

# ***EFFECTOS BIOLÓGICOS DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO***



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**  
**Grupo de Electromagnetismo**

---

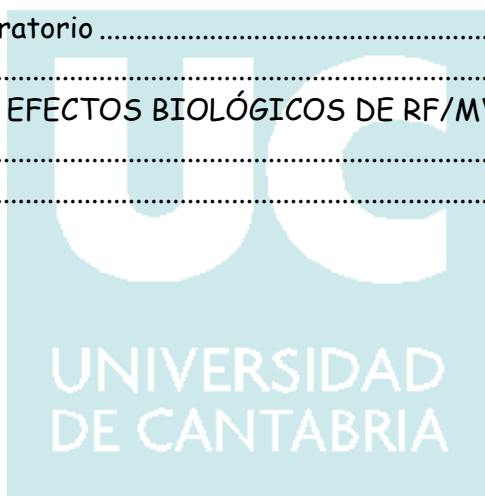
**AUTORES:**  
**Miguel Ángel Solano Vérez**  
**Juan Sáiz Ipiña**

---

## INDICE

<b>EFFECTOS BIOLÓGICOS DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO .....</b>	<b>4</b>
Introducción.....	4
Evaluación de la exposición .....	5
Mecanismos de exposición.....	6
Materiales biológicos.....	8
<b>EFFECTOS Y MECANISMOS DE LOS CAMPOS DE FRECUENCIA EXTREMADAMENTE BAJA (ELF).....</b>	<b>9</b>
Introducción.....	9
Campo interno y externo: acoplo .....	11
Corrientes inducidas.....	12
Sustancias biomagnéticas .....	13
Radicales libres.....	13
Membraba celular y enlace químico.....	14
<b>CAMPOS DE ELF Y CÁNCER .....</b>	<b>15</b>
Mecanismos del cáncer .....	15
Carcinogénesis .....	15
Hipótesis de la melatonina .....	17
Estudios en células.....	19
Efectos relevantes en el cáncer .....	19
Material genético .....	20
Transporte de calcio .....	21
Proliferación celular .....	21
Actividad de las enzimas .....	21
Hormonas .....	21
Sistema inmunológico .....	21
Comunicación intercelular.....	22
Efectos no cancerosos .....	22
Estudios en animales.....	22
Estudios sobre cáncer en animales .....	23
Estudios en animales sin relación con el cáncer .....	23
Estudios en humanos.....	23
Efectos en el comportamiento .....	24
Efectos en el sistema cardiovascular.....	24
Sensibilidad eléctrica.....	24
Shocks y microshocks .....	25
Conclusiones.....	25
<b>EFFECTOS Y MECANISMOS DE LOS CAMPOS DE ALTA FRECUENCIA (RF/MW: RADIO FRECUENCIA Y MICROONDAS).....</b>	<b>26</b>
Introducción.....	26
Transmisores de televisión y radio .....	27
Sistemas de radar.....	27

Estaciones de satélites terrestres.....	27
Comunicaciones microondas .....	28
Equipos móviles de radio.....	28
Equipos buscadores.....	28
Comunicaciones celulares (telefonía móvil) .....	28
Sistemas de comunicación personal .....	29
Otros sistemas .....	29
EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS DE RF/MW .....	29
Efectos térmicos.....	29
Efectos atérmicos y no térmicos .....	30
Investigaciones de laboratorio .....	31
Efectos genéticos .....	32
CONCLUSIONES SOBRE EFECTOS BIOLÓGICOS DE RF/MW.....	35
Referencias .....	36
Referencias web .....	36



## EFFECTOS BIOLÓGICOS DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

### *Introducción*

Un efecto biológico ocurre cuando la exposición a un campo electromagnético causa algún efecto fisiológico detectable en un sistema vivo. Este efecto puede o no llevar a un efecto nocivo. Por tanto, es esencial no identificar efecto biológico y efecto nocivo. Los efectos sobre la salud son frecuentemente resultado de efectos biológicos que se acumulan sobre un cierto espacio temporal y que además dependen de la dosis recibida. Por lo tanto el conocimiento de los efectos biológicos es importante para entender los riesgos generados para la salud.

Consideremos el ejemplo de la exposición a la radiación solar. El Sol da calor y luz que puede provocar quemaduras si la exposición es suficientemente prolongada para que la melanina no pueda protegernos (la melanina es un pigmento que da al pelo y a la piel su color y que nos protege frente a la radiación UV y la visible). Podemos controlar sus efectos utilizando gafas de sol, sombreros, ropas etc. Algunos efectos de esta radiación pueden ser nocivos pero otros pueden ser altamente beneficiosos para la salud. Todo depende de la dosis de exposición.

El acoplo de los campos de radio frecuencia y la distribución interna de energía absorbida son funciones del tamaño, forma, orientación y propiedades dieléctricas (permitividad y conductividad básicamente) del cuerpo humano o de un animal. Por ejemplo, modelando el cuerpo de un animal como un dieléctrico con pérdidas la cantidad de energía absorbida es función de la longitud de onda de la radiación recibida. Para un humano de altura 1,75 metros y peso 70 Kgs la máxima absorción se produce a unos 70 MHz aproximadamente. En contraste, para un ratón de 5,5 cms de largo y 15 gramos de peso la frecuencia de resonancia es de 2,5 GHz, aproximadamente. La frecuencia de resonancia, además de la eficiencia de acoplo del campo al cuerpo, depende de la orientación de la dimensión más larga del cuerpo con la dirección de polarización del campo electromagnético. En general, el máximo acoplo se produce cuando esa dimensión es paralela a la dirección en la que vibra el campo eléctrico. Por estas dependencias se ha introducido el concepto de SAR y tener así una normalización. Así por ejemplo, a la frecuencia de resonancia de 77 MHz un modelo humano en forma de esferoide tendría una SAR de 0,022 W/Kg por cada vatio/m<sup>2</sup> de potencia incidente, mientras que un modelo de ratón con frecuencia de resonancia 2,5 GHz tendría un SAR de 0,12 W/Kg para la misma densidad de potencia. Otra dependencia esencial para ver la dificultad en la absorción de energía electromagnética es la dependencia de la conductividad con la frecuencia

Por otro lado, además de todas estas dependencias, es necesario apuntar otra que indica que la distribución de energía interna absorbida también depende de la longitud de onda y de las propiedades dieléctricas del medio. En ciertas

condiciones, se pueden excitar modos complejos en el cuerpo debido a múltiples reflexiones que provocan la aparición de una onda estacionaria. Ello da lugar a distribuciones no uniformes de energía lo que se conoce con el nombre de puntos calientes (*hot spots*).

En este módulo se van a dar, en primer lugar, unas nociones básicas de ciertos conceptos necesarios para ir entendiendo los efectos biológicos del campo electromagnético junto con los conceptos electromagnéticos básicos del módulo 1. Posteriormente se irán relatando algunos de los efectos más significativos relatados en la literatura, dividiéndolos en efectos de baja frecuencia (ELF: extremely low frequency -frecuencia extremadamente baja-) y campos de alta frecuencia (RF: radio frecuencia).

### ***Evaluación de la exposición***

Por evaluación de la exposición se entiende la estimación sobre si el campo electromagnético produce efectos sobre la salud humana. Ello es central para los estudios epidemiológicos; si los epidemiólogos no pueden evaluar la exposición de los individuos a un agente "sospechoso" no podrán determinar la influencia de ese agente sobre la salud o la enfermedad. ¿Qué significa el término exposición?. Siempre que estamos en contacto con un agente medioambiental (en el aire, el agua, la comida, etc.) estamos expuestos a ese agente. Algunos factores son beneficiosos otros perjudiciales y otros ninguna de las dos cosas, y ello básicamente dependiendo de la duración de la exposición. *La evaluación de la exposición es la determinación o estimación de la magnitud y frecuencia de ocurrencia de la exposición para un individuo o grupo a un agente del medio ambiente.* Es muy útil diferenciar entre exposición y dosis. Exposición se refiere únicamente a la medida de un agente sin un particular conocimiento de aquellas características del agente que influyen en la salud; dosis se refiere a la evaluación de una característica particular de la exposición que es significativa respecto a la salud. En los estudios de salud, los investigadores intentan medidas de dosis, pero en ausencia de las características de la exposición que son significativas, tienen que medir la exposición y usarla como una aproximación de la dosis. Para entender mejor esto, consideremos el caso de la radiación ionizante de rayos X. Una placa que detecta la radiación X mide la exposición a un individuo, pero difícilmente es una medida de la dosis. Sabemos que la razón a la que ocurre la exposición es importante, y la placa no da esa información. También sabemos que el área de exposición es importante y la placa no nos dice si la exposición corresponde al área de la placa o al cuerpo entero. Por ello, es importante conocer la dosis, es decir, las características de la exposición que sean significativas. Existen medios para determinar la exposición a campos electromagnéticos, pero no de medir la dosis.

Cuando la evidencia del daño de la exposición a un agente ambiental es inequívoca, se toman medidas preventivas aún cuando se tenga poco conocimiento de

cómo "funciona" el mecanismo. Un ejemplo son los estudios epidemiológicos sobre el tabaco. En el caso del campo electromagnético, muchos científicos consideran los estudios epidemiológicos como equívocos. El motivo, en parte, es que no se conocen todos los mecanismos (es decir "como funcionan") que describen la interacción del campo electromagnético con tejidos y células<sup>1</sup>. Si se quieren diseñar estudios epidemiológicos mejores a partir de los cuales resolver el problema de los riesgos, se deben hacer mejores trabajos en lo que se refiere a la evaluación de la exposición, y eso probablemente no sucederá hasta que se pueda contestar a las cuestiones acerca de los mecanismos.

### ***Mecanismos de exposición***

Durante décadas los científicos han intentado explicar cómo interacciona el campo electromagnético con un sistema biológico, aún cuando éste no tenga energía suficiente como para ionizar un átomo o inducir calor. Las bases de la interacción electromagnética con un medio material fueron resueltas hace más de un siglo a través de las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, la aplicación de estas bases a un sistema biológico es muy complicada debido a la extrema complejidad y múltiples niveles de organización de los organismos vivos, además de la gran variedad de propiedades eléctricas de los tejidos biológicos. Aunque la evaluación de riesgos está generalmente basada en datos experimentales de sistemas biológicos, es necesaria la consideración de posibles mecanismos, por dos razones básicas: la primera es que los datos experimentales de efectos de campos de radiofrecuencia son inconsistentes y fragmentados en muchos aspectos, de manera que una comprensión de los mecanismos biofísicos sobre los efectos estudiados puede ayudar a racionalizar y entender los datos. La segunda razón es que es necesario extrapolar datos desde una condición de exposición a otras y, para una extrapolación fiable, algún entendimiento de los mecanismos es necesario. Por lo tanto, el conocimiento de los mecanismos de interacción es esencial para identificar procesos apropiados de dosimetría, para predecir las relaciones dosis-respuesta, para diseñar mejores experimentos y para servir de base para determinar si ciertos niveles de exposición provocan daños en los tejidos biológicos.

Los campos eléctrico y magnético que interaccionan con el cuerpo debidos a una fuente próxima pueden causar dos tipos de efectos biológicos, unos térmicos y otros no térmicos. Los efectos del campo magnético varían con la frecuencia y son, probablemente, más importantes en tejidos biológicos con pequeñas cantidades de magnetita, que se comporta como un medio ferromagnético análogo al hierro. La

---

<sup>1</sup> Es muy común "oir" que no se conocen los mecanismos de interacción entre el campo electromagnético y un medio biológico. Esto es sencillamente falso. Los mecanismos de interacción se conocen en su mayoría desde hace mucho tiempo. Otra cosa es que se conozcan todos o que se hayan descrito efectos que no son explicables en su totalidad, bien por alta de conocimiento en las características electromagnéticas de los tejidos o bien porque los efectos descritos no son todo lo fiables que pudieran parecer.

magnetita se encuentra en ciertas células de animales, incluidas las humanas. Se cree que algunos animales la usan para guiarse en sus desplazamientos.

Los efectos térmicos son los que causan un aumento de la temperatura debido a la energía absorbida de un campo electromagnético. La fuerza producida por un campo eléctrico sobre un cuerpo cargado, tales como los iones móviles del cuerpo, produce que éstos se muevan y la resistencia eléctrica a ese movimiento hace que el cuerpo se caliente. El aumento de temperatura se compensa por la termorregulación conducida por el flujo de la sangre. La relación entre el aumento de temperatura y la SAR es muy complicada, debido principalmente a lo complicado de modelar la influencia del flujo de sangre sobre la transferencia de calor.

La radiación electromagnética puede producir efectos no térmicos. En general, pueden surgir cambios detectables sólo si el efecto del campo eléctrico con el medio biológico expuesto a un campo electromagnético no está enmascarado por el ruido térmico. El ruido térmico es un movimiento random (aleatorio) debido a la energía térmica que todos los cuerpos tienen al poseer una temperatura por encima del cero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$  o 0 Kelvin). A la temperatura habitual (300 K) esta energía es de aproximadamente 26 MeV, que es mucho mayor que la energía producida por un campo de radiofrecuencia y por tanto, su efecto no térmico queda completamente enmascarado. Sin embargo, es posible que ciertos tejidos biológicos reaccionen muy sensiblemente a ciertas frecuencias resonantes y se deberían estudiar estas situaciones. Otro mecanismo no térmico proviene de las moléculas que se polarizan con el campo eléctrico pudiendo producirse atracciones eléctricas entre ellas. Otro mecanismo no térmico está asociado al movimiento de corriente a través de las membranas que tienen un comportamiento fuertemente no lineal. Esto significa, que cuando se aplica una tensión a una membrana la corriente no es proporcional a ella.

Se han descrito otros muchos mecanismos no térmicos, pero no parecen demasiado consistentes. Quizá merece la pena nombrar uno que se ha publicado recientemente y que indica que la radiación de microondas podría desdoblarse algunas proteínas. Los experimentos se realizaron en hornos de microondas modificados a frecuencias de 2,45 GHz. Este experimento es reciente y no ha sido refutado todavía. Otro mecanismo que ha ocasionado un gran interés se basa en la suposición de que algunos sistemas biológicos podrían interactuar resonantemente con los campos de microondas.

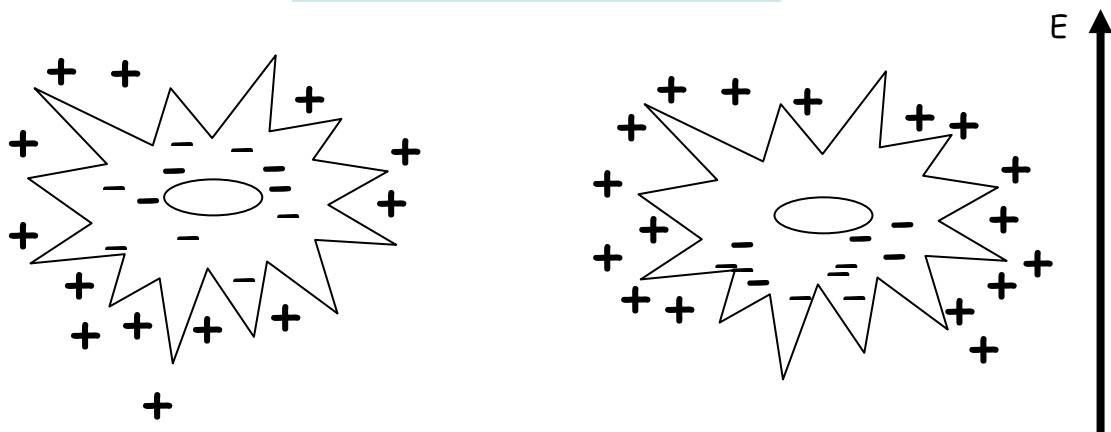
A continuación se describirán con más detalle algunos de los bioefectos y sus mecanismos descritos según el rango de frecuencia, que dividiremos en baja frecuencia y radiofrecuencia y microondas (RF/MW). Pero antes de ello, es necesario conocer algunas características de las células y tejidos en el cuerpo humano para poder entender sus mecanismos asociados de interacción.



### ***Materiales biológicos***

Cada ser humano está constituido por billones de células vivas que se agrupan entre sí para formar un órgano con unas ciertas funciones asignadas. Las células tienen diferentes tamaños (las de los músculos pueden ser de unos pocos milímetros y las nerviosas de un metro). Las células están formadas por la membrana que mantiene a la célula unida, el citoplasma que es una especie de gel en el interior de la membrana y, normalmente, el núcleo. No todas las células tienen núcleo. Dentro del citoplasma existen diferentes tipos de estructuras más pequeñas que realizan ciertas funciones metabólicas.

Las células son estructuras complejas con superficies cargadas complicadas. Las células están atestadas con moléculas y átomos cargados que pueden cambiar su orientación y movimiento cuando se encuentran expuestos a una fuerza electromagnética. En la figura se muestra un caso para el campo eléctrico. A la izquierda se muestra una célula en reposo. A la derecha célula bajo la influencia de un campo eléctrico. Las cargas se redistribuyen, la célula sigue siendo neutra pero es una estructura polar.



Las interacciones del campo electromagnético con un sistema biológico se efectúan a través de las células. Se pueden englobar en las tres siguientes categorías.

1. Interacciones con la membrana celular.
2. Interacciones con el citoplasma
3. Interacciones con el núcleo.



Estas interacciones dependen, entre otras cosas de la frecuencia. Para radiación no ionizante se dividen entre efectos de campos de muy baja frecuencia y efectos de radio frecuencia y microondas.

Los núcleos de las células contienen la mayoría de la información hereditaria en los cromosomas y los genes. Las células crecen, cambian y se reproducen en un proceso continuo llamado mitosis, que comienza en el núcleo a través de una duplicación e igual distribución de los cromosomas. Las células sin núcleo no se pueden dividir mientras que otras sufren de mitosis frecuentemente, como por ejemplo las de los embriones. Por ello es especialmente importante la protección a campos electromagnéticos durante el embarazo. A su vez, el proceso de mitosis tiene cuatro fases: profase, metafase, anafase y telofase. El período entre las divisiones se llama fase de reposo. Es evidente que hay diferentes procesos en la mitosis que pueden verse afectados por la radiación electromagnética. Existe un gran campo de investigación en el estudio de los procesos que afectan a los cromosomas durante la mitosis afectada por un campo electromagnético.

Las células se agrupan y combinan con otros materiales para formar tejidos. Existen cuatro tipos de tejidos: epitelial, conectivo, muscular y nervioso.

- ✚ El tejido epitelial consiste de células con una u varias capas. Realizan funciones de protección y regulación de la secreción o absorción de materiales.
- ✚ El tejido conectivo consiste de células y materiales no vivos como fibras y sustancias gelatinosas que sostienen y conectan tejidos celulares al esqueleto. El tejido conectivo contienen muchas de las sustancias intercelulares que desarrollan la importante labor de transportar materiales entre ellas. Ejemplos de estos tejidos son los huesos y los cartílagos.
- ✚ El tejido muscular consiste de células que van desde 1 a 40 milímetros de longitud con  $40\ \mu\text{m}$  ( $1\mu=1.10^{-6}$  metros) de diámetro. Estos tejidos contienen una gran cantidad de sangre.
- ✚ El tejido nervioso controla y gobierna toda la actividad corporal y consiste de células nerviosas o neuronas. Las neuronas largas proyecciones llamadas axones y que son análogas a líneas de transmisión. Las neuronas están localizadas en cada proteína del cuerpo y envían información al sistema nervioso central desde diferentes receptores de información.

## **EFFECTOS Y MECANISMOS DE LOS CAMPOS DE FRECUENCIA EXTREMADAMENTE BAJA (ELF)**

### ***Introducción***

Por campos de baja frecuencia entendemos todos aquellos cuya frecuencia sea inferior a unos 30 KHz. Recordemos que la electricidad es la fuente de potencia más común en el mundo debido a la facilidad con que se genera y se transmite allá donde se necesita. Desde el principio del siglo XX la industria basada en la electricidad y sus tecnologías relacionadas han sido una parte fundamental de nuestra sociedad. Debido a que la electricidad es usada universalmente y juega un papel esencial en la economía y desarrollo de las naciones, la posibilidad de que los campos eléctrico y magnético sean perjudiciales para los trabajadores y consumidores es una materia que merece especial atención y estudio.

Los campos eléctrico y magnético de muy baja frecuencia (ELF entre 0-30 KHz) se encuentran comúnmente en nuestro entorno. En los hogares las fuentes de estos campos son por ejemplo mantas eléctricas, calentadores de agua, secadores de pelo, afeitadoras eléctricas, televisiones, terminales de video, sistemas de música, sistemas de aire acondicionado, tubos fluorescentes, frigoríficos, estufas y cualquier otro electrodoméstico. En los lugares de trabajo son comunes fuentes de radiación ELF tales como ordenadores, máquinas de fax, copiadoras, luces fluorescentes, impresoras, scanners, centralitas telefónicas, motores y otros dispositivos eléctricos.

Ya ha quedado claro que en la radiación ELF los campos eléctrico y magnético pueden existir separadamente el uno del otro. Normalmente la discusión sobre los efectos se restringe normalmente al campo magnético que es producido por corrientes alternas o campos variantes en el tiempo cuya intensidad y dirección cambien de forma regular. Estos campos provienen principalmente de fuentes creadas por el hombre, especialmente de servicios de potencia eléctrica, electrodomésticos y sistemas de comunicación. Es muy común citar el campo estático magnético generado por la Tierra como fuente de especial atención. Sin embargo hay que considerar que su comparación con los campos anteriores no es adecuada debido a que la influencia en la materia es bastante diferente entre un campo estático y uno variante en el tiempo.

La variación con la distancia a la fuente que lo crea del campo magnético depende del tipo de fuente. Así si la fuente es un simple hilo conductor el campo varía como  $1/r$ . Si el campo lo provocan un par de hilos conductores entonces la variación es  $1/r^2$ . Si la fuente es un lazo de corriente, como lo que ocurre en los transformadores de la mayoría de los electrodomésticos y ordenadores la variación es como  $1/r^3$ . Otro tipo de fuente es la creada por las líneas de alta tensión. Estas son transmitidas mediante líneas de distribución de tres hilos. Cada uno de ellos lleva una corriente desfasada de los demás en  $120^\circ$  que se llama circuito balanceado; en este caso el campo magnético es proporcional a  $1/r^2$ . Si la línea no está balanceada entonces el campo varía como  $1/r$ .

Respecto a la exposición a radiación de ELF ocurre a distancias mucho menores que la longitud de onda. Esto tiene importantes implicaciones, porque bajo tales condiciones se tratan como componentes independientes. La situación es sustancialmente diferente de la que ocurre en la radiación a campos de RF/MW en donde los campos eléctrico y magnético están indisolublemente unidos. Esta es la razón por la que a estas frecuencias las investigaciones se han centrado en los efectos de un campo o el otro.

Durante mucho tiempo, los investigadores han intentado diversas teorías de interacción de frecuencias de ELF. Aunque la radiación de ELF no puede romper, debido a su baja energía, ningún enlace químico por débil que sea, existen mecanismos de interacción bien definidos que muestran la interacción con los tejidos biológicos sin necesidad de romper enlace alguno. Los campos eléctricos pueden crear fuerzas sobre moléculas cargadas o neutras o sobre sistemas celulares dentro de sistemas vivos. Estas fuerzas pueden causar movimiento de partículas cargadas o inducir tensiones entre las membranas de las células. Los campos magnéticos también pueden producir fuerzas sobre estructuras celulares, pero como la mayoría de los medios biológicos son no magnéticos, estas fuerzas son muy pequeñas. Además, los campos magnéticos pueden producir campos eléctricos en el interior de los cuerpos.

Aunque los campos eléctrico y magnético ocurren juntos, la mayoría de los estudios únicamente se centran en los efectos del campo magnético. El argumento es que el campo magnético es muy difícil de apantallar y penetra fácilmente en los edificios y en la gente, contrariamente a lo que le sucede al campo eléctrico que tiene poca habilidad para penetrar en los edificios y en los humanos.

### ***Campo interno y externo: acoplo***

Existen diversos mecanismos de interacción propuestos en la literatura. Pero antes de eso, es necesario entender la relación entre el campo fuera y en el interior de un sistema biológico (acoplo), que depende fuertemente de la frecuencia. El campo eléctrico en el interior de un tejido biológico es mucho menor que fuera, habitualmente en varios órdenes de magnitud. Eso significa que, por ejemplo, el cuerpo humano es un buen apantallamiento del campo eléctrico, es decir, no lo deja "pasar". Sin embargo, los tejidos biológicos son medios no magnéticos, lo que significa que el campo magnético externo es prácticamente el mismo que en el interior. La mayor parte del debate sobre límites aceptables sobre campos de ELF está expresado en términos del campo magnético. Sin embargo, el caso no es lo mismo para el campo eléctrico. Considerar el caso de un cuerpo humano bajo exposición a un campo de ELF. Eléctricamente, el acoplo es muy pequeño; por ejemplo, un campo eléctrico externo de 1 KV/m (1000 V/m) puede inducir un campo interno de 1mV/m (que es  $1 \cdot 10^{-3}$  V/m), lo que significa una reducción de 1 millón. Este

valor de campo eléctrico es el típico bajo una línea de alta tensión. Además, este campo eléctrico crea una corriente de conducción en el interior del cuerpo unos cuantos órdenes de magnitud inferior a las corrientes creadas por naturalmente por el corazón, nervios o músculos.

Se han propuesto diferentes mecanismos de interacción con el campo electromagnético pero no todos están suficientemente bien establecidos. Fundamentalmente, los mecanismos propuestos son corrientes eléctricas inducidas, efectos directos sobre materiales biológicos magnéticos y efectos sobre radicales libres.

### ***Corrientes inducidas***

En el rango de ELF un material biológico es un medio conductor. Debido a sus características morfológicas, las células presentan, por debajo de 100 Hz un comportamiento básicamente resistivo y muy poco inductivo. Un posible mecanismo de interacción del campo electromagnético con sistemas vivos, que se ha propuesto teóricamente, es la habilidad del campo magnético para estimular corrientes circulares (*eddy currents*) en las membranas de las células y en los fluidos de los tejidos, que circulan en un lazo cerrado que descansa en un plano perpendicular a la dirección del campo magnético. Esta corriente se puede calcular usando las ecuaciones de Faraday y Laplace, sin necesidad de resolver las ecuaciones de Maxwell. Por tanto, en el interior de un medio biológico se inducen corrientes y campos eléctricos debido al campo magnético.

La obtención de estas corrientes es muy complicada y sólo puede hacerse a través de simulaciones numéricas. Sólo en supuestos sencillos, es decir, modelando el cuerpo como un medio homogéneo la corriente puede obtenerse de forma analítica. Así, la densidad de corriente en un camino circular alrededor de un campo magnético sinusoidal se puede obtener de la ley de Faraday y resulta ser

$$J = \pi \sigma r B f \quad A/m^2$$

siendo  $\sigma$  la conductividad en S/m,  $r$  el radio del lazo,  $B$  la inducción magnética en Teslas y  $f$  la frecuencia en Hz <sup>2</sup>. En este caso, se está suponiendo que el medio biológico tiene propiedades eléctricas constantes, y la densidad de corriente es proporcional a la frecuencia. En un caso real, con diferentes interfases entre los medios las cosas pueden resultar bastante diferentes. Algunos cálculos descritos en

---

<sup>2</sup> Si esta ecuación se aplicara a un contorno no circular podríamos seguir admitiendo que "r" es la longitud de ese contorno. Por ejemplo, si consideráramos la corriente inducida en el cuerpo humano por un campo magnético podríamos considerar que "r" es su máxima dimensión lineal (la altura de la persona en cuestión)

la literatura muestran que un campo de  $100\mu\text{T}$  produce una densidad de corrientes de  $2\text{mA}/\text{m}^2$ . A frecuencias por encima de  $100\text{ KHz}$ , las corrientes inducidas producen calentamiento del sistema biológico expuesto. En el rango de las ELF, el calentamiento de tejidos no es problema, pero si la corriente inducida es muy grande, hay riesgo de estimular células eléctricamente excitables como las neuronas. A frecuencias menores que aproximadamente  $100\text{ KHz}$ , las corrientes necesarias para calentar sistemas biológicos son mayores que las corrientes necesarias para excitar neuronas y otras células eléctricamente excitables.

A continuación, nombraremos algunos ejemplos de investigaciones publicadas sobre corrientes inducidas

- ✚ Xi y Stuchly en 1994 hicieron cálculos basados en modelos anatómicos eléctricamente refinados y obtuvieron densidades de corrientes de  $2\text{mA}/\text{m}^2$  para campos de  $100\mu\text{T}$  a  $60\text{ Hz}$ .
- ✚ Kaune y otros, en 1981, analizaron numéricamente corrientes inducidas en ratones por campos lineales y circularmente polarizados de  $50\text{ Hz}$  prestando especial atención en la glándula pineal y en la retina pues son órganos asociados frecuentemente con cambios en la síntesis de la melatonina. Para campos de  $1,41\mu\text{T}$  los resultados obtenidos eran corrientes extremadamente bajas (menores que  $30\mu\text{A}/\text{m}^2$ )

### ***Sustancias biomagnéticas***

Todos los organismos vivos están compuestos esencialmente de compuestos orgánicos diamagnéticos, pero también están presentes algunas moléculas paramagnéticas (por ejemplo el oxígeno  $\text{O}_2$ ) y microestructuras ferromagnéticas (hemoglobina, magnetita). Estas microestructuras se comportan como pequeños imanes que están influenciados por campos externos que modifican su contenido de energía. Estas microestructuras se encuentran en bacterias y otros elementos biológicos pequeños. Se cree que el cerebro humano contiene estos elementos que responden al campo magnético aplicándose con él y creando algún efecto biológico. Los campos de ELF pueden crear efectos biológicos actuando como se ha descrito, pero para ello se necesitan campos magnéticos muy grandes de al menos  $2$  a  $5\mu\text{T}$ .

### ***Radicales libres***

Los radicales libres son átomos o moléculas con al menos un electrón desapareado. Estos electrones son muy inestables y peligrosos porque normalmente los electrones vienen en pares. Estos electrones hacen que los



radicales libres choquen con otras moléculas a las que pueden arrancar electrones, lo que causa que cambie su estructura pudiéndolas convertir a su vez en radicales libres que puede además prolongarse como una reacción en cadena. Los radicales libres son muy reactivos y existen durante cortos períodos de tiempo (típicamente menor que 1ns) pero su efecto es extremo pues puede dañar la cadena de ADN.

Los campos magnéticos estáticos pueden influir en la respuesta de reacciones químicas entre pares de radicales libres. Puesto que el período de vida de los radicales libres es muy pequeño y los campos de ELF tienen un período muy alto, básicamente actúan, para estos casos, como los campos estáticos. Campos magnéticos con intensidades menores que  $50\mu\text{T}$  no producen efectos biológicos significativos pues cualquier efecto se añadiría al campo geostacionario que varía entre 30 y  $70\mu\text{T}$ .

### ***Membraba celular y enlace químico***

El campo eléctrico de baja frecuencia puede excitar la membrana celular causando efectos nocivos. A frecuencias de líneas de alta tensión el valor límite de la densidad de corriente para producir efectos nocivos es de alrededor de  $10\text{ mA/m}^2$  que se corresponde con un valor del campo eléctrico en los tejidos de  $100\text{ V/m}$ . Muchos científicos opinan que la membrana celular juega un papel esencial en los mecanismos de interacción ente el campo electromagnético y los tejidos biológicos. El mecanismo teórico propuesto por los científicos concluye que las células biológicas son estructuras bio-electro-químicas que interactúan con su entorno de varias formas, entre las que se incluyen interacciones físicas, químicas, bioquímicas y eléctricas. El Dr. William Ross (Universidad de California) asegura que los iones<sup>3</sup>, especialmente los iones de calcio podrían jugar un papel similar al de un enlace químico entre el campo electromagnético y los procesos de la vida.

Como conclusión de los tres mecanismos biofísicos nombrados (corrientes inducidas, efectos directos sobre los materiales biológicos magnéticos y efectos sobre radicales libres) podemos decir que para que haya efectos nocivos notables es necesario intensidades de campo electromagnético importantes, y en cualquier caso, mucho mayores de las que habitualmente existen en nuestro entorno. Sin embargo, parar entender los

---

<sup>3</sup> Un ión es un átomo con carga eléctrica, por ejemplo un átomo al que se le ha arrancado un electrón.

efectos bio-electro-químicos se necesita conocer más sobre cómo el campo de ELF afecta a los procesos de la vida. Los investigadores creen que hay que hacer una clara distinción entre esos tres bioefectos y el proceso de efectos bio-electro-químicos de manera que el efecto de campos ELF débiles hay que encontrarlo fuera del ámbito de la física convencional.

## **CAMPOS DE ELF Y CÁNCER**

En la literatura sobre bioefectos de campos de ELF existen estudios sobre diferentes efectos sobre la salud; sin embargo, al que más atención se le ha prestado es a su posible relación con la inducción del cáncer.

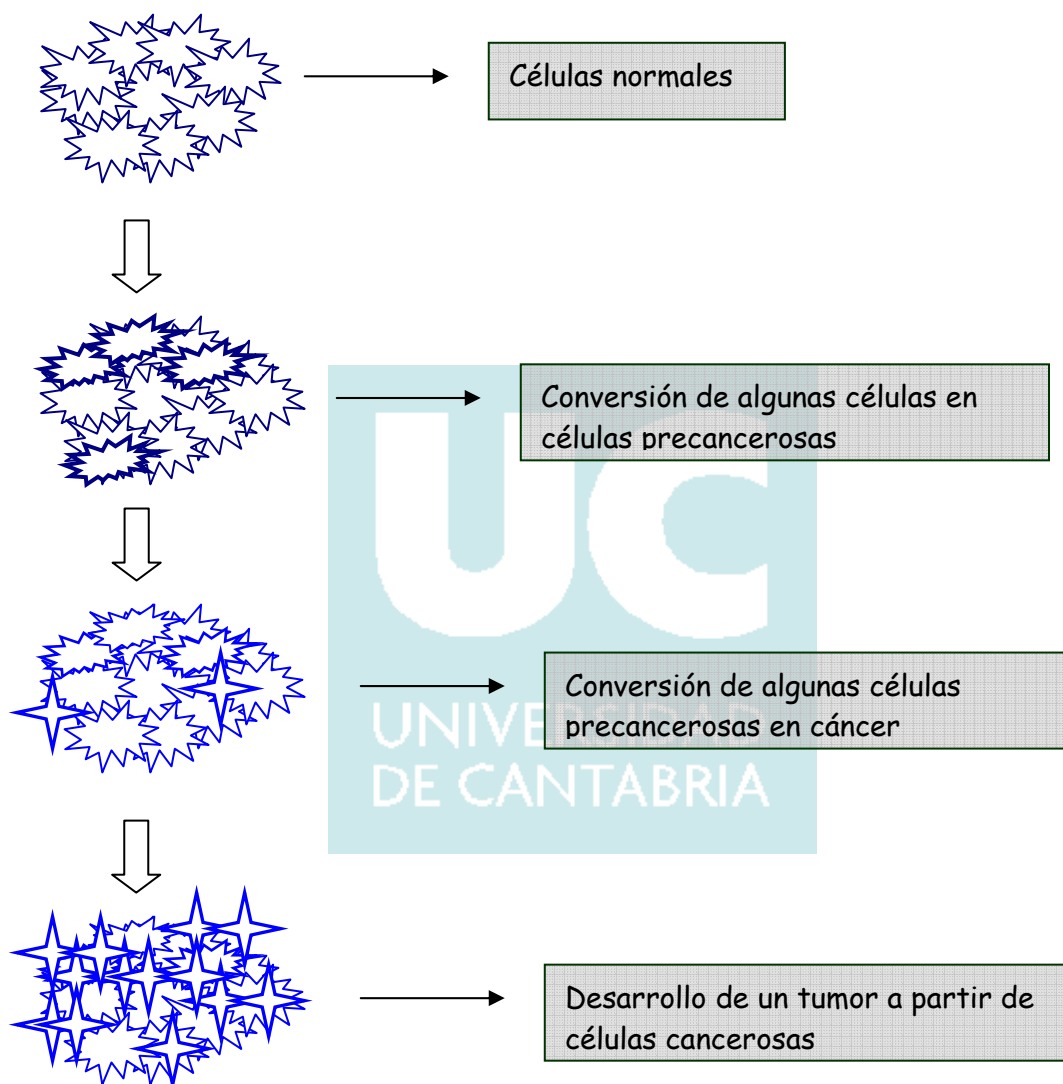
### ***Mecanismos del cáncer***

El cáncer es un término que describe al menos 200 enfermedades diferentes todas ellas con la característica común de un crecimiento incontrolado de las células. El cáncer es un caso de mitosis incontrolada en el que las células se dividen de forma incontrolada y crecen fuera de todo control. Esencialmente, el cáncer es, por tanto, es un desorden genético a nivel celular siendo un fallo en las propias células más que en el cuerpo entero. Las causas de muchos cánceres son desconocidas y muchos los factores de influencia en el riesgo de contraer cáncer. Cada uno de los factores de riesgo conocidos tales como el tabaco, alcohol, radiación ionizante y otros contribuyen a tipos de cáncer específicos. El riesgo de cáncer está relacionado con muchas causas. Así, el riesgo con amianto está relacionado con la longitud y dureza de las fibras. El riesgo con partículas en el aire está relacionado con su tamaño y su propensión para fijarse en los pulmones. La luz visible rompe enlaces en los procesos de fotosíntesis aunque ello no parece relacionado con el cáncer. La radiación de origen solar, como la radiación ultravioleta UV (especialmente la UVB, ver el espectro electromagnético en el módulo 1) está asociada con el riesgo de contraer cáncer de piel y melanoma maligno. Sin embargo, ya sabemos que la energía de un fotón de campos de baja frecuencia es insuficiente para romper enlaces químicos. En general, los cánceres potencialmente asociados a exposición a campo electromagnético son leucemia y tumores de pecho y cerebrales.

### ***Carcinogénesis***

La transformación de células sanas en células malignas es un proceso complejo, que incluye al menos tres etapas distintas debidas a deformaciones en el material genético de las células. El proceso global se denomina modelo de *carcinogénesis multietapa* y se ilustra en la figura siguiente.





*Modelo de carcinogénesis multietapa*

El cáncer humano es el resultado de la acumulación de varios cambios genéticos y epigenéticos en una población de células dada y se inicia por un daño en la cadena de ADN. Al agente que causa tal efecto se le llama *genotoxina*. Es altamente improbable que un simple daño genético en las células cause cáncer. Para ello se necesita una serie de daños genéticos. La genotoxina puede afectar a más de un tipo de células y por tanto causar más de un tipo de cáncer. Un agente epigenético es algo que incrementa la probabilidad de causar cáncer por un agente genotóxico. No existen ensayos standard para la actividad epigenética y por tanto no hay una manera fácil de predecir si una agente presenta tal actividad.

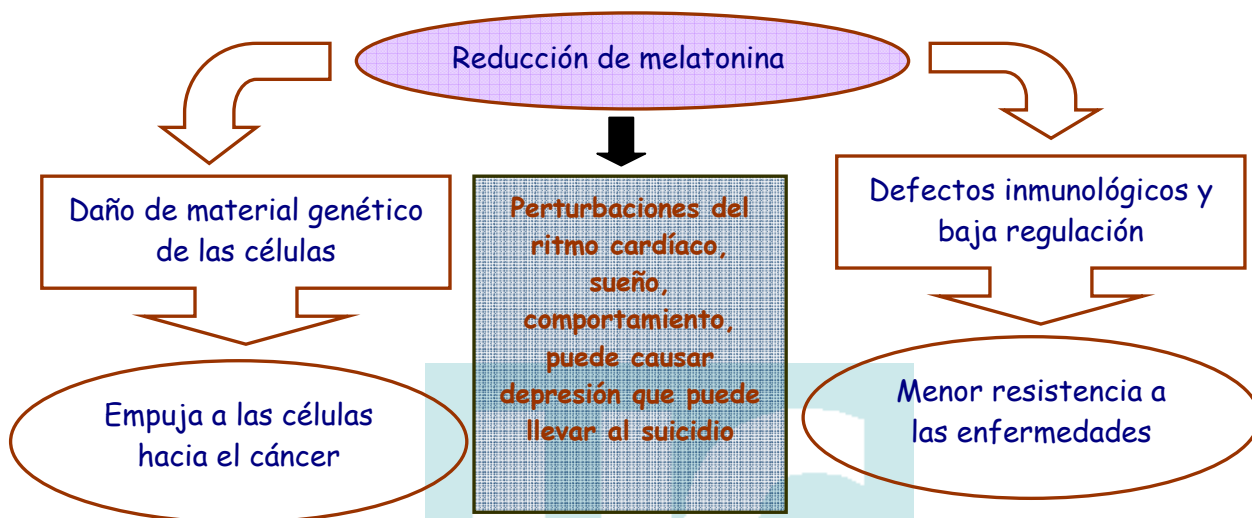
Los efectos genotóxicos de campos de ELF han sido ampliamente estudiados. No se ha confirmado ningún cambio celular significativo baja exposiciones a campos de ELF con niveles usuales. Los estudios muestran que los campos de ELF no causan

ni daño en el ADN, ni aberraciones cromosómicas, ni mutaciones, ni transformaciones en las células, ni formación de micronúcleos, ni efectos mutagénicos a niveles comparables a los que existen en el ambiente habitual. Sólo unos pocos estudios han comunicado genotoxicidad de estudios experimentales en animales, pero la mayoría no han reproducido fielmente las condiciones ambientales o no han sido replicados. Otros estudios han indicado que los campos de ELF podrían tener alguna actividad epigenética. Los mayores inconvenientes de los resultados provenientes de los estudios experimentales es que la mayoría de ellos no han sido replicados y, su repetición por otros autores es la única manera de comprobación de los resultados. Por otro lado, los resultados necesitan estar apoyados en mecanismos confirmados, lo que claramente no está todavía disponible.

La conclusión final de un gran número de estudios en este campo, es que exposiciones a campo eléctrico y magnético con intensidades menores a 0,1mT no producen ningún cambio celular significativo tales como actividad genotóxica o epigenética. Sin embargo, unos pocos estudios sí han encontrado evidencia de actividad epigenética. También, para campos superiores a 0,1 mT es pueden existir efectos nocivos.

#### ***Hipótesis de la melatonina***

Una posible interacción bajo investigación es que la exposición a campos de ELF suprime la producción de melatonina, que es una hormona producida por la glándula pineal localizada en una zona profunda del cerebro. La melatonina se produce principalmente por la noche y se libera mediante el flujo sanguíneo a través del cuerpo. La melatonina llega a casi todas las células del cuerpo humano, destruyendo los radicales libres además de regular a otras actividades como los ciclos menstruales femeninos, el ritmo cardíaco, el sueño, el estado de ánimo y la genética. La secreción de melatonina decrece con la edad siendo máxima en la niñez y su producción es esencial para el sistema inmunológico protegiendo al cuerpo de infecciones y de las células cancerosas. Si el nivel de melatonina decrece diversos tipos de cánceres pueden proliferar como se indica en la siguiente figura.



### *Consecuencias biológicas de la reducción de la melatonina*

Es conocido que la melatonina se ve afectada por la luz. Por ejemplo, las mujeres ciegas típicamente tienen más nivel de melatonina que las videntes y en ellas, las ciegas, la incidencia del cáncer de mama es mucho menor. Otras frecuencias de la energía electromagnética diferente a la del visible pueden también tener influencia en la generación de melatonina. El interés básico en la melatonina de muchos científicos es que podría servir de base para explicar algunos estudios epidemiológicos.

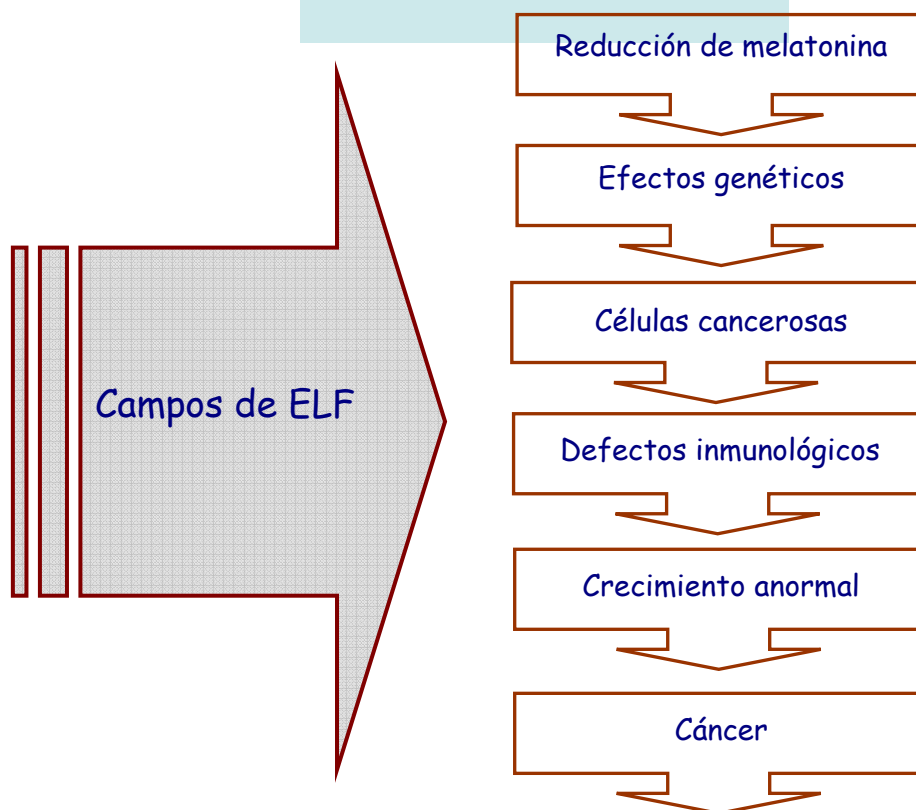
Diversos laboratorios han encontrado reducción de melatonina en células, animales y personas expuestos a campos de ELF siendo un efecto que depende fuertemente del período de exposición y de la intensidad del campo. Como un ejemplo Selmanoui y otros en 1995 realizaron un estudio con ratones expuestos a campos de 50 Hz con intensidades de 1, 10 y 100  $\mu$ Teslas durante 12 horas o durante 30 días durante 18 horas al día. Se observó un decrecimiento en la melatonina para los ratones expuestos 30 días (un 40% de reducción) y en los expuestos 12 horas a 100  $\mu$ T (un 20% de reducción). Para un 1  $\mu$ T no se observó reducción en ningún caso. Otros experimentos con células en cultivos y campos de 12 mG (1,2  $\mu$ T) a 60 Hz también provocaron una reducción en la actividad de la melatonina. Pero también existen estudios en los que no se ha encontrado esa reducción. Así Rogers y sus colaboradores, en 1995, sometieron a monos a campos eléctricos de 60 kV/m y magnéticos de 50  $\mu$ T o de 30 kV/m y 100  $\mu$ T de 60 Hz durante 12 horas al día y 6 semanas. No encontraron ninguna evidencia de reducción en la melatonina. También merece citar un estudio de Graham y otros en 2000 que no encontraron efectos entre hombres jóvenes voluntarios expuestos a campos de 60 Hz de 28,3  $\mu$ T.

### ***Estudios en células***

Las investigaciones de laboratorio sobre cultivos celulares, a los que se refiere como *in vitro*, son análisis experimentales o teóricos de efectos de CEM sobre células individuales o tejidos biológicos expuestos y evaluados fuera del cuerpo humano o de los animales. Aunque estos estudios no pueden ser transplantados en sus consecuencias directamente al cuerpo humano, son útiles como ayuda para entender los posibles efectos de los CEM en el cuerpo humano. La mayor ventaja de los estudios *in vitro* es que la geometría y las propiedades físicas de las muestras expuestas a CEM pueden ser muy bien controladas lo que permite su comparación entre los diferentes laboratorios. Existe una gran cantidad de estudios *in vitro* debido a la gran cantidad de procesos celulares que se pueden ver afectados por los campos de ELF.

### ***Efectos relevantes en el cáncer***

Algunos estudios han concluido que los campos de ELF pueden tener algún efecto relevante en el cáncer. Estos efectos se resumen en la siguiente figura.



*Efectos que pueden llevar al cáncer debido a exposición a campos de ELF*

Los posibles efectos sobre diferentes actividades del cuerpo de resumen a continuación.

### ***Material genético***

El genoma humano, que es una secuencia química que contiene la información básica del cuerpo humano, consiste de una cadena de ADN y está asociado a las moléculas proteínicas. Está organizado en estructuras llamadas cromosomas. El ADN es una macromolécula compleja, compuesta por dos cadenas o hélices que se entrelazan entre sí formando una doble hélice. Cada cadena está formada por millones de eslabones, llamados nucleótidos o bases nitrogenadas. Ambas hélices están unidas entre sí, a nivel de los eslabones complementarios de cada hélice, por parejas. La secuencia de los pares de bases es lo que determina el código genético. Según el orden que sigan esos pares de bases, se codifica una función u otra, o simplemente no se codifica nada. El ADN de la célula se organiza en cromosomas. Cada cromosoma es una molécula muy larga de ADN. Cada vez que una célula se divide en dos, el genoma entero se duplica; en humanos y otros organismos complejos esa duplicación se realiza en el núcleo. La mínima secuencia de ADN que es capaz de codificar una función o una estructura completa se denomina GEN. Cada molécula de ADN contiene muchos genes, unidad funcional y física fundamental de la herencia. Un gen es una secuencia ordenada de nucleótidos localizados en una cierta posición de un cromosoma específico y que codifica la información final. Podemos pensar en los genes como la información de un ordenador que se estructura en unidades de información llamados bits. Los genes son las unidades de información del ADN que se utilizan para construir las proteínas, entre otras cosas, del cuerpo humano. Se estima que el genoma humano tiene al menos 100.000 genes. El núcleo de la mayoría de las células humanas contiene dos conjuntos de cromosomas, provenientes cada uno de ellos del padre y de la madre. El ser humano tiene su ADN organizado en 23 pares de cromosomas distintos, es decir, 46 cromosomas. Cada conjunto de 23 cromosomas tiene 22 autónomos y dos cromosomas sexuales X e Y (una mujer tiene un par de cromosomas X y un hombre tiene un par X e Y). Los cromosomas contienen, aproximadamente, partes iguales de proteínas y ADN.

Mucha de la investigación en efectos biológicos de los CEM se ha dedicado a encontrar si la exposición a campos de ELF puede dañar el ADN o inducir mutaciones en él. Generalmente, se cree que la energía asociada con campos de ELF no es suficiente para causar un daño directo en el ADN; sin embargo, debe entenderse que pueden ser posibles efectos indirectos que cambien los procesos en las células que puedan producir un daño en el ADN. Por otro lado, campos de ELF con intensidades muy superiores a las habituales en el ambiente pueden producir cambios en la síntesis del ADN, cambiar la distribución molecular o inducir aberraciones cromosómicas. No nombraremos ningún estudio en particular, pero decir que en general los cambios mutagénicos sólo se observan a intensidad de campo alta.

### ***Transporte de calcio***

Los iones de calcio son partículas cargadas que tienen un papel vital en varios procesos celulares. El calcio es un componente crítico en la comunicación intercelular en el cuerpo y un regulador del crecimiento celular. El mantenimiento de una óptima concentración de calcio es muy importante. El fenómeno de liberación de iones de calcio  $\text{Ca}^{++}$  de las células por exposición de campos de ELF es conocido especialmente en el cerebro y las células linfáticas. Niveles elevados de  $\text{Ca}^{++}$  se han encontrado con niveles bajos y altos de campo en cultivos celulares y animales. El exceso de  $\text{Ca}^{++}$  puede causar perturbaciones en la actividad hormonal. Sin embargo, muchos científicos no estiman tan importante el papel del  $\text{Ca}^{++}$  en el cáncer y la leucemia aunque se conoce que las células segregan iones de calcio a las células circundantes como un mensaje para bloquear el desarrollo celular.

### ***Proliferación celular***

La biología de la división celular es similar en las células normales y las cancerosas. La diferencia es que las funciones de las células cancerosas están reguladas de forma extraña. Algunos estudios *in vitro* han mostrado proliferación de células debido a exposición a campos de ELF.

### ***Actividad de las enzimas***

Como otras proteínas, las enzimas consisten de largas cadenas de aminoácidos que se mantienen unidas. Están presentes en todas las células vivas y tienen una función esencial en el control de los procesos metabólicos. De nuevo existen estudios sobre la influencia de los campos de ELF sobre las enzimas.

### ***Hormonas***

Las hormonas son sustancias químicas, que se transportan en la sangre de un órgano a otro y alteran la actividad funcional y algunas veces la estructura de algunos órganos. Muchos estudios han demostrado los efectos sobre las hormonas de campos de ELF.

### ***Sistema inmunológico***

El sistema inmunológico es un mecanismo de protección compuesto de muchos tipos de células interdependientes que conjuntamente defienden el cuerpo de las



bacterias, microbios, toxinas, parásitos, infecciones víricas y crecimiento de tumores celulares. El sistema inmunológico no parece que se vea alterado por campos de ELF de niveles bajos.

### ***Comunicación intercelular***

Las interacciones intercelulares juegan un papel primordial en el desarrollo del sistema nervioso de todos los organismos. Las señales químicas y eléctricas a través de las membranas son las responsables de las comunicaciones intercelulares. Los campos de ELF pueden cambiar las propiedades de la membrana de las células, modificar las funciones celulares e interferir en la transferencia de información intercelular.

### ***Efectos no cancerosos***

Los efectos no cancerosos del campo de ELF en estudios *in vitro* no son tan numerosos como los anteriores. Se han estudiado efectos sobre la división y crecimiento celular para campos del orden de unos pocos V/m o décimas de mT. También se han estudiado efectos asociados con la exposición de embriones a campos de ELF. La importancia de estos estudios es que se han realizado conjuntamente en seis laboratorios de cuatro países. Con campos de 100 Hz y señales pulsadas (de corta duración) se encontró un 6% de incremento en el número de embriones anormales.

### ***Estudios en animales***

Los estudios en animales, llamados *in vivo*, tienen por objeto determinar los efectos biológicos de campos eléctrico y magnético sobre animales completos. Investigaciones en animales expuestos a agentes tóxicos sospechosos son importantes en la predicción de la potencial toxicidad en los humanos y en la confirmación de los efectos indicados por los estudios epidemiológicos. También proporcionan una información muy valiosa para estimar los niveles a los que la toxicidad puede ocurrir. Los estudios en animales son muy importantes pues pueden ser la base para elaborar modelos fiables en los que examinar cómo los campos de ELF influyen en la causa del riesgo. El proceso usual es exponer a los animales a un CEM y observar si desarrollan riesgos en su salud, cáncer u otras enfermedades. Estos experimentos, en si mismos hay que tomarlos con mucha cautela, en el sentido en que los animales podrían no exhibir las mismas respuestas, sensibilidad y propiedades que los humanos a los parámetros de la exposición.



### ***Estudios sobre cáncer en animales***

No existe ninguna evidencia en ningún estudio que campos de ELF de baja intensidad puedan causar cáncer en animales. Existe un estudio sobre animales tratados con un iniciador químico que ha encontrado un gran número de tumores en ellos cuando son sometidos a campos magnéticos de intensidades medias. Otros estudios en roedores sometidos a campos de ELF con valores de campo magnético de  $100\mu\text{T}$  mostraron crecimiento en los tumores de mama pero no una mayor incidencia en su presencia. Basándonos en los estudios realizados, es posible concluir que no hay una evidente conexión que ligue a exposición a campos de ELF con niveles del orden de los que existen en el ambiente habitual con el cáncer en animales. Para campos magnéticos altos se ha visto en ciertos estudios una relación positiva en la incidencia sobre el cáncer.

### ***Estudios en animales sin relación con el cáncer***

Sobre la incidencia de campos de ELF en animales estudiando sus efectos sobre enfermedades no cancerosas existen también muchos estudios. Se han realizado estudios en ratas y ratones midiendo la influencia de campos de ELF en su presión sanguínea, actividad funcional y celular y resistencia del sistema inmunológico. El valor del campo magnético era de 2, 200 y  $1000\mu\text{T}$  a 60Hz y la exposición era continua. No se encontraron efectos significativos. No hay una evidencia de que la exposición a campos de ELF cause cambios en los animales. Algunos estudios han indicado algunos cambios en el comportamiento social de monos pero la recomendación en este sentido es continuar con los estudios.

### ***Estudios en humanos***

Los efectos de campos de ELF podrían ser estudiados en humanos, con seguridad y con efectividad sobre voluntarios, a pesar de las limitaciones en la duración de la exposición y los tipos de pruebas que se les puedan hacer. Los estudios en humanos se centran en los efectos que pueden ocurrir durante un tiempo que va de unos minutos a algunas semanas. Estudios más extensos en el tiempo son muy difíciles, si no imposibles, por la dificultad de controlar la exposición. La selección de mecanismos fisiológicos para analizar está también limitada a aquellos que se puedan medir por métodos no invasivos o mínimamente invasivos. Por otro lado estos estudios tienen ciertas ventajas, pues se centran directamente en la especie "correcta" evitando extrapolación de resultados obtenidos de otras especies. Los estudios con humanos voluntarios pueden ayudar a definir dosimetría y tipos de respuesta a los resultados dados por los estudios

epidemiológicos y podrían guiar áreas de investigación en animales en los que hubiera que recurrir a métodos y mecanismos más invasivos.

Es conocido que muchas personas han dado a conocer diferentes efectos sobre la salud debidos a exposiciones de campos de ELF, tales como dolores de cabeza, cambios cardiovasculares, cambios en el comportamiento, confusión, depresión, dificultad en la concentración, perturbaciones del sueño, malas digestiones etc. Las fuentes esenciales en este campos son las encuestas a las personas que viven cerca de fuentes potenciales de campos de ELF, pruebas de laboratorio y datos epidemiológicos.

### ***Efectos en el comportamiento***

El sistema nervioso central es un lugar de potencial interacción con los campos de ELF debido a la sensibilidad eléctrica de sus tejidos. El sistema nervioso central consiste de nervios periféricos, la médula espinal y el cerebro y su labor es controlar la transferencia de información entre los organismos y el entorno y también controla los procesos internos. La posibilidad de que los campos de ELF afecten al sistema nervioso central y en especial al cerebro causando efectos adversos en el comportamiento y las capacidades cognitivas ha sido una preocupación constante en los diferentes estudios.

### ***Efectos en el sistema cardiovascular***

El corazón es un órgano bioeléctrico. El electrocardiograma es el diagnóstico esencial de los cardiólogos para determinar la condición del corazón. Densidades de corriente alrededor de  $0,1 \text{ mA/m}^2$  pueden estimular tejidos mientras que corrientes de  $1 \text{ A/m}^2$  interfieren con la acción del corazón causando fibrilación ventricular.

### ***Sensibilidad eléctrica***

La sensibilidad eléctrica también conocida como *hipersensibilidad electromagnética* o *electrosensibilidad*, es un desorden neurológico con síntomas de tipo alérgico que está relacionado con los CEM. Algunos individuos se muestran más sensibles a ciertas frecuencias reaccionando cuando se encuentran en las proximidades de fuentes electromagnéticas. Los síntomas de la electrosensibilidad pueden incluir dolores de cabeza, irritación en los ojos, náuseas, irritaciones en la piel, debilidad, fatiga, pérdida de concentración, dificultad de respirar, trastornos del sueño etc. Algunos autores consideran que este síndrome es puramente sicosomático.

### ***Shocks y microshocks***

Un mecanismo de interacción entre los campos de ELF y los tejidos vivos es la estimulación directa de células y membranas. Esto prueba la capacidad del cuerpo humano para percibir corrientes eléctricas que con toda probabilidad puedan producir shocks o microshocks dependiendo de la intensidad de la corriente. Por microshock se entiende arritmias cardíacas producidas por corrientes de baja intensidad que pasan a través del corazón. El término shock se utiliza para describir todos los daños importantes de la corriente eléctrica que pueden causar pérdida de conciencia y graves quemaduras o a perder la vida. Shocks ocurren más frecuentemente en personas que tocan un objeto conductor grande, como un motor, cuando no está aislado de tierra. Se estima que el umbral para la densidad de corriente para la estimulación de células excitables es de  $1 \text{ mA/m}^2$ . A frecuencias de ELF esto se corresponde con un campo eléctrico en el interior del cuerpo de  $100 \text{ V/m}$ . El campo eléctrico necesario para producir un shock es comparable con el que se necesita para producir calor. El valor mínimo para el shock se incrementa con la frecuencia. Por tanto, a bajas frecuencias el shock es el daño límite y a frecuencias grandes el calentamiento y las quemaduras pueden ocurrir a intensidades de campo bajas antes de dar lugar a un shock.

### ***Conclusiones***

En conjunto, de la literatura disponible sobre efectos biológicos de campos de ELF, no se deducen resultados adversos sobre la salud. Esto significa que la preocupación pública sobre estos efectos no está basada en pruebas científicamente establecidas. Por otro lado, establecer tales pruebas es muy difícil. La falta de conexión entre los resultados experimentales (*in vitro* o *in vivo*), datos en humanos y los mecanismos de interacción complica en gran manera las conclusiones. Dada la complejidad de los organismos vivos, es muy difícil aplicar el conocimiento de esas fuentes. A diferencia de los estudios en humanos, las investigaciones experimentales se aplican en especies "no correctas" y normalmente bajo exposiciones que no se encuentran en la vida real; sin embargo, muestran algunas correspondencias que son difíciles de ignorar. Los estudios celulares dan un conocimiento de las potenciales alteraciones fisiológicas a nivel celular básico debido a la exposición y otros efectos y son necesarios para evaluar efectos sobre la salud humana de exposición prolongada a campos de ELF. Sin embargo, existe cierta dificultad en extrapolar evidencias de los estudios en animales a otras especies, aunque es plausible aceptar que ciertos efectos ocurridos en una especie incrementa el indicio de que se puedan producir efectos similares en otras especies. Muchas de las evidencias experimentales justifican, moderadamente, una relación causal entre la exposición a campos de ELF ambientales y cambios en la función biológica. Sin

embargo, la falta de consistencia debilita la creencia de que esta asociación sea realmente debida a los campos de ELF. Por tanto, no es posible, de estudios experimentales, demostrar la existencia de ese riesgo. Sólo es posible probar que, bajo ciertas condiciones de exposición, existe un efecto.

Para conseguir una posible prueba, se necesitará un mejor control de la exposición a campos de ELF, incluyendo efectos transitorios, incrementar los estudios en animales y simular de forma más fiable los efectos en humanos reales y, asimismo, incrementar los estudios en humanos con incidencia directa en los efectos que podrían llevar a alteraciones de la salud.

## **EFFECTOS Y MECANISMOS DE LOS CAMPOS DE ALTA FRECUENCIA (RF/MW: RADIO FRECUENCIA Y MICROONDAS)**

### ***Introducción***

En 1909 Marconi hizo la primera comunicación sin hilos a través del océano Atlántico en una distancia de 3000 Km. Nació así lo que conocemos con el nombre de radio. En la actualidad, la tecnología en radio es una gran mercado internacional y el uso de comunicaciones sin hilos, a través de la telefonía móvil, ha alcanzado cotas no imaginables hace poco tiempo. El término de radio frecuencia (RF) se refiere a una corriente alterna que alimenta una antena que genera un campo electromagnético variable en el tiempo utilizable en multitud de aplicaciones que van desde la comunicación sin hilos hasta las aplicaciones médicas. Como ya se ha indicado entre las aplicaciones de la RF/MW podemos nombrar,

- ✓ Estaciones de radio y televisión
- ✓ Comunicaciones punto-punto en microondas; comunicaciones móviles de todo tipo (celulares, de onda corta etc.)
- ✓ Radioaficionados
- ✓ Navegación (marítima y aérea), aplicaciones radar (militares y civiles)
- ✓ Hornos microondas (para cocinar y aplicaciones industriales)
- ✓ Amplificadores en compatibilidad electromagnética y metrología.

Los elementos básicos de un sistema de RF/MW son

- ✓ Generadores o fuentes de RF/MW
- ✓ Líneas de transmisión: son los elementos utilizados para transportar la energía del generador a la antena y básicamente pueden ser cables coaxiales, líneas planas o guías de onda.
- ✓ La antena, es un dispositivo que acopla el circuito que genera la energía electromagnética al espacio libre por donde se propaga la energía

electromagnética que posteriormente recogerá otra antena. Las características de las antenas se muestran en otro apartado.

En cuanto a los diferentes sistemas dependiendo de las aplicaciones podemos nombrar los siguientes

### ***Transmisores de televisión y radio***

Las estaciones de radio y televisión emiten sus señales en a través de antenas de AM y FM. Normalmente las señales de AM emiten entre 535-1700 KHz y las de FM entre 2-806 MHz, y para televisión en las bandas de VHF y UHF.

### ***Sistemas de radar***

La palabra radar es un acrónimo utilizado por la marina estadounidense en 1942 que significa detección y alcance vía radio (radio detecting and ranging) y, por supuesto, desarrollado únicamente con fines militares, aunque después su utilidad se expandió a otros ámbitos. El radar mide la intensidad y tiempo que tarda en volver un pulso que envía una antena y que choca en un blanco. De esa información se obtiene la distancia a la que se encuentra. Se envían alrededor de 1500 pulsos de alta potencia por segundo con una anchura de 10-50  $\mu$ s. Asimismo, son comunes los radares de tráfico que a través del efecto Doppler calculan la velocidad a la avanza un móvil. Los primeros radares de efecto Doppler funcionaban a 10.525 GHz dentro de la banda X. Posteriormente se usaron a frecuencias superiores de 24,15 GHz (en banda milimétrica). En la actualidad se utilizan en la banda de 33,7-36 GHz. Estos radares emiten una señal de débil potencia en forma de onda continua (CW) en lugar de pulsos y las potencias son del orden de 10 a 100 mW, siendo un valor típico 15 mW que es considerado una señal de débil

### ***Estaciones de satélites terrestres***

Un satélite es un transmisor receptor que es lanzado por un cohete y colocado en órbita alrededor de la Tierra sometido a la atracción gravitacional. Sus funciones son múltiples: telefónicas, meteorológicas, detección en la Tierra y lejana, televisión y radio y en plataformas para sistema global de posicionamiento (GPS). Son muy comunes ahora las antenas parabólicas para plataformas de televisión digital que reciben señal enviada por las situadas en satélites en orbita geoestacionaria a 36.000 Kms de la Tierra.

### ***Comunicaciones microondas***

Las comunicaciones punto a punto entre antenas con "visión" directa es una forma de comunicación utilizada habitualmente en radiocomunicaciones. Las antenas de comunicación de microondas emiten y reciben señales de relativamente baja potencia a través de distancia no muy grandes. Normalmente las antenas empleadas son muy directivas de forma que existe muy poca señal en otro dirección que no sea el camino directo entre dos antenas.

### ***Equipos móviles de radio***

Estos sistemas (no los celulares actuales) son los más antiguos sistemas de comunicación sin hilos. Comenzó en USA en 1921 operando a 2MHz, de forma experimental para los departamentos de policía, y no empezaron de forma práctica hasta los años 40.

### ***Equipos buscadores***

Son equipos que avisan cuando reciben una señal emitida por una antena. Su utilidad ha disminuido con la llegada de la telefonía celular pero aún sigue siendo una buena opción en determinados sectores. Las frecuencias de las señales pueden estar entre 16-150 KHz para lugares de no más de 4 hectáreas, en las bandas de HF (26-31 MHz) o VHF (49 MHz), en la de UHF (459 MHz) para edificios e industrias. Habitualmente los transmisores se colocan en lo alto de los edificios.

### ***Comunicaciones celulares (telefonía móvil)***

Este es un tipo de comunicación de banda limitada, analógica o digital, en la que una persona se comunica vía radio a través de un terminal móvil con una antena que está situada relativamente cerca de él. Su crecimiento ha sido brutal en estos pocos últimos años. Su crecimiento empezó en los años 80, con la primera generación de móviles con tecnología analógica. Posteriormente comenzó la tecnología digital, lo que supuso una mejora en las prestaciones y servicios ofrecidos. La mayoría de los usuarios utilizan el sistema GSM (Global System for Mobile Communication). En la actualidad la estandarización se está moviendo hacia una tercera generación de móviles denominada UMTS (Universal Móviles Telecommunication System) que en Europa se localiza en la banda de 2 GHz.



### ***Sistemas de comunicación personal***

Aquí se engloban todos aquellos sistemas de comunicación personal sin hilos.

### ***Otros sistemas***

Aquí se engloban todos aquellos sistemas que no se utilizan para la comunicación personal. Así, la energía de RF en el rango de 3 a 300 MHz se utiliza para distintos procesos industriales de calentamiento. Asimismo, aprovechando la habilidad de la energía de microondas para penetrar en un medio material, se utilizan para muchas aplicaciones los hornos microondas. En particular, en los hogares se utilizan hornos microondas operando a una frecuencia de 2,45 GHz, que es precisamente la frecuencia de resonancia de las moléculas de agua que están en una cantidad importante en la mayoría de los alimentos. A esta frecuencia se produce la mayor absorción de energía electromagnética por estas moléculas.

Con esta pequeña introducción, se ha pretendido hacer un repaso a la multitud de dispositivos eléctricos capaces de generar ondas electromagnéticas susceptibles de interactuar con los tejidos biológicos.

## **EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS DE RF/MW**

En cuanto a los efectos biológicos de la RF/MW se han desarrollado un número significativo de estudios que exploran la posible relación entre la exposición a la radiación de campos RF/MW y las enfermedades, incluyendo el cáncer; sin embargo, todavía deberá de pasar un tiempo hasta que se tengan los resultados finales de la mayoría de los estudios.

Básicamente, existen tres tipos de efectos biológicos a estas frecuencias

- ✚ Efectos de nivel alto (térmicos)
- ✚ Efectos de nivel medio (atérmicos)
- ✚ Efectos de nivel bajo (no térmicos)

### ***Efectos térmicos***

Un resultado obvio de la radiación de RF/MW es el calentamiento del cuerpo humano a pesar de sus procesos propios de termorregulación. Estos efectos son conocidos desde las primeras investigaciones en efectos terapéuticos realizadas por los "padres" del electromagnetismo en el siglo XIX. Los efectos térmicos tienen



implicaciones significativas en la salud humana y están relacionados con las corrientes inducidas. El calentamiento es la interacción primordial de los campos de RF/MW especialmente a frecuencias por encima de 1MHz. Por debajo, el efecto dominante es el de las corrientes inducidas. Los sistemas biológicos alteran su funcionamiento debido al cambio de temperatura. Temperaturas elevadas tienen efectos como cataratas, incremento de la presión arterial, vértigo y mareos, debilidad, desorientación o náuseas.

Los efectos térmicos se pueden definir como una deposición de energía mayor que la capacidad termorregulatoria del cuerpo humano. Normalmente, el cuerpo genera calor debido al consumo de alimentos, llamado razón de metabolismo basal y que tiene una definición médica (incremento de calor en condiciones normales - 33°C- para un cuerpo en reposo después de 12 horas de la última comida). El valor estándar es de 1,2 W/kg. Si un humano se calienta por alguna fuente externa a una razón más elevada puede ocurrir un daño térmico. Los efectos térmicos están fuertemente influidos por la temperatura ambiente y la humedad relativa. El calor inducido en el cuerpo aumenta con la masa del cuerpo, al menos para animales pequeños. El cuerpo humano intenta regular su temperatura debido a un aumento térmico a través de la respiración y el intercambio de calor vía flujo sanguíneo. Las partes del cuerpo que tienen menos riego sanguíneo son las más afectadas por los efectos térmicos debido a que la termorregulación tiene una menor capacidad de acción. Efectos térmicos adversos tales como cataratas y quemaduras en la piel se producen con exposiciones a campos de RF/MW con densidades de potencia muy altas y por encima de 1000 W/m<sup>2</sup>. Estos valores no se encuentran nunca cerca de fuentes de RF/MW convencionales aunque sí pueden existir cerca de transmisores de alta potencia tales como radares militares.

### ***Efectos atérmicos y no térmicos***

En cuanto a los efectos de la radiación de nivel bajo y medio se trata de ver si estos niveles de potencia pueden causar cambios biológicos dañinos en ausencia de un aumento demostrable de la temperatura. Sobre este aspecto existe alguna controversia. Podemos diferenciar entre aquellos casos en los que la termorregulación entra o no en "funcionamiento". Cuando la termorregulación hace que la temperatura no aumente, cualquier efecto biológico se dice que es *no térmico*. Si la termorregulación no interviene se habla de efectos *atérmicos*. Todos estos efectos se producen con valores de SAR inferiores a 2W/kg.

Se han descrito muchos en la literatura, pero básicamente casi todos hablan de efectos neuronales, morfológicos, actividad neurotransmisora y de las enzimas, concentración de iones y efectos sobre el metabolismo. Sobre este tema existe todavía mucha discrepancia entre los investigadores. Algunos consideran probados estos efectos y otros consideran que no está probada de ninguna manera la conexión entre los efectos no térmicos dañinos y la radiación de bajo

nivel. Finalmente decir que los efectos no térmicos también dependen fuertemente de factores de propagación de la onda electromagnética, principalmente el tipo de modulación y por supuesto la frecuencia.

Una revisión de la literatura sobre efectos de campos de RF/MW de niveles intermedios y bajos muestran que la exposición a niveles de SAR bajos (siempre menores que 2W/kg), bajo ciertas condiciones, pueden afectar al sistema nervioso, incluyendo efectos morfológicos, electrofisiológicos, en la actividad neurotransmisora y en el metabolismo. También se han descrito efectos sobre el sistema inmunológico, sobre la morfología de los genes y los cromosomas, concentración de iones, morfología celular etc. Algunos de estos efectos nombrados han sido refutados por otros autores por lo que la situación al respecto no es clara. En la mayoría de los casos, los mecanismos de los efectos no se conocen todavía.

Respecto a la aplicación de los resultados obtenidos sobre los efectos de la RF/MW correspondiente a la telefonía móvil hay que tener una enorme precaución. Parece claro que no existe en la actualidad una gran cantidad de datos que permitan concluir si la exposición a campos de RF/MW durante el uso normal de un teléfono móvil puede producir o no efectos nocivos sobre la salud. Puesto que parámetros de la RF/MW tales como frecuencia, intensidad, duración, modulación, forma de onda etc. son esenciales para determinar la respuesta biológica, es necesario investigar mucho más en la interacción de tales parámetros con la respuesta de la señal de un móvil en condiciones normales. Algunos investigadores dan por científicamente probados los efectos biológicos no térmicos de campos de RF/MW de niveles intermedios y bajos. Otros investigadores, sin embargo, no confirman la opinión anterior asegurando que esos resultados son meramente especulativos, afirmando que haya o no conexión entre los efectos y la exposición a campos de RF/MW, éstos sólo se producen a niveles muchos mayores de los que se encuentran en aplicaciones de telecomunicaciones.

### ***Investigaciones de laboratorio***

Los diferentes organismos encargados de elaborar los límites a la exposición de CEM no han tenido hasta ahora en cuenta la protección frente a efectos no térmicos y atérmicos debido a la poca evidencia científica que existe en este aspecto. Un punto importante es conocer cómo se propaga la energía de RF/MW a través de un cuerpo biológico. Y cómo se distribuye la energía electromagnética por el cuerpo y cómo se dispersa por el cuerpo, especialmente si el aumento de temperatura no es medible por ser muy pequeño. En muchos casos, el campo de RF/MW se encuentra "mezclado" con campos de baja frecuencia (ELF) a través de un proceso denominado modulación. Los efectos del campo de RF/MW pueden verse enmascarados por los del campo de ELF y por lo tanto ser muy difícil de distinguir

entre unos y otros. A continuación, se indicarán algunos efectos más significativos relacionados en la literatura sobre el tema, pero deben ser entendidos con bastante cautela.

### ***Efectos genéticos***

Como se ha indicado para campos de ELF los agentes que pueden dañar el ADN de las células se dice que tienen un potencial carcinógeno y se llaman genotóxicas o que tienen actividad genotóxica. El concepto de daño de ADN como base para la formación del cáncer está puesto en tela de juicio por la evidencia de que el cáncer puede provenir de factores que no actúan directamente sobre el ADN. Si los campos de RF/MW no son directamente mutagénicos, existe siempre la cuestión de si pueden incrementar el desarrollo de células malignas o alterar otros procesos que produzcan cambios en el material genético. Relacionado con esto está la preocupación sobre los efectos sobre la salud a exposiciones prolongadas a campos de RF/MW de bajo nivel. Los investigadores creen que cambios genéticos sólo se producen en presencia de un aumento sustancial de la temperatura. Estas observaciones están en total acuerdo con la interpretación de que la energía de RF/MW no causa daño directo en el ADN debido a la poca energía asociada a sus fotones (ver módulo 1: constante de Planck).

### ***Estudios en células (in vitro)***

Aunque la radiación no ionizante no puede dañar el ADN de la misma forma que lo hace la ionizante, es probable que la exposición a campos de RF/MW pueda producir alguna alteración en procesos celulares, lo que, indirectamente, puede afectar a la estructura de ADN. Por tanto los estudios en células (*in vitro*) son esenciales para interpretar los resultados experimentales. Sin embargo, la crítica a estos estudios se basa en el hecho de indicar daños en el ADN y además, en que los estudios en su gran mayoría no han sido replicados. Son multitud los estudios celulares unos mostrando efectos y otros no. Probablemente el más "famoso" fue el realizado por Lai y Singh en 1995 en la Universidad de Washington, en Seattle. Con frecuencias de 2,45 GHz (las de los hornos de microondas) y con valores de SAR de 1,2 W/kg vieron efectos en las células del cerebro. Eso produjo una gran controversia en las compañías de telefonía móvil (la frecuencia de los móviles de tercera generación, la famosa UMTS, está en torno a esa frecuencia y las de GSM cercanas) y preocupación entre los usuarios, pues parecía que se encontraba una conexión, con datos ciertamente sin comprobar, entre los teléfonos móviles y el cáncer de cerebro. Otros autores realizaron estudios similares y no encontraron nada.

### ***Estudios en animales (in vivo)***

También se han realizado estudios en animales, en los que es más difícil de controlar los parámetros pero pueden dar una mejor valoración de las posibles consecuencias. De nuevo existe controversia entre diferentes estudios

Como resumen de los estudios genéticos podemos decir que los estudios experimentales, especialmente los celulares, sobre exposición a campos de RF/MW no han dado indicios de evidencia genotóxica a menos que la potencia incidente fuera suficiente para causar daños térmicos. Por otro lado, hay muy pocos resultados positivos sobre efectos genéticos de radiación de RF/MW de baja intensidad, de entre los que algunos resultados no han sido replicados, o bien no han sido confirmados cuando han sido replicados por otros autores.

### ***Proliferación celular***

La perturbación del ciclo normal celular es un posible signo de crecimiento incontrolado de células cancerosas. Incrementos de este tipo se han descrito pero sólo en el caso en que haya calentamiento. Otros estudios no han encontrado estos aumentos.

### ***Transformación celular***

El estudio de carcinogénesis se ha visto favorecido por el descubrimiento de la transformación morfológica en cultivos de células de mamíferos. Si ocurre alguna transformación morfológica de células eso da lugar a cambios en el control del crecimiento de las células del cultivo.

### ***Enzimas***

Se estima que la RF/MW modulada de bajo nivel puede afectar la actividad intracelular de las enzimas. Algunos estudios han detectado evidencias de cambios en esta actividad.

### ***Hormonas***

La influencia de los campos de ELF sobre hormonas, tales como la melatonina, ya ha sido comentada. También los campos de RF/MW pueden influir sobre la concentración de hormonas en la sangre.

### ***Actividad inmunológica***

La actividad inmunológica tiene una gran importancia en los sistemas vivos y también se ha estudiado la posible influencia de los campos de RF/MW sobre ella.

### ***Funciones de la membrana***

Las células poseen un voltaje a través de sus membranas y utilizan iones de calcio para muchos de los procesos de regulación en las células. Una alteración del campo eléctrico sobre la superficie de las células cambia la eficiencia de su comportamiento. Algunos estudios han encontrado cambios en la concentración de iones de calcio lo que se relaciona con las alteraciones en el funcionamiento de la membrana.

### ***Estudios de cáncer en animales***

Como la exposición a campos de RF/MW no se considera causante directo de carcinogénesis, la investigación se centra más bien en sus posibles efectos catalizadores, de ayuda a la proliferación de cáncer. Para hacernos una idea de cómo son estos estudios y qué características tienen podemos nombrar el realizado en la Universidad de Washinton. Un centenar de ratas se expusieron a radiación de RF/MW de 2,45 GHz modulada por una señal de 800 Hz durante 25 meses, 21,5 horas al día y con una SAR aproximada en los animales de 0,4 W/kg. Las ratas expuestas tuvieron un aumento significativo de tumores malignos respecto al grupo de control (grupo de animales no expuesto). Otro estudio similar, subvencionado por Motorola y dirigido por el Prof. Adey en la Universidad de California, exponiendo 244 ratones a señales de RF/MW de 837 MHz durante 22 meses seguidos; no encontraron aumento significativo en tumores cerebrales. Otros resultados que se pueden citar han relatado aumento de linfomas, ninguna influencia en aumento de tumores de mama. Este último resultado ha sido replicado por otro investigador. También existe un conjunto de estudios realizados sobre animales tratados con carcinógenos químicos. Observemos que todos los estudios someten a los animales radiaciones extremadamente prolongadas.

### ***Estudios de enfermedades no cancerosas en animales***

Además de la mayoría de los estudios que se han enfocado a carcinogénesis, aumento de tumores y efectos mutagénicos, también se han hecho algunos estudios



sobre posible influencia de la radiación de RF/MW en enfermedades no cancerosas. Los estudios se han centrado en efectos sobre la morfología del cerebro (sólo se han encontrado efectos a intensidades altas), sobre la morfología del ojo, sobre cambios en el comportamiento y sobre el sistema fisiológico que separa el cerebro de la médula espinal conocido como barrera de la sangre del cerebro. Este último tema es muy delicado por la vital importancia que tiene este sistema fisiológico en la salud: cualquier interrupción o trastorno de este sistema puede tener graves consecuencias.

## CONCLUSIONES SOBRE EFECTOS BIOLÓGICOS DE RF/MW

Muchos de los estudios experimentales publicados en revistas y reuniones científicas presentan el inconveniente de no proporcionar suficientes detalles sobre las condiciones de exposición. La mayoría de los efectos relacionados en la literatura no se relacionan directamente con enfermedades humanas o su relación es cuanto menos dudosa debido a la falta de explicación y conocimiento de los mecanismos de interacción. En cualquier caso es esencial entender que *la falta de evidencia sobre posibles efectos adversos para la salud no es igual a la evidencia de que no exista ningún efecto*. De la misma forma, es imposible demostrar la inocuidad del campo electromagnético, por lo que la pregunta que debemos hacernos no es si la radiación electromagnética es inocua para la salud si no bajo qué niveles la ciencia no ha encontrado ningún efecto nocivo y por tanto, a la luz del conocimiento científico, no producen efectos nocivos en la salud.

El balance de los estudios disponibles no propone que los campos de RF/MW causen cáncer u otras enfermedades, aunque sí exista alguna evidencia sobre efectos en las funciones biológicas, incluyendo las cerebrales, que puedan ser inducidas por radiación de RF/MW a niveles comparables con los asociados a los habituales de la telefonía móvil. Hasta el momento, sin embargo, no hay evidencia de que esos efectos biológicos desarrollen riesgos para la salud. No se sabe con absoluta seguridad cuáles son los efectos de exposición prolongada a campos de RF/MW y si son acumulativos. El resultado de un efecto acumulativo es sustancial en los efectos sobre la salud. La larga exposición acumulativa es el producto del tiempo y la exposición personal media. Por ejemplo, el efecto de la radiación ionizante, por ejemplo los rayos X, es acumulativo. Este tema ha surgido después de un número de estudios que han proporcionado efectos después de exposiciones prolongadas.

Es importante notar que los campos de RF/MW modulados (mezclados con una señal de menor frecuencia) o pulsados (transmisión a intervalos de tiempo muy pequeños) parece ser que producen más efectos.

Claramente se necesitan más estudios y análisis, bien realizados, independientes e imparciales y así conseguir un avance significativo en el

conocimiento del comportamiento los sistemas vivos que además debe de ser difundido al público en general. Todo esto implica la necesidad de invertir más dinero y tiempo para poder realizar evaluaciones precisas de las fuentes de campo electromagnético más habituales en nuestro entorno.

Finalmente, podemos decir que los efectos de la radiación de RF/MW son sólo una amenaza si la dosis de radiación es muy alta. En el caso de la mayoría de las fuentes de RF/MW de nuestro entorno habitual, especialmente las correspondientes a la telefonía móvil, la dosis no es alta. La detección de respuestas biológicas a exposiciones de bajo nivel requiere el diseño de procedimientos de investigación muy sensibles lo que puede crear una gran posibilidad de producir resultados contradictorios. Estas investigaciones dependen fuertemente de la habilidad y experiencia de los investigadores involucrados siendo necesario que los resultados que se obtengan sean comparados con investigaciones bien estructuradas de laboratorios independientes de equipos expertos.

### Referencias

- [1] R.W.Y. Habash: "Electromagnetic fields and Radiation: human bioeffects and safety", Marcel Dekker, Inc., New York, 2002.
- [2] L.A. Sagan: "Electric and Magnetic Fields: Invisible risks?", Gordon and Breach Science Publishers, The Netherlands, 1999.
- [3] Eleanor R. Adair, Ronald C. Petersen: "Biological effects of radio-frequency microwave radiation", IEEE, Vol. MTT-50, No. 3, pp. 953-962, marzo 2002. Revista del 50 aniversario de IEEE.
- [4] A. Rosen, María A. Stuchly, André Vander Vorst: "Applications of RF/Microwaves in Medicine", IEEE, Vol. MTT-50, No. 3, pp. 963-974, marzo 2002. Revista del 50 aniversario de IEEE.
- [5] "Biological effects and medical applications of electromagnetic energy", OM P. Gandhi, Editor, Prentice Hall, 1990.

### Referencias web

- [1] <http://www.bioelectromagnetics.org/>  
Sociedad de bioelectromagnetismo
- [2] <http://www.mcw.edu/gcrc/cop.html>  
Colegio Médico de Wisconsin
- [3] <http://www.grn.es/electropolucio/lafe3.htm>  
Algunos informes sobre bioefectos
- [4] [http://www.upv.es/antenas/Principal/efectos\\_biologicos.htm](http://www.upv.es/antenas/Principal/efectos_biologicos.htm)  
Página con enlaces a informes
- [5] [http://www.who.int/m/topicgroups/who\\_organization/en/index.html](http://www.who.int/m/topicgroups/who_organization/en/index.html)  
Organización mundial de la salud
- [6] <http://www.iegmp.org.uk/index.html>



Independent Expert Group on Mobile Phones

[7] <http://www.who.int/peh-emf/>

[8] <http://www.ortho.lsumc.edu/Faculty/Marino/EL/ELTOC.html>

Libro Electromagnetismo y Vida

[9] <http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/>

Información del programa EMFRAPID.

