

EFECTOS DEL CAMPO
ELECTROMAGNÉTICO
EN EL ORGANISMO

Olalla Varela Silvalde

Inés Riveiro Sierra

A stylized, low-poly mountain range graphic in shades of teal and light blue, positioned at the bottom right of the page.

HISTORIA

- ◆ Todos los organismos vivos están sometidos a un imán gigante llamado “Tierra”.
- ◆ La fuerza del campo geomagnético es $40 \mu T$, aproximadamente.
- ◆ El campo magnético de la Tierra es cuasi-estático, variando un poco con r y t .
- ◆ Los campos naturales estáticos y eléctricos:
 - Sobre $0,1 \text{ KV/m}$ en la superficie de la Tierra, bajo las condiciones de un cielo claro
 - De hasta 30KV/m se alcanzan bajo nubes que producen rayos.
- La mayor parte de los sistemas eléctricos diarios operan a 50 ó 60 Hz : como secadores de pelo, refrigeradores.
- Muchas de nuestras actividades diarias se producen cerca, y a veces por debajo, de líneas de transmisión de alto voltaje y líneas de distribución de voltaje bajo.
- La electricidad se tiene desde hace más de 100 años. La posibilidad de la exposición a los campos eléctricos y magnéticos producidos por varios tipos de equipos eléctricos e instalaciones pueden no haber sido previamente reconocidos los efectos adversos sobre la salud. Tema que empezó a preocupar sobre 1975 .
- A bajas frecuencias, las componentes del campo eléctrico y magnético son independientes, lo que significa que no existe un CEM verdadero, como ocurre a frecuencias mucho más altas, donde se acoplan.
- Se habla de CEM de muy baja frecuencia cuando es menor de 300 Hz

4 POSIBLES EFECTOS DEL CEM SOBRE EL SISTEMA BIOLÓGICO

1) Función neurofisiológica básica: el sistema nervioso es fundamentalmente un sistema eléctrico. Esto empezó con Galvani y Volta a principios S. XIX cuando tuvieron su famosa controversia sobre la estimulación eléctrica y la contracción de las ancas de ranas

2) Empezó sobre 1930 cuando científicos interesados en los efectos de irradiación de microondas en células de plantas, células de sarcoma animal y otros tipos.

3) Estudio clínico y terapéutico de las aplicaciones de los campos eléctricos y magnéticos a fracturas de huesos: algunas fracturas no curan propiamente y la aplicación de corrientes o campos parece que promover la cicatrización.

4) Basada en la preocupación pública y el interés científico de los posibles efectos adversos sobre la salud. Esta área fue impulsada por el decreto gubernamental de la Unión Soviética sobre trabajos eléctricos en 1973, promulgando una fuerza de campo más baja que la considerada peligrosa en los Países Occidentales. Tanto la preocupación pública como el interés científico se reforzaron con el trabajo epidemiológico de Wertheimer y Leeper (1979), que dieron cuenta de una posible asociación de la frecuencia de los C.M y la leucemia infantil.

A pesar de las 3 primeras áreas de investigación seguidas por científicos y clínicos en cada área, ha sido la 4ª área la que más se ha estudiado en las tres últimas décadas. Envolviendo a epidemiólogos, ingenieros y científicos de todo el mundo.

Esto alcanza mayor relevancia cuando los teléfonos celulares fueron adoptados mundialmente sobre 1990, hizo que surgieran preocupaciones similares sobre estos dispositivos, los cuales tienen frecuencias mucho más altas, 2GHz en los teléfonos más nuevos.

INVESTIGACIÓN NEUROFISIOLÓGICA BÁSICA

➤ Desde que el osciloscopio de tubo de Braun fue introducido en el estudio de la neurofisiología (Passer 1921), las estimulaciones eléctricas de un punto del sistema nervioso y la grabación de respuestas, ha sido una técnica de investigación muy poderosa durante las décadas siguientes.

➤ La estimulación superficial eléctrica (catodal) de la corteza cerebral fue ampliamente usada, en animales y algunos humanos sobre 1950.

Sin embargo con este método, solo con tejido como las dendritas y/o axones de neuronas que están localizadas cerca de la superficie y que son excitadas, los cuerpos de células y fibras localizadas a alguna profundidad no están estimulados directamente.

➤ Esta técnica con tan poca capacidad, se supera con técnicas de simulación magnética desarrollada desde 1985, por Barrer y otros, para estudiar las funciones cerebrales humanas.

En la cabeza humana se situaron bobinas, y la corteza motora era estimulado por pulsos magnéticos transcraneales. La respuesta EM fue grabada desde los músculos apropiados.

Por ej., si el área motora de la corteza que controla el brazo y la mano, fuese estimulada, la actividad en los músculos, incluyendo movimientos del brazo y de la mano podría ser inducidos. Con esta técnica un área enorme del cerebro es estimulada.

➤ En otra estimulación localizada en un área del cerebro, por Ueno y otros (1988, 1990) propusieron poner una fibra de 8 solenoides sobre la cabeza de forma que se produjese una corriente de remolino convergente tal que solo se localice la porción de la corteza motor estimulada. Este método se usa en el estudio de las funciones cerebrales (por ej, Day y Brown en 2001).

➤ La simulación magnética de otras áreas del cerebro humano también fue utilizada en un esfuerzo para mejorar el estatus mental (Pascual-Leone y otros en 1996).

INVESTIGACIÓN BIOLÓGICA CON ENERGÍA DE MICROONDAS

Durante y después de la II Guerra Mundial, la tecnología de microondas fue estudiada no solo para uso militar, sino también para uso civil.

Las tecnologías de comunicaciones (por ej, telefonía móvil) han avanzado rápidamente en los últimos años, entonces la energía de microondas está también ubicada en la atmósfera.

A final de 1940, fue publicado que los sonidos podían ser oídos cerca de una estación de radar.

El efecto de audición de radiofrecuencias fue sistemáticamente estudiado sobre 15 años más tarde (Frey 1961), coincidiendo con otros estudios de efectos de microondas en otros órganos y tejidos, como los ojos y el sistema nervioso.

CAMPOS ELÉCTRICOS ELF Y LA CURA DE HUESOS

Desde que Yasuda en 1954, midió la piezoelectricidad de los huesos, se han hecho intentos clínicos para aplicar campos eléctricos con el propósito de promocionar la curación de las fracturas de huesos, particularmente la de la tibia.

Muchos estudios clínicos terapéuticos se publicaron desde entonces (por ej. Bassett y otros en 1981). Desde mediados de los años 80, estudios clínicos controlaban el uso de placebo, obteniendo buenos resultados.

Desde entonces muchos experimentos clínicos y con animales de laboratorio han sido publicados, y parece que la eficacia de la terapia de los C.E y C.M ha sido establecida.

Recientemente, el interés de la investigación se ha desviado al estudio de la curación de huesos inducida por la exposición a C.M

PREOCUPACIÓN PÚBLICA SOBRE LA EXPOSICIÓN A CAMPOS EM

Hasta principios de los años 70 se asumía que la exposición a campos EM y fuerzas de campo relevantes para el entorno, producían efectos no dañinos sobre los seres humanos.

El resultado de los pocos estudios científicos completados sobre la cuestión y la experiencia de cerca de 100 años de uso exitoso de la electricidad eran reafirmantes. Incluso la exposición a campos EM se pensaba que tenía algún efecto favorable en alguna clase de plantas.

Sin embargo, la información de investigación de la Unión Soviética en 1972 en el encuentro de CIGRE, indicó que los trabajadores expuestos a CE de voltajes altos mostraban posibles efectos dañinos, lo que causó la atención en el Mundo.

A parte de los estudios de los investigadores Soviéticos, prácticamente no había mucha más información de los efectos dañinos a la exposición del CE.

Reportajes publicados de efectos negativos incluyen:

- Estudios médicos de 10 trabajadores expuestos a líneas energéticas de 350kV (Singewald, 1973)
- Estudios médicos de 56 trabajadores de mantenimiento en subestaciones de 735 kV (Roberge 1976)
- Estudios médicos a 53 trabajadores en 5 años en subestaciones de 400kV (Knave y Gamberale 1979)

Wertheimer y Leeper (1979) compararon la incidencia de la leucemia infantil y los tumores del cerebro en niños controlados en el área de Denver. Wertheimer y Beeper concluyeron que existía una asociación entre el cáncer y la exposición a CM. Debido a que en sus descubrimientos, parecía que se relacionaba con altas corrientes en lugar de con voltajes. La incidencia de leucemia se desdoblaba en los casos expuestos respecto de los casos controlados.

Después de las publicaciones, muchas investigaciones relacionadas con la seguridad de los campos ELF surgieron tanto en áreas epidemiológicas como en áreas biológicas.

LA SOCIEDAD DEL BIOELECTROMAGNETISMO

La Sociedad de Bioelectromagnetismo (Bioelectromagnetics Society) fundada en EEUU en 1979, en una época en la que el estudio del bioelectromagnetismo era motivado por las preocupaciones de la exposición a CEM antropogénicos o a la radiación expuesta a los humanos.

Desde la II Guerra Mundial el bioelectromagnetismo se centró en microondas.

El propósito de la Sociedad, que tiene miembros por todo el mundo, es promover:

- El estudio científico de la interacción de la energía EM (a frecuencias que van desde 0Hz hasta frecuencias de la luz visible)
- La energía acústica con sistemas biológicos (Constitution of the Bioelectromagnetic Society, Article II – Purpose).

Sin embargo, se ha notado recientemente que la Sociedad se está centrando y preocupando sólo en la amenaza biológica de campos y ondas EM.

Bajo la situación cambiante de los últimos años, particularmente después de la publicación del Consejo de Investigación Nacional (NCR) en 1997 y del programa NIEHS EMF-RAPID (1999), continúa el boletín (la Newsletter) con:

“Para la salud de la Sociedad a largo plazo, se deberá asumir énfasis en áreas importantes, como la comprensión de los mecanismos fundamentales, y los esfuerzos para desarrollar herramientas que puedan ser aplicadas para mejorar la salud humana”.

MODELOS USADOS

Un número de animales de laboratorio fueron utilizados para investigar una variedad de posibles efectos.

Animales usados:

Ratones	Ratas
Pollos	Monos
Vacas	Cerdos
Perros	Conejos
Abejas	

Aunque para algún experimento concreto también se utilizaron a humanos.

MATERIAS INVESTIGADAS

Las áreas experimentales estudiadas incluyen desarrollos y crecimientos:

- Endocrinológicos
- Hematología
- Inmunología
- Sistema nervioso
- Reproducción
- Otros

Además de estos experimentos in vivo, existen experimentos in vitro llevados a cabo. Mucho de estos estudios han sido publicados en la revista oficial del bioelectromagnetismo o en otras.

BIOELECTRICIDAD Y BIOMAGNETISMO

DEFINICIÓN: Bioelectricidad

“Es el estudio de fenómenos eléctricos generados por organismos vivos y de los *efectos* del campo EM externo sobre el cuerpo vivo”.

Los fenómenos eléctricos incluyen propiedades inherentes a las células, como el potencial de membranas, el potencial acción y la propagación de los potenciales.

Con “efectos” se quiere decir que las células en el cuerpo responden a la aplicación o exposición de campos.

Debido a que el cerebro es tan importante en el comportamiento humano, y porque la función del cerebro implica inherentemente una gran cantidad de actividad eléctrica, desde los inicios del bioelectromagnetismo ha sido importante encontrar efectos de CE y corrientes (y CM que inducen CE y corrientes) sobre el cerebro.

Para comprender esto hace falta algún conocimiento sobre electrofisiología, que se explicarán en los apartados siguientes

BIOELECTRICIDAD

DEFINICIÓN: Potencial de membrana

Existe una diferencia de potencial eléctrico entre el interior de una célula y el fluido extracelular que la rodea, y esta diferencia se llama potencial de membrana.

La función especializada del sistema nervioso es propagar cambios en el potencial de membrana en el interior de una célula (neurona) y transmitirlo a otras células.

La transmisión de estos cambios de potencial ayuda al cuerpo a coordinar la actividad con la información proveniente de tanto los entornos internos como de los externos al Sistema Nervioso Central, donde es procesada, permitiendo al cuerpo adaptarse de forma adecuada a las demandas de sus entornos.

POTENCIAL DE MEMBRANA

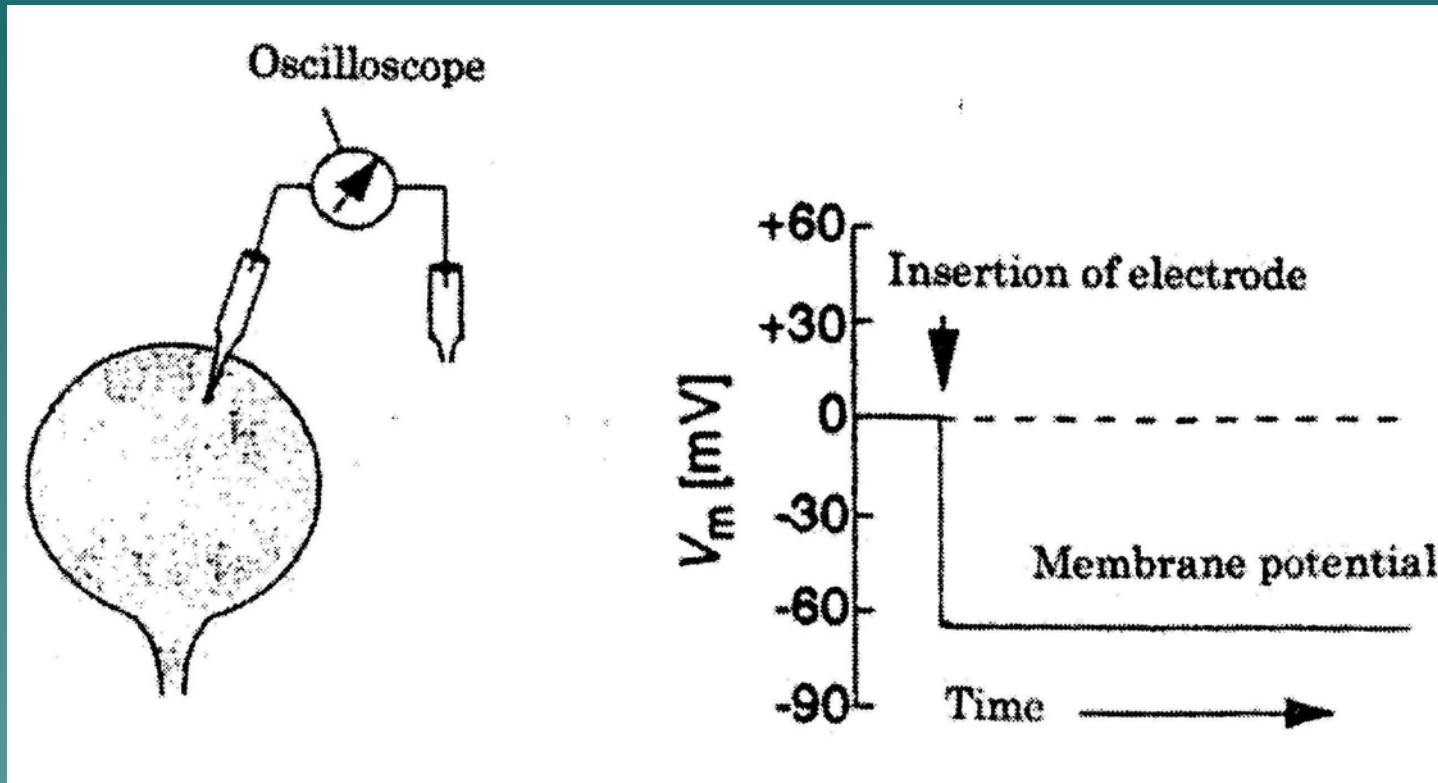
La diferencia de potencial entre el interior de una célula y el fluido que rodea a la célula puede ser medido conectando un polo de un voltímetro a través de un electrodo intracelular fino insertado dentro de la célula y el otro polo al fluido extracelular.

Generalmente se usan capilares de vidrio, llenos de una solución conductora, como electrodos intracelulares.

Al empezar la medida, ambos electrodos están fuera de la célula, y no hay d.d.p. entre ellos. Cuando el tipo de capilar de vidrio es empujado a través de la membrana de la célula, el potencial cambia de repente a aproximadamente -75mV .

Esta d.d.p. es grabada cuando la membrana es penetrada, llamada potencial de membrana o potencial de reposo, porque es el potencial grabado cuando la célula está en reposo y no está siendo estimulada.

POTENCIAL DE MEMBRANA



Medida del potencial de membrana intracelular.

A la izquierda: un diagrama del dispositivo de medida.

Cuando un microelectrodo intracelular se inserta en la célula, se graba el potencial de membrana en reposo.

Origen del potencial de membrana

Tanto los espacios intra-celulares como los extra-celulares están llenos con soluciones salinas acuosas.

En soluciones salinas diluidas, la mayoría de las moléculas se disocian en iones.

En soluciones acuosas los iones son los únicos portadores de carga.

En consecuencia, el desequilibrio de carga, expresado por el potencial en reposo, indica un cierto exceso de aniones dentro de la célula y un exceso correspondiente de cationes fuera de la célula. Este desequilibrio es activamente mantenido por la célula, la cual usa energía para insertar iones en contra de sus gradientes de concentración. Entonces los fenómenos eléctricos del cuerpo vivo están generados por el movimiento de iones, no por el movimiento de electrones.

La fuente del potencial en reposo es la distribución distinta de varios iones, particularmente de iones K^+ , dentro y fuera de la célula, Na^+ y Cl^- también son importantes. La concentración de potasio dentro de la célula es sobre 40 veces mayor que la del espacio extracelular, y la concentración del sodio es 12 veces más alta fuera que dentro.

EL POTENCIAL DE ACCIÓN

Es la tarea de las células nerviosas recibir, procesar y transmitir información a través del sistema nervioso, coordinando, integrando y regulando las funciones del cuerpo.

Cuando una célula nerviosa expulsa, se desarrolla un cambio positivo corto (sobre 1ms) en el potencial de membrana. Estos cambios se llaman “potenciales de acción”. Una vez generados, el potencial de acción es propagado a lo largo del nervio.

Es característico de la conducción del potencial acción, que la amplitud del potencial de acción, permanezca constante a lo largo del camino de propagación, ya que el potencial de acción es generado en todos los puntos de la membrana, obedeciendo “toda o ninguna ley”.

TRANSMISIÓN SINÁPTICA

DEFINICIÓN: Sinapsis

“La unión de un extremo axonal con una neurona, una fibra muscular o una glándula celular es llamada sinapsis”.

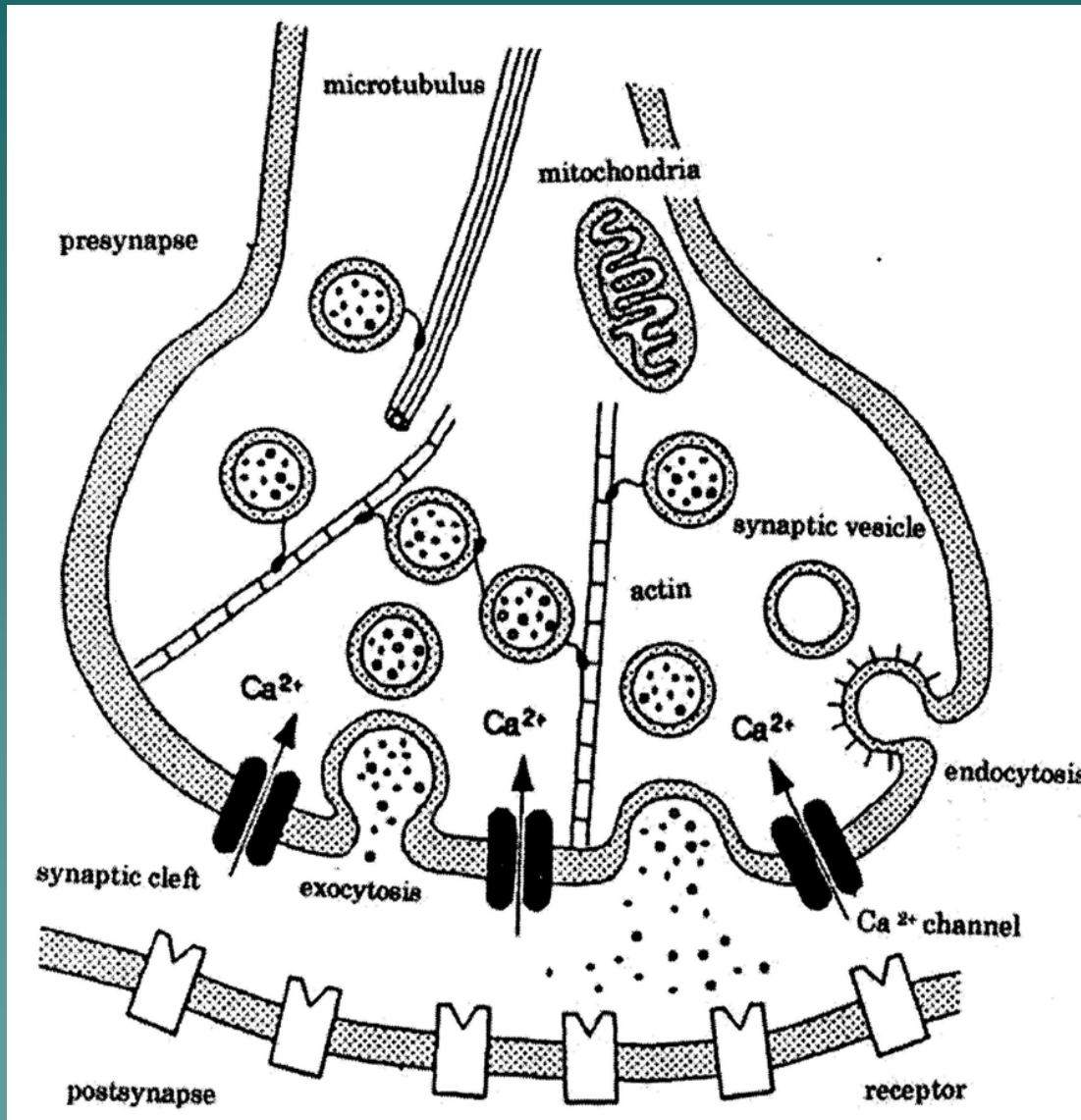
En una sinapsis, el potencial acción propagado es transmitido a la siguiente célula o células.

Existen 2 tipos de sinapsis:

➤ Sinapsis química: el terminal axonal da lugar a una sustancia química que produce un efecto excitador o inhibidor en la membrana subsináptica

➤ Sinapsis eléctrica

TRANSMISIÓN SINÁPTICA



Sinapsis y lanzamiento del transmisor sináptico

El transmisor sináptico está contenido en las vesículas sinápticas del mando sinóptico, que es el extremo del axón.

Las vesículas sinápticas están conectadas con microtúbulos y/o actina a través de sinapcina I.

Con incremento de la concentración intracelular Ca^{2+} las vesículas sinápticas son liberadas de los microtúbulos y/o actina.

Entonces se funden con la membrana presináptica, de donde el transmisor surge por exocitosis.

a) ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE SINAPSIS QUÍMICA

Las investigaciones con microscopios de luz y de electrones han revelado que las uniones sinápticas contienen una variedad de elementos.

La microscopía de la luz indica que axones acaban en el terminal presináptico, formando un alargamiento esférico llamado “knov sináptico”.

La microscopía electrónica muestra que el terminal presináptico es separado del lado postsináptico por un espacio estrecho, que mide de 10 a 20 nm de ancho.

La membrana subsináptica debajo de un knov sináptico parece de alguna forma más gruesa que la membrana postsináptica.

El terminal presináptico contiene un número largo de vesículas sinápticas, son sobre 50 nm de diámetro y contiene la sustancia transmitida que se introduce dentro del espacio sináptico cuando llega un potencial acción.

El transmisor unido a su tipo específico de receptor localizado en la superficie externa de la membrana subsináptica, transmite respuestas a la membrana subsináptica.

Las neuronas centrales poseen desde muchas docenas hasta varios miles de sinapsis. De todos modos estas sinapsis están clasificadas, en sólo dos categorías: excitadoras e inhibitoras. La integración continua de un número enorme de señales excitadoras e inhibitoras es la base de la función cerebral.

SINAPSIS EXCITADORA

La simulación de aferentes excitadores en las neuronas genera un potencial postsináptico excitador (EPSP) que tiende a reducir el potencial de membrana de la neurona postsináptica.

Un cambio en esta dirección es llamada excitador porque incrementa la probabilidad de que la neurona postsináptica se encienda.

La amplitud de EPSP depende del número de sinapsis activadas: si este número es suficientemente alto, la neurona es despolarizada hasta el umbral, produciendo un potencial acción que se propaga a lo largo del axón.

SINAPSIS INHIBIDORA

Cuando las neuronas inhibitoras son excitadas por algunas fuentes, un cambio de potencial hiperpolarizado puede ser grabado por una neurona subsináptica.

Con hiperpolarización, el potencial de membrana es desplazado lejos del umbral del potencial acción.

Por ejemplo, el potencial membrana puede ser cambiado desde -70mV a -75mV . Consecuentemente la neurona es inhibida. Como la hiperpolarización está grabada en una neurona se llama potencial inhibitorio postsináptico (IPSP).

RECEPTORES SINÁPTICOS

Los receptores sinápticos tienen dos funciones principales:

- Reconocer la sustancia específica transmitida
- Activar los efectores

Los receptores para los neurotransmisores pueden estar divididos en dos grupos primordiales según como las funciones receptoras y efectoras sean acopladas:

- **Receptores ionotrópico**, es decir, en los receptores en que penetran canales iónicos directamente (las 2 funciones son llevadas a cabo por distintos dominios de una sola macromolécula (figura A).
- **Receptores metabotrópicos**: el reconocimiento del transmisor y la activación de los efectos son llevados a cabo por moléculas distintivas y separadas (figura B).

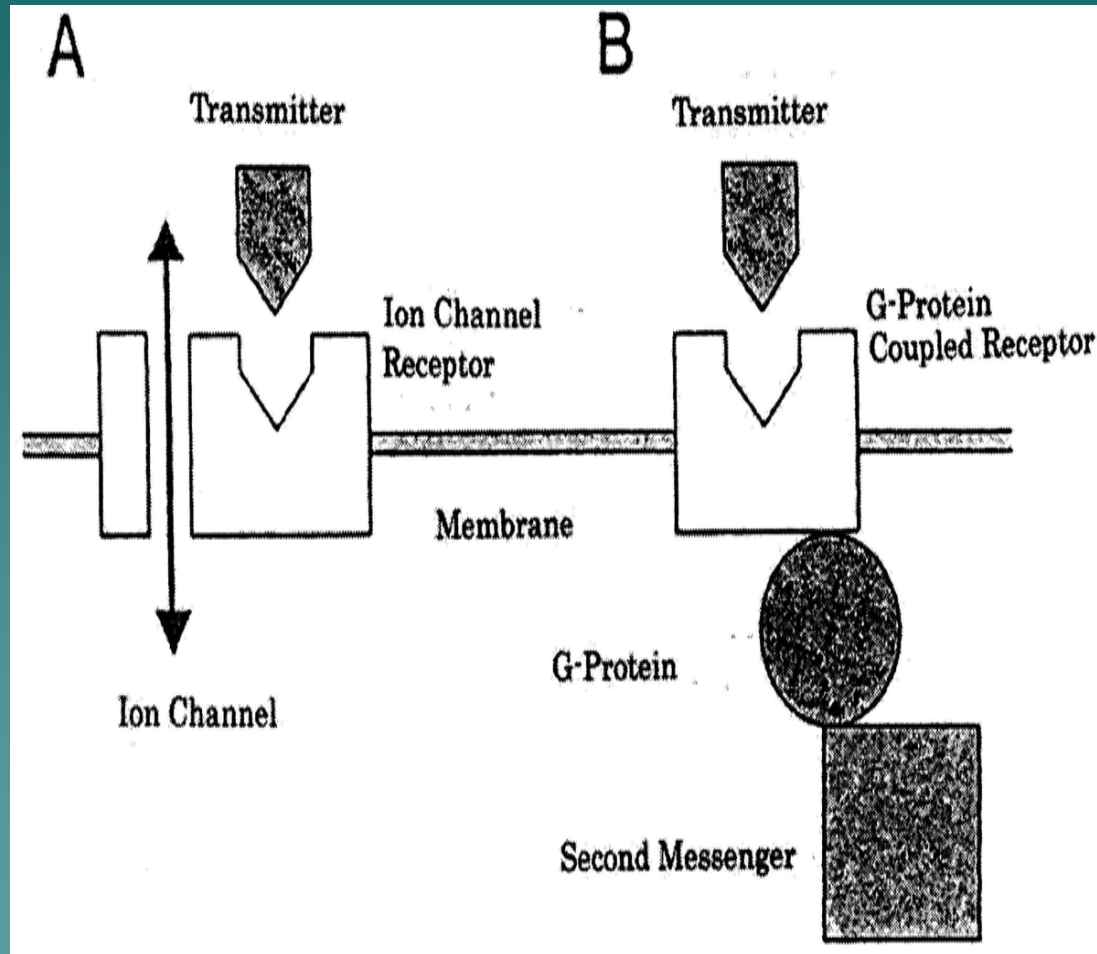
La activación del componente efector requiere la participación de varias proteínas.

Típicamente el **efector** es una enzima que produce un “2º mensajero” difundible, por ejemplo, monofosfato de adenosina cíclica (cAMP) o polifosfato inositol.

El 2º mensajero a cambio dispara una cascada bioquímica tanto activando kinasas de proteínas específicas que fosforilizan una variedad de las proteínas de la célula como movilizandoo iones Ca^{2+} desde almacenes intracelulares (iniciando entonces las reacciones que cambian el estado bioquímico de la célula).

Hay quizás 100 sustancias que actúan como transmisores, cada una de las cuales activa sus propios receptores específicos sobre la superficie de la célula.

RECEPTORES SINÁPTICOS



Dos tipos de receptores sinápticos

Los transmisores y las hormonas son llamados primeros mensajeros. Cuando el primer mensajero se acopla con un receptor acoplado con una proteína-G, los receptores segundos como AMP, GMP, Ca^{2+} o NO aparecen en el citoplasma, lanzando señales de transducción conduciendo a cambios de la célula.

> Receptores ionotrópico, (figura A).

> Receptores metabotrópicos (figura B).

b) SINAPSIS ELÉCTRICA

La sinapsis eléctrica es el gap donde la zona de aposición está acortada por canales que van desde el citoplasma a la neurona presináptica o la neurona postsináptica. Estas uniones median la transmisiones eléctrica, normalmente bidireccional.

BIOMAGNETISMO

El biomagnetismo trata los fenómenos magnéticos del cuerpo vivo, el cual puede ser observado a diferentes intensidades y frecuencias. Por ejemplo el llamado **magnetofosfenio**, es una sensación visual inducida por la exposición de la cabeza a un CM de frecuencia baja, sobre 10-20 mT. La señal es generada en la retina.

La estimulación magnética del cerebro humano y el corazón humano fueron usados para la investigación y tratamiento clínico.

Mediante técnicas de SQUID (dispositivos de interferencia cuántica superconductor), el CM débil del cerebro, corazón y pulmón pueden ser medidos desde fuera del cuerpo.

CAMPOS EM DEL ENTORNO Y BIOSISTEMAS

Nosotros estamos expuestos diariamente a campos EM, tanto de fuentes naturales como hechas por los humanos.

Los campos EM que existen naturalmente se originan de:

- Propiedades del núcleo de líquido fundido de la tierra
- Descargas eléctricas en la atmósfera (fuentes terrestres)
- Actividades solares y lunares (fuentes extraterrestres).

Los campos EM antropogénicos generados por el hombre, vienen principalmente de las líneas de transmisión de potencia de 50 o 60 Hz y de las líneas de distribución de dispositivos eléctricos que trabajan en la frecuencia de la línea de potencia, clasificadas como líneas de frecuencia baja (ELF).

CAMPOS NATURALES

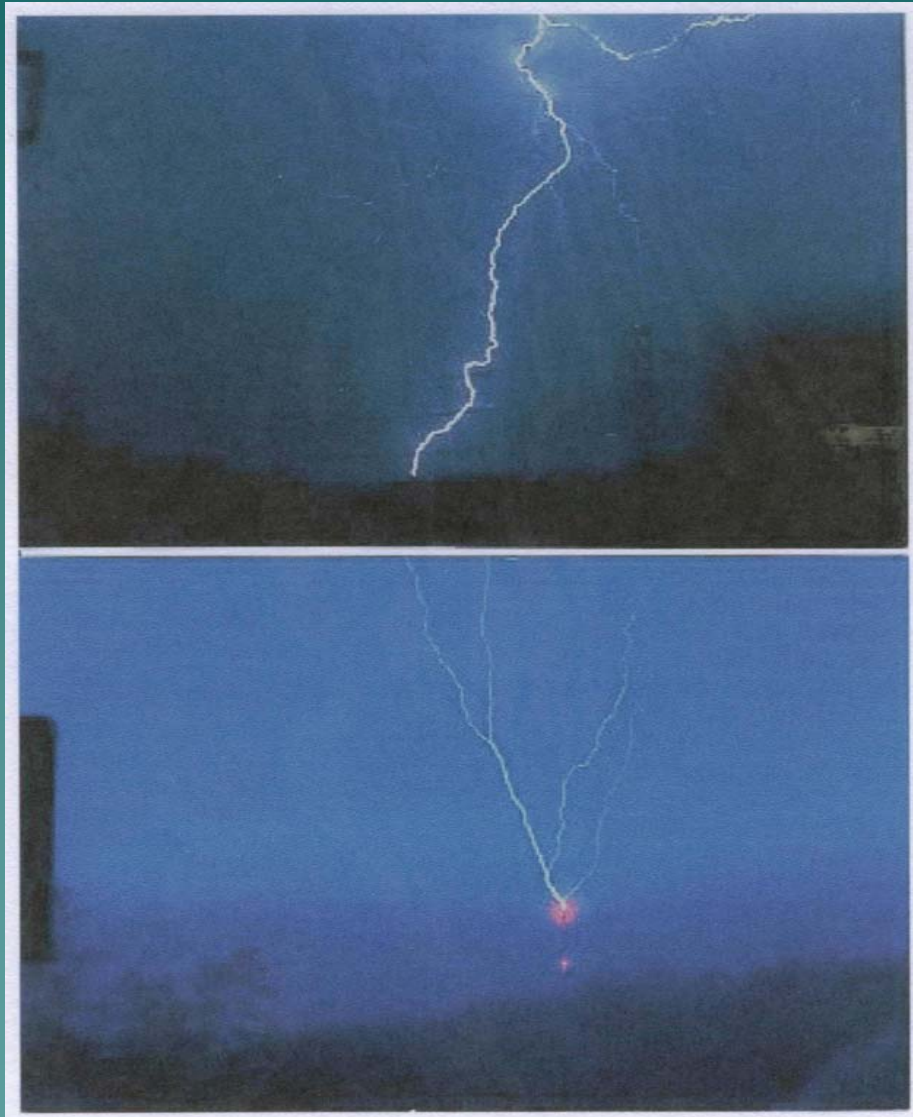
Las fuentes naturales de campos EM están asociadas con descargas iluminadoras y las señales resultantes son llamadas “atmosféricas” o “esféricas”, las cuales varían con el tiempo y la posición, y tienen ondas en ELF y a muy bajas frecuencias (VLF) con rangos hasta 300 kHz.

El campo eléctrico a nivel del suelo es de 0,1 kV/m, y durante tormentas se registraron más de 100 kV/m.

Las descargas de luz son consideradas como una fuente de corrientes eléctricas, que se cree que pueden generar de varios kA a cientos de kA. El camino de un rayo puede ser de varios longitudes, actuando como una antena enorme.

El rango de frecuencias va desde varios Hz a una banda de GHz. Estos son campos EM emitidos naturalmente.

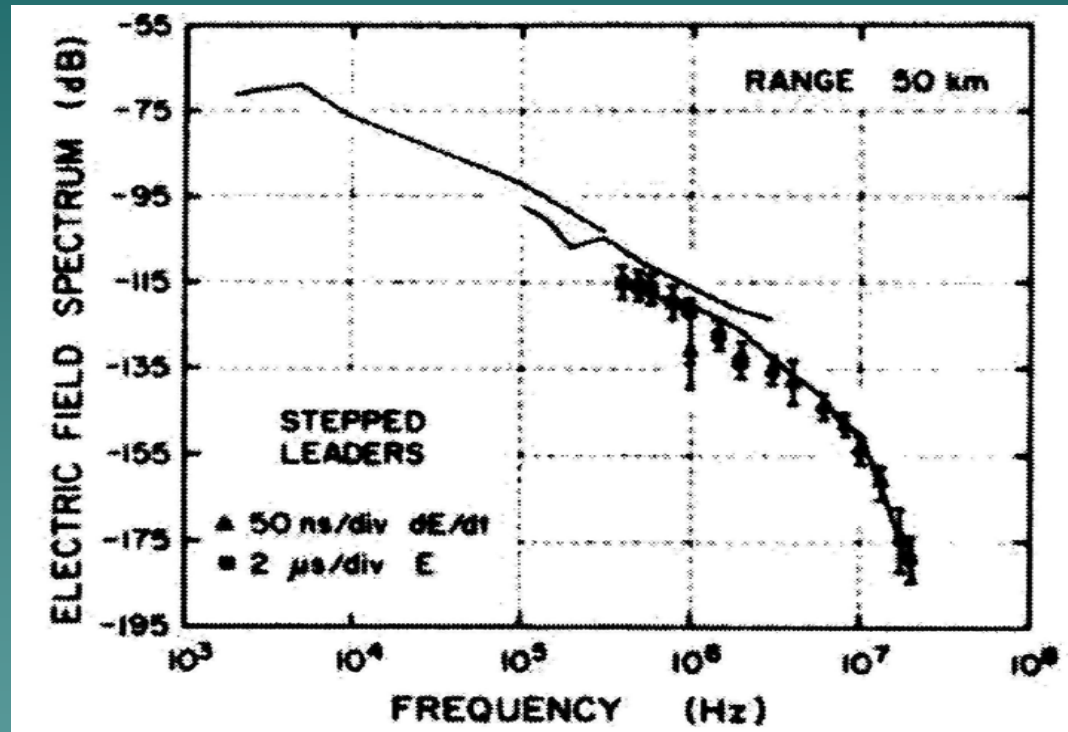
EJEMPLO FOTOGRAFICO TÍPICO DE UN RELÁMPAGO.



El rayo en la parte superior fue capturado durante la temporada de verano en el Akagi Test Center.

La foto de abajo muestra el rayo hacia arriba, en la temporada de invierno, Hokuriku (Japón).

ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE UN RAYO



Espectro de frecuencias del campo eléctrico medido a una distancia de la tormenta, de rayos obtenidos en 9 pasos entre 20 y 50 km normalizando a 50 km (Uman 1984)

ONDAS DE SEÑALES ATMOSFÉRICAS



Formas de ondas de señales atmosféricas a varias distancias, entre 50 y 15000 Km, desde un contacto de rayo con la Tierra (König y otros, 1981)

Cuando la distancia es corta la forma de la onda es un solo pulso. Aunque a distancias más grandes que 1000 km, la forma de la onda se aproxima a una forma oscilante con periodicidad definida.

El cambio de la forma de la onda se origina en la onda EM emitida por el rayo, el cual se propaga por reflexión entre la ionosfera y la superficie de la tierra, actuando como un conductor perfecto. Este fenómeno exhibe resonancia a frecuencias específicas.

El espacio entre la tierra y la ionosfera sirve como una enorme guía de ondas.

De las señales que se propagan desde descargas de rayos, los componentes de baja frecuencia tienen baja atenuación y pueden rodear a la tierra varias veces.

Las ondas permanentes se desarrollan de la excitación del resonador esférico, de la cavidad superficial entre la superficie de la Tierra y la capa de ligadura inferior de la ionosfera.

La frecuencia fundamental de esta resonancia es de cerca de 7,5 Hz, que se determina dividiendo la velocidad de propagación de la onda EM ($3 \cdot 10^5$ km/s) por el diámetro de la Tierra ($4 \cdot 10^4$ km).

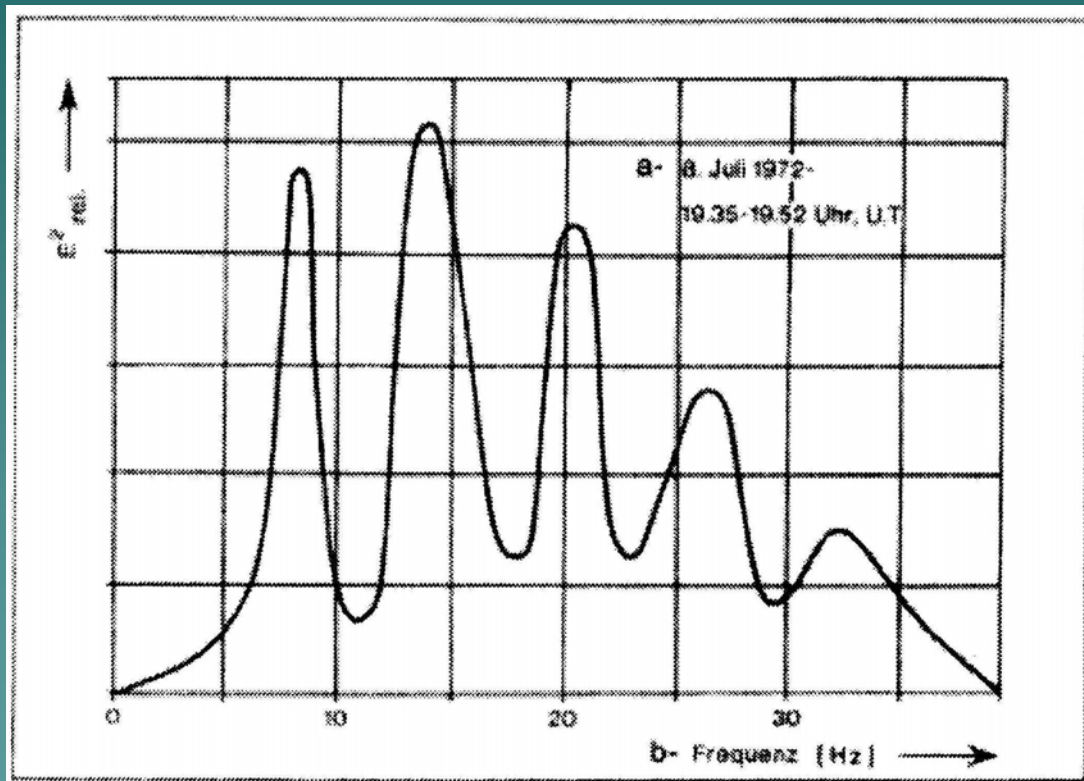
Más rigurosamente, como la conductividad eléctrica de la capa de ligadura de la ionosfera es finita y la estructura especial de la forma de la ionosfera, la frecuencia resonante fundamental es de unos 7,8 Hz.

La frecuencia armónica resonante puede ser obtenida de la siguiente ecuación:

$$f = 7,8 \cdot [n \cdot (n+1)]^{1/2} / 2 \text{ Hz} \quad n = 1, 2, 3$$

EL ESPECTRO DE POTENCIA DE CAMPO ELÉCTRICO

MEDIDOS EN SEÑALES NATURALES



- ◆ Resonancia Schumann, (König u otros, 1981)
- ◆ Espectro de potencia del campo eléctrico generado naturalmente
- ◆ En la figura se ve que hay una frecuencia resonante fundamental a unos 8 Hz y frecuencias armónicas resonantes de 14, 20 y 26 Hz.

En 1952, Schumann teorizó que el espacio entre la tierra y la ionosfera forma una cavidad, prediciendo que su frecuencia de resonancia es sobre 10 Hz (Schumann, 1952). Este fenómeno de resonancia de llama resonancia Schumann.

En 1954, König fue el primero en informar de la medida del fenómeno de resonancia (König y otros 1981).

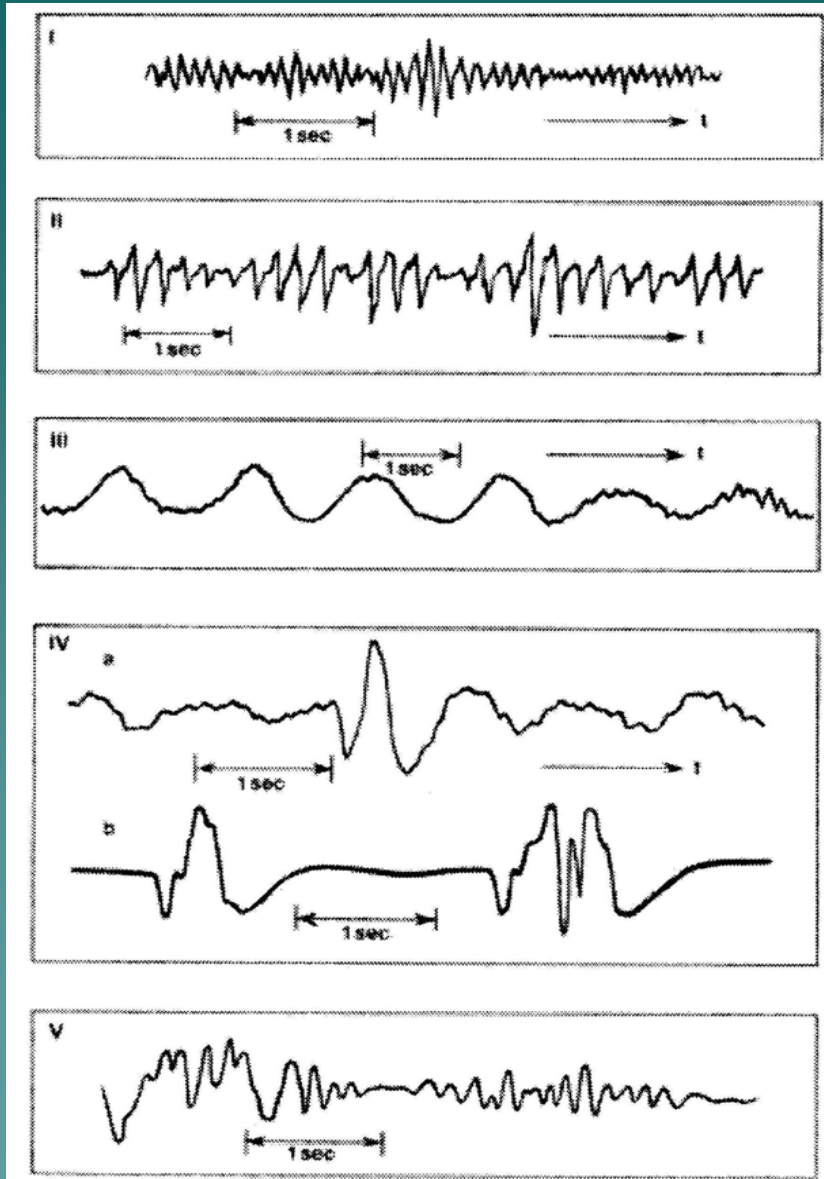
Cuando campos EM ELF son producidas, el campo eléctrico genera flujo de corriente eléctrica en la atmósfera.

Campo magnético de la misma frecuencia son producidos como resultados del flujo de corriente.

Cuanto más altas sean las frecuencias de las ondas EM mayor es el rango de atenuación y menor el de propagación.

Las fuerzas del campo eléctrico y campo magnético disminuyen rápidamente con frecuencia crecientes.

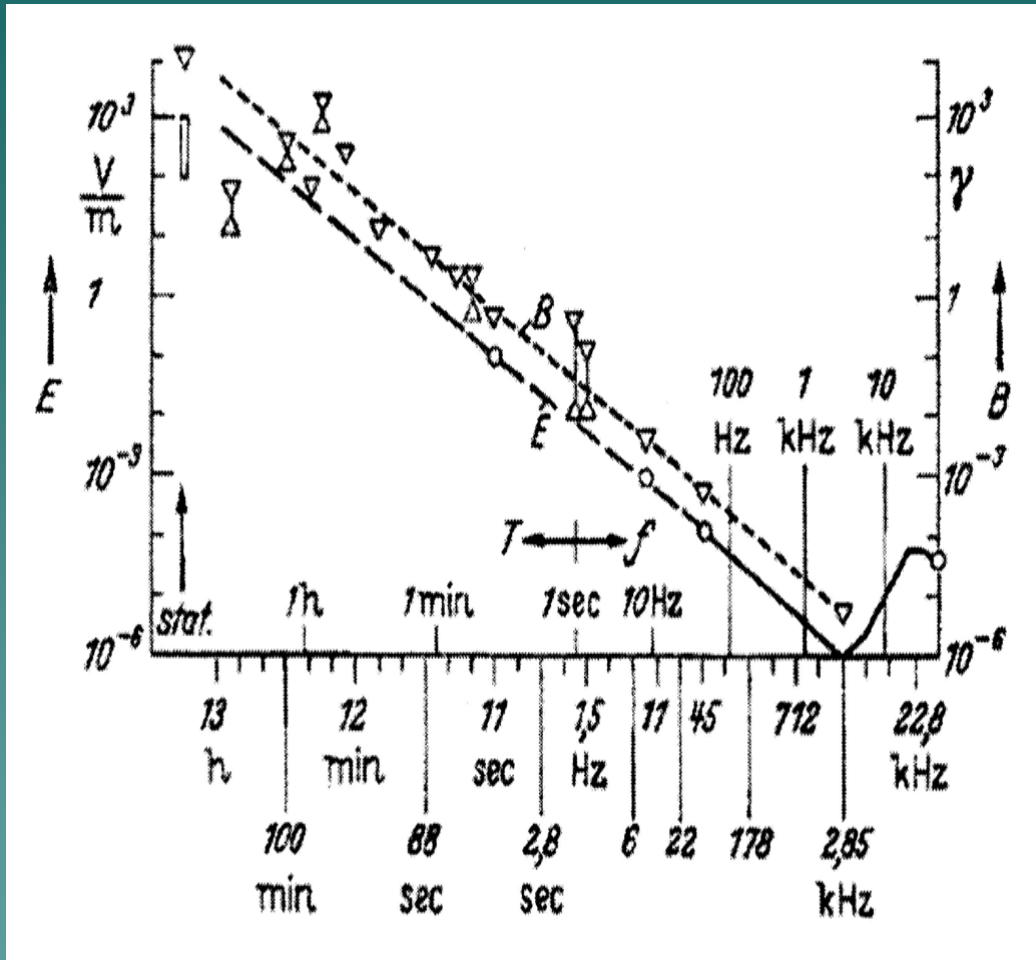
La fuerza de los campo eléctrico y campo magnético de frecuencia ultra baja sobre un ancho rango de frecuencia son de unos 10^{-3} - 10^{-5} V/m y 10^{-12} - 10^{-14} T, respectivamente



Un proceso EM de origen natural en las rangos ELF.

- (I) Resonancia Schumann cerca de 8 Hz.
- (II) Variación local de CE, 3-6 Hz.
- (III) Variación local de los CE de cerca de 0,7 Hz.
- (IV) Campo eléctrico durante tormentas de truenos.
- (V) Efecto de la salida del sol del campo eléctrico (Könog y otros, 1981).

En la naturaleza los campos EM ELF se dividen principalmente en las tres primeras variaciones.



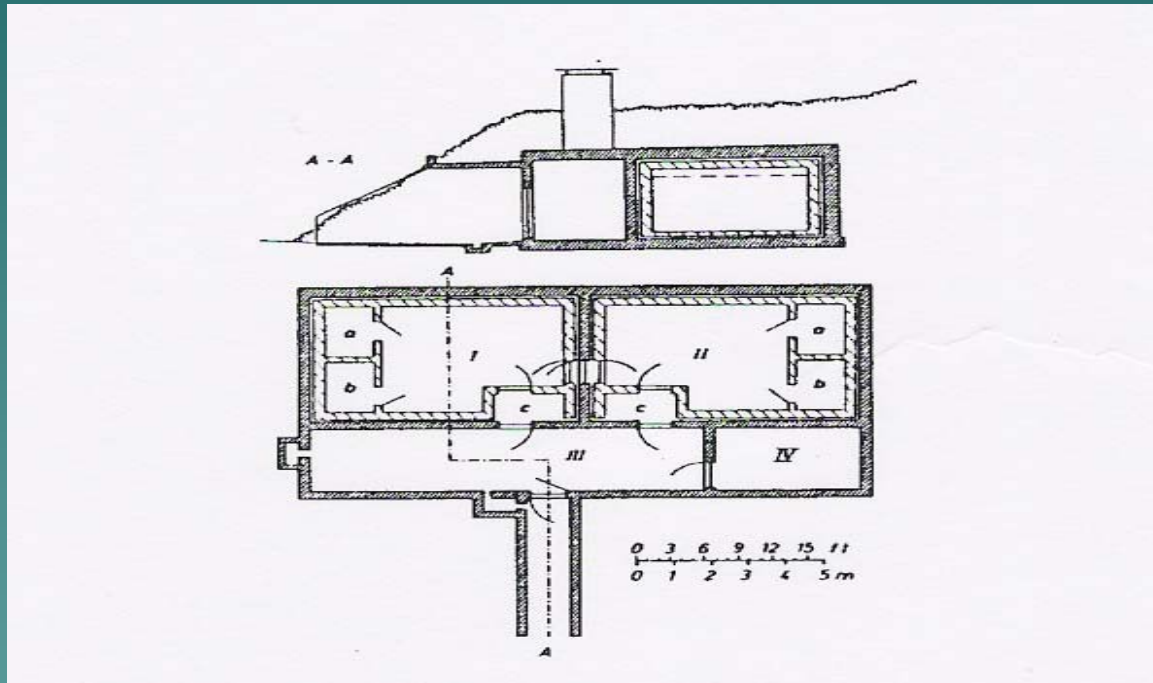
- ◆ Intensidad de campos eléctricos y magnéticos naturales en el rango de frecuencias de 0-50 Hz
 - Círculo: Campo eléctrico E en V/m
 - △ Triángulo: Campo magnético B en 10^{-9} T
- ◆ Como está descrito por Oehrl y König (1968), la intensidad del campo eléctrico, del campo magnético y el rango de frecuencia 0-50 kHz medidos en un punto son inversamente proporcionales en escala logarítmica. Esto muestra una relación entre campos y frecuencia.

1.3.2. Campos electromagnéticos ELF (frecuencia extremadamente baja) y sistemas biológicos.

1.3.2.1. Ritmos circadianos

- ◆ Los ritmos circadianos se definen como aquellos ritmos biológicos cuya frecuencia se aproxima al periodo de rotación de la Tierra.
- ◆ Los ritmos circadianos o biológicos son recurrencias de fenómenos biológicos en intervalos regulares de tiempo (ej: el ciclo sueño-vigilia que se repite como una constante en la vida)
- ◆ Varias periodicidades en procesos biológicos se acoplan, a cierto alcance, a ciclos geofísicos. Los animales tienen periodos de 23-25 horas y las plantas periodos de 23-28 horas. Las longitudes de periodos y fases de estos ritmos diarios internamente generados (endogénicos) de organismos biológicos son controlados fácilmente por factores externos del entorno, tales como el ciclo de 24 horas de día-noche producido por la rotación de la Tierra.
- ◆ Los organismos biológicos pueden ajustar sus ritmos basados en condiciones externas del entorno que se llaman factores de sincronización (un Zeitgeber). La luz visible es un Zeitgeber muy importante.

- ◆ La temperatura y la actividad del cuerpo humano tienen periodos de 24 horas y están sincronizados por factores externos del entorno.
- ◆ Si se quitan estos factores pasan a ser de 25.3 horas.
- ◆ En 1960 se investigaron los ritmos circadianos humanos aislando a sujetos de la información externa.



Sección transversal y plano del suelo de la habitación experimental aislada.

- I y II: unidades experimentales (a: cocina, b: baño, c: vestuario); III: habitación de control; IV: cámara experimental.

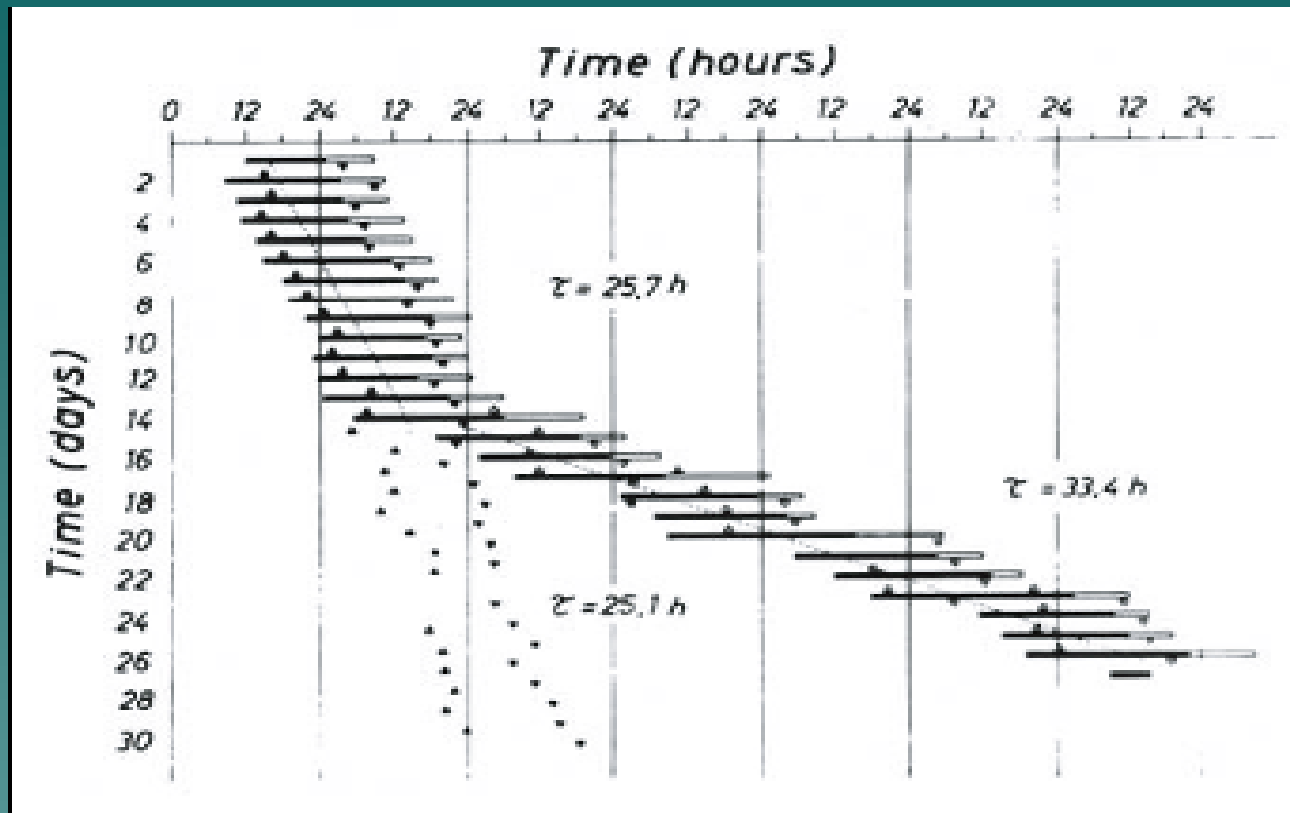
- ◆ Para investigar el efecto de los campos eléctricos naturales en el ritmo circadiano de la actividad humana, Wever (1968) dirigió un experimento centrándose en los efectos de campos eléctricos de 10Hz. Para proporcionar aislamiento de sonido, luz y otras fuentes externas se emplearon dos habitaciones subterráneas. Una de ellas estaba aislada ante los campos electromagnéticos mientras la otra no.

Se estudiaron los ritmos circadianos de la actividad y sueño, temperatura del cuerpo, orina y otros ritmos de los sujetos que vivían en ambas habitaciones.

Los resultados fueron los siguientes:

- Habitación aislada: Los sujetos que vivían en esta habitación presentaban un ritmo de actividad “roto” en dos ritmos con periodos de 25.3 y 33.4 horas, esto se llama desincronización interna. La complicación del período para sujetos en la habitación aislada era estadísticamente significativa.

En la siguiente figura se muestra un esquema.



Ejemplos de desviación por ciclos internos para ciclos de sueño-vigilia y ciclos de temperatura corporal

- Periodo de sueño-vigilia
- Periodo de sueño
- ▲ ▲ Ciclo de temperatura corporal

Durante los primeros 14 días, las variables medidas ocurren de forma sincronizadas unas con otras. Después de ese tiempo los dos ritmos ocurrían de forma separada, ocurriendo espontáneamente la desincronización interna.

-Habitación no aislada: en los sujetos que vivían en esta habitación no se observó el fenómeno anterior

A continuación se aplicó a la habitación aislada un campo eléctrico de baja frecuencia de 10Hz, $2.5V_{pp}/m$ (onda cuadrada), equivalente al del entorno natural (señal de resonancia Schumann) y se repitió el mismo experimento (Wever, 1968).

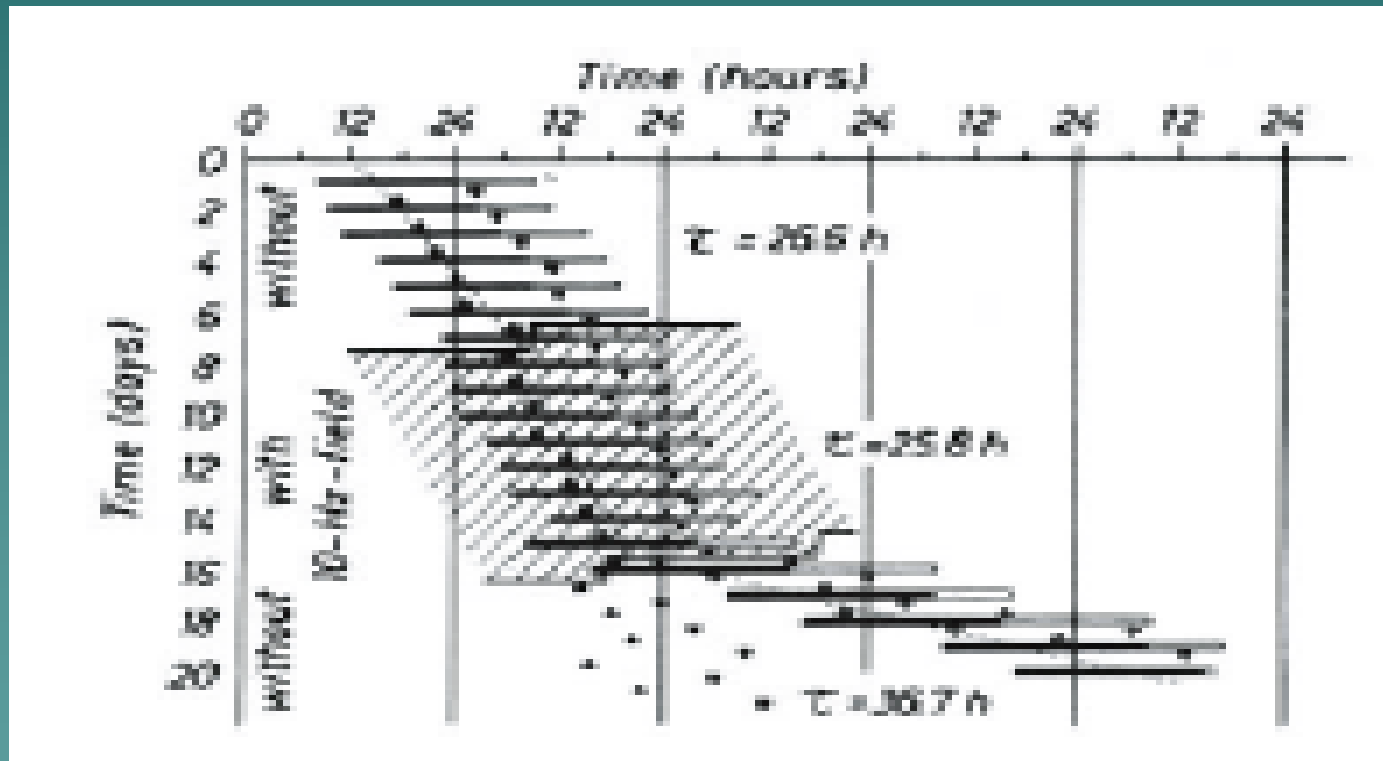
Observándose que:

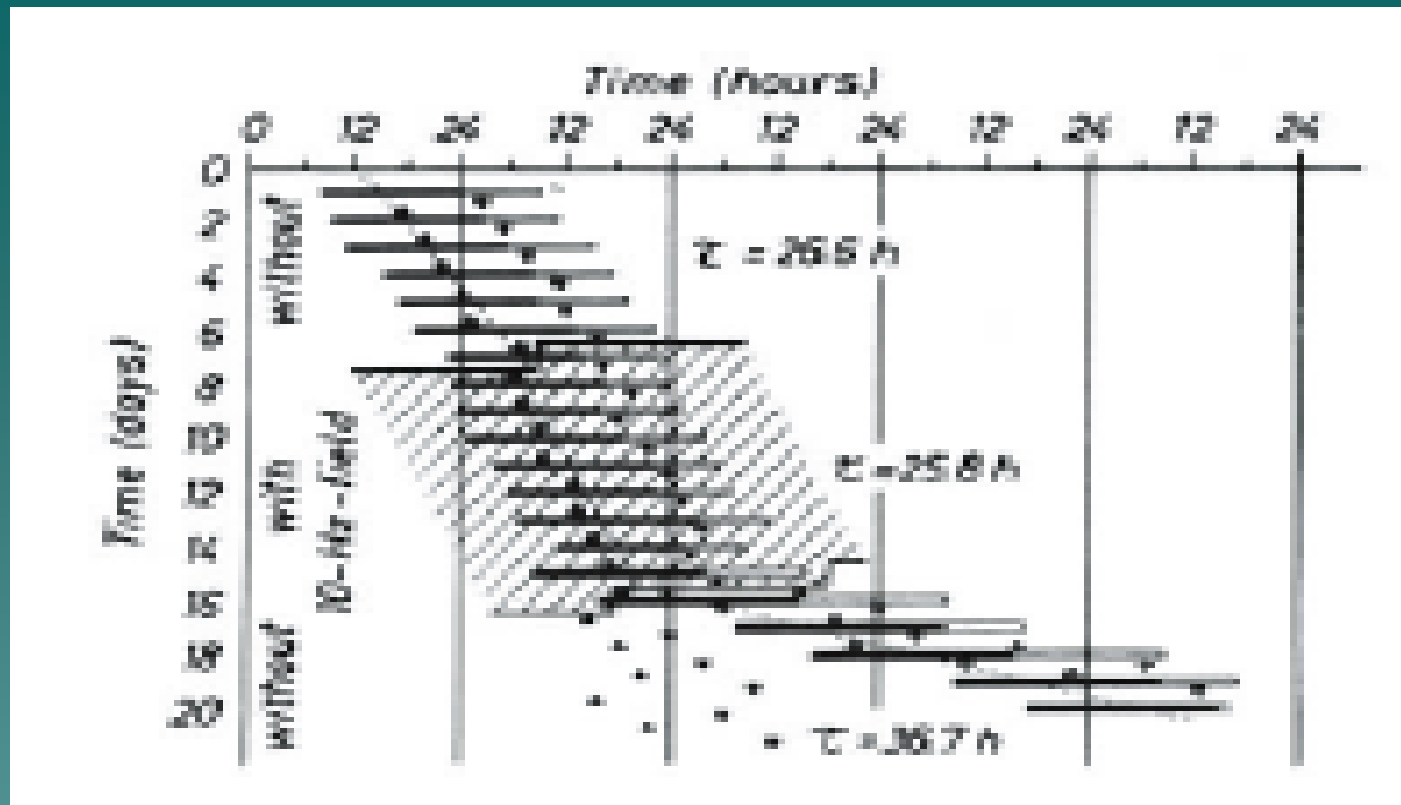
- El período del ritmo circadiano se acortó y volvió a su longitud original cuando el campo eléctrico se terminó.

Como ejemplo de esto tenemos siguiente figura:



En esta figura se muestra el cambio del ritmo circadiano de recorrido libre. El campo de 10Hz estaba apagado durante el primer y el tercer período. Cuando el campo se encendía, durante el segundo período, el periodo del ritmo de recorrido libre se hacía más corto. Durante el tercer período, con el campo apagado, el periodo del ritmo se ensanchaba y ocurría desincronización interna.





Efectos de la presencia o ausencia de campo eléctrico de 10Hz en cambios de ritmos circadianos de recorrido libre de sujetos experimentales (Wever 1968). Las áreas rayadas son el período de exposición al campo. El ritmo de actividad se muestra con barras (rellenas de negro: periodo activo, rellenas de blanco: periodo de descanso); la temperatura del cuerpo, ▲ representa máximo y ▼ mínimo; ▲ representa la repetición temporal del máximo y del mínimo. El periodo (τ) las distintas fases del experimento.

- ◆ Un total de 10 experimentos muestra que el periodo era más corto con el campo de 10Hz que sin él. Cuando se aplicaba campo eléctrico no se observaba desincronización interna. La aplicación del campo eléctrico de 10Hz reducía la longitud del período en 1.3 horas. Esto mostró que un campo eléctrico de 10Hz puede afectar a ritmos circadianos, incluyendo acortar el periodo y minimizar la desincronización interna.

- ◆ Aspectos que surgieron en respuesta a estos resultados incluyen:
 - Ausencia de una clara causa y efecto de la relación de periodicidad entre campos electromagnéticos y organismos.
 - Incertidumbre sobre los mecanismos.
 - Ausencia de medidas de campo eléctrico.
 - Explicación inadecuada del análisis de los datos.

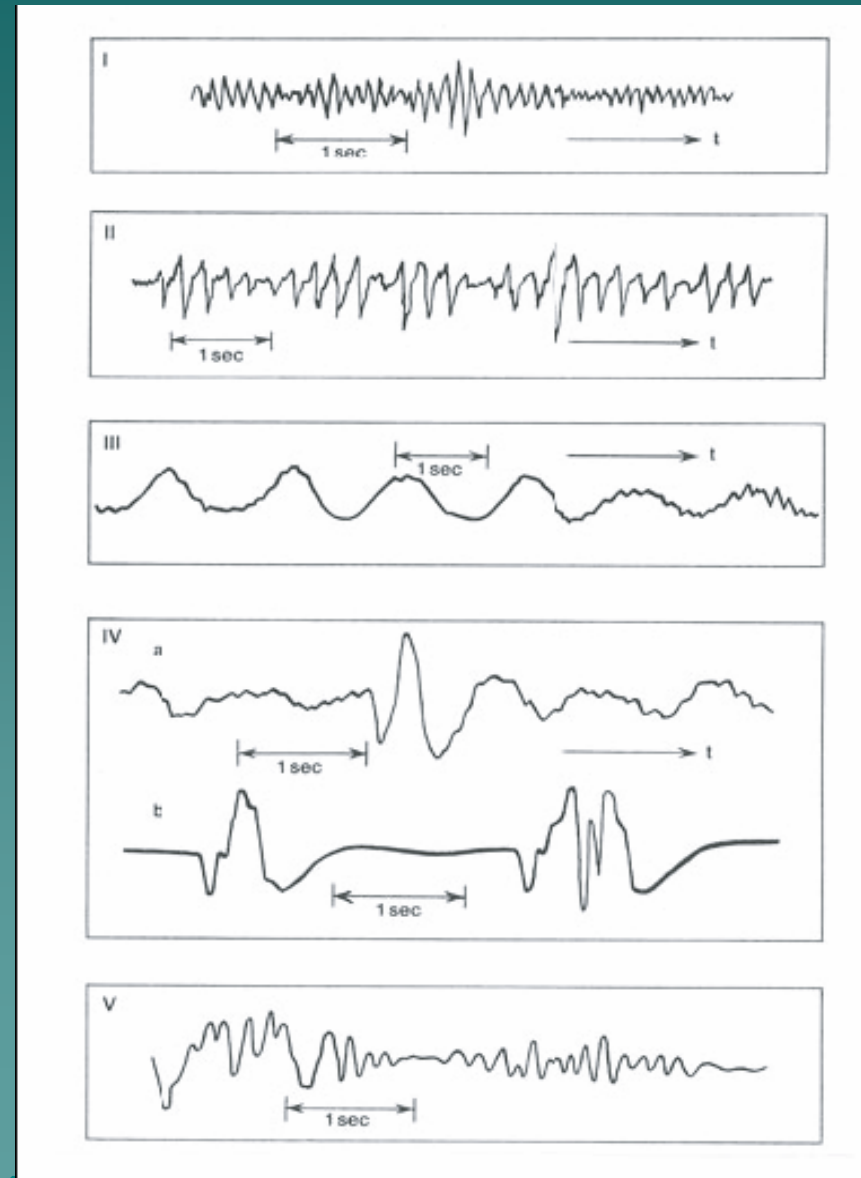
De todos modos, Wever (1974) concluyó que los campos electromagnéticos en el rango ELF influyen en los ritmos circadianos humanos. No se mostraron datos en contra.

1.3.2.2. Similitud entre los ritmos EEG y la resonancia Schumann

- ◆ Cuando adultos sanos cierran los ojos y los relajan, se pueden medir ondas cerebrales de 8-10Hz de frecuencia y de unos 5-100 μ V (ondas α). Estas ondas son el principal componente de las ondas cerebrales humanas, siendo las ondas β el otro componente (10-30Hz, 5-30 μ V). La actividad de las ondas δ declina durante la vigilia y aparecen ondas lentas de bajo voltaje, ondas θ (4-7Hz).
- ◆ Bajo condiciones similares, se observan espontáneamente ondas cerebrales en los mismos rangos de frecuencia para todos los vertebrados.
- ◆ Se ha descubierto que la forma de las ondas cerebrales es similar a la de las ondas de resonancia Schumann. Si se compara las ondas α y δ con la grabación obtenida del campo eléctrico en el rango ELF, hay mucha similitud entre las ondas α y las señales de tipo I y entre las ondas δ y las señales de tipo II (Köning y otros, 1981).

1.3.2.3. Influencia de procesos electromagnéticos naturales sobre humanos

- ◆ En esta figura se muestra la existencia de tres campos eléctricos ELF que ocurren naturalmente:
 - (1) variación de resonancia Schumann (tipo I) en 8Hz.
 - (2) variación local de unos 3-6Hz (tipo II)
 - (3) otras variaciones locales de unos 0.5-2Hz (tipo III)
- ◆ Dado que estas frecuencias están en la misma región que la de las ondas humanas cerebrales, se ha considerado la posibilidad de correlación entre estos fenómenos electromagnéticos ELF y la actividad humana



- ◆ Köning y otros llevaron a cabo un interesante experimento durante una exhibición de tráfico de automóviles en Munich en 1953.
- ◆ Utilizando a los visitantes como sujetos, se estudió la correlación entre el campo eléctrico ELF generado naturalmente y el tiempo de reacción a una señal de luz.
- ◆ Los resultados fueron que:
 - Cuando estaban presentes señales de tipo I (variación de resonancia Schumann en 8Hz), el tiempo de reacción se hacía más pequeño.
 - Cuando estaban presentes señales de tipo II (variación local de unos 3-6Hz), los tiempos de reacción se hacían más grandes
- ◆ Estos resultados fueron confirmados en experimentos (Köning, 1986) usando campos de 8-10Hz y 3Hz producidos artificialmente.
- ◆ Este fue el primer experimento que demostró algún tipo de relación entre las señales atmosféricas y la respuesta humana.

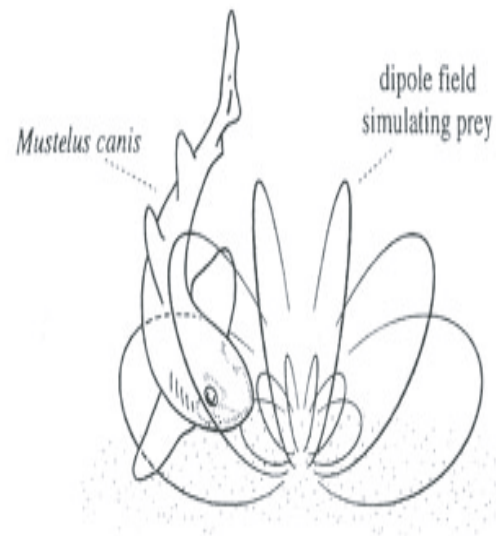
1.3.2.4. Campos geomagnéticos y sistemas biológicos

- ◆ La Tierra es un gran imán: su campo magnético es llamado campo geomagnético. La intensidad del campo geomagnético va desde cerca de $70\mu\text{T}$ en los polo norte y sur a unos $30\mu\text{T}$ en el ecuador.
- ◆ El campo geomagnético se describe por tres componentes
 - Intensidad magnética
 - Declinación
 - Inclinación
- ◆ Se han hecho hipótesis de que durante el curso de la evolución los organismos han usado el campo geomagnético como una pista para la orientación direccional y la migración.
- ◆ Se ha encontrado magnetita en palomas, pájaros migratorios, abejas de la miel y bacterias magnetostáticas. Esta podría ser usada como un sensor para el campo geomagnético de la Tierra.

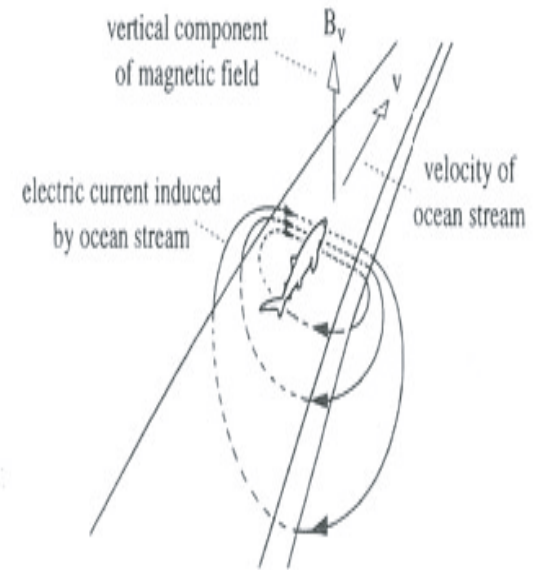
- ◆ Kalmijin (1974) mostró que los peces usan el campo geomagnético para mantener la orientación mientras nadan.
- ◆ Los tiburones y las rayas tienen las ampollas de Lorenzini, que están localizadas cerca de la parte delantera de sus cerebros y detectan campos eléctricos extremadamente débiles inducidos por el campo geomagnético, es decir, corrientes de la tierra (Matthes y otros, 2000).
- ◆ Hay varios mecanismos para detectar campos electromagnéticos como podemos ver en la siguiente figura en la que se muestran respuestas de comportamiento de organismos a campos electromagnéticos en el entorno acuático (Matthes y otros, 2000)

◆ (a) se muestra la situación cuando un tiburón se aproxima a la vecindad de un campo dipolar ($0.2-0.5\mu\text{V}/\text{m}$) usado para simular presa. A medida que el tiburón nada a través del campo geomagnético, de acuerdo con la Ley de Inducción de Faraday, se induce una fuerza electromotriz vertical. Este campo eléctrico inducido permite la selección de la dirección relativa a la dirección del campo geomagnético que se va a obtener. Se ha conjeturado que esto se usa para juzgar la dirección en la que el pez está nadando.

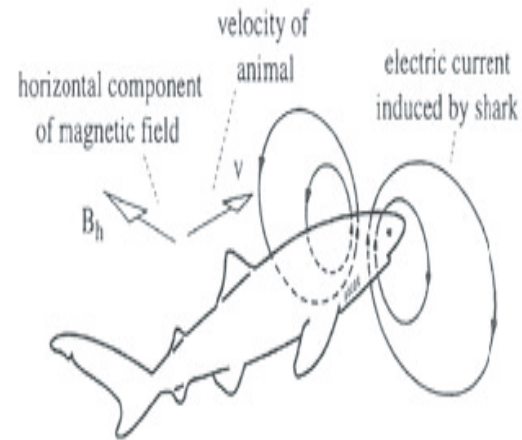
◆ (b) el producto vectorial del flujo de velocidad (v) de la corriente oceánica y la componente vertical del campo geomagnético (B_v) es equivalente al gradiente eléctrico creado: el flujo de corriente y su detección permite la percepción de la dirección del agua que fluye.



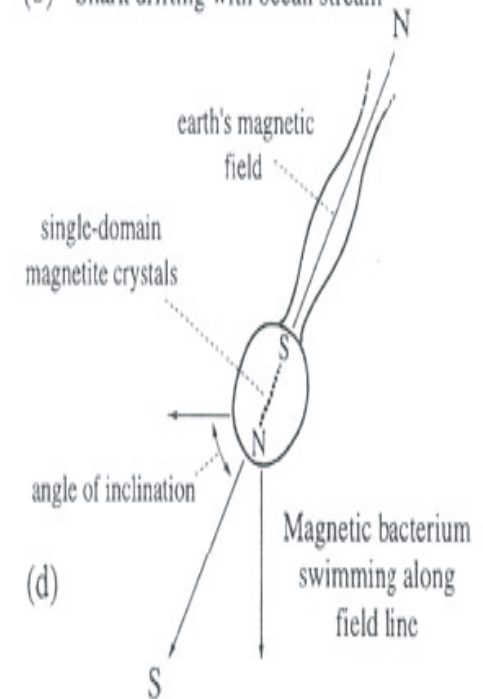
(a) Shark approaching prey hiding in sand



(b) Shark drifting with ocean stream



(c) Shark heading East



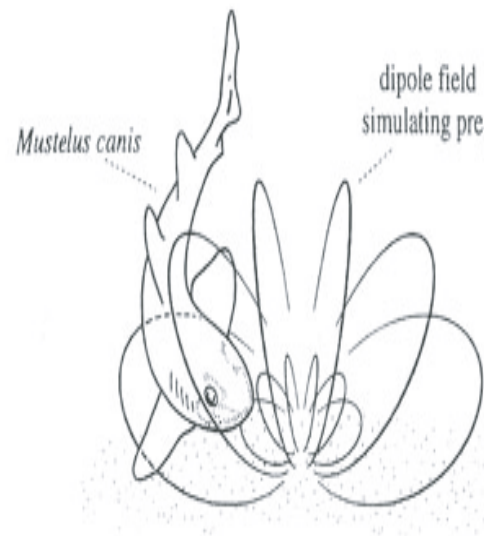
(d)

- ◆ (c) el tiburón está moviéndose a través del campo geomagnético: el campo eléctrico resultante del movimiento del tiburón a través del campo geomagnético le da un direccionamiento de brújula, esto es, electro-orientación activa.

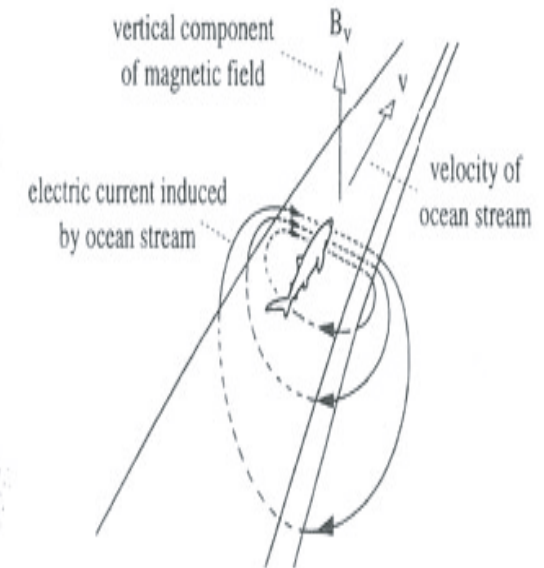
- ◆ (d) Blakemore (1975) descubrió que las bacterias cambian su dirección de nado en aguas lodosas en respuesta a campos magnéticos.

Dado que las bacterias magnéticas son anaeróbicas, el movimiento es hacia el fondo, donde las condiciones son más anaeróbicas, como dirigidas por el campo geomagnético de la Tierra.

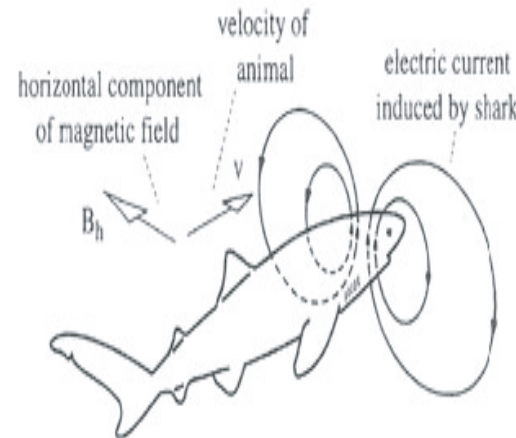
Más tarde, se encontraron en sedimentos marinos de agua dulce del hemisferio sur bacterias que se orientaban hacia el sur geomagnético.



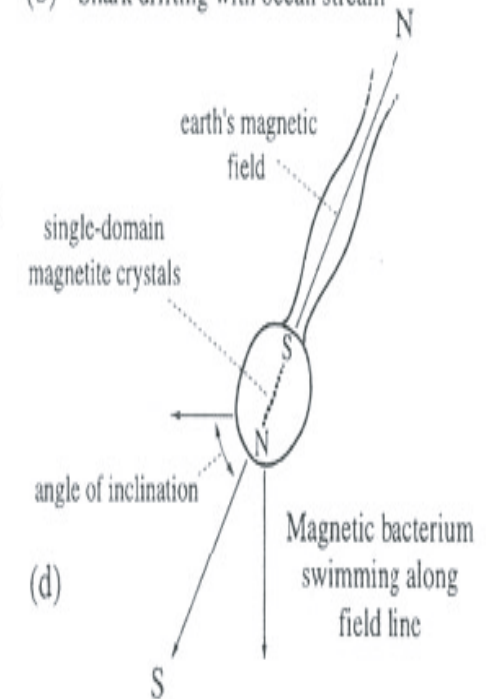
(a) Shark approaching prey hiding in sand



(b) Shark drifting with ocean stream



(c) Shark heading East



(d)

- ◆ Otro ejemplo de respuestas de comportamiento de organismos a campos electromagnéticos es el siguiente:
 - Cuando las abejas de la miel comunican la dirección y distancia a la comida a sus compañeras, cuando la fuente de comida está muy próxima (cerca de 50 metros), hacen un movimiento circular simple de todo su cuerpo. La dirección del movimiento de la abeja muestra el ángulo entre la localización de la comida y el sol, y este ángulo es transpuesto con respecto a la gravedad. Se dice que la velocidad de giro representa la distancia a la comida.
- ◆ Lindauer y Martin (1968) demostraron que el movimiento de las abejas estaba afectado por el campo geomagnético.
- ◆ Más tarde se demostró que había magnetita en el abdomen de las abejas y que estaba fuertemente magnetizada lateralmente y que usan esta magnetita como un sensor de campo geomagnético.

- ◆ Se ha investigado los efectos del campo geomagnético sobre la migración de pájaros (Wiltschko and Wiltschdo, 1995). Se colocaron transistores diminutos en palomas y estas fueron soltadas a 100-150km de su casa y seguidas en su regreso. Las palomas seleccionaron con precisión la dirección hacia su casa. Pero en áreas con campo geomagnético anormal, la selección se hace erróneamente.
- ◆ El número de palomas que no regresan aumenta en días nublados.
- ◆ En días soleados, las palomas pueden usar la brújula solar, pero se ha especulado que en días nublados las palomas vuelan mientras detectan geomagnetismo.
- ◆ La cantidad de material magnético en las cabezas de las palomas es de unos 10^{-5} a 10^{-6} emu. Se cree que las proteínas que contienen hierro son sintetizadas en sus cuerpos.
- ◆ Se ha comprobado experimentalmente que el campo geomagnético se usaba para migración y orientación (Wiltschko and Wiltschdo, 1995).

- ◆ El campo geomagnético tiene algunos efectos sobre el crecimiento de raíces y hojas de plantas (Phirke y otros, 1996). Se ha comprobado que la germinación y el crecimiento es más rápido cuando las semillas y esquejes de plantas están orientadas en la dirección geomagnética norte-sur.
- ◆ A PESAR DE QUE SE HABÍAN PUBLICADO MUCHOS INFORMES SOBRE EL EFECTO DE CAMPOS MAGNÉTICOS EN EL ENRIQUECIMIENTO DEL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS, FALTABAN RESULTADOS CONSISTENTES.

Es necesario en investigaciones futuras especificar las condiciones especiales del entorno para comprender el mecanismo de respuesta a campo magnético en plantas.

1.3.3. Campos electromagnéticos antropogénicos

- ◆ Los campos electromagnéticos naturales se originan de las propiedades de la tierra y del proceso atmosférico. Las fuentes se dividen entre las que son de origen natural y las artificiales, es decir, antropogénicas.
- ◆ Además de los campos eléctricos producidos naturalmente en nuestro entorno, el uso extensivo de equipamiento eléctrico operando a una frecuencia de potencia de 50 a 60Hz también produce campos eléctrico y magnético ELF. Estos campos eléctricos y magnéticos antropogénicos son ubicuos y más fuertes que los de origen natural.

1.3.3.1. Campos eléctricos de frecuencia de potencia en el entorno

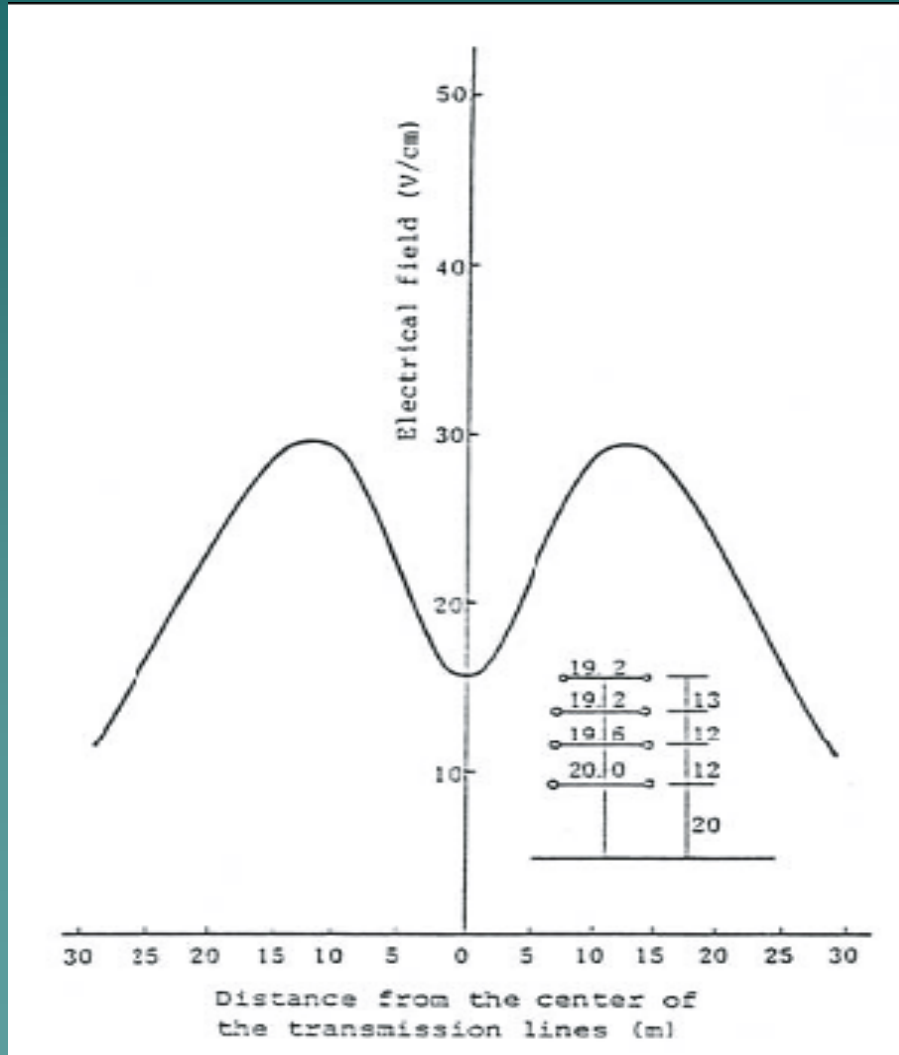
- ◆ Las fuentes artificiales de campos eléctricos y magnéticos ELF se dividen principalmente en dos tipos, DC y AC.
- ◆ Como herramienta de diagnóstico médico, la MRI usa campos magnéticos DC fuertes.
- ◆ Fuentes de campo electromagnéticos relativamente fuertes en el entorno en el que la gente vive y trabaja incluyen equipamiento eléctrico en casas, lugares de trabajo, lugares públicos, etc y líneas de transmisión y distribución.
- ◆ Fuentes de campo eléctrico en el entorno del hogar incluyen el cableado de la casa y los dispositivos eléctricos domésticos.
- ◆ Debido a que el voltaje usado por aparatos comunes es típicamente de cerca de 100 a 200V, el campo eléctrico no puede ser muy grande.

- ◆ Estos valores se midieron extremadamente cerca de las fuentes y la fuerza del campo decrece rápidamente con la distancia a la fuente.

Incandescent light bulb	2	Toaster	40
Electric range	4	Phonograph	40
Clock	15	Hand Mixer	50
Vacuum Cleaner	16	Iron	60
Coffee pot	30	Refrigerator	60
Color TV	30	Stereo	90
Hair Dryer	40	Broiler	130
Vaporizer	40	Electric Blanket	250

- ◆ Valores de campo eléctrico de frecuencias de potencia representativas de aparatos eléctricos comunes en el hogar.

- ◆ Para campos eléctricos de líneas de transmisión, que típicamente se miden cerca del nivel del suelo, la fuerza varía mucho con el voltaje de transmisión, la configuración del conductor, la distancia desde la transmisión y otros factores.



Esto da un perfil típico de la distribución de campo eléctrico a 1m sobre el suelo bajo una línea de transmisión de doble circuito vertical de 500KV en Japón. La altura del conductor es de 20m sobre el suelo. El conductor usado es 410mm²x4.

1.3.3.2. Campos magnéticos de frecuencia de potencia en el entorno

- ◆ Las fuentes principales de campos magnéticos de frecuencia de potencia incluyen aparatos eléctricos domésticos, herramientas de máquinas industriales, y líneas de transmisión.
- ◆ La fuerza del campo magnético varía diariamente con los cambios en el flujo de la corriente eléctrica asociados a la demanda variante de potencia eléctrica.
- ◆ Los campos magnéticos se diferencian de los campos eléctricos en que:
 - el apantallamiento por objetos (a no ser que sean dispositivos metálicos grandes) puede ser casi ignorado
 - cambios con las condiciones del suelo no ocurren
 - tienen componentes horizontal y vertical

- ◆ Esta tabla muestra ejemplos de resultados de medidas en EEUU (NRC 1997)

Table 1.2. Magnetic Fields from Transmission Line (NRC 1997)

Transmission Lines, kV	Maximum Magnetic Field on Right-of-Way, μT (mG)	Representative Magnetic Fields at Different Distances from Lines, μT (mG)			
		15.24m (50ft)	30.48m (100ft)	60.96m (200ft)	91.4m (300ft)
115	3.0(30)	0.7(7)	0.2(2)	0.04(0.4)	0.02(0.2)
230	5.8(58)	2.0(20)	0.7(7)	0.18(1.8)	0.08(0.8)
500	8.7(87)	2.9(29)	1.3(13)	0.32(3.2)	0.14(1.4)

Source EPA 1992

mG values = $10 \times \mu\text{T}$ values

- ◆ Se muestra el cambio de la fuerza del campo magnético con la distancia desde la línea de transmisión. La contribución de una línea de transmisión al campo magnético ambiente desaparece a distancias mayores que 100m desde la línea de transmisión.

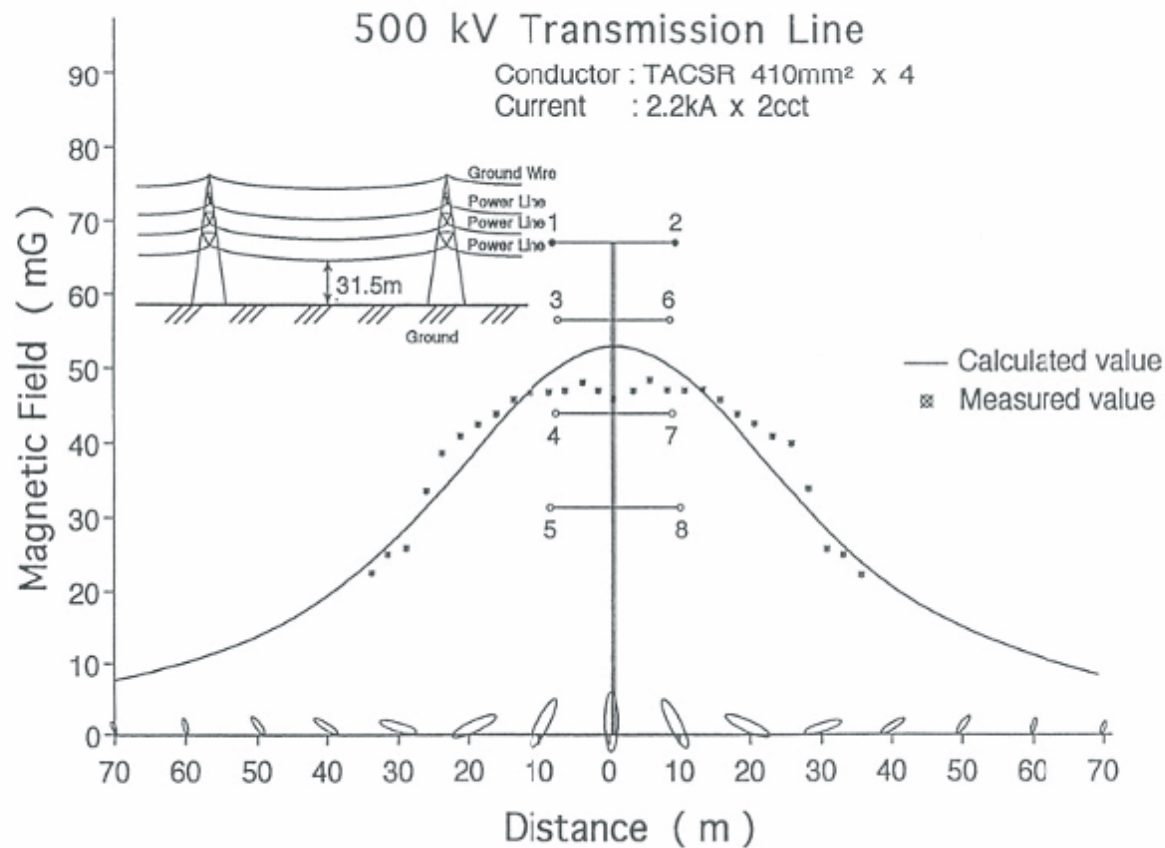
- ◆ En la siguiente tabla se muestra el nivel del campo magnético de varios equipamientos eléctricos.

Location and Appliance Type	Magnetic Field (μT) at 6 in (0.15 m)	Magnetic Field (μT) at 1 ft (0.3 m)
Bath room		
Hair dryers	0.1–70.0	Bkg ^a to 7
Electric shavers	0.4–60.0	Bkg to 10
Kitchen sources		
Blenders	3–10	0.5–2
Can openers	50–150	4–30
Coffee makers	0.4–1	Bkg to 0.1
Dishwashers	1–10	0.6–3
Food processors	2–13	0.5–2
Garbage disposals	6–10	0.8–2
Microwave ovens	10–30	0.1–20
Mixers	3.0–60	0.5–10
Electric ovens	0.4–2	0.1–0.5
Electric ranges	2.0–20	Bkg to 3
Refrigerators	Bkg to 4	Bkg to 2
Toasters	0.5–2	Bkg to 0.7
Laundry and utility-room sources		
Electric clothes dryers	0.2–1	Bkg to 0.3
Washing machines	0.4–10	0.1–3
Irons	0.6–2	0.1–0.3
Portable heaters	0.5–15	0.1–4
Vacuum cleaners	10–70	2.20
Office sources		
Air cleaners	11–25	2–5
Copy machines	0.4–20	0.2–4
Fax machines	0.4–0.9	Bkg to 0.2
Fluorescent lights	2–10	Bkg to 3
Electric pencil sharpeners	2–30	0.8–9
Video-display terminals	0.7–2	0.2–0.6
Workshop sources		
Battery chargers	0.3–5	0.2–0.4
Drills	10–20	2–4
Power saws	5–100	0.9–30

The magnetic field of the device producing the lowest level could not be distinguished from background (Bkg) levels.

SOURCE: EPA 1992

- ◆ En esta figura se muestra un ejemplo del perfil de los campos magnéticos bajo un circuito doble de una línea de transmisión.
- ◆ Se muestra la sección transversal de una línea de transmisión de 500kV en Japón



Ejemplo de perfil de campos magnéticos bajo una línea de transmisión de doble circuito. Campos magnéticos 1m sobre el nivel del suelo fueron calculados con la ley de Biot-Savart y medidos con Gaussómetro.

1.4. Resumen

- ◆ La investigación en bioelectromagnetismo empezó hace cerca de 200 años. En el siglo XX, los “conductores” han sido investigación básica en neurofisiología.
- ◆ Este capítulo proporciona un fondo inicial en tres áreas generales:
 - neurofisiología básica
 - los campos electromagnéticos naturales y artificiales encontrados en el entorno
 - los efectos biológicos de estos campos
- ◆ Porciones del capítulo describen brevemente la actividad biológica de organismos cuando está expuestos a campos electromagnéticos originados naturalmente en el rango ELF.

- ◆ Los sistemas biológicos, incluyendo seres humanos, están expuestos continuamente a campos electromagnéticos originados naturalmente. Un número modesto de experimentos con animales y personas indican que estos campos naturales pueden afectar a los humanos. Además, campos eléctrico y magnéticos ELF de la generación y distribución de potencia eléctrica existen comúnmente en casi todos los entornos humanos. Más incluso, el uso creciente de electricidad acompañando nuevas tecnologías, como los dispositivos de almacenamiento de energía de imán superconductor (SMES), sistemas de levitación magnética (MAGLEV), etc, han creado muchas fuentes nuevas de campos electromagnéticos.
- ◆ La posibilidad de que los efectos biológicos puedan ocurrir como resultado de la exposición a campos eléctricos y magnéticos ELF se ha convertido en una materia de creciente preocupación. En particular, la cuestión de si los campos electromagnéticos en el entorno humano, de fuentes tanto naturales como artificiales, puede causar efectos biológicos y sobre la salud adversos previamente no reconocidos continúa aumentando.