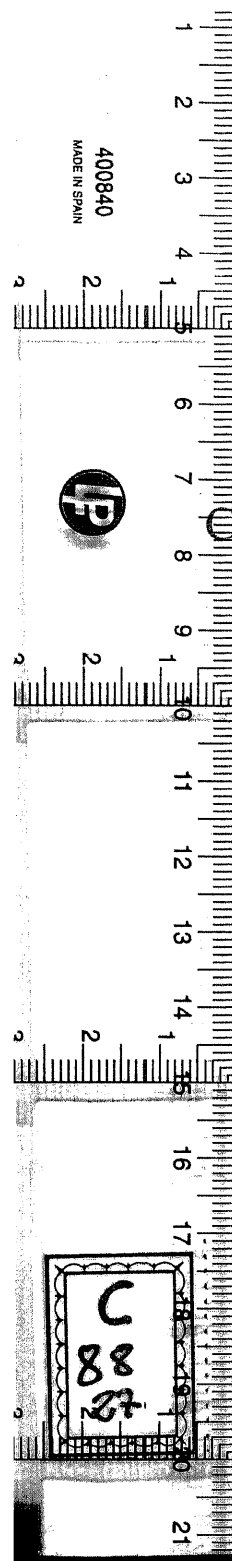


GERARDO PARDO SÁNCHEZ

Contaminación electromagnética

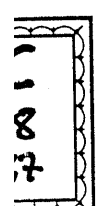


DISCURSO DE APERTURA
UNIVERSIDAD DE GRANADA
CURSO ACADÉMICO 2002-2003



GERARDO PARDO SÁNCHEZ

Contaminación electromagnética



DISCURSO DE APERTURA
UNIVERSIDAD DE GRANADA
CURSO ACADÉMICO 2002-2003

b 13227324
i 15010776

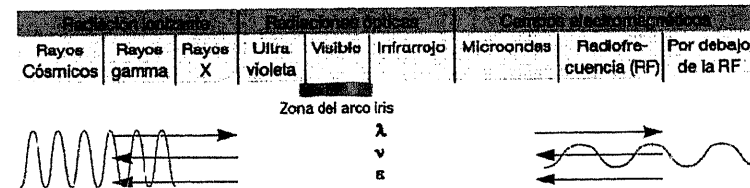
Contaminación electromagnética

GERARDO PARDO SÁNCHEZ

Contaminación electromagnética

UNIVERSIDAD DE GRANADA
CURSO ACADÉMICO 2002-2003

A los maestros que me iniciaron en la Ciencia
y a los discípulos que mantienen mi ilusión,
situando el testigo investigador mucho más alto.



© GERARDO PARDO SÁNCHEZ.
© UNIVERSIDAD DE GRANADA.
CATEDRÁTICO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS.
LECCIÓN INAUGURAL. APERTURA CURSO ACADÉMICO 2002-2003.
Edita: Secretaría General de la Universidad de Granada.
Imprime: Gráficas La Madraza.
Printed in Spain

Impreso en España

Excmo. y Mgfc. Rector,
Iltnas y respetadas autoridades,
Claustro de Doctores,
Profesores y alumnos,
Señoras y Señores:

A principios del pasado agosto estaba mentalmente muy distante de la Universidad. Una llamada de Secretaría General me conectó bruscamente con ella. Me daban a conocer el turno de representación de la Facultad de Ciencias, en el discurso de apertura. Pueden imaginar mi tensión interna dado que, por una parte, tenía confirmada una estancia en California (del 10 al 24 de septiembre) y, por otra, disfruto de una entrañable amistad con los responsables del gobierno de esta Universidad. El cariño que siempre he profesado a la Facultad, pesaron más que imaginadas propuestas de correr el turno. Y aquí estamos, pidiendo comprensión para un discurso que, dado mi temperamento y circunstancias, me temo sea un poco improvisado.

Un año más y con el ritual tradicional, se procede a la apertura del Curso 2002 - 03. Con el ritual entiendo que no se simboliza la rutina, sino el respeto al sentido cultural primigenio, que bien lo merece nuestra histórica universidad. Pensemos que estamos en una Institución que toma la siguiente provisión en enero de 1779, según consta en el Catálogo de la Universidad (leg. 1445): “Se manda a la Universidad de Granada que continúe la costumbre de paseos a caballo y a pie, observada en los grados de Licenciado y de doctor, con prevención que el paseo que antes se hacia a pie

hasta la Catedral, se haga en adelante por la manzana que circunda a la Universidad y que los vejámenes¹ que antes se daban en romance, se den en latín,..."

¹ Discurso poético de índole burlesca, que con motivo de ciertos grados se pronunciaba en las universidades y academias contra quienes en ellos tomaban parte.

CONTAMINACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

El tema ambiental que consideramos, la contaminación electromagnética, es actual, polémico y a su vez académico. Estas características se deben tener muy presentes, dado que estamos en las primeras etapas de su conocimiento y le queda mucho futuro. Nuestra responsabilidad sería dar la respuesta hoy, pero si no se tiene investigación suficiente para ello, hacerlo sería encadenar los límites de nuestras posibilidades. No obstante, admitir que no se sabe la respuesta científica de diferentes cuestiones no es trivial, sino que tiene un gran valor. Esta actitud de la mente científica es vital para resolver las cuestiones, en especial, las de contaminación.

La ciencia avanza a través de la investigación, lo cual siempre trae consigo un cierto grado de incertidumbre. La ciencia es universal y objetiva, porque sus respuestas no dependen del observador, método o procedimiento. Esto implica unas exigencias en la investigación que conllevan la asignación a los resultados de un cierto grado de probabilidad (nivel de confianza) o de incertidumbre (nivel de riesgo). Cualquier avance científico significa que el resultado se conoce mejor, es decir, tiene una probabilidad mayor o un riesgo menor.

La "verdad" y la probabilidad están relacionadas directamente. Esta consideración es fundamental en el avance científico en cualquier campo, pero es especialmente importante en la investigación de los efectos que producen las ondas electromagnéticas. La razón hay que buscarla en el

tipo de investigación que se realiza con los seres vivos (biosanitaria). Esta investigación, en especial, tratándose de campos electromagnéticos, maneja gran diversidad de parámetros y el obtener evidencias experimentales es una tarea bastante ardua.

El interés del discurso hay que buscarlo, por lo tanto, en el atrevimiento de asumir públicamente ciertas conclusiones. En mi opinión, con el estado actual de la investigación científica, la posición es razonable (probable). Si no lo parece es porque la “verdad” científica, como siempre, tiene un determinado nivel de riesgo (indeterminación), mientras las posiciones enfrentadas usualmente son dogmáticas.

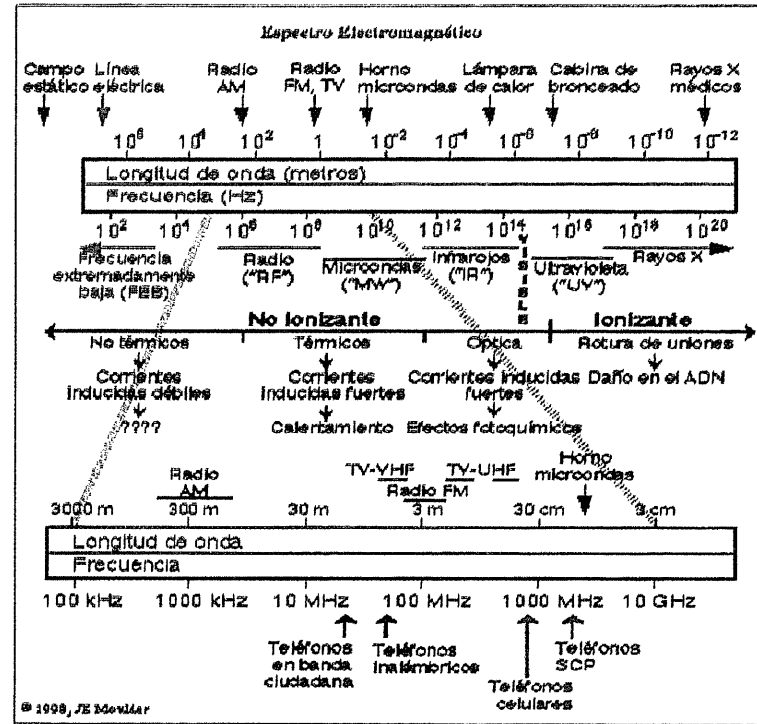
A continuación, nos introducimos académicamente en el tema. Primero damos un panorama del espectro electromagnético, que nos sitúa dentro de la “torre de babel” de las comunicaciones. Después hacemos su análisis agrupando las ondas en dos tipos, por sencillez de clasificación: microondas y ondas de extraordinariamente baja frecuencia.

EL PROBLEMA DE LAS MICROONDAS

El espectro

Los efectos biológicos de cualquier radiación electromagnética dependen esencialmente de la energía que se deposita en los tejidos. En este sentido, y dado que sólo interesa analizar la contaminación, consideramos que es suficiente con dividir el espectro electromagnético en tres regiones. Las regiones las denominamos, en orden decreciente en ener-

gía: *cuántica* o de *partículas*, de *ondas* y de *campos* (siguiente figura)



En la *región cuántica*, la frecuencia de la radiación es tan elevada que se puede considerar discreta la interacción con la materia, es decir, mediante “cuantos” o fotones que se comportan como si fuesen partículas. La energía de uno de estos fotones es proporcional a la frecuencia, $\epsilon = h\nu^2$. La

² Un cuanto es la cantidad menor de energía que se puede intercambiar. La constante de Planck h es universal e ineludible, relaciona biunívocamente dos

radiación nuclear más representativa es la constituida por fotones γ , aunque se habla de radiación de partículas, neutrones, electrones, etc. Esta radiación procede de ajustes de los niveles energéticos nucleares, por esto su energía es tan elevada (del orden del MeV). La energía de estas radiaciones es suficiente para **ionizar** las moléculas de los tejidos con las que interacciona.

Los rayos X son fotones de menor energía y se generan por los saltos atómicos a los niveles más internos. Tienen una energía del orden del keV. Estos fotones también pueden ionizar las moléculas (en esta imagen de partículas con efectos ionizantes se podría incluir hasta la radiación ultravioleta).

La zona visible de la radiación solar inicia la zona del espectro sin propiedades ionizantes. Los efectos biológicos, si las intensidades son suficientemente grandes, suelen ser esencialmente **térmicos** (calentamientos, quemaduras, cataratas, etc.). La radiación visible procede de los niveles atómicos y tiene una energía típica mucho menor que la anterior, del orden del eV. Los efectos en este caso son fotoquímicos o térmicos si la radiación tiene suficiente intensidad.

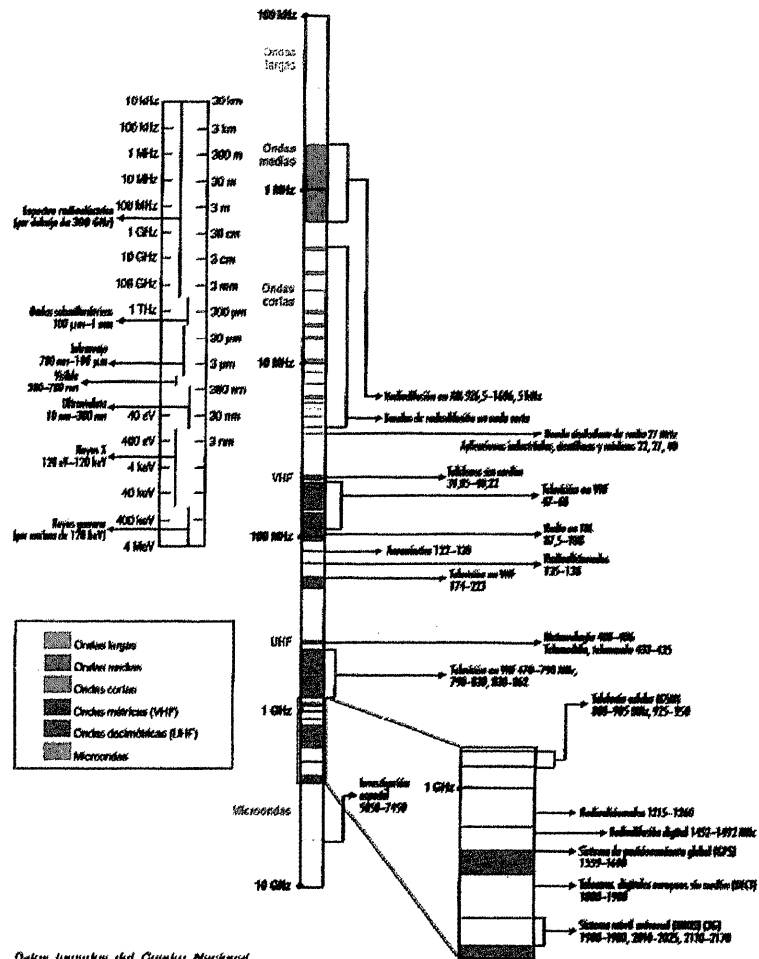
Esta región del espectro de frecuencias, que incluye la luz, las microondas, las ondas de telefonía móvil, las de televisión (TV) y las de radio, tiene un comportamiento típi-

magnitudes inseparables y tiene dimensiones de energía por tiempo. Su valor numérico es $6,623 \cdot 10^{-34}$ J s.

camente ondulatorio, por ello la denominamos *región de las ondas*. Hay numerosas aplicaciones muy usuales y, por lo tanto, es una zona del espectro con interés medioambiental. La energía térmica molecular³ es del orden de 1/40 eV y se suele utilizar como referencia. A temperatura ordinaria la energía se intercambia por los choques moleculares y es insuficiente para la ionización, aunque podría excitar a las moléculas. La pérdida de la energía de excitación suele realizarse mediante emisión de radiación de frecuencia luminosa o de microondas.

En este tema vamos a estudiar primero la banda de microondas del espectro (intervalo de frecuencia de 0,3 a 50 GHz y longitud de onda desde los milímetros a unos 30 cm). Estas ondas tienen una λ del orden del tamaño de las células de los tejidos y podrían, en principio, intercambiar, como tales ondas, energía con ellas. Esto significa que el aporte de energía a los tejidos se analiza ondulatoriamente, a partir de la intensidad I de la onda (W/m^2).

³ Esta energía proviene de $\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$



Datos tomados del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF).

Finalmente, se consideran desde las ondas electromagnéticas del tendido o red eléctrica, de frecuencia 50 Hz, hasta unos 10^4 Hz, de las ondas industriales (que incluyen las de los ordenadores personales). Para frecuencias muy bajas, la longitud de onda es muy grande respecto al tamaño de los cuerpos sobre los que actúa (6.000 km). Esto significa que el análisis del efecto de las ondas electromagnéticas, en la zona de frecuencias extraordinariamente bajas (siglas FEB), debería hacerse en términos de campos (eléctricos y magnéticos). Las ondas electromagnéticas se analizan, considerando los campos como estáticos, por eso a esta zona del espectro le llamamos *región del campo*. En esta región, la energía transportada es muy pequeña y no tiene efectos térmicos. No obstante, los campos asociados, tanto el eléctrico como el magnético, sí deberían producir otros efectos. Al menos, la acción directa del campo eléctrico y magnético tiene efectos físicos, al actuar sobre el flujo de cargas o iones del cuerpo humano. En principio, las ondas electromagnéticas de tipo industrial, 0 a 300 Hz, constituyen un problema medioambiental importante a considerar.

En la banda de las microondas, zona de las comunicaciones y de las ondas industriales, las fuentes ambientales son de tipo antropogénico. En otras regiones las fuentes naturales son más importantes que las antropogénicas. En todo caso, se debe tener muy presente que la humanidad ha evolucionado durante millones de años en presencia de una fuerte contaminación ambiental natural, tanto en la región cuántica (radiación cósmica, etc.), como en la de campos (campo eléctrico atmosférico y campo magnético terrestre).

El problema

La utilización de las microondas está usualmente conectada con el control del tráfico aéreo, la detección de móviles por radar militar y de policía, los sistemas de televisión vía satélite, los equipos telefónicos de larga distancia, los dispositivos médicos de diatermia y los hornos de microondas. A pesar del amplio uso científico, industrial y médico, la energía electromagnética que llega al público (la contaminación ambiental) es pequeña. En todo caso cabría preguntarse, cuando la intensidad de exposición es débil, ¿si son peligrosas?, ¿cuáles son sus efectos? y ¿cuáles deberían ser los límites?.

En el ambiente hay muy poca energía electromagnética en esta banda de frecuencias. El público usualmente está expuesto a niveles de energía tan bajos que la comprobación de su efecto será difícil. Este tipo de situaciones (la ausencia de efectos directos), aunque parezca contradictorio, favorece la controversia. Es bastante normal que se discuta sobre lo que se sabe y sobre lo que se ignora, cuando este tipo de resultados debería admitirse y reconocerse. Así, después de medio siglo y de miles de trabajos realizados, todavía se sigue especulando ácidamente sobre los efectos de la exposición a las microondas y otras contaminaciones ambientales. Además, con el transcurso del tiempo se pone de moda discutir sobre otros presuntos peligros dándose por inexistentes los anteriores.

Los efectos directos de la exposición a grandes dosis (intensidades) de microondas están confirmados experimen-

talmente (nadie debería discutirlos): producen un calentamiento de los tejidos e incluso quemaduras. El problema reside en la inexistencia de un límite claro a partir del cual dejan de ser perjudiciales. En otros términos, no se observan efectos a exposiciones a niveles de intensidad bajos, aunque esto no es una prueba de carencia de efectos. La fuente del debate reside en la imposibilidad de asegurar la ausencia de daño (norma de riesgo cero).

Los estudios realizados con animales expuestos a bajos niveles de radiación de microondas no obtienen resultados concluyentes, pero se *sugieren* los siguientes efectos biológicos:

- Cambios en el sistema inmune
- Alteraciones en el comportamiento
- Modificación en la permeabilidad de las membranas cerebrales a ciertas moléculas que transporta la sangre
- Daños en cromosomas
- Desarrollo de cáncer, etc.

Límite de exposición

La tecnología de microondas se introduce en la segunda guerra mundial con los dispositivos de tipo radar. Los campos electromagnéticos de baja frecuencia se usaron al principio en calentamientos terapéuticos. La utilización generalizada llegó con el uso industrial y médico, especialmente en comunicaciones. Su diversidad exigió introducir normas de exposición para controlar los posibles riesgos.

Herman P. Schwan (Universidad de Pennsylvania) apuntó una intensidad de 100 W/m^2 , como primer límite de exposición. Este límite equivalía aproximadamente a 1/10 de la intensidad recibida en una exposición a pleno Sol y de 1/50 de la intensidad utilizada en diatermia. Schwan estimó que recibir 1000 W/m^2 podría producir en el cuerpo humano calentamientos perjudiciales y sugirió 100 W/m^2 como *límite de exposición*. Usualmente se utiliza un factor de 10 como seguridad. Una revisión científica posterior “no encontró prueba de efectos” para intensidades menores de 100 W/m^2 . A partir de 1966 se aceptó este límite como Norma ANSI (siglas de American National Standards Institute). La norma cubría las frecuencias comprendidas entre 10 MHz y 100 GHz y permaneció inalterada hasta 1982.

Límite de absorción

Una mayor precisión en las medidas de dosis permitieron determinar que la energía absorbida dependía de la frecuencia, del tamaño del objeto y de la orientación. También se puso de manifiesto que los efectos eran diferentes en el hombre (la experimentación se realizaba con ratas). El hombre absorbía más radiación, “a modo de antena”, cuando el campo **E** era paralelo al cuerpo humano y el campo **B** perpendicular (a la parte anterior del cuerpo). Además, la absorción era mayor en la banda (70 a 100) MHz. Se podría decir que el cuerpo se “acopla” en la banda (70–100) MHz.

Los resultados exigieron modificar el límite de exposición a la radiación de microondas, considerando la potencia absorbida por unidad de masa (W/kg). Hasta 1966 se utili-

zaba un límite constante de 100 W/m^2 , en toda la banda de microondas (10 a 10^6 MHz), pasando a partir de 1982 a un límite variable. En esta nueva norma (ANSI, 1982), el límite para el público y para el trabajo sería:

- 1.000 W/m^2 para $\nu < 10 \text{ MHz}$;
- 10 W/m^2 para $\nu \approx 100 \text{ MHz}$, y
- 80 W/m^2 para $\nu > 1.000 \text{ MHz}$.

La recopilación de los efectos biológicos de la radiación, utilizada por el Comité del ANSI, indica que, hay un buen acuerdo experimental, para dosis absorbidas mayores de 5 W/kg. En estas situaciones biológicas, se considera que hay efectos, es decir, correlación entre dosis y consecuencias. A pesar de los numerosos experimentos, el acuerdo es todavía deficiente para dosis menores. La conclusión experimental importante, aunque hasta hoy tentativa, es que no se producen efectos claros por debajo de 4 W/kg. A partir de esta conclusión se estableció en 1982, con un margen de seguridad de 10, el *límite de absorción* de **0,4 W/kg**. Los límites de exposición indicados, Norma ANSI 1982, se corresponden con este límite de absorción.

Las consideraciones anteriores se han realizado en el contexto de la investigación científica, como paradigma. Esta consideración no es trivial dado que la investigación científica supone linealidad causa - respuesta, es decir, una relación cuantitativa entre dosis y respuesta. En la actualidad, se tiende a tener en cuenta: que algunas respuestas de los tejidos son fuertemente no lineales, que se presentan efectos ventana, etc.

En las investigaciones biomédicas y agrícolas los resultados deben extraerse a partir de una población sobre la que se experimenta en contraste con una que sirve de referencia. Cuando se experimenta con animales es difícil asegurar que se trata de muestras de la misma población. Incluso, es fácil olvidar algún parámetro (es frecuente la existencia de variables ocultas, etc.). El problema todavía es más acusado si se trata de investigaciones epidemiológicas. Estas son frecuentes en este campo (alerta de que en una escuela de niños existe una fuente de radiación, causa posible de sucesos de cáncer, etc.). Es muy difícil concluir adecuadamente una investigación, sin la referencia de poblaciones y condiciones idénticas. Además, el número de posibles variables a considerar suele ser desconocido y grande.

Controversia pública: Ejemplos

En las últimas décadas se han realizado numerosas investigaciones en el campo de las microondas y se han encontrado una enorme diversidad de efectos biológicos. Los efectos han sido producidos tanto por niveles altos como por niveles bajos de microondas. La mayor parte de estos efectos son típicos “efectos gato” (el gato es un animal muy sigiloso que aparece y desaparece sin dejar rastro). La denominación destaca el hecho de no haber sido comprobados posteriormente. Por otra parte, estos resultados son habituales en los estudios epidemiológicos y de tipo biomédico, en donde los investigadores encuentran los “efectos”, sobre la base de datos de dos poblaciones: control y referencia. En general, en las interpretaciones de tipo estadístico, influye notablemente la adecuada planificación de la experiencia.

Ésta debe evitar la fluctuación de las variables, las variables ocultas y debe cuidar la selección de las muestras representativas de la población (control y referencia) así como su tamaño, etc. A continuación aclaramos algunas de estas consideraciones y dificultades con tres ejemplos que hemos resumido e idealizado fuertemente.

Ejemplo 1. Influencia de las dosis de microondas recibidas sobre el transporte molecular a través de membranas cerebrales.

En 1975 dos equipos de investigadores norteamericanos anunciaron que habían encontrado efectos en la exposición a intensidades entre 1/3 y 1/50 de la norma ANSI. Concretamente, la exposición a esas dosis era capaz de aumentar la cuantía de penetración en el cerebro de moléculas trazadoras procedentes de la sangre.

Una decena de equipos de investigación, tras años de estudio con mejores equipos de medida, descartó el efecto. La conclusión a la que llegaron fue: sólo en el caso de niveles de exposición tan intensos que calentasen el cerebro significativamente se producirían alteraciones sustanciales en dichas barreras, lo cual podría permitir el paso de moléculas a través de las membranas.

Ejemplo 2. Efecto auditivo.

La exposición a microondas genera en la cabeza unos chasquidos en sincronía con los impulsos (se conocía desde 1947). En 1974 se demostró que el chas-

quido era producido por la expansión térmica del tejido. Se trataba pues de un efecto físico natural, ya que el calentamiento local es pequeño pero suficientemente rápido para originar ondas sonoras (producidas por las dilataciones bruscas).

Ejemplo 3. Efecto pantalla.

Se trata de presentar una investigación con un tamaño de muestra pequeño respecto al número de parámetros de control. Concretamente, esquematizamos los resultados de una investigación con dos grupos de ratas, control y referencia, cuyo tamaño de muestra fue 100. El grupo de control estuvo sometido, durante 21 h/día y 25 meses, a 5 W/m² de microondas de 2,45 GHz (el equivalente a una absorción específica de 0,3 W/kg). En la experiencia se examinaron 155 parámetros de salud y comportamiento: química de la sangre, peso, consumo de agua y comida, consumo de O₂ y producción de CO₂, nivel de actividad, etc. La única diferencia significativa entre las dos poblaciones fue, como publicaron, que 18 ratas del grupo expuesto a la radiación desarrollaron tumores malignos, frente a 5 del otro lote. En principio, esto conducía a un resultado significativo (con un coeficiente de riesgo⁴, $\alpha \approx 0,05$). El resultado fue criticado ampliamente (en 1984) por la deficiente planificación experimental, que anulaba los resultados, dado que:

⁴ Este coeficiente implica admitir que la probabilidad de que se produzca el resultado por azar es menor del 5 %.

- El número total de tumores en los animales de control era inferior al esperado para la raza de ratas utilizadas. En las ratas expuestas era más o menos el esperado.
- El número de tumores encontrado en las ratas expuestas fue tan bajo que agruparon los diferentes tipos de tumores sin predominio de ningún tipo (lo contrario sí podría reforzar la tesis).
- La comparación de tumores fue sólo una de las 155 comparaciones realizadas. En el análisis, el número de parámetros superaba incluso a la población. Estadísticamente, cuando esto sucede, pueden presentarse como significativas diferencias aleatorias entre las muestras.

En resumen:

“Si difícil es probar la presencia de efectos a dosis bajas, lo es todavía más demostrar la ausencia estricta de peligro.”

La prudencia obliga a considerar que en las ciencias de la vida las pruebas concluyentes son difíciles en ambos sentidos (afirmativo o negativo). Ni siquiera es fácil obtener las dosis umbrales o límites. Los resultados experimentales suelen estar muy condicionados por la ausencia de garantías científicas. Para la aceptación de los resultados, por los científicos, la garantía mínima es la reproducibilidad de los mismos. Esto se exige a cualquier resultado pero especialmente a investigaciones que traten con dos muestras de la misma población (control y testigo).

Las situaciones indicadas en los ejemplos, demostrar efectos o la ausencia de efectos a dosis bajas, son las que justifican la necesidad de adoptar normas o límites de exposición. Las normas internacionales se consideran como un instrumento, o fórmula social, que pretende equilibrar los beneficios del uso de la tecnología con los costes medioambientales que ese uso representa. Los riesgos potenciales deberían ser del mismo orden que los aceptados en las diferentes contaminaciones. Y todos dentro del intervalo de aceptación de una "Sociedad Sostenible".

Los diferentes países aceptan diferentes dosis límites, a veces la situación tiene que ver con el diferente grado de desarrollo, valoraciones, costumbres, etc. Como los valores de intensidad de exposición dependen del tiempo, usualmente los valores límite de exposición son promedios temporales:

$$\langle L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt,$$

donde $I = I(t)$ es la intensidad de exposición.

Por ejemplo, en la década de los 90, en la Unión Soviética se consideraba como límite de exposición 2 W/m² para fuentes estacionarias, 20 W/m² para fuentes móviles y 0,1 W/m² para el público (para recoger la variabilidad se consideran medias en el tiempo, con $T = 1$ h). La norma ANSI, 0,4 W/m², considera promedios de 6 minutos. Las discrepancias son usuales y la colaboración internacional se considera especialmente deseable.

Tabla 1. - Límites establecidos en diferentes países y comunidades autónomas en W/cm²

Comunidad	900 Hz	1800 Hz	Restricciones
Recomendación UE	450	900	
España	450	900	Zonas sensibles, menos
Cataluña	200	400	
Italia	100	100	Más de 4 h: 10
Suiza	4,2	9,5	
Castilla - La Mancha	200	400	Zonas sensibles: 0,1

EL PROBLEMA DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS: ONDAS EBF

Presentación

La corriente eléctrica es el soporte energético de la civilización actual. La utilización de la electricidad y su uso generalizado explica la necesidad de su producción. Las dificultades de su almacenamiento exigen su transporte desde las centrales mediante líneas de transmisión y de distribución (a elevada tensión, de 20 a 500 kV). Finalmente, la corriente eléctrica se transforma a la tensión de consumo, 220 V. La red de líneas eléctricas es tan profusa que se explica que estemos rodeados de estas ondas electromagnéticas de frecuencia 50 Hz. En USA la frecuencia a la cual se transporta la corriente eléctrica es de 60 Hz. Hasta unos 300 Hz (ondas industriales) se considera que se trata de ondas electromagnéticas de frecuencia extremadamente baja. Las si-

glas EBF tienen en cuenta esta consideración frente a las anteriores. La abundancia ambiental de este tipo de ondas es tal que es acuciante conocer sus efectos sobre la salud.

En la primera parte del tema hemos analizado el problema de las microondas, cuyas longitudes de onda son pequeñas (centimétricas) respecto a los cuerpos biológicos y respecto a la distancia emisor - receptor. A esas frecuencias, el campo eléctrico y el magnético actúan acopladamente (se considera la acción del campo electromagnético o de la onda electromagnética). Aquí, en cambio, se trata de una zona del espectro electromagnético de frecuencia menor de 300 Hz. Para estas frecuencias tan bajas las longitudes de onda son enormes (6.000 km para 50 Hz). En este caso, la l es enorme frente al tamaño de los cuerpos biológicos (el tamaño de una célula es del orden de 1 mm) o la distancia de actuación (unos metros). En la región de interés (la cercana a los emisores) es evidente que los campos eléctricos y magnéticos se pueden tratar como independientes y como estáticos. El análisis medioambiental de las ondas electromagnéticas de frecuencia extremadamente baja (EBF) se realiza considerando el efecto sobre los cuerpos biológicos de los campos **E** y **B**. A esta zona del espectro le llamamos, esencialmente por este argumento, la región del campo. Por otra parte, el análisis físico de la acción de los campos **E** y **B** es más sencillo que el de acción de las ondas.

Otra cuestión a dilucidar es la diferente importancia de los efectos de los campos. El campo **B** resulta ser relativamente más intenso y, por lo tanto, preocupante que el campo **E**. Esto se debe al origen del campo magnético ($\mathbf{B} \propto I$) y

a su mejor penetración en los tejidos. El campo externo **E** no penetra en los tejidos debido a que la conductividad de los mismos es mayor que la del aire. Por tanto, el campo **E** en el interior del cuerpo será principalmente de origen $\delta B / \delta t$, es decir, menor (se trata de señales FEB). Si a lo anterior se añade la facilidad del apantallamiento a los campos eléctricos (jaula de Faraday), se comprenderá que, en una primera aproximación, sólo se considere el efecto de los campos magnéticos ambientales (de **B**) sobre los tejidos.

Por lo anterior, los campos magnéticos están en todas partes y atraviesan la mayor parte de los materiales comunes (la excepción son los materiales de elevada permeabilidad magnética). Los campos ambientales que preocupan son los de origen antropogénico, debido al gran número de corrientes eléctricas que los producen: de transporte, distribución y uso. Estas consideraciones son especialmente indicadas en las proximidades de los aparatos eléctricos o en las cercanías de las líneas de distribución y transporte. En todo caso, se puede reconocer que se trata de un problema medioambiental importante, dado que estamos inmersos y rodeados por ellos, tanto en la ciudad como en el campo. Pero además de esta fuente, no se debe olvidar que en la Tierra se produce un campo magnético intenso directo (campo magnético natural) en virtud de los materiales magnéticos terrestres y de los movimientos de las cargas del núcleo terrestre. También existe un campo eléctrico natural con origen en las corrientes atmosféricas. Estas corrientes producen un campo eléctrico directo, normal a la superficie de la Tierra, que adquiere una carga superficial media negativa.

Los campos eléctricos y magnéticos naturales se deben considerar siempre, dado que son muy intensos y la humanidad ha vivido inmersa en ellos durante miles de años.

La investigación sobre los efectos de los campos eléctrico y magnético es biosanitaria y a veces epidemiológica; como en las microondas, es abundante y no concluyente (no se han encontrado todavía efectos biológicos). Pero en este caso, al contrario que en las microondas, físicamente se piensa que sí deberían existir estos efectos (se trata de la acción de los campos sobre las cargas o iones). A finales de la década de los 90, se investiga especialmente sobre:

- efectos en la comunicación celular
- efectos en los cambios tisulares y producción de neurohormonas.

Todavía no hay relación dosis – respuesta, es decir, mayor intensidad de campo no implica más efecto. Tampoco hay dosis límite, frecuencias particulares (λ es muy grande), etc. No obstante, el conocimiento físico del campo de fondo o ambiental, en cualquier posición espacial, es compleja pero precisa. A continuación vamos a dar los órdenes de valor de estos campos, tanto los ambientales como los internos. En ambos casos, se consideran los campos de origen antropogénico frente a los naturales.

Fuentes del campo: órdenes de valor

Para los propósitos medioambientales las unidades de medida de los campos son: el voltio por metro (V/m) y el

tesla (T) o bien el gauss (G). Usualmente, la unidad internacional de campo magnético es muy grande y se usan sus submúltiplos: militesla (1 mT = 10 G), microtesla (1 μ T = 10 mG) y nanotesla (1 nT = 10 μ G).

También es conveniente reunir los siguientes datos:

- Las microondas son ondas centimétricas, con frecuencias de varias decenas de GHz.
- Las ondas EBF tienen una longitud de onda (λ) de miles de kilómetros y una frecuencia de 50 Hz en Europa y 60 Hz en USA. En todo caso, las ondas llamadas industriales tienen una frecuencia menor de 300 Hz.
- El tamaño de las células de los organismos vivos es del orden del micrómetro y el de los cuerpos biológicos del metro. La distancia entre la fuente de las ondas y los cuerpos sobre los que interacciona suele ser del orden de varios metros, pero es muy variable.
- La región del campo se solapa con la región de las ondas, a través de las ondas de telefonía, radio y televisión. En la zona de transición se deben considerar las características de ambas regiones.
- El campo magnético terrestre es de unos 0,6 G.
- Las corrientes atmosféricas son del orden de 10^{11} A/m².
- En la atmósfera terrestre se generan miles de rayos y relámpagos que transportan elevadas densidades de corriente (la intensidad de corriente es del orden de 10 kA) y depositan cargas sobre la Tierra del orden de 20 C.

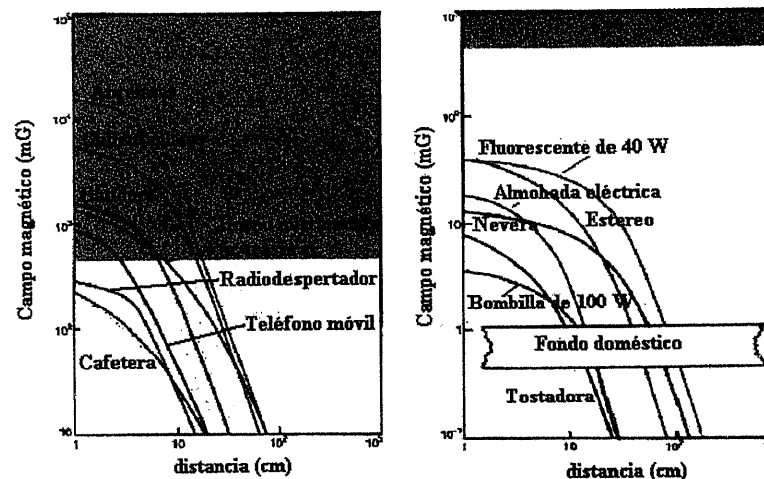
Valores ambientales

Antropogénicos

Presentamos unos datos en los siguientes párrafos que nos permiten comparar los valores de los campos eléctricos y magnéticos de diferentes configuraciones electromagnéticas (líneas de transporte, de distribución y de diferentes aparatos).

- Líneas de transmisión o transporte a alta tensión, de 20 kV a 500 kV:
 - **E** (de 1 V/m a 10.000 V/m)
 - **B** (de 1 mG a 100 mG)Las líneas de alta tensión son aéreas, están a unos 8 m del suelo y transportan una intensidad de corriente por fase de 2.000 A.
- Líneas de distribución (< de 20 kV)
 - **E** (de 10 V/m a 100 V/m)
 - **B** (de 1 mG a 10 mG)
 - El campo **B** en el suelo suele ser menor de 60 μ T y se reduce a 10 μ T a 40 m.
 - El campo **E** es normal al suelo, en la vertical es de unos 10 kV/m y disminuye con la distancia, siendo menor de 3 kV/m a 50 m.
- Las líneas de transmisión de los trenes transportan corrientes de alimentación de 500 A y dan campos magnéticos grandes, hasta de 100 μ T. La configuración de las líneas indica que la corriente de retorno va por las vías.
- En las casas: el campo **E** va de 1 a 10 V/m y los campos magnéticos **B** usuales van de 0,01 a 1 mG (a veces incluso 10 mG).

- Los electrodomésticos dan algunas decenas de microteslas (μ T) y el fondo doméstico es de algunas decenas de nanoteslas (nT).
- La televisión (TV) presenta valores en la pantalla del monitor de 70 mG, disminuyendo a valores de 0,2 mG, a 1 m.
- El ordenador y el teléfono móvil se caracterizan por funcionar con frecuencias mayores (la potencia de las antenas y la energía que transportan las ondas es bastante mayor que en el caso EBF). Por otra parte, son dispositivos que tienen una utilización frecuente, lo cual conlleva un tiempo mayor de exposición. Además, se suele estar muy cerca o relativamente cerca del emisor (más cerca se corresponde con campo más intenso). En este sentido, los campos magnéticos a los que se está expuesto son relativamente más altos y las consideraciones de sus antenas son problemas a atender más cuidadosamente.



Naturales

En la atmósfera existe un campo eléctrico \mathbf{E} perpendicular a la superficie terrestre, de unos 100 V/m. Su origen reside en las cargas de los iones atmosféricos y éstos se producen esencialmente por el choque de las moléculas con los protones de la radiación cósmica⁵. Las corrientes atmosféricas, debidas a estos iones, tienen una intensidad del orden de 10^{-11} A/m².

Este campo se ve modificado por la presencia del cuerpo humano, encontrándose que el valor máximo se encuentra sobre la cabeza.

Este campo eléctrico atmosférico tiene unas variaciones diurnas (ΔE) del orden de 30 V/m y produce una carga negativa sobre la superficie terrestre de 10^{-3} C/km².

El campo magnético terrestre \mathbf{B} se origina por las corrientes eléctricas internas y por sus materiales magnéticos. Su intensidad varía de 30 μ T en el ecuador, a 70 μ T en los polos. Tiene variaciones diurnas, ΔB , del orden de 0,03 μ T, y fluctuaciones de incluso 10 μ T.

Internos

Tal vez por la evolución en presencia de campos eléctricos y magnéticos tan intensos, en los organismos vivos exist-

⁵ Flujo de partículas de origen extraterrestre que recibe la Tierra. Los rayos cósmicos primarios están formados en un 90 % por protones de elevada energía, millones de eV.

ten corrientes eléctricas endógenas (internas) significativas y potenciales de membrana (endógenos) muy elevados:

- Los potenciales de membrana son del orden de 10^7 V/m, unos 100 mV en distancias de 10^{-8} m.
- Las corrientes eléctricas (señales nerviosas, circulación sanguínea, etc.) alcanzan valores entre 1 y 10 mA/m².

Campo eléctrico inducido por el campo exterior

El campo eléctrico exterior (\mathbf{E}_{ext}) induce en el interior del cuerpo humano un campo eléctrico (\mathbf{E}_{int}) que se puede expresar mediante:

$$\mathbf{E}_{int} \approx \frac{\omega \varepsilon_0}{\sigma_{int}} \mathbf{E}_{ext} \approx 0,7 \cdot 10^{-8} \mathbf{E}_{ext},$$

donde ω es la pulsación, ε_0 la permitividad del espacio libre y σ_{int} la conductividad específica de los tejidos. Se trata de un valor de la conductividad medio. La conductividad de los tejidos es en cualquier caso mucho mayor que la del aire (σ_{int} va de 0,01 S/m a 1,5 S/m, siemens por metro). Esto explica que los valores de los campos inducidos interiores sean tan pequeños.

En un caso muy desfavorable (campos eléctricos externos elevados, $E \approx 12$ kV/m), el campo eléctrico inducido sería del orden de 80 μ V. En conclusión, los valores inducidos de campo son muy pequeños respecto a los potenciales de membrana (10^7 V/m).

Campo eléctrico inducido por cargas

Toda carga en movimiento dentro de un campo \mathbf{B} genera un campo eléctrico tipo Lorentz que viene dado por:

$$\mathbf{E}_L = \mathbf{v} \times \mathbf{B}.$$

Las velocidades de las cargas son pequeñas (la velocidad sistólica de la sangre es del orden de 0,6 m/s) y el valor del campo inducido depende linealmente del campo \mathbf{B} . El resultado que se obtendría en diferentes situaciones sería:

- con un \mathbf{B} de 10 μT procedente de una línea de alta tensión, $E_L \approx 6 \mu\text{V/m}$
- con un \mathbf{B} de 50 μT procedente del campo terrestre, $E_L \approx 30 \mu\text{V/m}$
- con un \mathbf{B} de 2 T procedente de una resonancia magnética nuclear, $E_L \approx 1,2 \text{ V/m}$.

Subrayamos que algunas aplicaciones médicas utilizan campos electromagnéticos en sus dispositivos modernos de elevada intensidad: Imágenes RMN, tomografía de impedancia, sesiones TEC en psiquiatría, etc.

Campo inducido por \mathbf{B} variable

Como se trata de campos EBF, las frecuencias son muy pequeñas, los intervalos de tiempo muy grandes y, por lo tanto, los campos inducidos son relativamente pequeños ($\mathbf{E}_{ind} = \partial\mathbf{B}/\partial t$), menores que los anteriores, siempre con referencia a los endógenos de tipo potencial de membrana.

Corrientes inducidas

La conductividad de los tejidos biológicos es alta con respecto al aire. En este sentido, cabe esperar en el cuerpo humano corrientes inducidas elevadas. Las corrientes inducidas mayores son del orden de 3 mA/m² y corresponden a campos externos de aproximadamente 10 kV/m ó 0,2 mT. Las corrientes endógenas que se producen en el cerebro y las arterias son mayores, respectivamente 1 y 10 mA/m². Incluso con los mayores \mathbf{B} , del orden de 1 mT, las corrientes inducidas son 100 veces menores que las endógenas. No obstante lo anterior, en este caso se debe tener presente que las corrientes inducidas entran ya en el rango de valor de las naturales. Además, experimentalmente se observan efectos para corrientes inducidas con valor menor de 1 mA/m². Así, el flujo de calcio se afecta, aunque no haya efectos observables.

En resumen, los efectos físicos de los campos eléctricos y magnéticos sobre cargas y corrientes son observables y evidentes, pero todavía (finales de siglo) no es este el caso para los efectos globales biológicos. En la zona que denominamos del campo llamamos la atención que el estado actual del conocimiento del problema no permite pronunciarse por la existencia de efectos, aunque esto pueda tener que ver más con la ignorancia que con la evolución o el apantallamiento. La incertidumbre que encierra la proposición: “la exposición a campos magnéticos no está plenamente demostrado que afecte a la salud, ni por su intensidad, ni por la duración” es la conclusión más destacable, pero ni es aconsejable, ni puede considerarse el final del problema. Lo razonable es seguir investigando hasta obtener certidumbres universales y objetivas.

Controversia experimental: Conclusiones

Hay una gran variedad de investigaciones epidemiológicas que buscan el efecto de los campos magnéticos en niños y adultos, asociándolo con el estrés, las migrañas y la presencia de ciertos tumores. La gran variedad de situaciones analizadas no ha conducido a evidencias en ninguna dirección. Hay resultados de todo tipo: desde los que encuentran relaciones con enfermedades, a los que las descartan y, también, los no concluyentes. Los resultados se han simplificado, por las grandes diferencias de objetivos, poblaciones y situaciones analizadas, que no permiten un análisis más detallado en un planteamiento general.

Las investigaciones directas sobre células, tejidos, animales y hombres tampoco están dando resultados concluyentes. En todo caso, todo parece sugerir que en la exposición a campos magnéticos deben existir efectos sobre la salud. No obstante, la situación es complicada, pues no se saben explicar los mecanismos por los que el campo magnético podría producir los efectos perjudiciales sobre la salud. En estos momentos se investiga con relación a:

- Los efectos de los campos magnéticos sobre la comunicación entre las células.
- Los efectos sobre los tejidos y sobre los cambios que producen.
- Si afectan a la producción de neurohormonas o al sistema nervioso.

Hasta el momento no se ha demostrado una relación entre la dosis y la respuesta, es decir, con los cambios de nivel.

Esto significa que no hay dosis de exposición que permita garantizar ausencia o presencia de efectos. Tampoco hay una frecuencia particular, dirección, ángulo de fase o polarización que de manera reproducible origine una respuesta celular, etc. En conclusión, en otras contaminaciones nos situamos dentro del paradigma, mayor contaminación más efecto, si un poco es malo, más de lo mismo es peor. Aquí no; la exposición a un **B** mayor no implica más efecto. Esto significa que la intuición científica aquí tampoco nos serviría, complicando enormemente el obtener conclusiones.

Ante la ausencia de efectos, es razonable tratar a los campos magnéticos físicamente. De esta manera se puede saber y predecir la intensidad del campo a una distancia o bien la distancia a la que el campo tiene el valor ambiental o de fondo.

En conclusión, las normas y los límites no indican un riesgo nulo, sino legitimar las actuaciones (se trata de dosis para las cuales el riesgo no es serio y es del mismo nivel o inferior al de otros). Por otra parte, se debe insistir en los riesgos conocidos, incluyendo sistemáticamente un factor de seguridad. El problema social residirá especialmente en las dosis bajas, inferiores a los límites, ya que al no existir acuerdo o ser éste difícil, se suele acompañar de un ruido de fondo (debate social) que dificulta la toma de decisiones. Lo que parecen olvidar muchos grupos intransigentes es el carácter limitado de los presupuestos (nacionales, regionales, etc.). Algunos gastos en evitar contaminaciones presumibles impiden actuaciones necesarias para la población marginal.

Este tema se está utilizando para justificar la importancia que tiene para la formación ambiental tener ideas claras sobre los fundamentos científicos de los problemas y tener presente los órdenes de valor. En este sentido, para el problema de las microondas, la noción de referencia es la energía de la radiación. La radiación ionizante (ultravioleta, rayos X y rayos γ) tiene efectos biológicos claros e importantes, por su elevada energía (del orden del MeV). Esta energía es suficiente para ionizar, romper los enlaces químicos y producir radicales libres (químicamente muy activos), propagándose el daño. En cambio, la energía de un fotón de microondas es sólo del orden de unos $0,006 \epsilon$, siendo ϵ la energía térmica (kT). La ionización exige elevadas temperaturas, luego tratándose de microondas este mecanismo queda excluido, incluso la excitación entre niveles y otros efectos directos son poco probables.

Ejemplo. Las antenas de telefonía móvil

Los teléfonos móviles necesitan estaciones base de conexión en zonas urbanas y en zonas rurales. Las antenas urbanas dan una cobertura próxima y, por tanto, la antena emite la mayor parte de la radiación en forma sectorial, concentrándose en un haz de 6° . Las normas exigen que el haz principal toque el suelo a una distancia mínima de 50 m y la intensidad máxima de exposición a la radiación sería $3,5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (a 200 m), muy inferior (unas 1000 veces) al nivel de riesgo aceptado en microondas.

En el campo, las antenas de telefonía se montan sobre torres elevadas respecto al suelo con emisión en

todas las direcciones (360°). El riesgo biológico sería despreciable en los términos indicados, salvo para personas situadas muy cerca de la antena y para exposiciones muy prolongadas.

Los teléfonos móviles también emiten radiación electromagnética, solo que de mucha menor potencia. La distancia es mínima y se recibe el máximo de la radiación que se genera, pero el tiempo de exposición es pequeño, dado que se trata de sucesos episódicos.

El ejemplo lo utilizamos para situar en frecuencia, dentro de la zona no ionizante del espectro electromagnético, los siguientes dispositivos:

- teléfonos móviles: 900 - 1.800 MHz
- la radio en frecuencia modulada (FM) y la televisión (TV): 10^8 Hz
- la radio en amplitud modulada (AM): 10^6 Hz
- los ordenadores son aparatos con gran variedad de dispositivos, cuyas frecuencias están en intervalos muy diferentes, según sea el barrido de pantalla, la central de proceso de datos, etc. Citamos los intervalos: (50 a 100) Hz y (15 a 30) kHz, para el barrido vertical y horizontal; del orden de 10^8 Hz para la CPU, etc.

En conexión con las antenas, se suele definir una distancia de seguridad. Esta distancia, entre la antena y el receptor, es la que asegura una intensidad absorbida menor que la indicada por la norma ANSI y depende del tipo de antena emisora. En efecto, a continuación reflejamos el orden de

valor que depende de la potencia emitida:

- telefonía móvil: 1 - 2 m
- TV de alta frecuencia: 15 m
- radio FM: 30 m
- TV (UHF): 40 m.

Tabla 2.- Límites de exposición para ondas electromagnéticas no ionizantes (< 300 GHz)

	Nivel de seguridad	Nivel nocivo
Intensidad	1 mW/cm ²	50 mW/cm ²
Intensidad absorbida	80 mW/kg	4.000 mW/kg
Campo magnético	100 mT	5.000 mT

El aumento de 1 °C de la temperatura corporal se considera un efecto nocivo.

Las normas vinculadas a la exposición y emisión de ondas electromagnéticas de baja (y muy baja) frecuencia han sido forzadas, en muchos países, por los posibles casos de cáncer que se les atribuye. Especialmente, con antenas instaladas en zonas pobladas y sensibles (escuelas, etc.). El gobierno español ha decidido aceptar, como se ha reflejado, los estándares europeos.

Control

A pesar de las numerosas aplicaciones, las microondas no son abundantes en el medio ambiente, en cambio, sí lo

son las ondas FEB. Se puede decir que vivimos rodeados de ondas FEB. Si, además, añadimos las ondas de telefonía, TV y radio, que emiten en frecuencias más altas (todas las cadenas de TV emiten ya en UHF), la región constituye un importante problema de contaminación ambiental. El problema es socialmente mayor por la presencia de numerosas instalaciones dedicadas a comunicación (antenas de telefonía, etc.). Se comprende que las numerosas líneas de conexión eléctrica, junto a las numerosas antenas emisoras y receptoras hayan originado una alarma social. Pero aquí solo vamos a plantear el problema de su control.

En el caso de las microondas el apantallamiento es un control suficientemente eficaz. Una superficie conductora es una buena pantalla eléctrica. En el interior de un conductor en equilibrio electrostático el campo eléctrico es nulo. Por ejemplo, la carrocería metálica de un coche es un buen blindaje frente al rayo. La pantalla eléctrica se denomina "jaula de Faraday", porque en la práctica no es necesario que las paredes de la caja formen una envoltura continua; basta simplemente con un enrejado, como el de una tela metálica.

El problema del control es mucho más serio cuando se trata de campos magnéticos. Desde un punto de vista físico, los campos magnéticos se pueden modificar con tres procedimientos: Apantallamiento, interferencia y distanciamiento.

- *Apantallamiento.*

Aislarse del campo magnético generado por corrientes de baja frecuencia (50 Hz) no es fácil. Este procedimiento

requiere pantallas gruesas de material de alta permeabilidad. Se llama profundidad de penetración en un material a la distancia δ desde la superficie hasta donde se atenúa el campo un 37 % de su valor inicial. Esta distancia viene dada por:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu' \nu}},$$

donde ρ es la resistividad, μ' la permeabilidad relativa y ν la frecuencia. Los materiales con μ' elevado tienen un δ pequeño, de 0,1 a 0,01 cm. Un buen factor de atenuación requiere un espesor grande. El generalizar el apantallamiento es un problema económico y práctico, debido al gran número de fuentes de campo. En la práctica es difícil y sólo se realiza para dispositivos específicos y áreas concretas, con materiales ferromagnéticos, etc.

- *Interferencia*

El magnetismo tiene su origen en los dipolos o en las corrientes. En todo caso, al tratarse de campos, la anulación exige otro igual y opuesto. Esto se suele aprovechar haciendo circular por conductores próximos corrientes en diferente sentido, etc. En todo caso, como interesa la región de campo próximo (en las cercanías de la fuente, bajo las líneas que sobrevuelan el terreno), la interferencia destructiva exige que en las líneas de transporte las corrientes sean antiparalelas.

En el caso de la corriente trifásica, al ser el desfase de 120 grados, la polarización resulta elíptica y la situación de los conductores es importante.

Para líneas de potencia trifásica, los conductores se colocan en configuración delta, vertical u horizontal. La primera distribución es mejor, dado que se minimiza el **B** al nivel del suelo.

Hay más métodos de interferencias, pero no presentan una ventaja clara.

- *Distanciamiento*

Una forma más efectiva que el apantallamiento es alejarse suficientemente de las líneas, conociendo que el campo disminuye con la distancia ($\mathbf{B} \propto 1/r$). La distancia a la fuente del campo se puede aumentar por elevación de las líneas de transmisión y apartándolas de donde la gente vive. En este sentido, el enterramiento sería mejor sistema, aunque se hace a profundidades menores y el suelo no actúa de pantalla. La razón reside en el blindaje y mayor proximidad de las líneas. En todo caso, el alejamiento de las líneas de transmisión y distribución de las zonas habitadas es una medida de control adecuada, hasta que se pruebe la inocuidad de ciertos niveles continuos de exposición.

Palabras finales

La probabilidad de efectos en una exposición a microondas ambientales es muy pequeña (no se han demostrado tales efectos biológicos). La exposición a campos electromagnéticos ambientales de muy baja frecuencia, dentro de los niveles admitidos, tampoco presenta efectos biológicos. Pero, en este caso, las exposiciones sí provocan efectos físicos, lo cual preocupa a los científicos. En principio, con el estado de conocimiento actual y dentro de los niveles per-

mitidos se puede admitir que la utilización de tecnologías que emiten ondas electromagnéticas es relativamente segura. El riesgo que asume la sociedad con la contaminación electromagnética es mucho menor que en otras situaciones de riesgo, que son mucho más usuales. Además, el uso de estas técnicas está justificado por su utilidad (beneficios).

En las ciencias medioambientales se debe tener, como referencia, un panorama de riesgos realista. En este sentido, se estima que los principales riesgos están conectados con la falta de alimentos, con una sanidad precaria y, en especial, con una generalizada falta de cultura. Si se comparan riesgos reales con opiniones de riesgos (subjetivos), se suelen encontrar fuertes sesgos en la opinión pública, en muchas situaciones de riesgo⁶.

En el sentido aludido, sería muy saludable que las controversias y debates se realicen fuera del marco establecido de lo que se sabe y de lo que se desconoce científicamente (el reino de la especulación). Lo que se sabe debe ser recabado del científico y lo que no se sabe científicamente no se debe convertir en ruido de fondo, dado que éste suele dificultar la solución de los verdaderos problemas sociales.

En esta lección de apertura hemos pretendido posicionarnos en la contaminación electromagnética. Y el marco de referencia científico utilizado ha sido el postula-

⁶ En telefonía móvil son frecuentes las protestas en torno a las antenas emisoras, cuando la intensidad electromagnética que se recibe (disminuye con el cuadrado de la distancia), es menor que la recibida por los usuarios (a unos milímetros de las neuronas).

do del desarrollo sostenible. Esta proposición, sobre la que considero se debe cimentar cualquier pretendida ciencia del medio ambiente, podría enunciarse así: El desarrollo sostenible de la sociedad humana debe ser compatible con la universalidad espacio-temporal. El postulado representa una garantía de la ciencia que tiene en cuenta tanto a la Biosfera como al hombre. La exigencia directa del postulado tiene que ver con las decisiones relevantes a tomar. Estas deben considerar su aplicabilidad a todos los países del mundo y su duración temporal, es decir, debe tener en cuenta a las generaciones futuras.

La utopía ecologista es admirable en sus intenciones. Pero, tratándose de sociedades democráticas, también es perturbadora (ruido de fondo). A veces, de acuerdo con el postulado, conduce a decisiones políticas injustas e insolidarias. En efecto, ciertas políticas llamadas verdes no suelen considerar los costes, posicionándose como si los presupuestos de los países fuesen ilimitados. Las decisiones ambientales (algunas discutibles y superfluas) se financian de los presupuestos (globales), en ocasiones a expensas de necesidades educativas, sanitarias, etc.

Considero, junto a otros científicos mucho más prestigiosos, que la mejor defensa contra los mitos y contra el marasmo⁷ en el que está sumida la actual sociedad es la educación científica. En fin, dado que estoy sobre un púlpito

⁷ La situación de confusión en contaminación electromagnética se puede explicar, por ejemplo, por la contradicción entre la avidez de los teléfonos portátiles y otros medios de comunicación, y el terror contra la instalación de las necesarias antenas transmisoras.

to me permito el desliz ignaciano de afirmar que: “ Sólo la educación nos hace verdaderamente libres”. Pero, en el siglo XXI pienso que debe lograr que seamos, también, más responsables.

En el sentido anterior, todavía se debe considerar que los sistemas biológicos tienen respuestas alineales, efectos ventana, interacciones con el medio, etc., que no se han estudiado suficiente. Con todo, el panorama de la contaminación electromagnética que hemos trazado es suficientemente grave y preocupante. Es evidente, por tanto, que la sociedad debe sentirse responsable de la investigación científica, en especial de ésta tan cercana al hombre. En pocas palabras, es muy importante intensificar la búsqueda de los efectos electromagnéticos (“la verdad”), dado que esto implicará una utilización de los medios tecnológicos de comunicación más segura. Por otra parte, pienso que es justo indicar, también, que los avances del hombre en estas tecnologías han sido extraordinarios, mucho más relevantes para el hombre que los riesgos asumidos. Por ello creo adecuado terminar con las sencillas palabras del poeta hindú, R. Tagore, que iluminan esta contraposición:

“ Si de noche lloras por el sol, no verás las estrellas”.

Granada, 30 de septiembre del 2002