

ENTRE LOS MILAGROS DEL AGUA IMANADA Y EL TERROR AL CAMPO MAGNÉTICO: LA FASCINACIÓN DEL MAGNETISMO

ANTONIO HERNANDO GRANDE *

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. C/ Valverde, 22. 28004 Madrid

El Magnetismo es término de significados múltiples y de sugerencias infinitas. La razón de la asociación popular entre Magnetismo y misterio es, sin duda, la existencia de muchos materiales naturales que presentan ferromagnetismo a temperatura ambiente. La detección sensorial de la fuerza ejercida entre dos imanes permite acceder a cualquier profano a la evidencia experimental de la acción a distancia. La presencia en la corteza terrestre de magnetita y minerales de hierro hizo posible que desde la más remota antigüedad se observara el efecto de la interacción magnetostática. Durante los dos últimos siglos el Magnetismo fue completamente comprendido hasta donde alcanza la capacidad de conocer del hombre, y hoy es utilizado en casi todas las manifestaciones de la tecnología. No obstante, el reclamo histórico de su poder de fascinación ha sido y es utilizado por malandines y pícaros como mercancía de propiedades maravillosas, que afectan indistintamente a mejorar o empeorar la salud de los ciudadanos, según convenga a los intereses del marketing en la feria del consumo.

La creciente utilización de campos electromagnéticos, CEM, en los múltiples dispositivos que utilizamos continuamente como, radios, teléfonos móviles, radares, televisiones, discos duros de ordenador, videos, tarjetas de crédito, billetes de metro, llaves, unidos a los CEM producido por los canales de suministro de energía eléctrica (líneas de alta y media tensión) ha conducido a una situación nueva caracterizada por dos posibles efectos nocivos: a) efectos sobre la salud y b) efectos sobre el propio funcionamiento de los dispositivos (*compatibilidad electromagnética*).

INCOMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

Los casos frecuentes de incompatibilidades electromagnéticas son cada vez más familiares en la vida cotidiana. Las interferencias de los teléfonos móviles con los instrumentos de navegación de aviones o de los inhibidores de frecuencia con las ondas de radiocomunicaciones son ejemplos constantemente presentes a día de hoy. Las incompatibilidades electromagnéticas pueden plantear, en ocasiones, serios problemas sociales. Este fue el caso del Hospital Clínico San Carlos de la Ciudad Universitaria de Madrid con motivo de la construcción y puesta en funcionamiento de la línea 7 del ferrocarril metropolitano. El túnel transcurre por debajo del Hospital, de tal modo que los campos magnéticos producidos por la corriente tractora que fluye a lo largo de la catenaria pueden afectar las trayectorias de los haces de electrones de los microscopios electrónicos del servicio de anatomía que se encuentran en los sótanos del edificio. Como los campos magnéticos tienen una dependencia temporal aleatoria es imposible su compensación inmediata. La modificación de las trayectorias de los haces de electrones imposibilitan la obtención de la imagen de microscopía de los tejidos, imagen que debe obtenerse en tiempo real durante el transcurso de las intervenciones quirúrgicas. El campo magnético producido por la tracción eléctrica del "Metro" constituyó entonces la causa de un conflicto entre dos servicios sociales de la máxima importancia para los ciudadanos, la sanidad y el transporte. La modificación adecuada del cableado eléctrico orientada a una loca-

lización máxima de los campos magnéticos producidos por las corrientes permitió resolver el problema sin perjuicio para ambos servicios.

CAMPOS MAGNÉTICOS Y SALUD

Un título como este suscita inmediatamente la asociación de campos magnéticos y posibles daños a la salud. Se requiere una segunda lectura mas sosegada para percibir que la resonancia magnética nuclear utiliza un campo magnético actuando sobre los momentos magnéticos del agua del cuerpo para constituir un poderoso método de diagnóstico. Se requiere también cierto tiempo para caer en la cuenta de que los imanes constituyen el núcleo fundamental de varios dispositivos y prótesis que facilitan el correcto funcionamiento de algunos mecanismos naturales deteriorados. La nanotecnología ofrece una posibilidad esperanzadora para el tratamiento de ciertos tumores mediante la acción de campos magnéticos, aplicados desde el exterior del organismo, que producirían hipertermia (aumento de la temperatura local) matando las células enfermas. Los campos magnéticos podrían también servir de guía conductora hacia las zonas tumorales de nanopartículas magnéticas cargadas de fármacos que de esta forma actuarían selectivamente —solo sobre las células a combatir— reduciendo los efectos secundarios.

La alarma social que ha surgido en la sociedad en torno a las redes de alta tensión, primero, y posteriormente en torno a la telefonía móvil y, mas concretamente, a las antenas de esta telefonía merece un análisis global. Como este análisis supera el ámbito de este artículo científico nos limitaremos a esbozar aquellas de sus componentes mas estrechamente relacionadas con la física de los campos electromagnéticos.

Como ingredientes básicos del problema destacan los tres siguientes: 1) afortunadamente, la sociedad aumenta su sensibilidad hacia los posibles efectos de agentes que le son desconocidos y, en cierta medida, impuestos por entidades públicas o privadas sin una explicación detallada e inteligible del estado del conocimiento sobre ellos. 2) La ciencia nunca puede demostrar que un agente no produce efectos nocivos. Este punto es sin duda el mas importante y en el que se

basan muchos de los argumentos que no cesan de sembrar duda en la sociedad sobre la posible nocividad de los CEM y 3) Un planteamiento científico del problema parte de la realidad conocida y que en lo que respecta al tema de los CEM se puede resumir en los siguientes puntos: a) los efectos de los campos sobre los mecanismos de la vida dependen de su intensidad de tal modo que para cada frecuencia de campo existe un umbral de intensidad por debajo del cual no existe daño conocido. b) el hecho de que, por debajo de dicho umbral de intensidad, no exista daño conocido no excluye la posibilidad de que se descubra en el futuro algún tipo de daño. No obstante, este daño al ser desconocido no es un objeto de ciencia a día de hoy y c) las intensidades y frecuencias de los campos electromagnéticos a los que habitualmente estamos sometidos por el mero hecho de vivir en la biosfera —campos estáticos magnético y eléctrico terrestres, campos de alta frecuencia debidos a la radiación solar y cósmica— nos sirven de patrones de intensidad o guías de los ordenes de magnitud tolerables por el organismo.

Aceptadas las tres componentes que sirven para fijar las coordenadas científicas del problema veamos cual es el método que permite el progreso del conocimiento sobre los efectos biológicos de los CEM. Existen dos aproximaciones metodológicas sobre las que se basa la investigación actual: a) los posibles fenómenos o efectos que los campos electromagnéticos, según su frecuencia, pueden generar en la materia viva y b) los análisis epidemiológicos y estadísticos realizados sobre la población que tratan de relacionar enfermedades con condiciones medioambientales, como puede ser la acción de CEM. Es obvio que cuando los estudios derivados de ambas aproximaciones se refuerzan podemos hablar de alta probabilidad o incluso evidencia. Cuando no se conoce efecto alguno de los CEM sobre algún mecanismo particular de funcionamiento del organismo y no existen indicios epidemiológicos de enfermedad asociada a la disfunción de ese mecanismo podemos olvidarnos de la posible interacción de este mecanismo con los CEM. Cuando, por el contrario, conocemos los efectos contundentes que una intensidad de corriente superior a un miliamperio tiene sobre el sistema motor de la circulación de la sangre y contamos además con una rica estadística que muestra la muerte del organismo sometido a esa corriente, podemos hablar de evidencia

de daño. En general las situaciones frecuentes no son las de coincidencia entre los efectos predecibles y la epidemiología. En concreto y en el caso de los CEM de 50 herzios de frecuencia, correspondiente a los campos producidos por las corrientes de la red de suministro de energía eléctrica, existe un leve indicio epidemiológico que parece sugerir asociación entre frecuencia de leucemia infantil y proximidad habitual a líneas de alta tensión. Como la frecuencia de leucemia infantil es afortunadamente baja, los datos parecen sugerir que cada cien niños con la enfermedad quizás un caso podría asociarse a las líneas de alta tensión lo que sin duda pone de manifiesto que la vinculación causa efecto no se puede trasladar con el mínimo rigor intelectual a esta casuística. Si la epidemiología sugiere una tendencia que no puede justificarse con un efecto conocido de los campos sobre la vida, no por esto puede descartarse pero si se requerirá para su consideración un reforzamiento superior de los resultados estadísticos, sobre todo en comparación con los resultados que se sustentan en efectos conocidos.

Respecto al estado actual de conocimiento de los posibles efectos de los CEM sobre la materia viva conviene resaltar que hay un desequilibrio entre el conocimiento de los efectos generales producidos por los CEM y el conocimiento de los mecanismos de la vida y más concretamente de la vida humana. La teoría de los CEM constituye la parte más acabada de la Física. Las ecuaciones de Maxwell escritas en la segunda mitad del siglo XIX han sido un paradigma ilustrativo de la capacidad del método científico. Basadas en los experimentos de Coulomb, Oersted y Faraday estas ecuaciones han resistido las revisiones profundas asociadas a la Mecánica Cuántica y la teoría de la Relatividad. Es más, la modificación introducida por Einstein en la física clásica con su teoría de la Relatividad especial afectó a las ecuaciones de Newton para dejar invariantes a las ecuaciones de Maxwell. Los principios que gobiernan el comportamiento de los CEM, obtenidos de experimentos macroscópicos, sirven también para explicar el comportamiento de estos CEM en la escala atómica y subatómica y en el límite de altas velocidades. Por el contrario los fenómenos intrínsecos a la vida, la elaboración de enzimas según el código genético, los plegamientos de las proteínas, el funcionamiento de los motores moleculares, forman un conjunto de complejísimos objetos de investigación actual que probablemente dentro de cin-

cuenta años puedan sintetizarse en un conjunto de ecuaciones-principios semejantes a las ecuaciones de Maxwell. En esta importante cuestión de la influencia de los CEM sobre la vida la debilidad de la respuesta hoy está en la biología o quizás, con más precisión, en la físico-química de la biología. No obstante, ya se van conociendo muchos mecanismos nuevos de la actividad celular, en concreto neuronal, que están muy íntimamente relacionados con CEM, volveremos sobre ello más adelante.

La epidemiología es una ayuda que tiende a complementar al limitado conocimiento actual de la biología. La medicina como terapia de urgencia no puede esperar a los descubrimientos biológicos para actuar. Los estudios epidemiológicos arrojan alguna luz sobre las posibles relaciones causa-efecto de enfermedades. Sin embargo sus resultados no son siempre lo suficientemente fiables como desearíamos que lo fueran.

De este análisis se desprende que la realidad científica de los efectos sobre la salud producidos por los CEM está abierta al futuro, pero también se deriva que existe tal realidad a día de hoy. Es precisamente la plasmada por los valores de referencia recogidos en la Recomendación del Consejo de la Unión Europea y en los siguientes documentos: Último informe realizado por el Ministerio de Sanidad y Consumo sobre la aplicación del Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas. Informe Técnico elaborado por el Comité de Expertos: Evaluación actualizada de los Campos Electromagnéticos en relación con la Salud Pública, elaborado en septiembre de 2003. Informe de la Comisión de las Comunidades Europeas: *Implementation report on the Council Recommendation limiting the public exposure to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)*. Informe del National Radiological Protection Board: *Review of the Evidence for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (0-300 GHz)*, realizado en colaboración con la Health Protection Agency del Reino Unido. Informe de la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: *Review of the Epidemiologic Literature on RF and Health, Environmental*

Perspectives. Volumen 112; número 17, Diciembre 2004.

Que todos estos informes sean revisables en el futuro significa que son a día de hoy el resumen del estado actual del conocimiento. Las instituciones de mayor prestigio y los científicos independientes que las asesoran han resumido en estos documentos lo que se conoce sobre los efectos de los CEM en la salud humana y han recomendado escrutar con detenimiento los resultados de las investigaciones en marcha para modificar los límites establecidos si así se observara necesario. La tabla adjunta muestra los límites conocidos como restricciones básicas (o niveles que no deben sobrepasarse en ningún caso).

LOS CAMPOS MAGNÉTICOS PRODUCIDOS POR LA ACTIVIDAD CEREBRAL

Como establece Hämäläinen en su artículo Magnetoencephalography en Reviews of Modern Physics, Vol 65, n 2, Abril 1993: "Exploration of the human brain is of the utmost intellectual interest,: the whole humanity depends on our minds"

Una magnífica herramienta que permite aproximarnos al conjunto de correlaciones y sincronismos eléctricos inducidos en el cerebro humano por la actividad neuronal es la magnetoencefalografía. Las neuronas excitadas por voltajes eléctricos generan nuevos potenciales (potenciales de acción) que son transmitidos a nuevas neuronas, a músculos y a glándulas. Las corrientes eléctricas de polarización y despolarización generan campos magnéticos que pueden ser detectados en las proximidades del cráneo con sensores de tipo "squid" (superconductor quantum interference device) de muy alta sensibilidad (10^{-14} T).

El córtex, formado por materia gris, pliega sus 2500 cm^2 de superficie total en un espesor de 2 a 4 mm de profundidad inmediatamente adyacente al cráneo. Está formado por 10^{10} neuronas, con unas diez mil uniones sinápticas por neurona, lo que implica un número total de 10^{14} sinapsis. Un número aproximado de 10^{11} células gliales completan la estructura del córtex humano.

Los potenciales postsinápticos que proviniendo del axón de otra neurona provocan la actividad química del neurotransmisor y son transmitidos al soma de la

	Rango de frecuencias	Densidad de corriente para cabeza y tronco ($\text{mA} \cdot \text{m}^{-2} \text{ rms}$)	S.A.R. Promedio de cuerpo entero ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	S.A.R. localizado de cabeza y tronco ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	S.A.R. localizado de extremidades ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Campo magnético B (mT)	Densidad de potencia S ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
Público en general	0 Hz	----	----	----	----	40	----
	0 Hz - 1 Hz	8	----	----	----	----	----
	1 Hz - 4 Hz	$8/f$	----	----	----	----	----
	4 Hz - 1 kHz	2	----	----	----	----	----
	1 kHz - 100 kHz	$f/500$	----	----	----	----	----
	100 kHz - 10 MHz	$f/500$	0.08	2	4	----	----
	10 MHz - 10 GHz	----	0.08	2	4	----	----
	10 GHz - 300 GHz	----	----	----	----	----	10

Restricciones básicas para en público en general, para campos electromagnéticos de hasta 300 GHZ

neurona a través de la dendrita sináptica oscilan en amplitud entre 10 y 100 mV y tienen una duración típica de 10 ms. Los potenciales de acción que, generados por la integral de los potenciales sinápticos, se propagan por el axón alcanzan valores de 100 mV durante 1 ms. Las corrientes sinápticas de polarización se propagan longitudes, l , de 0.1 mm hacia el interior de la dendrita y dan lugar a dipolos de corriente, Il , donde I es la intensidad de corriente, del orden de 20 fAm. El prefijo “femto” significa 10^{-15} , lo que permite inferir que las intensidades son del orden de 10^{-10} A. Los campos magnéticos en el exterior inmediato al cráneo, producidos por una corriente postsináptica individual de 10^{-10} A situada inmediatamente adyacente al interior del cráneo, son de 10^{-4} fT y, por tanto, serían completamente indetectables. El campo que se mide con el “squid” es del orden de 100 fT que es el producido por aproximadamente un millón de corrientes sinápticas con una intensidad bipolar de 10nAm, lo que corresponde a la activación del uno por mil de las uniones existentes en 1 mm^2 . Un campo de esta magnitud es una mil millonésima del campo magnético terrestre, lo que permite apreciar la enorme sensibilidad de los sensores y la no menos enorme dificultad de la medida que requiere apantallamientos extremada-

mente eficientes del ruido electromagnético ambiental. Es importante considerar que las corrientes que fluyen por los axones como resultado de los potenciales de acción inducen un campo magnético (de naturaleza cuadrupolar y que varían con la inversa del cubo de la distancia) mas localizado que los producidos por las corrientes post-sinápticas (de naturaleza bipolar y que varían con la inversa del cuadrado de las distancias).

El magnetoencefalógrafo es un equipo que consta de mas de 140 sensores “squid” distribuidos uniformemente en la superficie de un casco que se coloca sobre la cabeza del paciente y que permite registrar los campos magnéticos producidos en su córtex de modo no invasivo. El análisis de sincronismos entre las señales producidas en distintas regiones del cerebro ha conducido recientemente a importantes descubrimientos sobre, por ejemplo, las correlaciones existentes entre las zonas promotora, motora y muscular. Esta técnica cuyo uso ha arrancado muy recientemente permitirá en un futuro inmediato conseguir notables avances en el conocimiento de las transmisiones de señales y acoplamientos entre distintas y distantes regiones cerebrales asociadas a cada actividad consciente e inconsciente.