinación de ojo-mano y la sensibilidad del contraste visual cercano se reducen para campos adyacentes a una unidad MRI de 1.5 T. La ocurrencia de estos efectos es probable que sea dependiente del gradiente del campo y el movimiento del sujeto. Un pequeño cambio en la presión sanguínea y el ritmo del corazón se observó en algunos estudios, pero estuvieron en el rango de variabilidad fisiológica normal. No existe evidencia de efectos de los campos magnetostáticos sobre otros aspectos de la fisiología cardiovascular, o sobre las proteínas del suero y hormonas. La exposición a los campos magnetostáticos de hasta 8 T no parece inducir cambios de temperatura en los seres humanos.

Note sin embargo, que muchos de los estudios fueron muy pequeños, estuvieron basados en muestras de conveniencia, y con frecuencia incluyeron grupos no comparables. Además, no es posible obtener algunas conclusiones con respecto a la amplia variedad de criterios de valoración examinados en este reporte.

15.1.6 Estudios epidemiológicos

Los estudios epidemiológicos han sido realizados casi exclusivamente en trabajadores expuestos a campos magnetostáticos generados por equipamiento que utilizo grandes corrientes DC. Muchos trabajadores estuvieron expuestos a campos magnetostáticos moderados de hasta varias decenas de mT como soldadores, fundidores de aluminio, o trabajadores en varias plantas industriales que utilizaron grandes celdas electrolíticas en procesos de separación química. Sin embargo, tal trabajo también es probable que haya involucrado la exposición a una variedad de gases y aerosoles potencialmente peligrosos; confundiendo la

interpretación. Los criterios de valoración de la salud en estos trabajadores incluyen el cáncer, cambios hematológicos y resultados relacionados, la frecuencia de aberración de los cromosomas, resultados reproductivos, y desórdenes muscoesqueléticos. Además, unos pocos estudios examinaron la fertilidad y el resultado de los embarazos de operadoras de MRI, donde el potencial de haber sido expuesto a campos estáticos relativamente grandes de hasta ~ 1T podría haber existido. Dos estudios examinaron los resultados del embarazo en voluntarias saludables expuestas a exámenes de MRI durante el embarazo.

El incremento de los riesgos de varios cánceres fueron reportados por ej. cáncer al pulmón, cáncer pancreático y malignidades hematológicas, pero los resultados no fueron consistentes a través de los estudios. Los pocos estudios epidemiológicos publicados hasta la fecha dejan un número de temas sin resolver concerniente a la posibilidad del incremento del riesgo de cáncer provenientes de la exposición a los campos magnetostáticos. La evaluación de la exposición ha sido pobre, y el número de participantes en algunos de los estudios ha sido muy pequeño, por lo que estos estudios son capaces de detectar solo riesgos muy grandes para estas raras enfermedades. La incapacidad de estos estudios para proporcionar informaciones útiles es apoyada por la falta de una evidencia clara para otros, factores carcinogénicos más establecidos presentes en algunos de los ambientes de trabajo. Otros efectos a la salud que no sean cáncer han sido considerados aún más esporádicamente. Muchos de estos estudios se basan en números muy pequeños y tienen numerosas limitaciones metodológicas. Otros ambientes con un potencial para campos altos no han sido adecuadamente evaluados, ej. Los operadores MRI. En el presente existen datos inadecuados para una evaluación de la salud.

15.1.7 Evaluación del riesgo a la salud

Campos electrostáticos

No existen estudios sobre exposición a campos electrostáticos de los cuales se obtengan alguna conclusión sobre los efectos crónicos o retardados. La IARC (IARC 2002) notó que existía una evidencia insuficiente para determinar la carcinogenicidad de campos electrostáticos.

Pocos estudios de los efectos agudos del campo eléctrico estático han sido realizados. En general, los resultados sugieren que el único efecto agudo adverso a la salud esta asociado con la percepción directa de los campos y las molestias de los microshocks.

Campos magnetostáticos

Con respecto a los efectos crónicos y retardados, la evidencia disponible de los estudios epidemiológicos y de laboratorio no es suficiente para obtener algunas conclusiones. La IARC (IARC, 2002) concluyó que existía inadecuada evidencia en seres humanos para la carcinogenicidad de los campos magnetostáticos y ningún dato relevante disponible proveniente de experimentos en animales. Por consiguiente, en el presente, no son clasificables como carcinogénicos para los seres humanos.

La exposición de corto plazo a los campos magnetostáticos en el rango de los teslas y a las gradientes de campo indican un número de efectos agudos.

Las respuestas cardiovasculares, tales como los cambios en la presión de sanguínea y el ritmo cardíaco, han sido ocasionalmente observados en voluntarios humanos y estudios en animales. Sin embargo, estos estuvieron dentro del rango fisiológico normal para exposición a campos magnetostáticos de hasta 8 T.

Aunque no verificada experimentalmente, es importante notar que los cálculos sugieren tres posibles efectos de los potenciales de flujo inducidos: cambios menores en el ritmo de latidos del corazón (que podrían ser considerados sin consecuencias a la salud), la inducción de latidos ectópicos del corazón (que podrían ser fisiológicamente más significativos), y un incremento de la probabilidad de arritmia reentrante (posiblemente conduciendo a la fibrilación ventricular). Se piensa que los primeros dos efectos tienen umbrales por encima de 8 T, y los valores de umbral para el tercero son difíciles de evaluar en el presente por causa de la complejidad del modelamiento. Algo de 5-10 por 10,000 personas son particularmente susceptibles a la arritmia reentrante, y el riesgo para tales personas podría ser incrementado por exposición al campo magnetostático y la gradiente de los campos.

Las limitaciones de los datos disponibles son tales, que sin embargo, tomados en forma integral no es posible sacar conclusiones firmes acerca de los efectos de los campos magnetostáticos sobre los criterios de valoración considerados anteriormente.

El movimiento físico dentro de una gradiente de campo estático se reporto que induce sensaciones de vértigo y náuseas, y algunas veces fosfenos y un sabor metálico en la boca para los campos estáticos en exceso de alrededor de 2-4 T. Aunque solamente transitorios, tales efectos podrían afectar adversamente a las personas. Junto con los posibles efectos sobre la coordinación ojo-mano, la ejecución óptima por parte de

los trabajadores de procedimientos delicados (ej. cirujanos) podría verse reducida con un impacto concomitante sobre la seguridad.

Efectos sobre otras respuestas fisiológicas han sido reportados, pero es difícil llegar a alguna conclusión firme sin una replicación independiente.

15.1.8 Recomendaciones para las autoridades nacionales

Se recomienda a las autoridades nacionales implementar programas que protejan al público y los trabajadores de algunos efectos desfavorables de los campos estáticos. Sin embargo, dado que el principal efecto de campos electrostáticos es la incomodidad proveniente de la descarga eléctrica sobre los tejidos del cuerpo, el programa de protección podría ser simplemente la provisión de información sobre situaciones que podrían llevar a exposición a grandes campos eléctricos y el como evitarlos. Se necesita un programa para campos magnetostáticos, para proteger contra los efectos agudos establecidos. A causa de la insuficiente información actualmente disponible sobre los posibles efectos de largo plazo o retardados de la exposición, medidas precautorias costo/efectivas, como las que están siendo desarrolladas por la OMS (www.who.int/emf) podrían necesitarse para controlar las exposiciones de los trabajadores y el público.

Las autoridades nacionales deberían adoptar estándares basados en ciencia sólida que limiten la exposición de las personas a campos magnetostáticos. La implementación de los estándares basados en la salud proporciona la medida precautoria primaria para los trabajadores y el público. Estándares internacionales existen para los campos magnetostáticos (ICNIRP, 1994) y son descritos en el Apéndice 1. Sin embargo, la OMS recomienda que estos deban revisarse a la luz de la evidencia más reciente proveniente de la literatura científica.

Las autoridades nacionales deberían establecer o complementar los programas existentes que proporcionan protección contra los posibles efectos de exposición a campos magnetostáticos. Las medidas protectoras para el uso industrial y científico de campos magnéticos puedan ser categorizadas como controles de diseño de ingeniería, el uso de una distancia de separación, y los controles administrativos. Las medidas protectoras contra los peligros secundarios provenientes de la interferencia magnética con equipamiento electrónico de emergencia o médico y con implantes quirúrgicos y dentales son un área especial de preocupación con respecto a los posibles efectos adversos a la salud de los campos magnetostáticos. Las fuerzas mecánicas impartidas a los implantes ferromagnéticos y los objetos flojos en instalaciones con campos altos requieren que se tomen precauciones.

Las autoridades nacionales deberían considerar el uso bajo licencia de las unidades de MRI para asegurar que las medidas precautorias sean implementadas. Esto también permitiría requerimientos adicionales a cumplir por las unidades de MRI con intensidades en exceso de los estándares locales nacionales ó 2T. Tales requerimientos se relacionan al suministro de información de los pacientes, trabajadores y de cualquier incidente o lesión resultante de los campos magnéticos fuertes.

Las autoridades nacionales deberían proveer financiamiento para la investigación a fin de llenar los grandes vacíos en el conocimiento que conciernen a la seguridad de las personas expuestas a campos magnetostáticos. Recomendaciones para mayor investigación forman parte de este documento (ver a continuación) y son colocados la página web de la OMS: www.who.int/emf. Los investigadores deberían ser financiados para realizar los estudios recomendados en esta agenda de investigación de la OMS.

Las autoridades nacionales deberían financiar unidades MRI para recolectar información sobre la exposición del trabajador a campos magnetostáticos y la exposición del paciente a MRI y hacerlo disponible para estudios epidemiológicos futuros. Ellos también deberían financiar bases de datos que recolecten información sobre exposiciones a los trabajadores donde exposiciones altas de largo plazo ocurran, tales como aquellas involucradas en la fabricación de MRI o similarmente de magnetos de alta intensidad y nuevas tecnologías tales como los trenes MagLev.

15.2 Recomendaciones para mayor estudio

Identificar los vacíos en nuestro conocimiento de los posibles efectos a la salud de la exposición al campo estático es una parte esencial de esta evaluación de riesgo a la salud y las siguientes recomendaciones se realizan para mayor investigación.

15.2.1 Campos electrostáticos

Parece haber poco de beneficio de continuar la investigación relacionada con los efectos a la salud concernientes a los campos electrostáticos. Ninguno de los estudios conducidos hasta la fecha sugieren algún efecto adverso a la salud, excepto al posible estrés resultante de la prolongada exposición a los microshocks. Por consiguiente no existen recomendaciones de mayor investigación concerniente a los efectos biológicos de exposición a campos electrostáticos. Además, solamente existe oportunidad limitada para exposición significativa a estos campos en el lugar de trabajo o el

ambiente en el que vivimos y por consiguiente no garantiza ningún estudio epidemiológico.

15.2.2 Campos magnetostáticos

En términos generales, la investigación realizada hasta la fecha no ha sido sistemática y ha sido con frecuencia realizada sin una metodología apropiada e información de la exposición. Programas de investigación coordinados son recomendados como una ayuda a un enfoque más sistemático. Existe también la necesidad de investigar la importancia de los parámetros físicos como la intensidad, duración y la gradiente del resultado biológico.

Siguiendo una discusión de las limitaciones de los estudios existentes, se recomienda una mayor investigación que cubra epidemiología, estudios voluntarios, biología animal e in vitro, y estudios de los mecanismos de interacción, e investigaciones teóricas y computacionales. Estas recomendaciones están resumidas en la Tabla 1

15.2.2.1 Estudios teóricos y computacionales

La dosimetría computacional proporciona un vínculo entre un campo magnético externo y los campos eléctricos internos y las corrientes inducidas causadas por el movimiento de los tejidos vivos en el campo. Tales técnicas teóricas permiten que los campos sean caracterizados en tejidos y órganos específicos. Para buenas resoluciones, anatómicamente realistas, fantasmas basados en voxels de adultos varones están disponibles, y han sido ampliamente utilizados en estudios con campos electromagnéticos variables en el tiempo. Sin embargo, se ha realizado muy poco trabajo con los campos estáticos, y se considera necesario un mayor trabajo utilizando estos modelos. En particular, el uso de fantasmas de diferentes tamaños, y el uso de fantasmas femeninos se considera importante, como es el uso de fantasmas embarazadas con fetos de diferentes edades. Podrían ser presentados estudios similares con fantasmas de animales preñadas para ayudar a la interpretación de los resultados de los estudios en desarrollo con estos modelos (**prioridad media**).

Debería desarrollarse un fantoma de cabeza y hombros de muy buena resolución y utilizarlo para investigar los campos eléctricos y las corrientes asociadas con los fosfenos visuales y vértigo. Este modelo podría también ser utilizado para investigar los campos y corrientes generadas por los movimientos de la cabeza y el ojo en un campo magnetostático. Lo último es considerado de particular relevancia a los procedimientos de MRI intervencional donde los movimientos reducidos de la cabeza de los cirujanos y otro personal clínico podrían necesitar un

movimiento incrementado de los ojos. El movimiento brusco del cuerpo del personal alrededor del sistema intervencional tiene que ser también simulado (**alta prioridad**).

Los cálculos que utilizan un modelo detallado del corazón y el modelamiento de las patologías cardíacas comunes son considerados importantes. Este modelo debería incluir la microarquitectura del corazón así como de los vasos sanguíneos más pequeños dentro del corazón que podrían producir campos y corrientes con alguna influencia sobre la generación del ritmo del marca pasos y la propagación de depolarización. Además, son necesarios cálculos para estimar la magnitud y la distribución espacial de las corrientes que son inducidas en el corazón como consecuencia del campo y la exposición a la gradiente del campo. Múltiples orientaciones del campo deberían ser estudiados. Esto permitiría la comparación con las corrientes que han sido calculadas para inducir los efectos cardíacos. Se recomienda estudios experimentales y de laboratorio que soporten estos cálculos (**alta prioridad**).

Aunque haya una resistencia al uso de MRI de campo alto sobre mujeres embarazadas en la actualidad, se reconoce que esta situación podría cambiar. Por consiguiente, sería recomendable realizar los estudios de modelamiento investigando las corrientes inducidas en un feto por el movimiento maternal o intrínseco fetal en un campo alto. Estos cálculos (y estudios similares con gradiente y campos de radiofrecuencia) permitirían realizar una estimación de la probabilidad de los posibles efectos sobre el feto (**alta prioridad**).

15.2.2.2 Estudios *in Vitro*

Los campos magnetostáticos podrían interactuar con los sistemas biológicos en un número de formas, aunque el más probable medio para causar efectos a la salud es a través de los efectos de campo inducido sobre moléculas cargadas y alteraciones en la tasa de las reacciones bioquímicas.

Se necesitan mayores estudios sobre los posibles mecanismos y los órganos blanco de los efectos biológicos de campos magnetostáticos. Se recomienda investigar los efectos de campos magnetostáticos de 0.01-10 T sobre la interacción de los iones (ej. Ca^{2+} o Mg^{2+}) con formación de enzimas y pares radicales. Aunque se considera difícil hacerlo, es conveniente buscar más reacciones enzimáticas que procedan a través de los mecanismos de pares radicales en sistemas modelos que son relevantes para la salud humana. Otra sugerencia es concentrarse sobre las especies de radical tóxico, tales como el superóxido que son conocidos por ser dañinas y ser producidas por los mecanismos de radical libre (**prioridad media**).

Los reportes de un efecto comutagénico en varias células son de particular interés con respecto al potencial carcinogénico de campos magnetostáticos. Este tipo de estudios deben ser presentados utilizando células primarias de seres humanos y extendidas para incluir sistemas transformados y genéticamente modificados (**alta prioridad**).

Los campos magnetostáticos podrían afectar la expresión del gen y varias de las funciones pertinentes en células de seres humanos y de mamíferos bajo condiciones específicas de exposición, pero se tiene poca información disponible sobre esto. Estudios con técnicas tales como proteómica y genómica deberían ser realizados con las células humanas primarias para buscar posibles marcadores moleculares para los efectos de campos magnetostáticos relevantes a los temas de salud humana (**baja prioridad**).

15.2.2.3 Estudios experimentales en animales

Lo efectos de exposición de largo plazo a campos magnetostáticos pueden ser enfocados utilizando modelos de animales. En ausencia de información específica con respecto al potencial carcinogénico de los campos magnetostáticos, se recomienda estudios de largo plazo (incluyendo estudios de por vida). Animales normales y genéticamente modificados podrían ser utilizados. Por ejemplo, si una amplificación de los radicales libres fuese considerada una ruta posible por la cual el riesgo de cáncer podría ser incrementado, podría ser utilizado un modelo de ratón con supresión del gen superóxido dismutasa. En este modelo, la susceptibilidad a los tumores y otras enfermedades relacionadas a los radicales libres es muy elevada. El uso de las técnicas de microarreglos permiten que los efectos de muchos parámetros diferentes de exposición sean fácilmente evaluados y cuantificados sobre el genoma y proteoma (**alta prioridad**).

La posibilidad del aumento de riesgo de anomalías en el desarrollo y efectos teratológicos necesitan ser enfocadas de modo sistemático. El desarrollo del cerebro podría ser particularmente susceptible a los efectos de las corrientes inducidas por movimiento: los efectos de orientación son muy importantes para guiar el crecimiento normal de las dendritas neuronales. También es posible que cambios duraderos podrían ser inducidos por exposiciones relativamente cortas. El estudio de los parámetros neuroconductuales pueden proporcionar un ensayo rápido y sensible para explorar los efectos de exposición sobre el desarrollo de la función del cerebro, y se recomienda tales estudios. Los estudios para registrar los sutiles cambios morfológicos que ocurren durante el desarrollo de regiones específicas del cerebro, tales como la corteza o el hipocampo también son del valor. El uso de los modelos transgénicos apropiados debería ser considerado (**alta prioridad**).

Aunque haya datos que indiquen que la exposición de animales (y seres humanos) a los campos alrededor de 2 T no causan efectos electrofisiológicos, sería útil conocer los efectos de los campos más altos. Además los efectos de exposición de hasta y por encima de 10 T podrían ser provechosamente explorados en animales (**prioridad media**).

Una variedad de otros criterios de valoración han sido investigados en animales que proporcionan en el mejor de los casos solo información limitada. Mientras que una serie de estudios individuales para cada uno de estos criterios de valoración podría no ser costo-efectivos, un amplio estudio animal para cubrir diferentes criterios de valoración sería valioso (**baja prioridad**).

15.2.2.4 Estudios experimentales en seres humanos

Los efectos cognitivos y conductuales de los campos magnetostáticos deberían de investigarse más, aunque los datos disponibles no sugieren riesgos particulares para aspectos específicos de cognición ni sirven para sugerir que parámetros deberían ser evaluados en el laboratorio. En la ausencia de una dirección clara un enfoque posible sería investigar los efectos de exposición sobre la realización de una batería de tareas cognitivas, que incluyan evaluaciones estándares de atención, tiempo de reacción y memoria, solamente para actuar como un tamiz inicial dejando pendiente trabajo más enfocado. El trabajo inicial podría ser realizado con voluntarios como parte de los estudios experimentales (**prioridad media**).

Con una utilización más amplia de los estudios de MRI donde el personal de apoyo esta en una proximidad cercana a pacientes dentro de un magneto, tal como en los procedimientos de MRI intervencional, se necesitan estudios adicionales de la coordinación de la cabeza y la vista, función cognitiva y del comportamiento en un gradiente de campo. Se considera de especial interés una mayor investigación de los mecanismos y la intensidad de disfunción vestibular inducida por el campo incluyendo el vértigo debido al incremento de la probabilidad que el personal médico estará realizando tareas complicadas dentro de un campo magnético por largos periodos de tiempo (**alta prioridad**).

Similarmente, estudios adicionales sobre la función cardiaca serían útiles y podrían investigar los efectos sobre el sistema cardiovascular. Estos estudios podrían necesitar ser completados para niveles superiores a 3 T, para evaluar el riesgo potencial por encima del que existe en el ambiente clínico rutinario (**baja prioridad**).

15.2.2.5 Estudios epidemiológicos

Existe un número de categorías de trabajadores con exposiciones elevadas a campos magnetostáticos, por ejemplo los técnicos de MRI, los

trabajadores en las plantas de fundición de aluminio, y ciertos trabajadores de transporte (metros, trenes MagLev, trenes conmutados, y trenes urbanos). Para las enfermedades crónicas raras como el cáncer, estudios de factibilidad son necesarios para identificar los grupos ocupacionales altamente expuestos que cuya participación sería posible asegurar en los estudios epidemiológicos. Los estudios de factibilidad también necesitan determinar que otras exposiciones están presentes en estas ocupaciones. Si números suficientes de trabajadores pueden ser identificados, un enfoque de caso control anidado es probablemente el más apropiado, ya que información detallada acerca de la exposición y factores importantes de confusión tales como la radiación ionizante necesitan obtenerse. Estudios de colaboración internacionales probablemente son necesarios para obtener números suficientes de personas expuestas (**alta prioridad**).

Para otros resultados de salud más comunes con periodos cortos de latencia grupos ocupacionales altamente expuestos específicos pueden ser identificados y seguidos en el tiempo, por ejemplo los trabajadores en industrias donde los sistemas de MRI son fabricados. Información acerca de diferentes resultados de salud podrían ya estar disponibles provenientes de los exámenes de salud realizados rutinariamente a estos trabajadores, pero solamente pueden ser utilizados si información similar también esta disponible para un grupo comparable no expuesto. Una encuesta de salud de cirujanos, enfermeras, y otros trabajadores que utilizan MRI intervencional proporcionaría información útil como los niveles, duraciones y frecuencia de las exposiciones de los trabajadores a campos estáticos en estos sistemas. Similarmente, el registros de pacientes podrían existir en algunos hospitales de los cuales sería posible obtener los datos de las personas que estuvieron expuestas pero cuyas condiciones fueron subsecuentemente encontrados ser benignas (**alta prioridad**)

También es considerado conveniente realizar un estudio prospectivo de los riesgos del embarazo asociados con la exposición ocupacional al campo magnetostático, así como también el seguimiento de los resultados del embarazo de las mujeres embarazadas que experimentaron exámenes MRI (**alta prioridad**).

La experiencia con otras frecuencias ha mostrado que obtener estimaciones confiables de la exposición a campos electromagnéticos para uso en estudios epidemiológicos puede ser muy difícil, y mediciones sustitutas de la exposición, tales el cargo en el trabajo o la distancia a una fuente en particular podrían no siempre proporcionar evaluaciones suficientemente exactas. Por consiguiente el uso de instrumentos específicos es requerido para medir la exposición. Los dosímetros personales relativamente pequeños han demostrado ser muy útiles en la investigación de los campos de ELF, de esta manera, los dosímetros

personales mejorarían mucho la evaluación de la exposición en los estudios epidemiológicos. La validación numérica y experimental de los dosímetros debería ser realizada. La intensidad del campo magnético, los gradientes del campo magnético, las duraciones de las exposiciones e idealmente la tasa de cambio magnético debido al movimiento debería ser registrada (**alta prioridad**).

Tabla 1. Recomendaciones para la investigación

Mecanismos de interacción
Química de las reacciones de pares radicales (0.1-10T) Efectos comutagénicos utilizando células humanas
Estudios teóricos y computacionales
Estudios dosimétricos con fantomas voxel masculino/femenino/ embarazada Corrientes inducidas en el ojo Potenciales de flujo en el corazón
Estudios in Vitro
Mecanismos de interacción: reacciones de pares de radicales y actividad enzimática Influencia de parámetros físicos (intensidad, duración, recurrencia, gradientes de SMF Mutagenicidad y transformación en células primarias de seres humanos Expresión del gen en células primarias de seres humanos
Estudios experimentales en animales
Cáncer Efectos en desarrollo/neuroconductuales Función cardiaca (~20 T)
Estudios experimentales en voluntarios
Función vestibular, coordinación de cabeza y ojos Función cognitiva y del comportamiento Efectos cardiovasculares
Estudios epidemiológicos
Estudio de factibilidad de fuentes de exposición, factores de confusión, número de personas expuestas Estudio de caso control anidado de enfermedad crónica ej. cáncer (si es factible) Resultados del embarazo en relación a la exposición ocupacional y exámenes MRI Estudio cohorte de efectos de corto plazo en ocupaciones altamente expuestas