



BASES BIOLÓGICAS PARA NORMATIVAS DE PROTECCIÓN ANTE RADIACIONES NO IONIZANTES

Alejandro Úbeda Maeso,
Servicio BEM-Investigación, Hospital Ramón y Cajal

RESUMEN

La generalización del uso de la energía eléctrica y del empleo de radiofrecuencias para la transmisión de la información a distancia, ha dado lugar a una presencia virtualmente ubicua de campos electromagnéticos no ionizantes en el medio ambiente urbano. Las posibles consecuencias sobre la salud humana de la exposición a dichos campos son objeto de interés creciente por parte del público y de autoridades responsables de salud ambiental. En respuesta a dicho interés, un comité de expertos comisionado por la OMS, el ICNIRP, elaboró en 1998 una guía de niveles de referencia y restricciones básicas cuyo cumplimiento garantizase la seguridad de los ciudadanos en lo referente a radioprotección ante efectos nocivos de exposiciones agudas a campos no ionizantes. Los criterios y conclusiones de ICNIRP-OMS fueron adoptados por el Consejo de la Unión Europea, que les dio forma de Recomendación en 1999. Los países firmantes del documento se comprometieron a desarrollar en un plazo breve las estrategias oportunas, legales y técnicas, para dar cumplimiento a las medidas establecidas en la Recomendación. El presente documento tiene por objeto informar a los ciudadanos y profesionales interesados en conocer la base teórico-experimental que justifica la adopción de las medidas de radioprotección propuestas por la OMS y el Consejo e la Unión Europea. Para ello, el artículo incluye información resumida sobre las fuentes más comunes de campos no ionizantes de diferentes frecuencias y sobre los niveles que alcanzan las emisiones en las proximidades de dichas fuentes. Se explican también los criterios seguidos por ICNIRP en la elaboración de sus límites, y se lleva a cabo una revisión de la literatura científica existente sobre aquellos bioefectos de los campos no ionizantes que pudieran ser relevantes para el establecimiento de límites a la exposición humana. El artículo explica cómo la interpretación que algunos expertos hacen de la literatura científica ha generado un cierto grado de controversia en el seno de la comunidad científica y ha dado lugar a que países europeos, como Suiza e Italia, se muestren disconformes con determinados aspectos de la Recomendación del Consejo la Unión Europea. El trabajo identifica la existencia de algunas carencias en el presente conocimiento científico sobre la materia. Tales carencias son en gran medida responsables de la controversia y la percepción de riesgo existentes, por lo que es urgente incrementar y mejorar la investigación dirigida a completar el conocimiento científico sobre la respuesta biológica a las radiaciones no ionizantes.

SUMMARY

As a result of the current extensive use of electric power and radiocommunication, the presence of non-ionizing electromagnetic fields in urban environments has become virtually ubiquitous. The potential consequences of human exposure to such fields have generated a growing interest on the part of the public and of the authorities responsible for environmental health. In response to that interest, in 1998 the ICNIRP, a panel of experts commissioned by WHO, published a group of guidelines aimed at limiting human exposure to non-ionizing electromagnetic fields with potentially harmful, short-term health effects. In 1999, the Council of the European Union adopted the WHO-ICNIRP criteria and guidelines and gave them a legal format of Recommendation. The European countries that endorsed the Recommendation committed themselves to adopting the legal and technical strategies necessary to enforce the established limits within their territories. The present text is intended to provide the public and professionals with information on the theoretical and experimental bases justifying the exposure limits proposed by ICNIRP and the Council of the European Union. To this end, the present paper includes summarized information on current sources of non-ionizing fields and on the exposure levels in the vicinity of these sources. In addition, a review of recent literature on bioeffects of non-ionizing fields is provided, along with ICNIRP criteria for evaluating existing evidence relevant to the adoption of exposure limits. Objections have been raised by a number of experts against some of the mentioned criteria, which have become a source of controversy. The view of these experts is described in this article. As a consequence of that disagreement, two European countries, Switzerland and Italy, have adopted exposure limits that, in some aspects, are more restrictive than those recommended by the ICNIRP and the European Council. This paper identifies existing gaps in the current scientific knowledge which underlie the present scientific controversy as well as the excessive risk perception on the part of the general public. The present, unwanted situation urgently demands amplification of our scientific knowledge though more extensive and complete studies on the biological response to non-ionizing radiation of relevant frequencies.

1. CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y SALUD PÚBLICA

PROPIEDADES FÍSICAS Y EFECTOS SOBRE LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS

Existen múltiples fuentes naturales y artificiales que generan energía en forma de ondas electromagnéticas. Estas ondas consisten en campos eléctricos y magnéticos oscilatorios (Figura 1) que son capaces de interactuar de formas diferentes con los sistemas biológicos, incluidos los seres humanos. Una onda electromagnética consiste en pequeños paquetes de energía denominados fotones. La energía de cada fotón es directamente proporcional a la frecuencia de la onda: cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la cantidad de energía de dicho fotón. La forma en que las ondas electromagnéticas afectan a los sistemas biológicos viene determinada por la intensidad del campo y por la cantidad de energía de cada fotón.

Según su frecuencia y energía, las radiaciones electromagnéticas pueden clasificarse en "ionizantes" y "no ionizantes" (RNI). Las radiaciones ionizantes corresponden a señales electromagnéticas de frecuencias extremadamente altas, como los rayos X y los rayos gamma, que transmiten a los sistemas biológicos energía suficiente como para romper enlaces atómicos y dividir moléculas en iones, positivos y negativos. A este fenómeno se le conoce como "ionización." La denominación de radiaciones no ionizantes se aplica a la porción del espectro electromagnético que posee energías de fotón demasiado débiles para romper las uniones atómicas. Incluso las RNI de alta intensidad son incapaces de provocar ionización en sistemas biológicos. En el espectro no ionizante se incluyen: la radiación ultravioleta (UV), la luz visible, la radiación infrarroja, las radiofrecuencias (RF) y microondas (MW), los campos de frecuencias extremadamente bajas (ELF), y los campos eléctricos y magnéticos estáticos (Figura 2).

La Tabla 1 contiene un resumen de las cantidades y unidades eléctricas, magnéticas y electromagnéticas que se emplearán en el presente texto*.

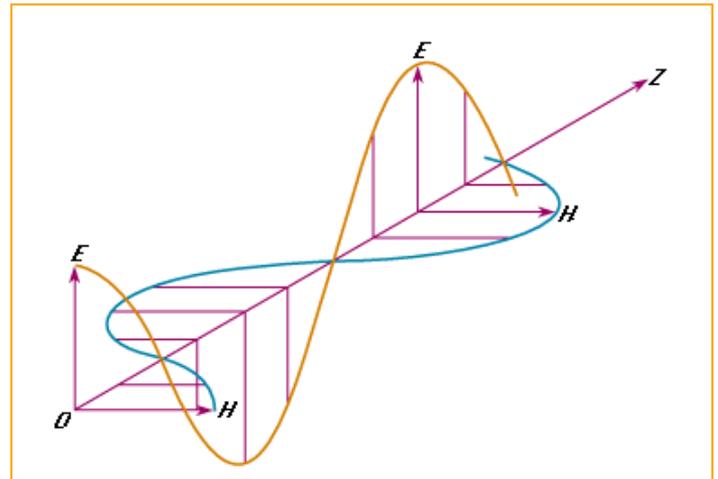


Figura 1: Los componentes eléctrico (E) y magnético (H) de una onda electromagnética siguen planos perpendiculares entre sí. La onda se transmite en el espacio (dirección O → Z en la figura) a la velocidad de la luz.

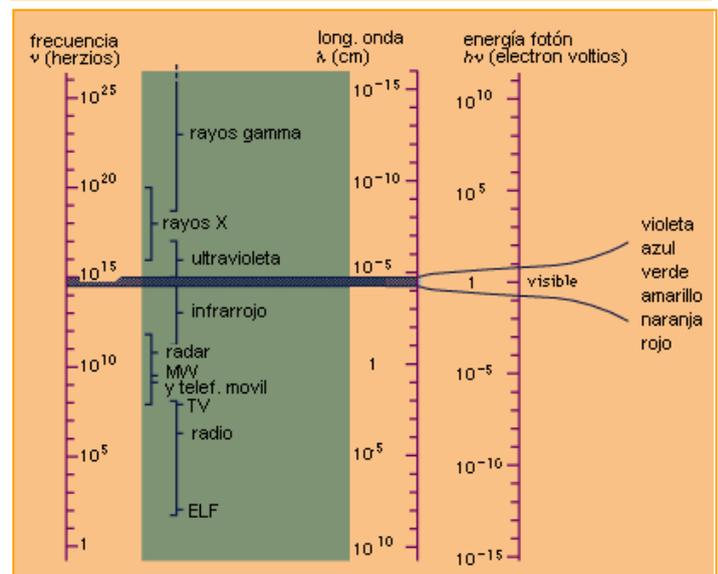


Figura 2: El espectro de frecuencias de las radiaciones electromagnéticas.

TABLA 2:
Cantidades eléctricas, magnéticas, electromagnéticas y dosimétricas, y las correspondientes unidades SI

CANTIDAD	SIMBOLO	UNIDAD
Conductividad	σ	Siemens por metro (S/m)
Corriente	I	Amperio (A)
Densidad de corriente	J	Amperio por metro cuadrado (A/m ²)
Frecuencia	f	Hertzio (Hz)
Intensidad de campo eléctrico	E	Voltio por metro (V/m)
Intensidad de campo magnético	H	Amperio por metro (A/m)
Densidad de flujo magnético	B	Tesla (T)
Permeabilidad magnética	μ	Henrio por metro (H/m)
Permisividad	ϵ	Faradio por metro (F/m)
Densidad de potencia	S	Vatio por metro cuadrado (W/m ²)
Absorción específica	SA	Julio por kilogramo (J/kg)
Tasa de absorción específica	SAR	Vatio por kilogramo (W/kg)

* Para una descripción más amplia de estas unidades, ver el texto de la Recomendación 1999/519/EC del Consejo de la Unión Europea, referido en el Apartado 5 del presente artículo.

FRECUENCIAS TÍPICAS DE FUENTES DE RNI ARTIFICIALES

- ✓ Fuentes de campos estáticos (0 Hz) son: Trenes de levitación magnética, sistemas de resonancia magnética para diagnóstico médico o sistemas electrolíticos de aplicación industrial-experimental
- ✓ De campos de frecuencias extremadamente bajas e intermedias (ELF: $0 \text{ Hz} < f \leq 300 \text{ Hz}$; IF: $300 \text{ Hz} < f \leq 10 \text{ MHz}$, respectivamente): Trenes eléctricos (16,66 - 60 Hz y sus armónicos), todo sistema relacionado con la generación, transporte o utilización de la energía eléctrica (50 o 60 Hz), detectores antirrobo, monitores de video y televisión (3 - 30 kHz), radio AM (30 kHz - 3 MHz), cocinas y hornos de inducción (300 kHz - 3 MHz) y equipos de diatermia de (3 - 30 MHz).
- ✓ De radiofrecuencias y microondas (RF/MW: $10 \text{ MHz} < f \leq 300 \text{ GHz}$) son: Radio FM (30 - 300 MHz), teléfonos móviles y las antenas de sus estaciones base, antenas emisoras para radio y televisión, hornos de microondas, monitores de vídeo, equipos de diatermia (0.3 - 3 GHz), radares y sistemas de comunicación por microondas (3 - 30 GHz).

NIVELES TÍPICOS DE EXPOSICIÓN A RNI AMBIENTALES

Los rangos de frecuencias de las RNI a que está expuesta la población, tanto en el ámbito ocupacional como en el residencial o en espacios públicos, corresponden mayoritariamente a las ELF industriales (50/60 Hz) y a RF/MW de radio, TV o telefonía móvil.

En espacios públicos:

- **ELF:** La energía eléctrica de las estaciones generadoras es distribuida hacia los centros de población a través de líneas de transmisión de alto voltaje. Mediante el empleo de transformadores, se reduce el voltaje en las conexiones con las líneas de distribución doméstica. Los campos eléctricos y magnéticos bajo las líneas de transmisión pueden ser de hasta 12 kV/m y 30 μT (microteslas), respectivamente. En las proximidades de subestaciones y estaciones generadoras, se pueden registrar campos de hasta 16 kV/m y 270 μT (Figura 3A).
- **RF:** La mayor parte de los campos RF encontrados en el ambiente proviene de emisoras de radio y TV, y de sistemas de telecomunicación. Dependiendo de las características del espacio (rural, suburbano, urbano), varía la intensidad relativa de exposición a cada una de las fuentes. Así, en ciudades con la estructura propia de las grandes urbes estadounidenses, se encontró un nivel basal promedio de niveles RF de 50 $\mu\text{W}/\text{m}^2$. Aproximadamente el 1% de los ciudadanos en dichas urbes está expuesto a niveles RF superiores a 10 $\mu\text{W}/\text{m}^2$. Se detectaron niveles superiores solamente en las proximidades de centros o puntos de transmisión y cerca de sistemas de radar.

En ambientes residenciales

- **ELF:** Los niveles de exposición residencial a campos eléctricos y magnéticos dependen de diversos factores, tales como la distancia a líneas eléctricas locales (Figura 3B), el número y tipo de electrodomésticos empleados en la vivienda, la configuración del cableado eléctrico de la casa, o el tipo de vivienda (unifamiliar, adosada, apartamento). En las inmediaciones de electrodomésticos comunes, los valores de campo eléctrico y magnético generalmente no superan los 500 V/m y los 150 μT , respectivamente. Sin embargo, los niveles de ambos parámetros se reducen notablemente a unos pocos centímetros de estos aparatos, dado que los valores correspondientes decrecen con el cuadrado de la distancia a la fuente.

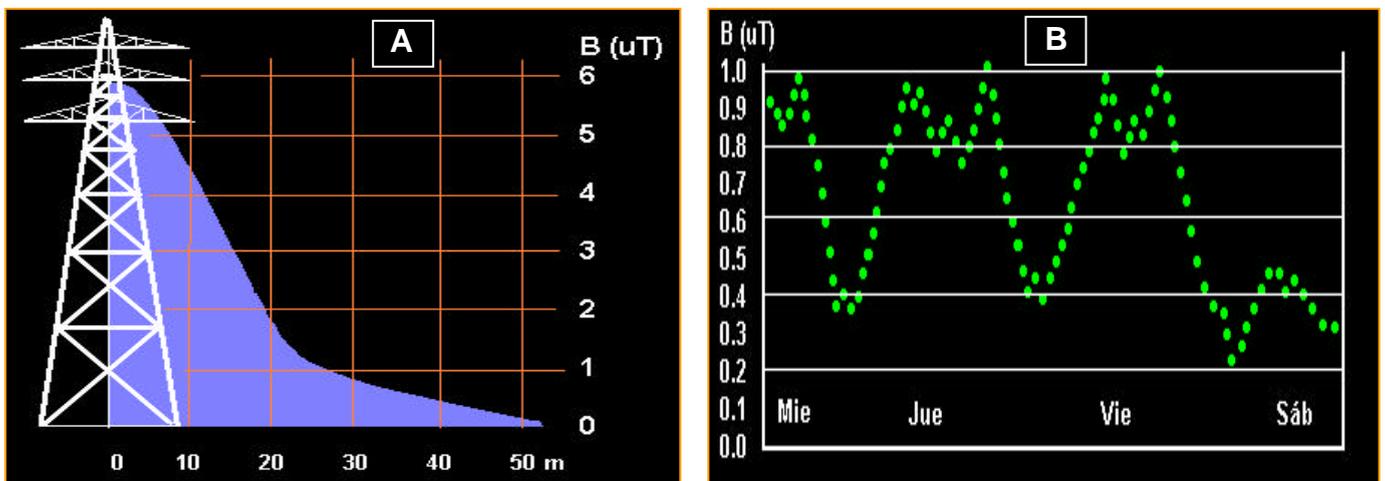


Figura 3: Valores de densidad de flujo magnético (en μT) medidos en las proximidades de una línea de transmisión ($I = 50 \text{ Hz}$). En A se puede comprobar cómo los niveles se reducen significativamente al aumentar la distancia a la línea. En B se muestran los niveles medidos, a lo largo de tres días, en un único punto de una vivienda unifamiliar situada a 30 metros de la misma línea. Como puede comprobarse, los valores de campo registrados dependen directamente de la carga de la línea (mayor en horarios y días laborales)



- **RF:** Las fuentes de campos RF residenciales incluyen los hornos de microondas, los teléfonos móviles, las alarmas antirrobo, los monitores de video y las pantallas de TV. En términos generales, el nivel basal de radiación emitido por estos sistemas es relativamente bajo, en el orden de las decenas de $\mu\text{W}/\text{m}^2$.

En ambientes ocupacionales:

- **ELF:** Existen campos eléctricos y magnéticos ELF en las proximidades de grandes equipos eléctricos industriales. Los trabajadores encargados del mantenimiento de las líneas de transmisión y distribución pueden verse expuestos a campos eléctricos y magnéticos intensos. Se han registrado campos superiores a 25 kV/m y 2 mT (militeslas) en estaciones generadoras y en subestaciones. Los soldadores pueden verse expuestos a campos de hasta 130 mT a causa de su actividad. En las proximidades de hornos de inducción y cerca de células electrolíticas industriales, existen campos de hasta 50 mT. Sin embargo, en la mayoría de los trabajos, tales como oficinas, hospitales, laboratorios, etc., los niveles de exposición son muy inferiores, con valores medios por debajo de 1 μT y picos de corta duración (segundos - minutos) que raramente superan los 10 μT (Figura 4) [Úbeda y col. , 2000].
- **RF:** Existen diversos procesos industriales que emplean campos RF. Es el caso de los calentadores dieléctricos para laminado de madera y sellado de plásticos, calentadores industriales por inducción, hornos de microondas, equipos de terapia por diatermia o instrumental electroquirúrgico para corte y coagulación de tejidos. Existe la posibilidad de sobreexposición a RF para los trabajadores que usan estos equipos, ya que en sus proximidades pueden registrarse niveles que superan las decenas de W/m^2 . También pueden darse niveles elevados de exposición RF para aquellos trabajadores de industrias de la telecomunicación que operan en las proximidades de antenas emisoras. Asimismo, se ha detectado un especial riesgo de sobreexposición en un sector del personal militar que trabaja cerca de radares.

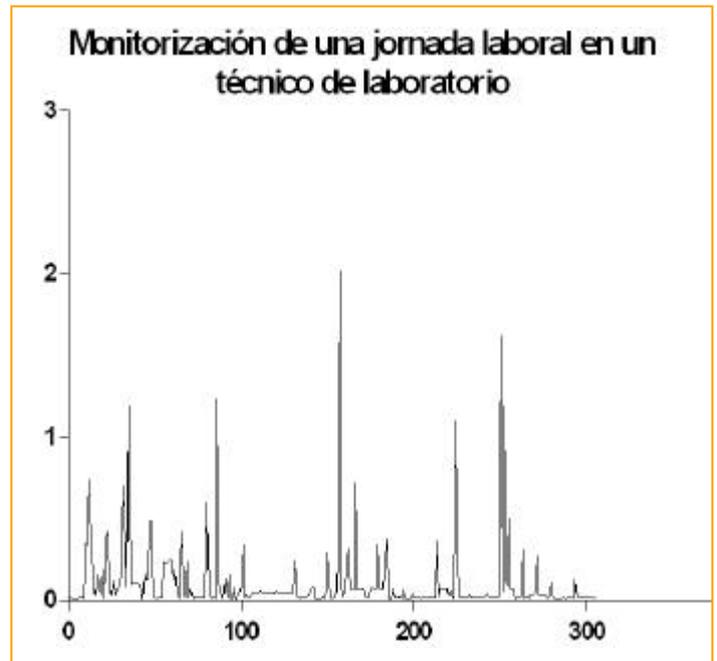


Figura 4: Niveles de densidad de flujo magnético (μT) de campos ELF (50 Hz y sus armónicos) durante la jornada laboral de un trabajador en un laboratorio. El sujeto portó en su cintura un magnetómetro durante sus tareas normales. Se registraron niveles intermedios, típicos de exposiciones ocupacionales. Como puede apreciarse en el magneto-grama, el sujeto cambió varias veces de tipo de actividad a lo largo de la jornada (Tomado de Úbeda y col., 2000).

2. PERCEPCIÓN DE RIESGO ANTE EXPOSICIONES A RNI; LA NECESIDAD DE UNA REGULACIÓN INTERNACIONAL

La información que en la actualidad poseemos sobre los efectos biológicos y los efectos potencialmente nocivos de las exposiciones a radiaciones no ionizantes es todavía limitada e incompleta. En estas condiciones, el establecimiento de factores de seguridad radiológica para el amplio rango de frecuencias y de modulaciones de frecuencias existentes en el espectro no ionizante, resulta complicado sin una base robusta, capaz de despejar posibles incógnitas sobre la idoneidad de tales factores. Existen, además, algunas indeterminaciones sobre circunstancias de las que se sospecha que pudieran influir en la respuesta de los sujetos a las exposiciones a RNI. Entre ellas cabe destacar las siguientes:

1. Los efectos de la exposición en ambientes con condiciones extremas de temperatura y en sujetos con un alto nivel de actividad física. Ambas circunstancias podrían comprometer el funcionamiento de los mecanismos de equilibrio térmico de los individuos expuestos [Michaelson y Elson, 1996].
2. La potencial hipersensibilidad a la exposición por parte de grupos en determinados rangos de edad (ancianos y niños) y en sujetos enfermos o bajo tratamiento con ciertos tipos de fármacos.
3. Las diferencias de absorción de energía electromagnética en función del peso y complejión de los diferentes sujetos.

Teniendo en cuenta las citadas carencias en el estado actual de nuestro conocimiento sobre esta materia y, al mismo tiempo, reconociendo que existe una necesidad de establecer unos criterios adecuados de seguridad ante exposiciones a RNI, cuya presencia se hace significativa en un número creciente de ambientes ocupacionales y residenciales, las autoridades sanitarias nacionales e internacionales han optado por formar comités de expertos encargados de estudiar el problema y elaborar paquetes de normas consensuadas para la protección de los ciudadanos ante RNI. La **Organización Mundial de la Salud (OMS)** encargó la citada labor a la **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)***. Esta comisión publicó sus últimas conclusiones en 1998. Un año después, el **Consejo de la**

*<http://www.icnirp.de>



Unión Europea (CUE) hizo suyos los criterios y conclusiones de ICNIRP y elaboró una Recomendación para la protección del público en general (no aplicable a los trabajadores) ante eventuales efectos nocivos de la exposición a campos electromagnéticos (CEM) en el espectro 0 Hz - 300 GHz. España, al igual que la mayor parte de los países europeos, firmó la Recomendación en julio de 1999.

La literatura científica revisada en el presente texto, y los criterios seguidos para su evaluación, coinciden en términos generales con los empleados por ICNIRP. Sin embargo, en nuestro documento tendremos también en cuenta datos relevantes recientes, que no habían sido publicados en las fechas en que ICNIRP emitió sus directrices. Incluiremos, asimismo, datos sobre niveles de seguridad que están vigentes en algunos países europeos y que se basan en criterios diferentes de los empleados por ICNIRP en la elaboración de sus conclusiones.

LOS CRITERIOS ICNIRP PARA LA ELABORACIÓN DE SUS LÍMITES DE EXPOSICIÓN

El grupo de expertos de ICNIRP llevó a cabo un estudio exhaustivo de la literatura científica y realizó una "evaluación de la credibilidad de los datos publicados." En esta evaluación sólo se tuvieron en cuenta aquellos efectos que los citados expertos calificaron como "bien establecidos." Concretamente, la potencial inducción de enfermedades (determinados tipos de cáncer, principalmente) por exposición crónica a CEM no fue considerada bien establecida y, por tanto, los límites ICNIRP están basados en efectos inmediatos sobre la salud. Dichos efectos comprenderían: la estimulación de nervios periféricos y músculos, shocks y quemaduras provocados por contactos con objetos conductores, e incrementos de temperatura de los tejidos causados por absorción de energía durante exposiciones a CEM. En el caso de los potenciales efectos de exposiciones a largo plazo, tales como los citados incrementos en el riesgo de cáncer, ICNIRP entiende que los datos disponibles son insuficientes para proporcionar una base para el establecimiento de restricciones a la exposición. Ello, a pesar de que "la investigación epidemiológica ha proporcionado indicaciones, aunque no convincentes" de una asociación entre posibles efectos cancerígenos y exposiciones a campos de 50/60 Hz con densidades de flujo magnético sustancialmente más bajas que las recomendadas por ICNIRP.

La literatura sobre los efectos *in vitro* (cultivos de células o tejidos) de exposiciones cortas a CEM ELF o de amplitud modulada a ELF fue también evaluada por ICNIRP. De acuerdo con esta comisión, existen numerosos datos de respuestas tisulares y celulares a exposiciones cortas a CEM. Sin embargo, en estos casos, el tipo de relación dosis-respuesta no resulta evidente. ICNIRP considera que los resultados de los estudios *in vitro* son de interés limitado a la hora de valorar posibles efectos de los CEM sobre la salud, dado que muchas de las respuestas *in vitro* no han sido comprobadas sobre organismos completos (*in vivo*). En consecuencia, los estudios *in vitro* por sí solos no fueron considerados una base suficiente para valorar posibles efectos de los CEM sobre la salud.

Como veremos en secciones posteriores de este texto, los citados criterios, a pesar de contar con la aprobación de la mayoría de los expertos y de las autoridades responsables de programas internacionales de salud pública y medio ambiente, han sido cuestionados en algunos círculos especializados, y son objeto de discusión en la actualidad.

CRITERIOS DE NOCIDIDAD: EFECTOS BIOLÓGICOS vs. EFECTOS NOCIVOS

La valoración de las implicaciones de los posibles efectos de las RNI no puede hacerse sin tener en cuenta el hecho de que la identificación de una respuesta biológica no implica directamente la existencia de un efecto perjudicial para la salud. Así, los sistemas biológicos responden a estímulos externos de diversa naturaleza, y lo hacen siguiendo patrones fisiológicos de respuesta que permiten al sistema relacionarse con su medio y adaptarse a este de forma equilibrada. Estas respuestas normales son ejemplos de efectos biológicos. Algunos efectos, por el contrario, pueden ser nocivos, pero en muchos casos las repercusiones que aquellos pudieran tener sobre la salud son irrelevantes o, simplemente, indeterminadas. Por consiguiente, para los agentes químicos o físicos capaces de provocar en humanos respuestas significativas, su consideración de peligrosos o inocuos habrá de ser determinada en función de las características de la respuesta. Entre dichas características, la OMS incluye: la reversibilidad o irreversibilidad del efecto cuando el agente es retirado, la existencia o no de mecanismos fisiológicos capaces de compensar eficazmente el efecto, y el nivel de probabilidad de que la respuesta conduzca a efectos nocivos para el bienestar físico, mental o social del sujeto [Repacholi y col., 1998].

EXPOSICIÓN OCUPACIONAL vs. EXPOSICIÓN DEL PÚBLICO EN GENERAL

Se consideran exposiciones ocupacionales las que son recibidas por aquellos trabajadores que conocen, en términos generales, sus condiciones de exposición, y que están entrenados para identificar riesgos potenciales y tomar las precauciones adecuadas. Por el contrario, el público en general se define como el conjunto de individuos, de cualquier edad y en cualquier estado de salud, que no son necesariamente conscientes de estar expuestos a un determinado tipo de RNI y a los que no se les supone una capacidad para tomar precauciones encaminadas a minimizar o evitar la exposición. Sobre la base de estos criterios, ICNIRP establece para las exposiciones del público en general unos límites que son netamente más restrictivos que los recomendados para las exposiciones ocupacionales. El Consejo de la Unión Europea, por su parte, sólo contempla límites para exposiciones del público en general. Estos límites coinciden exactamente con los recomendados por ICNIRP.



3. REVISIÓN DE BIOEFECTOS RELEVANTES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LÍMITES ANTE EXPOSICIONES A FRECUENCIAS 0 Hz - 100 kHz

a. **Desarrollo embrionario.** En el presente no hay duda de que la embriogénesis de diversas especies de vertebrados puede ser alterada, en determinadas condiciones, por campos ELF [ver, por ejemplo, Úbeda y col., 2001]. Sin embargo, los estudios realizados sobre mamíferos indican que su desarrollo embrionario no es afectado por CEM de 50/60 Hz y densidades de flujo $B < 100 \mu\text{T}$ [Tenforde, 1996]. Tampoco poseemos datos que muestren efectos teratógenos en fetos de mujeres gestantes expuestas a estos CEM en medios residenciales u ocupacionales convencionales.

b. **Cáncer de mama en animales.** Respecto a hipotéticos efectos cancerígenos, no existe evidencia de que los campos de 50/60 Hz puedan afectar la estructura del ADN, por lo que resulta improbable que dichos campos actúen como *iniciadores* del proceso de transformación neoplásica [Tenforde, 1996]. Si estos campos resultasen ser cancerígenos, actuarían más bien como *promotores*, acelerando el crecimiento (o impidiendo la muerte) de células que hubieran sufrido daño genético anterior. Tales efectos epigenéticos podrían darse a través de alteraciones en las vías de señalización celular o en la expresión génica. Por ese motivo, se han realizado preferentemente estudios dirigidos a detectar posibles efectos de campos de 50/60 Hz en la evolución de tumores previamente iniciados en roedores mediante carcinógenos químicos o radiaciones ionizantes. En general, de entre estos estudios, aquellos que han detectado un efecto carcinógeno lo han hecho en tumores de piel o de mama, y en animales expuestos a campos muy intensos (de hasta 2 mT) [Liburdy y Löscher, 1997]. Sólo dos trabajos [Mevissen y col., 1993; Löscher y col., 1994] procedentes de un mismo laboratorio, han mostrado una tendencia de incremento en la tasa de desarrollo tumoral en ratas expuestas a campos débiles, en el rango de los microteslas. En ambos estudios se observó que dicho efecto iba acompañado de una reducción de la secreción nocturna de melatonina, una hormona supuestamente oncostática cuyas características se describen en el punto c de este Apartado. Un intento de réplica independiente de estos estudios, realizado recientemente, no tuvo éxito. En tanto los estudios citados no sean replicados y, en su caso, ampliados mediante investigaciones independientes, no es posible emitir conclusiones acerca de los posibles efectos de los campos de 50/60 Hz sobre la promoción tumoral en cáncer de mama.

c. **La Hipótesis de la Melatonina.** La melatonina (MEL), el mediador químico de la glándula pineal (GP), es sintetizada y secretada por dicha glándula siguiendo un ciclo circadiano de luz-oscuridad ambiental. La síntesis y secreción de MEL es estimulada por la oscuridad e inhibida por la luz. Con el comienzo de la escotofase se inicia la síntesis y secreción de MEL al torrente sanguíneo, alcanzándose los valores más altos a mitad de la noche (entre las 2 y las 4 a.m. en humanos). Con el comienzo de la fase de luz, los niveles de MEL en sangre se reducen notablemente y se mantienen en valores muy bajos hasta la llegada de la noche. Además de su función de regulación de ciclos circadianos y circanuales de actividad, la melatonina y sus análogos pueden actuar, según indican los resultados de diversos estudios, como poderosos oncostáticos, alterando el crecimiento de células cancerosas, tanto *in vivo* como *in vitro*. Así se ha probado en ratas, en las que la actividad de su GP había sido reprimida mediante pinealectomía [Tamarkin y col., 1981] o por exposición constante a luz [Kothari y col., 1984; Shah y col., 1984]. La administración de MEL se ha mostrado efectiva en la supresión de cáncer mamario inducido por el carcinógeno químico DMBA [Kothari, 1987; Kothari y Subramanian, 1992].

Según la denominada *Hipótesis de la Melatonina* [Stevens, 1992, 1996] que tomó fuerza en la primera mitad de los años 90, y que está todavía por comprobar, una reducción en los niveles de melatonina en sangre causada por exposiciones a CEM, tendría como consecuencia una desregulación de la síntesis de esteroides y un incremento de la incidencia de cánceres hormona-dependientes (mama, próstata). En efecto, existe evidencia de que campos eléctricos y magnéticos relativamente débiles, de 50/60 Hz, pueden suprimir la síntesis de melatonina en algunos mamíferos (roedores, generalmente). Así, se ha descrito una disminución de la concentración de MEL en suero de ratas [Selmaoui y Touitou, 1995; Kato y col., 1993, 1994], hámsters [Yellon, 1994] y ratones [Löscher y col., 1994] expuestos a campos magnéticos. La exposición de ratas a un campo eléctrico de ELF reducía la actividad de enzimas que intervienen en la síntesis de la MEL [Wilson y col., 1981, 1986] o la concentración de MEL en sangre [Grotta y col., 1994]. Sin embargo, Bakos y col. (1995; 1997) y John y col. (1998) no encontraron una disminución en los niveles del principal metabolito de la MEL, la 6-sulfatoxymelatonina, en ratas expuestas a CM. Levine y col. (1995) tampoco encontraron ningún efecto sobre el metabolismo de la GP en ratones expuestos a CM. Tampoco se han encontrado efectos consistentes de CEM sobre la síntesis de MEL en otros animales, tales como ovejas y primates no humanos [Rogers y col., 1995; 1997].

Algunos datos epidemiológicos han sido interpretados como pruebas indirectas de una acción bloqueadora de la síntesis de MEL en grupos humanos expuestos a campos ELF. Así, Van Wijngaarten y col. (2000) encuentran, en un estudio caso-control, un incremento significativo en el índice de suicidios en trabajadores que supuestamente habían estado expuestos crónicamente a campos de 50/60 Hz. Los índices de exposición fueron estimados en función de la categoría profesional de los sujetos, y de un muestreo de mediciones en diversos ambientes ocupacionales. Los autores concluyen que este dato constituye evidencia de asociación entre exposición ocupacional a CEM y suicidio. Según proponen los autores, la relación causal entre exposición y suicidio podría venir mediada por cuadros de depresiones supuestamente inducidos por la presencia crónica de bajos niveles de MEL en la sangre de los sujetos expuestos. Esta interpretación de los resultados epidemiológicos ha sido criticada por especulativa y, una vez más, la metodología de cuantificación de la exposición ha sido considerada pobre (ver Úbeda y col., 2000)



Por lo que se refiere a experimentos realizados con voluntarios humanos, los sujetos fueron sometidos a exposiciones cortas (una noche) con CEM de 60 Hz, 1 mT o 20 mT intermitentes [Graham, 1994, 1996a] o continuas [Graham, 1996b], o a un CM de 50 Hz y 100 mT continuo [Selmaoui y col., 1996]. Estos trabajos no mostraron cambios significativos en la concentración de MEL en suero de los sujetos. Sin embargo, algunos estudios más recientes sí han proporcionado indicios de efectos sobre niveles de MEL y/o sobre el sueño en sujetos expuestos en su medio laboral [Burch y col., 1999], y en voluntarios sometidos a campos intensos [Åkerstedt y col., 1999; Graham y Cook, 1999]. Pero en estos casos los efectos resultaron ser sutiles, se detectaron en una baja proporción de sujetos y desaparecían inmediatamente una vez eliminada la exposición.

En consecuencia, siendo contradictorios y faltos de consistencia los datos con que contamos actualmente, la conclusión más aceptada es que en el presente no existe confirmación de que la exposición a campos ambientales típicos altere significativa e irreversiblemente los niveles de melatonina en humanos. No obstante, las indeterminaciones surgidas de los citados datos contradictorios deben ser resueltas, por lo que la ampliación del conocimiento científico respecto a los posibles efectos de campos eléctricos y magnéticos intensos sobre la GP y la síntesis de MEL constituye hoy una prioridad [Repacholi y col., 1998].

d. Otras formas de cáncer en animales: Una revisión general de los datos experimentales muestra que, con la excepción de los citados estudios sobre tumores mamarios, existe poca evidencia indicativa de que campos magnéticos ELF tengan un efecto cáncer-promotor. Sobre la base de su revisión de la literatura, ICNIRP concluye que no existe por el momento evidencia "convinciente" de efectos cancerígenos de la exposición a CEM ELF. Sin embargo la Comisión entiende que son necesarios estudios más completos sobre modelos animales para clarificar los posibles efectos de los campos ELF sobre las señales celulares y la regulación neuroendocrina, factores que pueden influir en el desarrollo de tumores a través de la promoción de la división en células previamente iniciadas. Se considera, pues, que los estudios realizados sobre sistemas animales y celulares no han demostrado efectos adversos de exposiciones ELF cuando la densidad de las corrientes inducidas en los tejidos es $J \leq 10 \text{ mA/m}^2$. A valores superiores ($J = 10\text{-}100 \text{ mA/m}^2$) sí se han observado efectos consistentes tales como cambios funcionales en el sistema nervioso [Tenforde, 1996].

e. Cáncer y enfermedades neurodegenerativas en humanos: Los datos sobre riesgos de cáncer asociados a la exposición a campos ELF en sujetos que viven en las proximidades de líneas de distribución eléctrica muestran una aparente consistencia, revelando un moderado incremento en la incidencia de leucemia en niños y no de otros tipos de cánceres. Así, un estudio internacional reciente que analiza los resultados de 9 trabajos epidemiológicos independientes, ha encontrado que niños expuestos crónicamente a campos de 0,4 mT o más presentarían una probabilidad de desarrollar leucemia que duplica la observada en sujetos no expuestos, o expuestos a niveles más bajos (Ahlbom y col., 2000). Sin embargo, resultados negativos de diversos estudios anteriores habían sido interpretados por algunos expertos como indicativos de que la citada asociación es cuestionable (ver Wartenberg, 1998 para un metaanálisis de la epidemiología del cáncer). Las bases de una supuesta relación entre leucemia y exposición a campos ELF son desconocidas, por lo que algunos investigadores especulan sobre la posibilidad de que otros factores, generalmente agentes polucionantes químicos potencialmente ligados a la presencia de las líneas, pudieran ser los verdaderos causantes de la débil asociación descrita. Por tanto, y a falta de un soporte experimental más firme, ICNIRP ha considerado que los datos epidemiológicos son insuficientes para justificar la recomendación de niveles de seguridad más restrictivos.

Existen también datos sobre incrementos en el riesgo de ciertos tipos de cáncer, tales como leucemia, tumores del sistema nervioso y cáncer de mama entre trabajadores expuestos crónicamente a campos relativamente intensos [Tynes y col., 1994; 1996; Floderus y col., 1994; Feichting y col., 1998]. Asimismo, un grupo de estudios epidemiológicos recientes ha revelado una tendencia al incremento de riesgo de algunas enfermedades neurodegenerativas (Alzheimer y esclerosis múltiple, generalmente) en trabajadores de empresas e industrias relacionadas con la generación y distribución de energía eléctrica [Davanipour y col., 1997, Savitz y col., 1998; Johansen y col., 1999]. La metodología empleada en muchos de estos estudios es objeto de crítica debido a una ausencia de dosimetría de campos para dichos trabajadores y a la existencia de posibles factores de confusión (presencia de tóxicos volátiles en el medio laboral, por ejemplo) que no fueron tenidos en cuenta en algunas de las investigaciones. Dado que en otros estudios similares no se ha encontrado asociación entre cáncer y exposición ocupacional a campos ELF, ICNIRP-CUE entienden que la evidencia existente sobre incidencia de cáncer en trabajadores del sector eléctrico es limitada e insuficiente.

f. En definitiva, los efectos de los CEM de frecuencias bajas se deberían a la inducción de cargas y corrientes eléctricas capaces de afectar al funcionamiento de células y tejidos eléctricamente excitables, como las células del sistema nervioso. Dado que en los seres vivos existen de por sí corrientes eléctricas endógenas, provocadas por reacciones químicas normales, se ha propuesto que sólo aquellos CEM capaces de inducir corrientes significativamente más intensas que las fisiológicas podrían ser susceptibles de provocar efectos adversos inmediatos. Aunque, como veremos más adelante, diversos autores han desarrollado modelos biofísicos que pretenden explicar algunos efectos atribuidos a CEM muy débiles, el mecanismo de respuesta basado en la estimulación de células excitables eléctricamente es hoy el único admitido universalmente. En consecuencia, las restricciones propuestas por ICNIRP-CUE se basan en este criterio.



4. REVISIÓN DE BIOEFECTOS RELEVANTES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LÍMITES PARA EXPOSICIONES A FRECUENCIAS 100 kHz - 300 GHz.

a. **Efectos térmicos de las RF en general.** La evidencia experimental de la que disponemos en la actualidad indica que exposiciones de 30 minutos a CEM con SAR de 1 a 4 W/kg provocan en humanos en reposo incrementos de temperatura iguales o inferiores a 1 °C. Los estudios experimentales han mostrado indicios de la existencia de un umbral en el mismo rango de SAR para respuestas conductuales en mamíferos de laboratorio. La exposición a SAR más intensos puede superar la capacidad termorreguladora de los sujetos y provocar niveles peligrosos de hipertermia. Un número importante de trabajos sobre roedores ha puesto de manifiesto el amplio rango de daño tisular provocado por incrementos de temperatura de 1 - 2 °C en todo el cuerpo o en diferentes órganos o miembros. La sensibilidad específica de cada uno de los distintos tejidos del cuerpo varía enormemente, pero el umbral para efectos irreversibles, incluso en los tejidos más sensibles, está por encima de los 4 W/kg cuando la exposición tiene lugar en ambientes y sujetos normales. Estos datos constituyen la base sobre la que ICNIRP ha establecido el nivel de los 0,4 W/kg como límite de seguridad recomendado para exposiciones ocupacionales. Este límite debería proporcionar un amplio margen de seguridad para otras condiciones (ver Apartado 2) como son la temperatura y humedad ambientales extremas, o el nivel de actividad física. Para exposiciones del público en general, el límite ICNIRP-CUE (0,08 W/kg) es todavía más restrictivo.

Los datos correspondientes a la respuesta humana a CEM de alta frecuencia capaces de producir niveles significativos de hipertermia han sido obtenidos a partir de investigaciones sobre voluntarios sometidos a exposiciones controladas, y de estudios epidemiológicos sobre trabajadores expuestos a fuentes tales como radares, sistemas de terapia por diatermia o de sellado por microondas. Estos datos confirman la validez de las conclusiones obtenidas de los trabajos de laboratorio, en el sentido de que niveles de hipertermia superiores a 1 °C pueden provocar efectos nocivos sobre la salud de los sujetos expuestos.

La exposición a niveles no térmicos de CEM pulsados lo suficientemente intensos, puede provocar efectos tales como fenómenos auditivos o diversas respuestas conductuales. Hace años, algunos estudios dieron cuenta de observaciones sobre potenciales daños severos en la retina de sujetos expuestos a CEM pulsados. Aquellos resultados, sin embargo, no han sido reproducidos posteriormente en trabajos independientes. Asimismo, algunos datos epidemiológicos, principalmente sobre trabajadores expuestos a SAR relativamente elevados, pero incapaces de inducir hipertermia, mostraron indicios de potenciales efectos adversos sobre la salud [Taskinen y col., 1990; Larsen, 1991; Ouellet-Hellstrom y Stewart, 1993]. Dichos trabajos se enfocaron preferentemente en efectos sobre el desarrollo embrionario (aborto, pérdida fetal, teratogénesis o problemas perinatales) y en posibles incrementos de riesgo de cáncer entre sujetos expuestos. Estos efectos no han podido ser confirmados hasta el presente.

En su conjunto, los estudios sobre público en general y sobre trabajadores no han aportado pruebas firmes de una asociación significativa entre efectos nocivos para la salud y exposiciones en ambientes ocupacionales o residenciales típicos. Sin embargo, la cuestión no ha quedado zanjada y en la actualidad se están llevando a cabo varios proyectos de investigación epidemiológica dirigidos a dar una respuesta a las presentes indeterminaciones.

b. **Estudios experimentales: efectos no térmicos.** Tampoco los resultados de los estudios de laboratorio sobre sistemas biológicos *in vivo* y *in vitro* expuestos a niveles no térmicos de RNI de altas frecuencia, han demostrado efectos teratógenos o carcinógenos consistentes. Sin embargo, sí existe evidencia experimental de que pueden darse respuestas biológicas en algunos sistemas expuestos a RNI relativamente débiles. Por ejemplo, se ha descrito muy recientemente un incremento significativo de síntesis de proteínas de choque térmico en invertebrados expuestos a la acción de niveles atérmicos de RF [Pomerai y col., 2000]. Asimismo, Lay y col. (2000) han mostrado que ratas expuestas a RF pulsadas (SAR = 1,2 W/kg) durante 1h pueden ver mermada su memoria-a-largo-plazo. Este tipo de evidencia merece ser estudiada mejor y los mecanismos de respuesta atérmica deben ser investigados y descritos. No obstante, los bioefectos observados en estos trabajos experimentales no constituyen una prueba de potenciales efectos nocivos sobre la salud humana de las citadas exposiciones (ver "Criterios de Nocividad" en el Apartado 2).

c. **Las RF de amplitud modulada empleadas en telecomunicación:** Efectos en animales. Un elevado número de estudios sobre bioefectos de CEM de amplitud modulada (AM), que en general emplearon niveles bajos de exposición, han proporcionado resultados contradictorios. Así, en lo que se refiere a posibles **efectos cancerígenos en animales** (roedores, generalmente), los estudios, en su conjunto, no han mostrado indicios consistentes de incrementos en la incidencia de distintos tipos de cánceres (para una revisión ver Úbeda y Trillo, 1999). Una excepción, que ha sido ampliamente difundida, la constituyen los resultados publicados por Repacholi y colaboradores en 1997. Estos investigadores emplearon ratones con modificaciones genéticas que les hacían proclives al desarrollo de linfomas. Los animales fueron expuestos intermitentemente (1 h/día) durante 18 meses, a RF intensas de señal modulada, imitando las características de las ondas típicas de telefonía móvil. Al final del estudio se encontró un incremento modesto, pero estadísticamente significativo, en la frecuencia de linfomas en la muestra expuesta a RF. No se encontraron cambios en la frecuencia de otros tipos de cánceres. Este trabajo, a pesar de sus potenciales repercusiones, todavía no ha sido replicado independientemente, por lo que no es posible valorar en términos de salud humana la relevancia de los datos descritos.

Otro indicio de potencial nocividad fue el descrito hace años por Cleary y col. (1990). Estos autores encontraron un exceso de tumores en ratas inyectadas intracranalmente con un carcinógeno químico y expuestas posteriormente a frecuencias de 27 y 2450 MHz con SAR de 5 y 25 W/kg. Sin embargo, un estudio reciente [Roti Roti, 1999], empleando una metodología similar a la de Cleary, no ha encontrado efectos sobre el crecimiento y desarrollo de los tumores inducidos químicamente.

También se han descrito **otros efectos en animales**, tales como alteraciones electrofisiológicas y cambios en la transmisión sináptica (comunicación entre células nerviosas) en tejido nervioso y en cerebros expuestos a radiaciones RF, y se ha especulado sobre potenciales alteraciones en la permeabilidad de la barrera hematoencefálica en exposiciones prolongadas. De cualquier forma, la validez de los datos deberá ser determinada mediante réplica independiente y, en su caso, los estudios habrían de ser ampliados mediante investigación adicional.

En resumen, un análisis general de los resultados obtenidos hasta el presente indica que los efectos de los CEM AM varían dependiendo de los parámetros de exposición, del modelo biológico empleado y del blanco biológico estudiado. En general, los efectos observados son sutiles y difíciles de interpretar en términos de una potencial nocividad de exposiciones a niveles atóxicos.

d. Las RF moduladas de telefonía móvil: Posibles efectos sobre la salud. El espectacular incremento que ha experimentado en los últimos años el número de usuarios de la telefonía móvil, justifica que dediquemos un apartado completo a los estudios en humanos expuestos a las RF típicas de este medio de telecomunicación.

Conviene, en primer lugar, señalar que la energía emitida por las **antenas de telefonía móvil** instaladas en postes o en azoteas es relativamente baja (Figura 5), por lo que no cabe esperar que de la exposición a sus emisiones, incluso a pocos metros de distancia, se deriven efectos térmicos nocivos para la salud. Así lo indican también las extrapolaciones de datos experimentales sobre modelos *in vivo* e *in vitro* [revisión por Úbeda y Trillo, 1999].

Respecto al **teléfono móvil (TM)**, se ha sugerido que su uso prolongado y frecuente podría provocar dolores de cabeza [Frey, 1998]. Así, un estudio epidemiológico realizado por Mild y col., (1998) entre usuarios suecos y noruegos de teléfonos móviles, indicaba que éstos mostraban una tendencia a declararse aquejados de dolor de cabeza con más frecuencia que los usuarios de teléfonos convencionales. El estudio, sin embargo, no se considera concluyente debido a limitaciones metodológicas y a potenciales diferencias socioculturales entre las dos muestras comparadas. Posteriormente se ha realizado un estudio entre voluntarios que declaraban sentir dolores de cabeza, ansiedad y otros síntomas inespecíficos, mientras usaban su TM. Cuando el uso del teléfono se hizo en condiciones controladas y bajo la supervisión de los investigadores, los síntomas referidos no se presentaron [Hietanen y Hamalainen, 2000]. Por su parte, Leeuwen y col. (1999) han descrito que, en las peores condiciones de empleo y con el modelo de teléfono de mayor potencia de emisión (máxima potencia: 1,6 W/kg), podrían darse, en zonas intracraneales inmediatas a la antena del teléfono, microincrementos de temperatura inferiores o iguales a 0,1 °C. Teniendo en cuenta que el tejido nervioso del cerebro, por su necesidad de equilibrio homeotermo, está muy fuertemente vascularizado, se calcula que los hipotéticos microincrementos de temperatura serían disipados inmediatamente por la sangre circulante. Así, los autores del trabajo citado indican que "no cabe esperar efectos duraderos derivados de la exposición." (Figura 6).

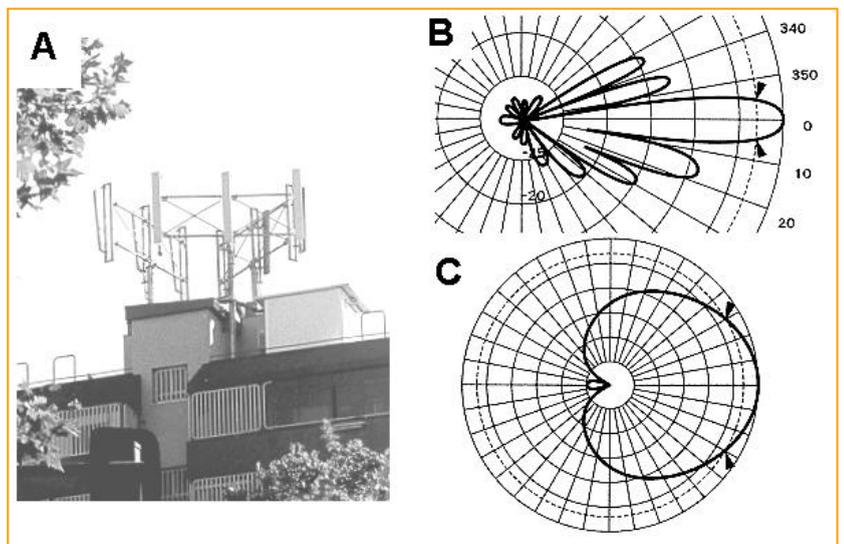


Figura 5: Emisiones RF de antenas de telefonía móvil. **A:** Grupo de antenas sectoriales montadas en una azotea, en una configuración típica de áreas urbanas. **B:** Sección vertical del esquema de emisiones, en el campo cercano, de una antena (horizontal: 0°). **C:** Sección horizontal de la emisión.

Por lo que se refiere a la **epidemiología del cáncer en humanos**, una publicación reciente de Moulder y colaboradores (1999) presenta una revisión crítica de los estudios experimentales y epidemiológicos más relevantes en los últimos años. Los autores afirman. "Los estudios epidemiológicos sobre radiación RF no sugieren una asociación causal entre cáncer y exposición a las RF, pero los estudios son escasos y todos ellos presentan deficiencias en la cuantificación de la exposición". En 1999 se presentaron dos trabajos similares sobre usuarios de teléfonos móviles, que fueron causa de cierta controversia debido a las posibles implicaciones de sus resultados en la etiología del cáncer. Uno de estos estudios, realizado por Muscat, no detectó incremento de cánceres cerebrales en general, aunque se encontró un riesgo incrementado de tumores en el lado del cerebelo en el que se aplicaba el TM. No obstante, el mismo incremento se detectó en usuarios de teléfonos convencionales. El estudio reporta un incremento significativo estadísticamente (2-3 veces más que en controles) de tumores neuroepiteliales. Sin embargo no se encontró efecto de dosis en la respuesta (el riesgo no era mayor para aquellos sujetos que usaron más el TM). En el segundo estudio, Hardell y col. compararon frecuencias

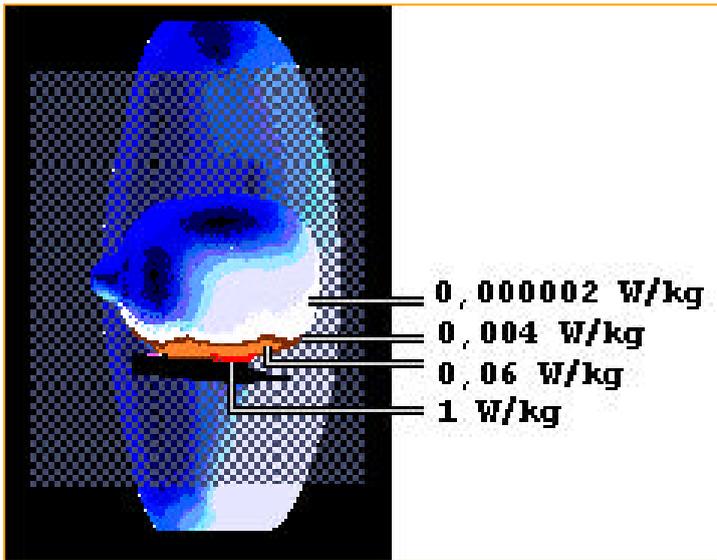


Figura 6: Vista axial de busto humano (mirando hacia la izquierda de la página) con un teléfono móvil aplicado en el pabellón auditivo izquierdo. Las mayores tasas de absorción (SAR) se registran en la oreja y sus inmediaciones (1 W/kg). Los valores decrecen significativamente con la distancia a la antena. En la región temporal del cráneo se dan SAR entre 0,004 y 0,06 W/kg. La mayor parte del cerebro recibe dosis inferiores a 1 μ W/kg.

de cánceres cerebrales entre usuarios de TM y no usuarios (controles). No se observaron diferencias. Se encontró una tendencia, aunque no significativa estadísticamente, a un exceso en la frecuencia de tumores en el lóbulo temporal/occipital derecho (la región más próxima a la antena durante el uso del teléfono) para sujetos que usaban el teléfono con la mano derecha: (2,45 veces más entre los usuarios de TM). Asimismo, se encontró un incremento no significativo en la frecuencia de tumores en el lóbulo temporal/occipital izquierdo en sujetos que usaban el teléfono con la mano izquierda (2,40 veces más entre los usuarios de TM). Al valorar la relevancia de los resultados de ambos estudios, en su conjunto, es imperativo tener en cuenta que los datos presentan inconsistencias y divergencias, y no son en absoluto concluyentes. La cuantificación de los niveles de exposición de los sujetos es poco precisa, dado que estos fueron tomados de registros preexistentes, y ello dificulta seriamente la caracterización retrospectiva de los niveles de exposición de estos individuos. Además, las muestras consideradas son muy pequeñas (210 - 446 casos de cáncer cerebral frente a 420 - 425 controles) y los incrementos relativos de riesgo no son significativos estadísticamente. Son necesarios más estudios, realizados con una metodología más refinada, y muestras de mayor tamaño para dar respuesta a las cuestiones planteadas por estos trabajos.

También se han llevado a cabo **estudios sobre voluntarios** que eran expuestos a radiaciones de telefonía móvil durante periodos cortos de tiempo (horas) en ambientes controlados. Los resultados han mostrado respuestas relativamente inconsistentes y difíciles de interpretar desde el punto de vista de posibles efectos sobre la salud. De hecho, se han reportado posibles respuestas no térmicas, inmediatas y reversibles en sujetos expuestos [Roschket y Mann, 1997; Wagner y col., 1998; Borbely y col., 1999; Preece y col., 1999; Huber y col., 2000]. Sin embargo, estos efectos, por su naturaleza (cambios inespecíficos en el electroencefalograma, o mayor velocidad de respuesta en tests), constituyen indicios de potenciales respuestas biológicas ante una excitación eléctrica, más que efectos nocivos capaces de provocar daños permanentes en la salud del usuario.

En definitiva, la exposición del público a las radiaciones típicas de telefonía móvil es relativamente reciente, por lo que de momento carecemos de datos suficientes para evaluar correctamente sus posibles efectos sobre la salud. Así, los estudios sobre epidemiología del cáncer son inconsistentes debido, en parte, a diferencias en su diseño, ejecución e interpretación, incluyendo la identificación de las poblaciones expuestas y la comprobación retrospectiva de dicha exposición. En lo concerniente a los estudios con voluntarios, las respuestas observadas hasta hoy no constituyen pruebas de efectos nocivos. No obstante, por razones que resultan obvias, la realización de más y mejores estudios, tanto epidemiológicos como de laboratorio, es considerada prioritaria por la OMS. Varios estudios están en curso en el presente. Cinco de ellos, financiados por la UE y realizados por grupos de 9 - 12 laboratorios europeos, han sido iniciados en el presente año y se espera que finalicen en el año 2003.

e. Las corrientes de contacto. El contacto con objetos metálicos en el seno de un CEM de alta frecuencia puede provocar efectos adversos en forma de quemaduras. A frecuencias entre 100 kHz y 110 MHz (propias de emisiones de ondas FM) las corrientes de contacto pueden inducir respuestas que van desde la simple percepción hasta el dolor intenso. El umbral de percepción se da para valores de 25 - 40 mA, dependiendo de las características físicas del sujeto. El dolor se registra en el rango de 30 - 55 mA. Por encima de los 50 mA el sujeto puede sufrir quemaduras graves en las zonas de la piel que entran en contacto con el metal irradiado.

f. Resumen. Para exposiciones a frecuencias altas el mecanismo de respuesta aceptado universalmente es el de incremento a corto plazo de la temperatura de los tejidos y del cuerpo completo. Así, para frecuencias por debajo de 10 GHz podrían producirse efectos nocivos en aquellas condiciones de exposición que indujesen en tejidos internos o en el cuerpo completo incrementos de temperatura superiores a 1 °C. Para frecuencias entre 10 GHz y 300 GHz, que son absorbidas en su mayor parte por los tejidos superficiales, los efectos nocivos se derivarían principalmente de quemaduras en dichos tejidos. Aunque existe evidencia experimental de respuestas biológicas a niveles no térmicos de RNI, esta evidencia es limitada y no se ha considerado lo suficientemente robusta y relevante en lo que concierne a potenciales efectos sobre la salud. En consecuencia, las restricciones propuestas por ICNIRP-CUE se basan exclusivamente en efectos térmicos a corto plazo.



5. LA RECOMENDACIÓN 1999/519/EC DEL CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA

Esta Recomendación, que no tiene rango de normativa ni de ley y que, por tanto no es de obligado cumplimiento, fue aprobada en julio de 1999 por la mayoría de los países miembros de la UE. Los niveles de CEM recomendados, que se refieren a exposiciones para el público en general, excluyendo taxativamente las exposiciones en el medio laboral, coinciden con los publicados por ICNIRP en 1998 para exposiciones **no ocupacionales**. Para calcular los niveles recomendados por ICNIRP para exposiciones ocupacionales, bastará, en general, con multiplicar por 5 los valores contenidos en las tablas que se incluyen a continuación.

El texto completo de la "RECOMENDACIÓN DEL CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA Relativa a la Exposición del Público en General a Campos Electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)", publicado en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas del 12 de julio de 1999, puede encontrarse en:

http://europa.eu.int/comm/health/ph/programmes/pollution/ph_fields_index.html

Los países europeos firmantes de la Recomendación, entre los que figura España, se comprometieron a dotarse, en un plazo breve, de los medios legales y técnicos oportunos para que las restricciones de exposición establecidas fuesen respetadas en sus respectivos territorios. España planea dar cumplimiento al citado compromiso en el curso del año 2001.

6. INTERPRETACIONES DE LA EVIDENCIA CIENTÍFICA QUE NO COINCIDEN CON LOS CRITERIOS ICNIRP-CUE

La gran mayoría de los grupos de expertos comisionados por agencias de ámbito nacional e internacional, coinciden en sus conclusiones con las publicadas por ICNIRP. Sin embargo, es necesario apuntar que algunos autores se han mostrado en desacuerdo con los criterios ICNIRP-CUE concernientes a:

1. Los potenciales efectos nocivos de las RNI sólo pueden derivarse de corrientes intensas inducidas en tejidos excitables (CEM de bajas frecuencias) o de respuestas térmicas por parte de los tejidos expuestos (radiaciones de frecuencias altas).
2. Los efectos de las exposiciones crónicas a RNI no se consideran diferentes de los provocados por exposiciones agudas, que dan lugar a respuestas inmediatas por parte de los sujetos.

La controversia se basa en el bloque limitado de evidencia experimental, tanto in vitro como in vivo, que muestra indicios de respuestas biológicas por debajo de los niveles propuestos por ICNIRP-CUE. A partir de estos indicios, algunos expertos consideran que, aunque no bien definidos todavía, existen otros mecanismos de respuesta biofísica a las RNI que no han sido contemplados en las directrices y recomendaciones aprobadas.

En efecto, las ideas sobre las respuestas de origen exclusivamente electro-excitatorio o térmico comenzaron a ser objeto de revisión hace tiempo, cuando se hizo evidente que exposiciones a CEM débiles, de bajas frecuencias, generaban bioefectos que hoy se utilizan regularmente en terapias como las aplicadas al tratamiento de fracturas óseas recalcitrantes o pseudoartrosis. Más conocidos, por la alarma generada y por sus notables repercusiones económicas, son los resultados de diversos estudios epidemiológicos, cuya relevancia está todavía por determinar, y que han relacionado algunas formas del cáncer con la exposición a campos débiles en las proximidades de líneas de alta tensión o en ambientes ocupacionales (ver Apartado 3 del presente artículo).

En general, los datos acumulados sobre respuestas biológicas a radiaciones débiles han mostrado indicios de que los efectos observados no están relacionados exclusivamente con la intensidad de la radiación, sino más bien con su forma de onda; es decir, con el significado de la potencial información contenida en la señal. En el presente, los mecanismos biofísicos responsables de este tipo de interacción están todavía por determinar. Diversos autores han elaborado una serie de modelos [Liboff, 1985; Lednev, 1991; Blackman y col., 1994; Blanchard y Blackman, 1994] sobre la idea base de que un determinado sistema biológico sería excitable por combinaciones específicas de parámetros eléctricos y magnéticos capaces de "sintonizar" condiciones de resonancia para uno o más iones biológicamente activos. Dichos parámetros incluirían, entre otros, la frecuencia y la amplitud de la señal, la intensidad del campo DC ambiental y su orientación respecto a la señal EM, y la carga-masa de los iones blanco. En otras palabras, según este concepto de interacción, los parámetros fundamentales de la señal electromagnética están relacionados con su forma de onda, y no sólo con la potencia asociada a ella. Obviamente, los modelos propuestos por los autores citados son aplicables exclusivamente a señales que, aunque débiles, tengan una intensidad suficiente como para que el sistema biológico pueda detectarlas por encima del nivel de ruido térmico de fondo. Los intentos realizados hasta la fecha para validar los citados modelos han generado respuestas heterogéneas (ver por ejemplo Chacón y col., 1988; Trillo y col., 1996; Blackman y col., 1998; 1999).

Estos conceptos constituyen, como se ha dicho arriba, la base en la que algunos expertos sustentan sus discrepancias con los principios enunciados por ICNIRP-CUE. Estos expertos, habiendo revisado la misma literatura científica que la estudiada por las comisiones ICNIRP-CUE, dan relevancia a datos experimentales o epidemiológicos que no fueron considerados convincentes por los citados organismos y, en consecuencia, llegan a conclusiones parcialmente diferentes de las publicadas en las recomendaciones de 1998 y 1999. Uno de los casos más conocidos de este tipo de lo constituyen las conclusiones del Panel para el programa RAPID, del *US National Institute of Environmental Health Sciences* (NIEHS).



En junio de 1998, el NIEHS formó un Grupo Internacional de Trabajo con el cometido de revisar los resultados de los estudios acerca los potenciales efectos de la RNI sobre la salud. Este Grupo de Trabajo, empleando los criterios establecidos por la *International Agency for Research of Cancer* (IARC), concluyó que los CEM de frecuencias muy bajas (ELF, incluyendo las frecuencias industriales, 50/60 Hz) deberían ser considerados como "posibles carcinógenos humanos." De acuerdo con los criterios IARC, la clasificación de "posible carcinógeno humano" se aplica a agentes para los cuales existe evidencia limitada de carcinogenicidad en humanos, pero no existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en animales experimentales. La clasificación está basada en la robustez de la evidencia científica, y no en el grado de carcinogenicidad o en el nivel de riesgo de cáncer provocado por el agente. La consideración de los CEM ELF como "posibles carcinógenos" implicaría que existe una necesidad de completar la evidencia actual mediante estudios más amplios y de mayor calidad, que permitan encuadrar dichos campos en una categoría mejor definida.

7. LAS NORMATIVAS DE SEGURIDAD EN PAISES EUROPEOS QUENO SE HAN ADHERIDO A LAS RECOMENDACIONES ICNIRP-CUE

REINO UNIDO. Los niveles de exposición a RNI considerados seguros actualmente en el Reino Unido superan los recomendados por ICNIRP-CUE. Sin embargo, la voluntad de la sociedad, unida a las conclusiones del informe emitido recientemente por un grupo de expertos reunido *ad hoc* (Stewart & IEGMP, 2000), hace previsible que el Reino Unido adoptará en el futuro las citadas Recomendaciones.

ITALIA. Desde hace años, y respondiendo a presiones de sindicatos, grupos ecologistas y parte del público, algunas regiones de Italia han venido aplicado límites de exposición a CEM ELF significativamente más restrictivas que las recomendadas por ICNIRP-CUE. En lo que respecta a exposiciones a RF emitidas por antenas fijas de telefonía móvil, radio o TV, Italia aplica unos límites de 6,0 V/m o 10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Recomendación ICNIRP: 450 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$). Para fuentes de RF/MW entre 3 MHz y 3 GHz, el límite es de 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$; para frecuencias de 3-30 GHz, el límite está en 400 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Las restricciones italianas se aplican a exposiciones en viviendas, escuelas, hospitales y cualquier lugar donde las personas permanezcan regularmente durante 4 horas o más. No se aplican a teléfonos móviles, dado que se trata de exposiciones voluntarias [Gazzetta Ufficiale Della Repubblica Italiana (3 nov. 1998)]

SUIZA. Este país posee desde febrero de 2000 un reglamento mucho más restrictivo, en algunos aspectos, que la Recomendación europea. Los límites son aproximadamente 100 veces más bajos que los fijados por ICNIRP-CUE. Así:

<u>FUENTE</u>	<u>VALORES LÍMITE</u>
Nuevas líneas eléctricas, subestaciones, ferrocarril	1 μT
Todas las antenas en para telefonía móvil a 900 MHz	4,0 V/m o 4,2 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Todas las antenas emisoras de radio y TV	3,0 - 8,5 V/m o 20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Estos límites se apoyan en la interpretación que las autoridades suizas hacen del llamado "principio de precaución" y se basan en el hecho de que los expertos convocados por dichas autoridades entienden que existen "indicaciones verosímiles" de que exposiciones crónicas a RNI de bajo nivel pueden ser nocivas. El objetivo perseguido es "mantener las exposiciones tan bajas como resulte técnicamente posible y económicamente sostenible."

Los límites están diseñados exclusivamente para el público en general y se aplican de forma estricta en espacios "sensibles", o áreas en las que cabe esperar presencia humana por periodos de tiempo prolongados. Estas áreas incluyen viviendas, escuelas, hospitales y zonas de recreo en parques. En áreas accesibles al público, pero no consideradas "sensibles", los límites admitidos se corresponden con los recomendados por ICNIRP-CUE. Sin embargo, la ordenanza restringe la construcción de nuevos edificios en áreas donde la exposición exceda los límites bajos "de precaución". La ordenanza no se aplica a exposiciones ocupacionales ni a emisiones procedentes de teléfonos móviles, electrodomésticos o equipos médicos. Además, los límites "de precaución" no se aplican a espacios privados situados al aire libre, como patios o jardines de viviendas (Ordinance on Non-Ionizing Radiation Protection; 1 feb. 2000).

Las posiciones suiza e italiana han recibido críticas por parte de asociaciones de expertos y de organismos internacionales que entienden en materia de radioprotección, incluida la OMS. Las críticas se centran en la idea de que estas normativas restrictivas, que darían prioridad a criterios sociopolíticos sobre los científico-técnicos, dañan gravemente una estrategia que hasta el presente había conducido a un principio de consenso para la normalización internacional de los niveles de seguridad ante exposiciones a RNI.



7. CONCLUSIÓN

La presencia casi ubicua de radiaciones electromagnéticas no ionizantes en determinados ambientes, preferentemente urbanos, es resultado del notable incremento en la utilización de la energía eléctrica y de la tecnología de transmisión de información mediante radiofrecuencias. Las posibles consecuencias de la exposición humana a dichos ambientes son objeto de un creciente interés por parte de la población y de las autoridades responsables de salud ambiental. En los últimos años, además, parte de la población ha venido mostrando cierto grado de inquietud respecto a las RNI, debido a una percepción de riesgo amplificada que ha sido alimentada por diversos medios de comunicación y determinados sectores de la sociedad. Para dar respuesta al problema, la OMS formó un comité de expertos independientes, ICNIRP, con la doble misión de recopilar la información existente sobre posibles efectos nocivos derivados de la exposición a RNI ambientales y de proporcionar una guía de niveles de referencia y restricciones básicas cuyo cumplimiento garantizase la seguridad de los ciudadanos, tanto en lugares públicos, como en su domicilio y en su trabajo. Los niveles recomendados por ICNIRP en 1998 para exposiciones del público en general fueron adoptados en 1999 por el Consejo de la Unión Europea, que les dio forma de Recomendación. Esta Recomendación, que como tal, no es de obligado cumplimiento, fue firmada por España y por la mayoría de los países europeos.

Los niveles de referencia y las restricciones básicas de ICNIRP-CUE proporcionan, con un elevado margen de seguridad, protección contra efectos inmediatos potencialmente nocivos derivados de la excitación celular/tisular causada por corrientes inducidas, o de la disrupción del metabolismo fisiológico por causas térmicas. Debido a ello, las restricciones y recomendaciones ICNIRP-CUE son las más ampliamente aceptadas, y los criterios de seguridad y protección radiológica basadas en ellas son admitidos por la mayoría de los países y de los organismos internacionales. Sin embargo, es cierto que la actual base experimental y epidemiológica sobre los posibles efectos nocivos de las RNI todavía es limitada, y algunos consideran que existen en ella indicios que aconsejarían prestar atención a posibles efectos de exposiciones crónicas a intensidades próximas o inferiores a los límites de seguridad. Esta circunstancia es hoy causa de una falta de consenso entre grupos de expertos y entre autoridades responsables de sanidad ambiental en distintos países.

Semejante situación genera incertidumbre entre la ciudadanía respecto a la validez de los niveles de seguridad establecidos. Ello ha venido siendo motivo de serias controversias, diseminadas por los medios, y de actuaciones legales promovidas por particulares o por asociaciones. La situación persistirá en tanto no exista un consenso generalizado que permita establecer estándares de radioprotección no ionizante aceptados por la práctica totalidad de los países. La condición indispensable para ello es la extensión y profundización de nuestros conocimientos en la materia a través de investigaciones completas y de calidad. En este sentido, la Unión Europea y otras comunidades internacionales, en colaboración con agencias públicas y compañías privadas, están llevando a cabo un importante esfuerzo de programación y financiación de la investigación. Entre tanto, y a la espera de datos experimentales y epidemiológicos robustos, existe el compromiso de poner los medios para facilitar el cumplimiento de las recomendaciones de ICNIRP-CUE en los países adheridos, y de informar a los ciudadanos correctamente de cómo y por qué se cumplen las citadas recomendaciones. Como medida adicional, podría evaluarse la conveniencia de arbitrar estrategias de evitación prudencial de exposiciones no controladas, que permitan compaginar la seguridad ambiental de los ciudadanos y trabajadores con un desarrollo tecnológico e industrial capaz de competir en el escenario internacional (véase: *Communication on Precautionary Principle. Comisión Europea, Bruselas, 2 Feb. 2000*).



BIBLIOGRAFÍA

- Ahlbom y col. (2000) British Journal of Cancer 83: 692
- Åkerstedt y col. (1999) Journal of Sleep Research 8: 77
- Bakos y col. (1995) Bioelectromagnetics 16: 377
- Bakos y col. (1997) Bioelectromagnetics 18: 190
- Bartsch y col. (1990) Neuroendocrinology 52: 538
- Blackman y col. (1994) Bioelectromagnetics 15: 239
- Blackman y col. (1998) Bioelectromagnetics 19: 204
- Blackman y col. (1999) Bioelectromagnetics 20: 5
- Blanchard y Blackman (1994) Bioelectromagnetics, 15, 217
- Borbely y col. (1999). Neurosci-Lett. 275: 207
- Burch y col. (1999) Am. J. Epidemiol. 159: 27
- Chacón y col. (1990) J. Bioelectricity 9: 61.
- Cleary y col. (1992) Ann-N-Y-Acad-Sci. 649: 166
- Consejo de la Comunidad Europea (1999) Diario Oficial de las Comunidades Europeas del 12 de julio de 1999
- Davanipour y col. (1997) Bioelectromagnetics 18: 28
- Feychting y col. (1997) Epidemiology 8: 384
- Feychting y col. (1998) Scand-J-Work-Environ-Health 24: 46
- Floderus y col. (1994) Cancer Causes Control 5: 189
- Frey (1998) Environ. Health. Perspectives 106: 101
- Graham y col. (1994) Bioelectromagnetics 15: 447
- Graham y Cook (1996) Bioelectromagnetics 17: 263
- Graham y col. (1996) Bioelectromagnetics 18: 166
- Graham y Cook (1999) Bioelectromagnetics 20: 277
- Grota y col. (1994) Bioelectromagnetics 15: 427
- Hardell y col. (1999) Internatl. J. Oncol. 15: 113
- Hietanen y Hamalainen (2000) XXII BEMS-EBEA Meeting. Session:15-5
- Huber y col. (2000) NeuroReport 15: 3321
- ICNIRP Guidelines (1998) Health Physics, 74: 494.
- Johansen y col. (1999) Neurology 52: 1279
- John y col. (1998) Bioelectromagnetics 19: 172
- Kato y col.(1993) Bioelectromagnetics 14: 94
- Kato y col. (1994) Bioelectromagnetics 15: 489-492
- Kothari y col. (1984). Cancer Lett. 22: 99
- Kothari (1987). Oncology 44: 64
- Kothari y Subramanian(1992) Anti-Cancer Drugs 3: 623
- Larsen (1991) Scan. J. Working Environ. Health 17: 318
- Lay y col. (2000). Bioelectromagnetics 21:52
- Lednev (1991) Bioelectromagnetics 12:71
- Leeuwen y col. (1999) Phys. Med. Biol. 44: 2367
- Levine y col. (1995) Physiol. Behav. 58: 535
- Liboff (1985). En: Interaction between electromagnetic fields y cells. Chiabrera, Nicolini y Schwan, Eds., Plenum Press, NY.
- Liburdy y Löscher (1997) En: The Melatonin Hypothesis, Breast Cancer y Use of Electric Power. Stevens, Wilson y Anderson, Eds. Battelle Press, Columbus. Pag 585.
- Löscher y col. (1994) Oncology 51: 288.
- Löscher y Mevissen (1994) Life Sci. 54: 1531
- Mevissen y col. (1993) Bioelectromagnetics 14: 131.
- Michaelson y Elson (1996), En: Polk & Postow Eds. Biological Effects of EMF. Boca Raton, FL: CRC Press: Pag. 435
- Mild y col. (1998) Documento del: National Institute for Working Life (Sweden)
- Moulder y col. (1999) Radiation Research 151: 513
- Muscat (1999). Wireless Technology Research Symposium, Jun. 1999
- Ouellet-Hellstrom y Stewart (1993) Am. J. Epidemiol. 138: 775
- Pomerai y col. (2000) Nature 405: 417
- Preece y col. (1999) Int. J. Radiat. Biol. 75: 447
- Repacholi y col. (1997) Radiat. Res. 147: 613
- Repacholi y col. (1998). Bioelectromagnetics 19: 1
- Rogers y col. (1995) Bioelectromagnetics Suppl., 3: 111
- Rogers y col. (1997) En: The Melatonin Hypothesis. Stevens, Wilson y Anderson Eds. Battelle Press, Columbus, Richland. Pag. 429
- Roschket y Mann (1997) Bioelectromagnetics 18: 172-
- Roti Roti (1999) Radiation Research 152: 665
- Savitz y col. (1998) Environ. Health 53: 71
- Selmaoui y Tuitou (1995) Life-Sci. 57: 1351
- Shah, Mhatre y Kothari (1984). Cancer Res. 44: 3403.
- Stevens, R.G. (1992) The FASEB Journal 6: 853.
- Stevens, R.G. (1996) Environmental Health Perspectives 104: 135.
- Stewart and Independent Expert Group on Mobile Phones (2000) National Radiological Protection Board, Chilton OX11 0RQ
- Taskinen y col. (1990) J. Epidemiol. Comm. Health 44: 196
- Tamarkin y col. (1981) Cancer Res. 41: 4432.
- Tenforde (1996) En: Biological Effects of Electromagnetic Fields. Polk y Postow, Eds. CRC Press, Boca Raton. Pag. 185.
- Trillo y col. (1996) Bioelectromagnetics 17:10.
- Tynes y col. (1994) Am. J. Epidemiol. 139: 645
- Tynes y col. (1996) Cancer Causes Control.7: 197
- Úbeda y Trillo (1999) Radioprotección 20: 24
- Úbeda .y col. (2000) Radioprotección 25: 30
- Úbeda y col., (2001) Life Sci. En prensa
- Van Wijngaarten y col. (2000) Occup. Environ. Med. 57: 258
- Wagner y col. (1998) Bioelectromagnetics 19: 199
- Wartenberg (1998) Am. J. Public Health 88: 1787
- Wilson y col. (1981) Bioelectromagnetics 2: 317
- Wilson y col. (1986) Bioelectromagnetics 7: 239
- Yellon (1994) J. Pineal Res. 16: 136

Alejandro Úbeda Maeso
Servicio BEM-Investigación
Hospital Ramón y Cajal
28034 MADRID
Tel: 91.729.3475
e-mail: alejandro.ubeda@hrc.es
<http://www.hrc.es/bioelectro.html>