

Efectos de las radiaciones electromagnéticas no ionizantes en sistemas biológicos

Resumen

En el presente trabajo se plantean los conceptos necesarios para entender la interacción de los seres vivos con los campos electromagnéticos no ionizantes, así como los efectos de esta interacción sobre los organismos. También se analiza la literatura existente sobre estudios de efectos por la exposición a campos electromagnéticos en la salud. Además de plantear la discusión sobre los efectos nocivos también relaciona algunos efectos útiles de dichos campos en la medicina.

Palabras clave: CEM, radiaciones no ionizantes, salud, sistemas biológicos.

Abstract

In this work are exposed the fundamental concepts necessary to understand the interaction between live beings and non-ionizing electromagnetic fields, further the effects of this interaction on live organisms. Also, the literature dealing with the effects on health of exposition to electromagnetic fields is analyzed. Besides to discuss about the harmful effects of these radiations, some utile effects in medicine are considered.

Key words: EMF, non-ionizing radiation, health, biological systems.

Recibido para publicación: 05-10-2006

Aceptado para publicación: 24-10-2006

Javier Ignacio Torres O.

Ingeniero Electricista, M.Sc (c). Profesor Auxiliar Departamento de Física; Universidad Tecnológica de Pereira.

Luis Hildebrando Alzate A.

Médico General. PhD Neurología. Profesor de Biofísica. Departamento de Física, Universidad de Caldas. Manizales.

Introducción

Desde la aparición de los seres vivos en el planeta, estos han evolucionado y se han acondicionado a las radiaciones electromagnéticas terrestres (geomagnetismo) y cósmicas. Pero con la aparición de la industria eléctrica se ha presentado como subproducto de ésta los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, estos de origen artificial y dado que la industria eléctrica y su infraestructura se desarrolla con abrumadora rapidez, los organismos biológicos no se pueden adaptar con igual velocidad al rápido desarrollo de esta industria. Por este motivo y en aras de proteger al ser humano y su entorno organizaciones internacionales desde finales de la década de los setenta, se han dado a la tarea de investigar los efectos de los campos electromagnéticos sobre seres vivos. Con estas investigaciones como sustento se busca desarrollar normas y reglamentaciones que protejan al ser humano y el medio ambiente de la exposición incontrolada a dichos campos. Sin embargo, no se presenta unificación de criterios para la aceptación de los efectos, ni para la dosimetría a la cual se pueden exponer los organismos vivos en los diferentes ambientes.

En la actualidad se tiene evidencia científica que demuestra los efectos adversos para la salud de las radiaciones “no ionizantes” de alta frecuencia, que producen una elevación de la temperatura de órganos y tejidos (efectos térmicos). También existen evidencias que sugieren que las radiaciones electromagnéticas

“no ionizantes” de baja frecuencia, no alcanzan a producir efectos térmicos pero inducen corrientes a nivel muscular; pues además se encuentran otros efectos biológicos menos probados, tales como el desarrollo de diversos tipos de cáncer y alteraciones en el sistema nervioso central.

Ondas electromagnéticas y radiaciones no ionizantes

En la tabla 1 se resumen las magnitudes y unidades relacionadas con radiaciones electromagnéticas.

Radiación electromagnética (REM).

Es el proceso de emitir energía en forma de ondas o partículas, cerca o a la velocidad de la luz, por una fuente electromagnética (1). La energía que escapa de un circuito o equipo eléctrico se asume como energía electromagnética radiante, la cual responde a la ecuación (1). Las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos. Este fenómeno se presenta cuando la frecuencia es mayor a 0 Hz, o sea que con corriente directa (DC), los campos estáticos no emiten ondas EM.

Campo Electromagnético (CEM)

Se denomina campo a la zona del espacio donde se manifiesta una fuerza; siendo el CEM la zona donde

Tabla 1. Variables eléctricas

Cantidad	Símbolo	Unidades
Conductividad	—	Siemens por metro (S/m)
Corriente	I	Amperio (A)
Densidad de corriente	J	Amperio por metro cuadrado (A/m ²)
Frecuencia	F	Hertz (Hz)
Campo eléctrico	E	Voltio por metro (V/m)
Campo magnético	H	Amperio por metro (A/m)
Densidad de flujo magnético	B	Tesla (T)
Densidad de potencia	S	Vatio por metro cuadrado (W/m ²)
Absorción específica de energía	TA	Julio por Kilogramo (J/kg)
Tasa de absorción específica de energía	TAE	Vatio por Kilogramo (W/kg)

las partículas eléctricas se ven afectadas por las fuerzas electromagnéticas. En frecuencia extremadamente baja (FEB) el campo magnético (CM) se puede desacoplar del campo eléctrico (CE), debido a que siempre estaremos en la zona de campo cercano, siendo este concepto una herramienta útil para el estudio de los efectos de los campos magnéticos en FEB. Se debe tener en cuenta que 1 micro tesla (μT) equivale a 0.8 A/m.

Ecuación de energía: Está ecuación (1) desarrollada por el físico alemán Max Planck describe la propagación de la energía electromagnética como una onda.

$$E = h f \quad (1)$$

Donde h es la constante de Planck que equivale a 6.2760×10^{-27} erg/s. Con esta ecuación se hace más clara la división del espectro electromagnético en radiaciones ionizantes y no ionizantes. La ionización se refiere al proceso mediante el cual es arrancado un electrón de las capas exteriores de un átomo, por acción de una radiación externa. Para organismos vivos esta radiación debe presentar frecuencias $f > 300$ GHz.

La radiación electromagnética no ionizante se puede ordenar en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy bajas 0 Hz (con longitudes de onda altas) hasta frecuencias muy elevadas 300 GHz (longitudes de onda pequeñas). La luz visible es sólo una pequeña parte del espectro electromagnético.

Espectro electromagnético no ionizante

Frecuencias extremadamente bajas (FEB): Ondas que están entre los 1 Hz y 300 Hz; se cuentan dentro de estas las instalaciones de transporte y distribución de energía eléctrica que actúan a 60 Hz para nuestro país. Los campos electromagnéticos (CEM) más significativos son debidos a tendidos de alta tensión y subestaciones eléctricas (S/E), estas constituyen los nodos del sistema de transporte. En las S/E los CEM más intensos son generados por líneas entrantes y salientes.

Radiofrecuencias (RF): Frecuencias comprendidas entre 3 kHz a 300 MHz, e incluyen las radiocomunicaciones en AM y FM.

Microondas (MO): Frecuencias superiores a 300 MHz hasta 300 GHz, son producidas por telefonía móvil, hornos microondas, radares y sistemas de comunicación; la telefonía móvil o celular

actualmente emplea bandas entre 800 MHz a 1.900 MHz (Microondas), con transmisión directa. Los elementos básicos de este sistema son dos: el terminal o teléfono móvil y la estación base. Para los terminales la potencia varía entre 0.6 W a 2 W.

Contaminación Electromagnética: Se refiere a todas aquellas radiaciones electromagnéticas que resultan como subproducto en el funcionamiento de equipos eléctricos, sean caseros (electrodomésticos), de telecomunicaciones, o industriales.

Tecnologías generadoras de CEM artificiales (electrocontaminación)

Electrodomésticos: Estos equipos que forman parte de nuestra vida diaria pueden presentar mayor riesgo que equipos como subestaciones S/E y líneas de transmisión, dado que su uso se da a una mayor cercanía del organismo y por su construcción algunos no presentan en su mayoría parámetros de protección apropiados.

Interacción y efecto biológico

La OMS define salud como un estado de bienestar físico, mental y social, y no sólo como ausencia de enfermedad o trastorno, por eso es necesario hacer una distinción entre los conceptos: interacción o interferencia, percepción, efecto biológico, lesión y riesgo. Cuando una entidad biológica se expone a un CEM, se produce una interacción entre la potencia del campo, la corriente eléctrica inducida y las cargas del tejido corporal. El efecto biológico es la respuesta fisiológica a esa interacción, que puede o no ser perceptible por el organismo expuesto. El efecto biológico no tiene por que ser necesariamente una lesión. Se produce una lesión cuando el efecto biológico supera las propiedades biológicas de compensación del organismo. El riesgo es una probabilidad latente de que se produzca una lesión. Los efectos producidos por exposición a CEM desde el punto de vista clínico se pueden clasificar en agudos y crónicos (2). Los efectos agudos se relacionan con efectos inmediatos y objetivos, y los crónicos no son ni inmediatos ni objetivos, se pueden denominar a largo plazo; además se pueden clasificar como nocivos y benéficos estando estos últimos en el campo de la magnetoterapia.

Las ondas electromagnéticas interactúan entre sí y dado que los seres vivos somos cuerpos

eminentemente electromagnéticos, interactuamos con el espectro electromagnético que nos rodea y se producen fenómenos de absorción, transmisión y emisión de energía, con cambios de estado en niveles energéticos de las moléculas (3).

Mecanismos de Interacción

La interacción del material biológico con una emisión electromagnética depende en principio de la frecuencia de la emisión, o sea de la cantidad de energía que este absorbe (ver ecuación 1). Los CEM inducen la formación de momentos de fuerza sobre las moléculas que pueden ocasionar el desplazamiento de iones situados en posiciones sin perturbación, vibraciones en cargas unidas y la rotación de moléculas bipolares, como las del agua. Estos mecanismos son incapaces de ocasionar efectos observables tras la exposición a CEM de bajo nivel, dado que quedan superpuestos a agitación térmica aleatoria. Además, el tiempo de respuesta debe ser lo suficientemente rápido para permitir que la respuesta se produzca durante el periodo de tiempo de la interacción. Ambas consideraciones implican que debe existir un valor umbral (dosis), por debajo del cual no existe respuesta apreciable y una frecuencia límite por encima de la cual no se advierte respuesta.

Por debajo de los 100 kHz el principal mecanismo de interacción es la inducción de corrientes en tejidos (4). El CE induce una carga superficial sobre un cuerpo conductor expuesto, la cual produce una corriente dentro del mismo. La magnitud de la corriente inducida depende de muchos factores: tamaño, forma, composición interna, distancia, configuración del campo. Otro fenómeno recientemente propuesto es el de *resonancia estocástica*, la cual está relacionada con la recepción, transducción y amplificación de la señal impuesta a las membranas por los campos magnéticos de FEB (5).

Dosimetría

Una de las cuestiones más delicadas al momento de valorar los efectos de los CEM tiene que ver con la definición de dosis. En términos fisiológicos, una dosis es una cantidad de un agente o producto que se recibe en un tiempo determinado. Esto está bien definido para algunas sustancias químicas, con los CEM no es tan simple y plantea uno de los principales problemas, ya que actualmente no se conoce con certeza qué aspecto del CEM al que se está sometido, es el más importante a la hora de producir un efecto

sobre la salud o la integridad de un ser vivo (6). La tasa a la cual la dosis es entregada o absorbida se llama tasa de dosis. En el campo de la biología de las RNI (radiaciones no ionizantes), la dosis es definida en términos de energía y la tasa de dosis se define en términos de potencia. Sabiendo esto la TAE (tasa de absorción específica), determina la cantidad de energía absorbida por el organismo, y se expresa en W/Kg. Un parámetro igualmente importante es la densidad de potencia (S) incidente en una superficie, que se da en W/m². Además de esto la densidad de potencia de un CEM se refiere al producto entre las componentes del campo eléctrico y magnético (ver ecuación 2).

$$W (W / m^2) = E (V / m) \times H (A / m) \quad (2)$$

En realidad no se sabe qué aspecto tiene más impacto: si es el nivel medio de exposición diario, si sólo son importantes las exposiciones por encima de cierto valor umbral o sí, por el contrario, lo que hay que tener en cuenta es el número de veces que se entra y se sale de un campo electromagnético dado. Otra dificultad añadida, que complica más el panorama, tiene que ver con que no existe ninguna seguridad de que intensidades más altas de CEM produzcan efectos más perjudiciales que intensidades más bajas. Por lo anterior, la dosimetría es uno de los elementos más importantes para cualquier estudio científico.

Percepción por los seres vivos de los CEM naturales

Desde hace más de un siglo se ha planteado la hipótesis de la existencia de una posible influencia del campo geomagnético sobre los seres vivos (3, 7). Según diversas investigaciones, se ha observado una relación y respuesta de diferentes organismos biológicos a los CEM naturales y la posible afectación de estos por parte de los CEM artificiales. Estos efectos pueden ser de dos tipos en los animales:

Respuestas magnetotáxicas: Se ha encontrado en bacterias, mariposas y vertebrados como tortugas, roedores, delfines, peces, aves y hasta en el ser humano, células con concentraciones de magnetita (material ferromagnético). Las bacterias que presentan un comportamiento en respuesta a la interacción con CEM, se denominan organismos Magnetotáxicos y la producción de material magnético es controlada genéticamente, lo que puede indicar la adaptación de estos organismos a los campos geomagnéticos (8).

Efectos magnéticos sobre la conducta migratoria o de orientación: En diversas investigaciones con animales como mariposas, tortugas y aves en las que se pretende determinar los métodos de orientación, se plantea que estos son sensibles a los campos geomagnéticos locales y a los máximos y mínimos magnéticos; ciertas aves migratorias en pleno vuelo detectan fluctuaciones magnéticas muy pequeñas, hasta de 10 nT. Esta observación es reforzada al encontrar en el cráneo de la paloma cristales de magnetita. Se sabe que algunos organismos precipitan inclusiones de material magnético *biomagnetita* y que incluso el hombre en la base del cráneo y en el cerebro presenta este material en forma de magnetosomas (3), que son órganos especializados formados por cristales magnéticos recubiertos por membranas biológicas.

Efecto cancerígeno de las radiaciones

Varios estudios experimentales muestran que las radiaciones no ionizantes pueden tener efectos sobre el material genético (clastogénicos), ya sea directamente o sirviendo como un cofactor de agentes químicos de reconocida capacidad cancerígena (9, 10). Otro mecanismo es la inducción de proteínas de choque térmico, las cuales proveen respuestas e interacciones que permiten a las células cancerosas evadir los ataques del sistema inmune y de agentes farmacológicos (11).

Efectos asociados a la exposición a campos electromagnéticos

Los efectos biológicos producidos en los seres vivos por CEM no ionizantes, dependen de la respuesta fisiológica a la cantidad de energía absorbida por los organismos. La respuesta de un sistema biológico a la interacción con un CEM depende de las propiedades intrínsecas del sistema, de las características del CEM (frecuencia y potencia radiante) y de las condiciones del medio donde se produce la interacción (12).

En una primera clasificación de estos efectos se describen dos tipos: (a) efectos térmicos y, (b) efectos no térmicos, los cuales incluyen cambios en la producción de melatonina, ferritina, ornitín descarboxilasa y poliaminas relacionadas, proteínas de choque térmico (HSP), mastocitos e histamina, alteraciones en la membrana celular, aumento de permeabilidad de la barrera hematoencefálica, cambios endocrinos, mutagenicidad e imprinting. Los efectos tratados aquí corresponden a resultados de estudios por exposición a REM, divididos en dos

grupos: (A) a frecuencias extremadamente bajas (FEB) y (B) a radiofrecuencias (RF) y a microondas (MO). Cada grupo presenta tres clases de estudios: *in vitro*, *in vivo* y *epidemiológicos*, aunque también se han realizado estudios por simulaciones y modelos de laboratorio.

Estudios realizados con CEM de frecuencias extremadamente bajas.

Estudios en la célula: La ausencia de mutaciones del material genético en el núcleo de las células, la naturaleza dispersa y el bajo rango de efectos notorios a altos niveles de exposición, son todos factores a favor de la conclusión de ausencia de potencial cancerígeno de los CEM FEB (13).

Estudios en animales: En diferentes estudios realizados en EEUU y en el Japón con roedores expuestos a altas intensidades de CM propusieron que no hay una relación clara entre la exposición a CM y cáncer. Lamborso en 1996 encontró en roedores inhibición de la secreción de la melatonina y ya que esta es un marcador del ritmo circadiano, este puede verse alterado por exposición a CEM FEB.

Estudios de laboratorio relacionados con el cáncer: Se han llevado a cabo numerosos estudios sobre diferentes sistemas biológicos con el objeto de valorar experimentalmente la supuesta carcinogenicidad de las exposiciones a CEM FEB:

No existe evidencia de que los CEM FEB puedan ocasionar alteraciones en la estructura del ADN y que estos ocasionen cáncer de mama en animales. Por tanto, es improbable que dichos campos actúen como indicadores del proceso de transformación neoplásica (Tenforde, 1996). Si estos campos resultasen ser cancerígenos, actuarían más bien como promotores, acelerando el crecimiento de las células que hubieran sufrido daño genético anterior (9).

La US Environmental Agency (1997) ha descubierto que la melatonina puede inhibir el crecimiento de las células MCF-7 en cultivo y que con 1,2 μ T a 60 Hz puede bloquear completamente la acción oncostática.

Epidemiología del cáncer: Desde 1979 a través de los estudios de Wertheimer y Leeper, que detectaron una excesiva mortalidad de cáncer en niños que vivían en hogares expuestos a CM supuestamente altos, se sospechaba que la exposición débil a CM FEB podría ser importante en el origen del cáncer.

La mayor parte de los estudios se han centrado en demostrar el impacto de las líneas de alta tensión y los CEM sobre la salud de las personas. La búsqueda de la relación entre el cáncer en niños o leucemia linfoblástica y la presencia de líneas de alta tensión o subestaciones, en cercanía de las viviendas ha sido un factor determinante en las investigaciones. Pero todos llegan a resultados contradictorios, y así para citar algunos Fulton (1980), Myers (1985), Tomenius (1986), Kaune (1987) y Coleman (1988) no encuentran correlación estadística entre la incidencia de leucemia y las líneas de alta tensión. Por otra parte Feychting (1992) y Lin (1994) sí encuentran relación entre la leucemia infantil y los CEM. Aunque las medidas de CM en las casas de niños con cáncer sí eran mayores que en las de referencia de niños sanos, no se presenta en estos estudios un control con respecto a las corrientes telúricas ni a las redes de radiación de Hartmann y Curie que pueden ser causantes de cáncer (12).

Posiblemente el estudio más trascendente realizado se llevó a cabo en el Instituto Karolinska, por Feychting y Ahlbom en 1992, ya que estableció claramente, tras estudiar una cohorte de un millón de personas, que el riesgo de padecer leucemia infantil era mayor en los niños expuestos a campos mayores a $0.2 \mu\text{T}$ y que este riesgo aumentaba cuanto más cerca se estaba de las líneas de alta tensión (Feychting y Ahlbom, 1993); para Colombia por ejemplo se presentan magnitudes de $2 \mu\text{T}$ para líneas de 230 kV y de 0.6 T para líneas de 115 kV.¹

Tomados en conjunto, los datos sobre riesgos de cáncer asociados a la exposición a CEM FEB en sujetos que viven en las proximidades de líneas de transmisión eléctrica, muestran una aparente consistencia, revelando un moderado incremento en el aumento de leucemia en niños y no de otros tipos de cánceres. Sin embargo, resultados negativos de otros estudios han sido interpretados como indicativos de que la citada asociación es cuestionable. La base de la supuesta relación entre leucemia y CEM FEB es desconocida, por lo que algunos investigadores especulan con la posibilidad de que otros factores, generalmente agentes polucionantes químicos, potencialmente ligados a la presencia de líneas, pudieran ser los verdaderos causantes de la asociación descrita. Por tanto, y a falta de un soporte experimental más firme, el ICNIRP (International Comisión on non-ionizing radiation protection) consideró en sus directrices que los datos epidemiológicos eran insuficientes para recomendar niveles de seguridad más restrictivos.

Sin embargo, a todo lo anterior, en julio de 2001 la IARC (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer) con base en estudios epidemiológicos de leucemia en niños clasificó a los CM FEB como *posiblemente cancerígenos* (4).

Efectos fisiológicos de los CEM a FEB: Los efectos de los CM sobre los tejidos vivos, son de tipo electrodinámico donde la fuerza de interacción con las cargas móviles responde a las leyes de Maxwell. Estos efectos consisten en la orientación de las grandes moléculas hacia una configuración de mínima energía. Los CM inducen tensiones y corrientes en los tejidos según las leyes de Faraday y Lenz, siendo precisamente la densidad de corriente inducida el parámetro que caracteriza los principales efectos sobre los tejidos vivos. En cuanto al CE se pueden producir calentamiento de los tejidos por efecto Joule, el cual es directamente proporcional al cuadrado del campo y a la conductividad del medio.

Dado que la hemoglobina (Hb) y la mioglobina (Mb) son células paramagnéticas los campos magnéticos podrían influir en su comportamiento y en las reacciones bioquímicas con participación de los radicales libres (7).

El CE también puede producir el efecto llamado electroforesis, que es el movimiento de partículas cargadas, iones inorgánicos o células vivas, en una solución, y teniendo en cuenta que la importancia del campo bioeléctrico se manifiesta equilibrando la tendencia a la difusión. La magnitud de este campo puede afectar la velocidad de estas partículas y producir efectos en el metabolismo (McLean et al, 2005).

Los CEM pueden inducir corrientes en el cuerpo que dependen de la intensidad y de la frecuencia del campo, las mayores sensibilidades al campo se dan en frecuencias entre 10 Hz y 500 Hz, a partir de 1 KHz va disminuyendo la sensibilidad en términos del campo externo aproximadamente con el inverso de la frecuencia. Entre 1 KHz hasta 100 KHz esta se mantiene aproximadamente constante (4).

En términos de densidad de corriente los efectos en los nervios y estimulación muscular ocurren a densidades de 1 A/m^2 a frecuencias industriales. A niveles más altos, del orden de 3 A/m^2 , se dan contracciones involuntarias de los músculos y la posibilidad de fibrilación cardiaca. Si se toma la densidad de corriente o la corriente inducida como base, entonces hay diferencia fundamental entre los efectos producidos por el CE y el CM, ya que sólo

1. Estudio realizado por el grupo de alta tensión (GRALTA) de la Universidad del Valle en el 2005

se diferencia en este aspecto la distribución de las corrientes en el cuerpo.

Efectos sobre el sistema nervioso: Estudios epidemiológicos han revelado una tendencia al incremento de enfermedades neurodegenerativas, tales como enfermedad de Alzheimer y esclerosis múltiple, generalmente en trabajadores de empresas e industrias relacionadas con la generación y distribución de energía eléctrica (18).

Estudios realizados con CEM a Radiofrecuencia y Microondas.

En este aparte se relacionan algunos estudios realizados in vitro e in vivo.

Estudios en la célula: Los CEM disponen de una cantidad de energía por fotón que es insuficiente para provocar destrucción de las células, pero suficiente para generar cambios en su morfología, metabolismo, reproducción o duración de la vida celular.

Tabla 2. Resumen de estudios realizados sobre efectos de los CEM en organismos vivos, por la IEEE y OMS²

Tipo de estudio	IEEE	OMS	Total x tipo
Ingeniería y física	49	70	119
Epidemiología	68	66	134
En seres humanos/Provocación	45	96	141
In Vitro	37	118	155
In Vivo	52	128	180
Otros	42	29	71
Total	293	507	800

Estudios sobre la membrana celular indican que la RF de baja intensidad puede alterar las propiedades de la membrana celular tanto desde un punto de vista estructural como funcional (19), y a una variedad de propiedades de los canales iónicos como son la disminución en la formación de los canales y la disminución en los periodos de apertura. Estos estudios incluyen campos constantes y pulsantes a diferentes intensidades. Así parece que varias intensidades de RF afectan a los canales de membrana (6). La inhibición de la actividad bioeléctrica se debe al aumento de la conductancia de la membrana al K⁺, en un proceso de apertura de los canales de K⁺ dependientes de Ca²⁺ (20).

Estudios genéticos: Czarska y otros (1992), encontraron que la temperatura juega un papel importante en la transformación linfoblástica de células humanas expuestas a calor convencional o a MO de carácter continuo. Los resultados con MO de carácter pulsante mostraron diferencias significativas en el número de células con transformaciones linfoblásticas, comparadas con células calentadas convencionalmente y por irradiaciones continuas de MO.

Garaj-Vrhovac, Fucic, y Horvart (1992) expusieron linfocitos humanos a temperatura constante de 22°C: la TAE no fue determinada. Después de expuestas las células, fueron estimuladas con el mitógeno fitohemaglutin y posteriormente se prepararon para un análisis cromosómico. Se encontraron incrementos en todos los tipos de aberraciones entre niveles de densidad de 10 mW/cm² a 30 mW/cm², los datos sugieren una relación respuesta dosis y fueron interpretados como consistentes.

Si bien estos estudios genéticos han producido resultados interesantes, no pueden ser certificados como válidos hasta no obtenerse la réplica de los resultados en otros estudios de laboratorio independientes (14).

Estudios en el sistema inmune: El sistema inmune presenta una doble respuesta a la radiación de RF y MO. Así, por debajo de potencias de 1 mW/cm², la exposición actúa como estímulo, mientras que por encima de este valor existe una supresión de la actividad de este sistema. Debido a que el sistema inmune es complejo y presenta una gran variedad

2. Evaluación del riesgo de la salud de los campos electromagnéticos de la telefonía móvil. Instituto nacional de investigaciones y capacitación de telecomunicaciones (INICTEL). Lima Peru. 2005

de modelos biológicos y sistemas de exposición, los resultados son aún inconsistentes.

Efectos sobre el sistema nervioso SN: La barrera hematoencefálica es un complejo neurovascular que actúa como un filtro permitiendo el paso selectivo de material desde la sangre al cerebro. En recientes estudios se ha comprobado un aumento de la permeabilidad ante la exposición a RF con una TAE de 0.016 W/Kg RF (15), lo que permite el paso de diversas moléculas desde la sangre al cerebro, entre ellas, moléculas tóxicas que normalmente son detenidas por esta barrera.

La exposición a bajos niveles de pulsos de RF puede afectar la neuroquímica del cerebro de manera que coincide con las respuestas al estrés. Estudios con ratas, mostraron que estas pueden ver afectados sus mecanismos de aprendizaje (16).

Adicionalmente, Stevens et al, propusieron una relación entre la exposición a CEM FEB y la carcinogénesis a través de la acción de la RF en la secreción de melatonina (17).

Estudios realizados con CEM a Radiofrecuencia in vivo.

Efectos de carácter térmico: Los tejidos que más se alteran son los que tienen un mayor porcentaje de agua (sistema nervioso central, globo ocular). En órganos con poca o nula circulación sanguínea (globo ocular) el daño puede ser mayor puesto que la pérdida de calor es más lenta. La exposición a CEM de 0.1 T a 0.28 T produce cambios en la temperatura de la piel humana, detectados mediante el uso de cámaras de termografía sobre muñecos conteniendo fluidos similares a los biológicos.

Con el fin de determinar el origen de estas variaciones, que se manifiestan tanto en hombres como en animales, se han realizado experimentos con ranas a las que se somete a exposición de CEM de 0.4 T, llegando a establecerse que dichas variaciones se dan por alteraciones en el flujo sanguíneo, disminución esta que se producía en los vasos pequeños. En las arterias y los vasos grandes no se percibía alteración alguna. Estos efectos están relacionados con el nivel de radiación; así con niveles de 0.31 T a 0.35 T los efectos eran reversibles en un 90%. Con niveles de 0.37 T se provocaba oclusión de los vasos pequeños, esto por el aumento en la viscosidad de la sangre. Una posible explicación a esto se debe al carácter diamagnético de la mayoría de las moléculas orgánicas.

Las elevaciones moderadas de la temperatura inducen la síntesis, por parte de las células afectadas, de

proteínas de choque térmico (HSP) (11), las cuales por un lado protegen a las células contra las altas temperaturas y otras condiciones de stress físico o químico, pero también protegen a las células neoplásicas de la acción de agentes anticancerígenos o del mismo sistema inmune.

Efectos en el sistema nervioso (SN): Los efectos relacionados con el SN en algunos estudios, efectuados principalmente en Europa, parecen presentarse en trabajadores expuestos a RF y MO aproximadamente de 30 MHz a 300 GHz. Estos estudios reportan la ocurrencia de síntomas inespecíficos asociados al SN, tales como dolor de cabeza, nerviosismo, fatiga, irritabilidad, insomnio, pérdida del apetito, vértigo, inestabilidad emocional, depresión, pérdida de la memoria, agrandamiento de la tiroides, sudoración temblor de dedos, pérdida del deseo sexual e impotencia (14). Además de los anteriores, Hocking (1998) encontró malestar general, náusea, trastornos del sueño y dificultad para concentrarse. Colectivamente estos síntomas se combinan con tres síndromes que han sido vistos como etapas progresivas de una enfermedad llamada *mal de las microondas*. Típicamente, los efectos asociados a las etapas tempranas de esta enfermedad se interrumpen si la exposición se detiene (18).

Estudios epidemiológicos

De la revisión de estos estudios se deduce que para poder extractar una conclusión válida es necesaria una investigación mucho más profunda. La hipótesis de que la exposición a CEM de RF puede ser asociada con cáncer, especialmente leucemia, podría ser fortalecida si existiera un modelo válido en animales, pero todavía no han sido publicados estudios adecuados¹.

Bates (1991) presentó evidencia epidemiológica de la correlación entre la exposición a campos electromagnéticos débiles de 50 Hz (FEB) de origen habitacional y el cáncer. Esta correlación es estadísticamente significativa para la exposición a campos de origen domiciliario en niños. La significancia estadística descrita es fuerte para cánceres del sistema nervioso central, especialmente cerebrales en niños.

En tanto, los estudios epidemiológicos indican posibles relaciones entre la exposición a RF y un aumento del riesgo de cáncer. Algunos hallazgos positivos fueron encontrados entre la leucemia y los tumores cerebrales, pero en conjunto los resultados no

son concluyentes y no permiten aportar las hipótesis para señalar que la exposición a CEM RF sea una causa directa del cáncer (6).

Efectos de la REM debidas a teléfonos celulares

Se ha demostrado elevación de temperatura superficial y profunda en tejidos de la cabeza expuestos localmente a radiación electromagnética de 900 MHz proveniente de teléfonos celulares, indicando que el efecto térmico puede alcanzar al tejido cerebral, con sus consiguientes efectos adversos para la salud y también efectos neuroconductuales. Se ha medido experimentalmente (en ratones) los efectos de la radiación electromagnética similar a la de algunos equipos telefónicos celulares, de 900 MHz, que causa en éstos un riesgo relativo de 2,4 en relación a animales controles para desarrollar linfomas (6).

Para el ser humano, hay algunos estudios preliminares que sugieren, pero de una manera no concluyente, una mayor frecuencia de tumores cerebrales en usuarios de teléfonos celulares. Se ha encontrado una incidencia 3 veces mayor de cáncer cerebral en usuarios de teléfonos móviles aplicados al oído en comparación con teléfono manos libres; pero no se ha detectado significancia estadística para dicho efecto, probablemente debido al reducido número de casos en dicho estudio. También se ha demostrado un aumento de tumores neuroepiteliales cerebrales en el hemisferio cerebral del lado de uso del teléfono celular, en comparación con hemisferio cerebral contralateral.

Es necesario considerar que la radiación electromagnética emitida por antenas base de teléfonos celulares es transmitida de manera no uniforme en ambientes urbanos, debido a que emiten en forma direccionada y a reflexiones ambientales; además, los estándares se refieren a intensidades promedio y no a los posibles picos de alta intensidad que pueden encontrarse en algunas áreas. Si bien los límites impuestos por las normas hacen que no se produzcan los efectos térmicos sobre las personas expuestas, es necesario considerar la existencia de efectos no térmicos, producidos con intensidades mucho más bajas de radiación, cuyos efectos crónicos o diferidos sólo podrán ser detectados por estudios epidemiológicos en el largo plazo.

Efectos no establecidos que están siendo investigados

Algunas variables que vienen siendo estudiadas son la pérdida de la memoria, tiempos de reacción, cambios de

presión sanguínea, cambios en la barrera hematoencefálica y efectos subjetivos (hipersensibilidad) (21, 22).

Magnetoterapia

La radiación magnética no sólo la debemos concebir como un producto probablemente nocivo para la salud humana, sino que también puede ser usada como un elemento de diagnóstico clínico: magnetoencefalografía (MEG) y magnetocardiografía (MCG) y de terapia médica, mediante sus efectos terapéuticos.

La magnetoterapia es el método mediante el cual sobre el organismo humano se aplican campos magnéticos constantes (CMC) o variables (CMV) con el objetivo de solucionar determinadas afecciones. A diferencia del campo electromagnético de alta frecuencia durante la acción del CMC ó CMV de baja frecuencia los efectos térmicos son despreciables (23).

Antecedentes de la magnetoterapia

Las primeras aplicaciones del electromagnetismo en la terapia médica se realizan en el siglo XIX por Antón Mesmer; pero sólo hasta la segunda mitad del siglo XX adquiere un cuerpo sólido de doctrina y protocolizando tratamientos específicos frente a determinadas patologías.

Aplicaciones de la magnetoterapia

Muchas son las áreas de acción de esta práctica; para dar una visión sintética se divide en seis grandes grupos (3): Cirugía, Ginecología, Estomatología, Otorrinolaringología, Oftalmología y Enfermedades diversas, como por ejemplo: vasculares periféricas, cardiopatías e hipertensión, pulmonares, gastro-intestinales, neurológicas, reumáticas, pediátricas, dermatológicas y de cicatrización de heridas (24, 25).

Conclusiones

- Las investigaciones sugieren que el potencial cancerígeno de los CM es muy bajo inclusive a altos niveles de exposición, aunque la ausencia completa de riesgo no ha podido ser probada.
- En términos generales sólo se aceptan efectos a corto plazo y como probados, los efectos nocivos por corrientes inducidas mayores a 10 mA en FEB e inducción de calor con aumentos de temperatura superiores a 1° C por RF o MO.
- Debido al efecto de latencia de enfermedades como el cáncer, que puede ser mayor a diez años y dado el poco tiempo que lleva el uso de la telefonía móvil, existe la duda acerca de los efectos a largo plazo,
- Luego de analizar la documentación existente en cuanto a estudios sobre efectos de la exposición a REM NI y observar que no hay criterios unificados acerca de los riesgos que esta produce, se debe apelar al principio de cautela y tener un conjunto de normas que protejan el sector laboral y al público.
- Se deben plantear nuevas líneas de investigación que aborden el biomagnetismo desde otra óptica, por ejemplo avanzar en la fundamentación del concepto *biocompatibilidad electromagnética*.
- Se debe promover el estudio concienzudo del tema en las facultades de Medicina y Física, y organizar eventos científicos y tecnológicos en los cuales se divulgue trabajos desarrollados en la región y el país.
- Los expertos deben atinar más sus afirmaciones sobre la relación entre exposición a CEM y cáncer, ya que es impropio decir que no se dispone de suficientes datos para concluir que la exposición a radiaciones EM FEB es segura, porque nunca se tiene suficiente información para determinar que algo está libre de riesgo. Por esto debemos apelar al principio de cautela en nuestra legislación.
- Los organismos biológicos sí presentan respuestas a los campos electromagnéticos, y estas en algunos casos son benéficas para la recuperación de diversas afecciones.

Referencias bibliográficas

1. Vidaurre, A., Jiménez, M. Fundamentos de ingeniería II, Valencia 1996. p297.
2. STOA. Parlamento Europeo. Notas informativas. Campos electromagnéticos y salud. N°297.563/2001
3. Bardasano, J., Elorrieta J. Bioelectromagnetismo, Ciencia y Salud. Mc Graw Hill. 2000. p259.
4. INTERNATIONAL COMISIÓN ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). Recomendaciones para limitar la exposición a CEM (hasta 300 GHz) 1998.
5. Hafemeister, D. Power lines Field and Public Health. American Physical Society. 1996.
6. IV Congreso Nacional de Medioambiente (CONOMA), España 1998.
7. Volkstein, M. Biofísica. Moscú. 1978. p230.
8. Polyakova T, Zablotskii V. Magnetization processes in magnetotactic bacteria systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2005, 293: 365–370.
9. Cho YH., Chung HW. The effect of extremely low frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) on the frequency of micronuclei and sister chromatid exchange in human lymphocytes induced by benzo(a)pyrene. *Toxicology Letters* 2003; 143: 37-44.
10. Winker R, et al. Chromosomal damage in human diploid fibroblasts by intermittent exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields. *Mutation Research* 2005; 585: 43–49.
11. De Pomerai D, et al. Microwave radiation induces a heat-shock response and enhances growth in the nematode *Caenorhabditis*

- elegans*. *IEEE Trans Microwave Theor Tech* 2000; 48: 2076-2081.
12. Lin J C. Advance in electromagnetic fields in living systems. Vol1. Plenum Press, New York.1994
 13. Ruiz Gomez et al. 25 Hz electromagnetic field exposure has no effect on cell cycle distribution and apoptosis in U-937 and HCA-2r1cch cells. *Bioelectrochemistry* 2000 ; 53 : 137-140.
 14. CIDET. Propuesta de norma Colombiana sobre campos electromagnéticos y salud. Itaguí, Antioquia. 1999.
 15. Salford L, et al. Permeability of the blood-brain barrier induced by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50, and 200 Hz. *Microsc Res Tech* 1994 ; 27(4) : 535.
 16. Lai H. Single-and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *International Journal of Radiation Biology* 1996; 69 (2): 513-521.
 17. Stevens RS, et al. Electric power, pineal function, and the risk of breast cancer *The FASEB Journal* 1992; 6: 853-860.
 18. Johansen C. Exposure to Electromagnetic Fields and Risk of Central Nervous System Disease in Utility Workers. *Epidemiology* 2000; 11(3): 539-543.
 19. Morelli A, et al. Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on membrane-associated enzymes. *Arch Biochem Biophys* 2005; 441(2): 191-8.
 20. Hinch R, et al. The effects of static magnetic field on action potential propagation and excitation recovery in nerve. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 2005; 87: 321-328.
 21. Lei Y, et al. Effects of extremely low-frequency electromagnetic fields on morphine-induced conditioned place preferences in rats. *Neuroscience Letters* 2005; 390: 72-75.
 22. Berk M., Dodd S., Henry M. Do ambient electromagnetic fields affect behavior? A demonstration of the relationship between geomagnetic storm activity and suicide. *Bioelectromagnetics* 2005; 27(2): 151-155.
 23. Finlay, C. Magnetoterapia, su aplicación en la Medicina. *Rev Cubana Med Milit* 2001.
 24. Hidalgo, Armando., González, Marta., Quiñónez, Alfredo. Acción del campo magnético de baja frecuencia en la cicatrización de la piel. *Rev Cubana Invest Bioméd*, jul.-sep. 2001
 25. Kumar V. S, et al. Optimization of pulsed electromagnetic field therapy for management of arthritis in rats. *Bioelectromagnetics* 2005; 26 (6): 431-439.



Flor - Jesús Herney Moreno

Mención Especial - Primer Concurso de Fotografía, Facultad de Ciencias de la Salud-2006