

Importancia de los aplicadores de campo magnético en los tratamientos electroterapéuticos en las personas mayores

A. Madroñero de la Cal

Consejo Superior de Investigaciones Científicas. CENIM (Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas). Madrid. España.

RESUMEN

A medida que ha ido progresando el conocimiento sobre los mecanismos de interacción entre los campos magnéticos exógenos y el cuerpo humano se han ido incrementando sus aplicaciones terapéuticas, al mismo tiempo que se iban produciendo más eficientes y más especializados equipos y sistemas para aplicarlos.

Los grandes avances que se consiguieron en traumatología y en rehabilitación dan paso a su empleo en el tratamiento de enfermedades degenerativas. Esta nueva indicación ha precisado modificaciones sustanciales en el diseño de los aplicadores con los que se genera el campo magnético en el que se sumerge al paciente durante cada sesión terapéutica.

En el presente trabajo se revisan los conocimientos sobre la interacción campos magnéticos-organismos y los parámetros que regulan la interacción y sus efectos.

Se describen los dos rangos de intensidad de los campos terapéuticos: *a*) campos del orden de militeslas (10^{-3} T), que tienen efectos sobre ciertos procesos metabólicos, regidos por las leyes de la fisicoquímica clásica, y *b*) campos extremadamente tenues, del orden de picoteslas (10^{-12} T), que actúan sobre ciertos procesos neuronales y que se rigen por las leyes de la física cuántica. Los primeros se utilizan en la corrección de fallos en la reparación ósea, mientras que los segundos están mostrando su eficiencia en el tratamiento de algunas enfermedades degenerativas, como la esclerosis múltiple o las enfermedades de Parkinson y de Alzheimer. Dado lo tenue de los campos con los que hay que actuar sobre el cerebro, resulta muy prometedora la posibilidad de aplicarlos en la modalidad de campos cruzados, por ser éste el modo de conseguir la máxima eficiencia.

Palabras clave

Magnetoterapia. Interacción campos magnéticos-organismos. Reparación ósea. Enfermedades degenerativas en ancianos. Campos cruzados.

Importance of the magnetic field devices in electromagnetic therapy in the elderly

ABSTRACT

As knowledge of the mechanisms of interaction between exogenous magnetic fields and the human body has grown, the therapeutic applications of these fields have increased. At the same time, these therapeutic options have become more efficient and specialised apparatus and systems have been developed for their application.

The advances achieved in traumatology and rehabilitation have resulted in the use of magnetic fields in degenerative diseases. This new indication has required considerable modifications to the design of the devices used to generate the magnetic field in which the patient is submerged in each therapeutic session.

The present study reviews knowledge of the interaction between magnetic fields and organisms and the parameters that regulate this interaction and its effects.

The two ranges of intensity of therapeutic fields are described: *a*) fields in the order of milliteslas (10^{-3} T), which have effects on certain metabolic processes and are governed by the laws of classical physics and chemistry, and *b*) extremely tenuous fields, of the order of picoteslas (10^{-12} T), which act on certain neuronal processes and which are governed by the laws of quantum physics. The former have been used in the treatment of delayed bone healing while the latter are demonstrating their effectiveness in the treatment of some degenerative diseases such as multiple sclerosis, Parkinson's disease, and Alzheimer's disease. Given the tenuousness of the fields applied to the brain, the possibility of applying them in a crossed field modality is highly promising since this mode achieves maximum efficiency.

Key words

Electromagnetic therapy. Interaction magnetic fields-organisms. Bone healing. Degenerative diseases in the elderly. Crossed fields.

Correspondencia: Dr. A. Madroñero de la Cal.
Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
CENIM (Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas).
Avda. Gregorio del Amo, 8. 28040 Madrid. España.
Correo electrónico: inmac09@cenim.csic.es

Recibido el 18-07-03; aceptado el 20-10-03.

INTRODUCCIÓN

La aplicación clínica de las técnicas físicas sigue siempre un camino evolutivo similar, consistente en ir enriqueciendo la ingeniería sanitaria con las aportaciones que en cada campo de aplicación sugiere la optimización de la técnica. Se produce así una incesante transfe-

rencia de fundamentos y equipamientos de unas especialidades a otras.

Un ejemplo muy conocido es el de las ondas de choque, en el que el modo operatorio desarrollado para la litotricia fue trasvasado luego al tratamiento de problemas de reparación ósea, y después a la rehabilitación de ligamentos.

Algo parecido puede decirse de la utilización terapéutica de los campos magnéticos. Su avance tuvo lugar casi independientemente del estudio del campo magnético en la biología y progresó sobre todo por la experimentación clínica, apoyada en algunas ramas de la física como la magnetoquímica y la teoría de la resonancia paramagnética electrónica.

Esto parece proporcionar las claves para transferir la filosofía de optimización de los tratamientos con campos magnéticos terapéuticos a ámbitos en los que su uso es incipiente. El desarrollo de esta posibilidad es el objeto del presente trabajo.

Desde el nacimiento, el biomagnetismo clínico tuvo, en los países de nuestro entorno, dos vías de desarrollo: como técnica coadyuvante para rehabilitación-fisioterapia y como tratamiento en traumatología. Por el contrario, en los países del área de influencia de la extinta Unión Soviética, el desarrollo estuvo primordialmente conducido sobre la base de la magnetoterapia, o aplicación al tejido blando (edemas, úlceras, etc.) y a la aplicación sinérgica con otras técnicas electroterapéuticas, hablandose de magnetoláser, magnetoacupuntura, etc.

En relación con la aplicación convencional en fisioterapia, disponemos en nuestras clínicas de las habituales camillas provistas de un aplicador muy simple, en forma de gran anillo desplazable. En realidad no es sino un solenoide generador de campo magnético, alimentado por un generador. En su interior se coloca al paciente durante la administración del tratamiento. Con estos sistemas se ayuda en el tratamiento de problemas álgicos y edematosos.

Por el contrario, para tratamientos traumatológicos, cuando se presentan complicaciones postoperatorias o retardos en la consolidación de las fracturas, se facilita al paciente un pequeño equipo para la administración de tratamientos domiciliarios. Estos tratamientos, en general aplicados durante el sueño, reactivan el proceso anormalmente detenido o enlentecido de biosoldadura entre los fragmentos de la fractura, evitando intervenciones complejas y con mayores riesgos de complicaciones o fracaso (como el uso de injertos o el empleo de materiales no biológicos de osteosíntesis).

Estas posibilidades terapéuticas, ampliamente conocidas, no suponen más que una mínima parte del aprovechamiento teórico de las posibilidades clínicas del bio-

magnetismo, y en este trabajo se intentarán mostrar las posibilidades de la utilización de los campos magnéticos para el tratamiento de algunos problemas degenerativos que aquejan con frecuencia a los pacientes de edad avanzada, tanto como herramienta *per se* como intensificador del efecto de los fármacos con los que se suele tratar de paliar estos procesos malignos.

IMPORTANCIA DEL TIPO DE CAMPO QUE SE GENERA EN LOS APLICADORES

Cualquier equipo destinado a aplicar sesiones terapéuticas con campos magnéticos debe estar constituido por un generador de impulsos de corriente que alimenta a un conjunto de devanados, que van alojados en un aplicador. En el interior de este aplicador se situará la zona anatómica en tratamiento. Así pues, este aplicador no es sino un transductor corriente eléctrica → campo magnético, gracias al cual podemos aplicar el campo a la zona anatómica en tratamiento.

Según la ley de Ampere, como el campo es proporcional a la corriente, con la corriente que genera el equipo impondremos frecuencia e intensidad del campo terapéutico, pero la estructura del campo, uniforme en todo el espacio, intenso en el centro y débil en la periferia, etc., depende precisamente de la arquitectura del aplicador. Y esta geometría del campo es esencial desde el punto de vista de sus aplicaciones terapéuticas.

Quizá, la forma más simple de exponer la filosofía del diseño de los aplicadores sea el conocimiento de cómo funcionan los imanes permanentes cuando son aplicados sobre puntos de acupuntura (magnetoacupuntura). Está perfectamente entendido que los imanes más terapéuticos no son los que aportan los campos más intensos, y que su poder radica en la geometría del campo que con ellos se produce. Esto ha permitido perfeccionar su utilización, sobre todo en los tratamientos contra el dolor.

McLean et al¹ explican que, mejor que usar imanes más potentes, resulta preferible utilizar un conjunto de cinco pequeños imanes dispuestos en cuadro y con el quinto en el centro, como los puntos de la cara del cinco de cualquier dado de juego.

La explicación se expone en la figura 1, en la que se representa gráficamente (fig 1a) el campo que genera el imán compuesto por el agrupamiento de cinco pequeños imanes; es decir, la variación de la intensidad de dicho campo en el entorno del centro del agrupamiento. Si los 5 imanes presentan todos cara norte o cara sur, el conjunto será un campo norte o un campo sur, más extendido que si trabajásemos sólo con un pequeño imán.

Pero si el pequeño imán del centro es de polaridad opuesta al de los pequeños imanes de la periferia, el

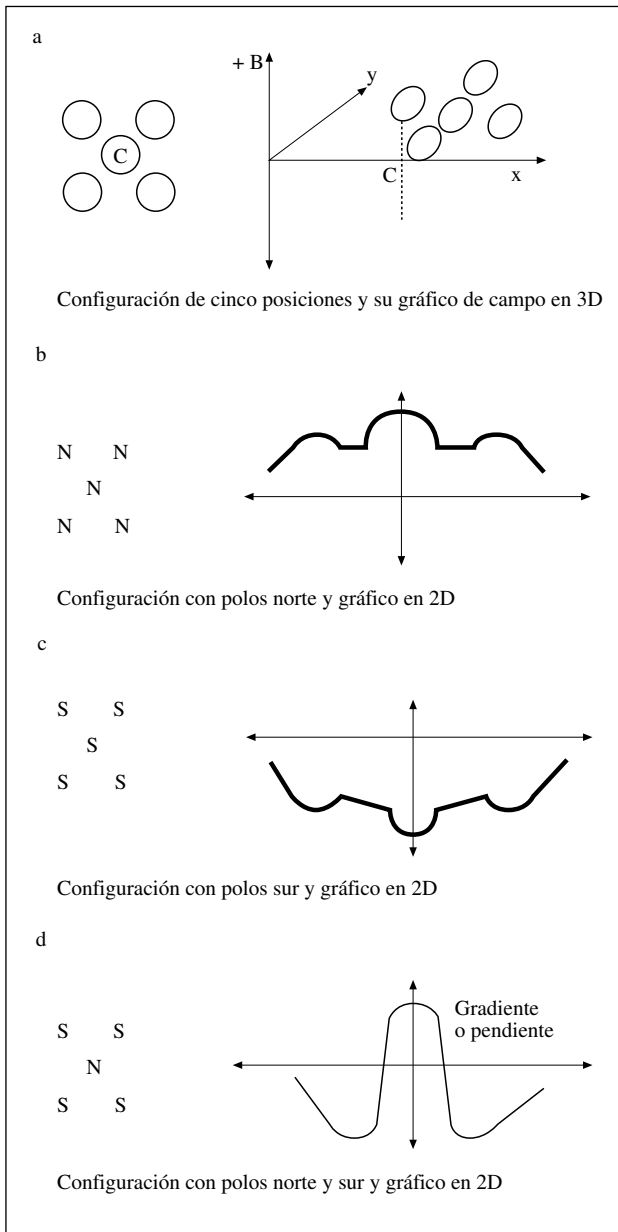


Figura 1. Descripción del gradiente del campo magnético a tenor de la colocación de los 5 imanes con los que se trata un punto de acupuntura.

campo resultante es de alto gradiente o pendiente (fig. 1d). En física se designa como gradiente de una magnitud (temperatura, densidad, intensidad de un campo, como en este caso) a su derivada con respecto a la distancia, es decir, a su variación a medida que nos vamos alejando del centro del sistema de coordenadas que nos sirve de referencia. En el lenguaje común lo llamaríamos pendiente de la curva que representa la intensidad del campo. Pues bien, resulta ser el valor de esta pendiente o gradiente el que puede determinar la capacidad terapéutica del campo en tratamientos en los que se busca una capacidad analgésica.

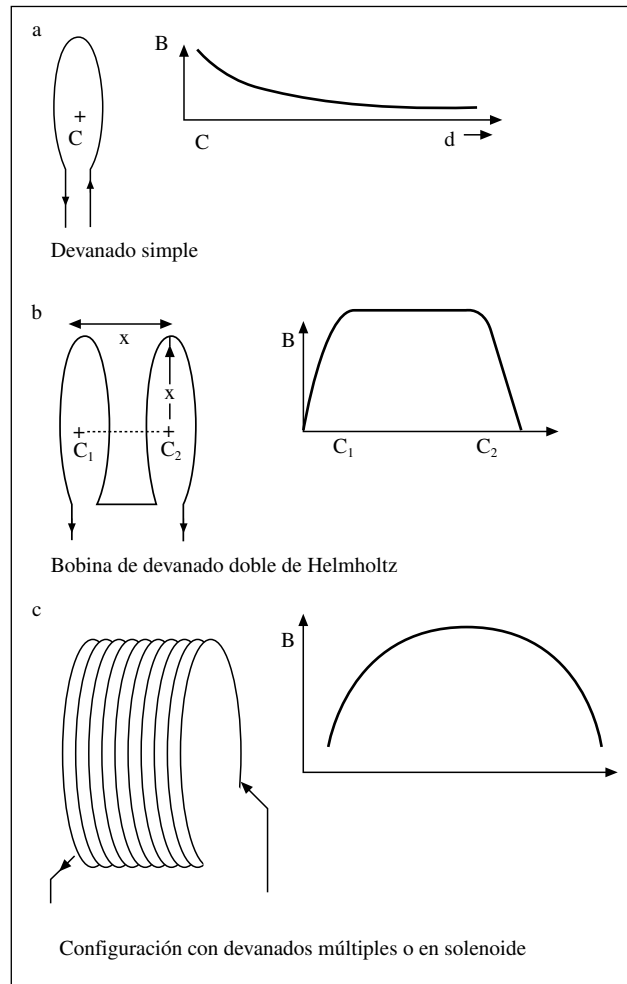


Figura 2. Posibles configuraciones de los aplicadores en uno, dos o múltiples devanados.

Aunque en algunos textos de biomagnetismo el gradiente suele estar designado como «inhomogeneidad espacial del campo», aquí mantendremos el término físico de «gradiente».

Si en vez de trabajar con imanes permanentes tuviéramos que funcionar con bobinas alimentadas por corriente eléctrica, las posibilidades equivalentes serían las indicadas en la figura 2. Allí se describen las tres estructuras básicas para la construcción y fabricación de aplicadores con un solo devanado, con doble devanado y con devanado múltiple.

Merece la pena resaltar la importancia de este tema. El devanado simple (fig. 2a) equivale a una sola espira que produce un campo al ser recorrida por una corriente, de acuerdo con la ley de Biot y Savart. Si midiéramos el campo a lo largo de la perpendicular al plano de la espira que la atraviesa justamente por su centro, encontraríamos una curva decreciente, que nos indica que, a medi-

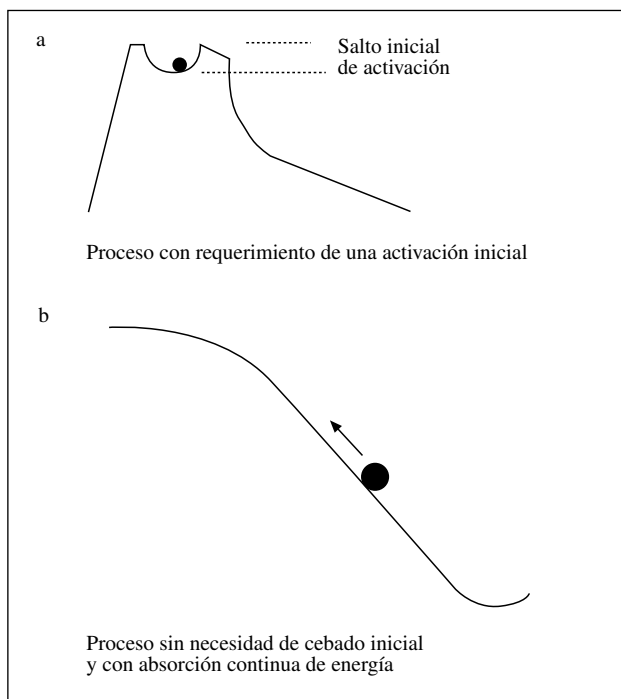


Figura 3. El concepto del requerimiento energético en procesos de cebado inicial con aceleración espontánea y en procesos de absorción continua de energía.

da que nos alejemos del centro de la espira, el campo será más débil.

Desde el punto de vista de la utilización, podemos decir que los equipos para dar tratamientos de TMS (*Transcranial Magnetic Stimulation*) usan como aplicador una bobina de este tipo. De acuerdo con lo comentado en la figura 1, estamos ante un aplicador diseñado para producir un campo con un gradiente muy alto. Estos aplicadores son muy apropiados para los casos en los que vamos buscando un pulso o *tigging*.

El extremo opuesto está representado por la configuración conocida como «bobina del Helmholtz» (fig. 2b), que está constituida por dos devanados idénticos enfrentados perfectamente a una distancia igual a su radio.

Con esta configuración específica, en el espacio comprendido entre las dos bobinas se genera un campo lo más parecido posible a un campo perfectamente uniforme. No hay ninguna otra arquitectura que pueda dar un campo magnético con mayor uniformidad.

Como es evidente que la uniformidad es el opuesto del gradiente, los aplicadores con esta configuración son idóneos para incrementar en una zona anatómica amplia la actividad metabólica, pues actúa como un estimulador de procesos químicos por vía metabólica. Es decir, son los aplicadores ideales para imponer un proceso regenerativo.

En el punto intermedio están los solenoides (fig. 2c), que constituyen el anillo desplazable tan habitual en los equipos de magnetoterapia convencional que tanto abundan en los gabinetes de electroterapia y que mencionábamos al principio de este trabajo.

Resulta curioso que este aspecto esencial de la homogeneidad del campo en el seno del aplicador no sea referido normalmente en los informes sobre resultados de la terapéutica con campos magnéticos, lo que equivale a decir que no suele estar incluida en el protocolo de los ensayos. Y eso a pesar de que es el campo generado de este aplicador el que detenta la totalidad de la capacidad terapéutica de la técnica.

Realmente, con la sola información de la frecuencia, la intensidad del campo y la duración y el número de sesiones no es posible comparar los resultados de la aplicación de uno u otro equipo publicados por los distintos equipos de investigación. Y esto es de total importancia cuando se plantea la utilización de los campos magnéticos para tratamiento de enfermedades degenerativas.

Por parte del usuario, lo importante es tener en cuenta que un aplicador que genera un campo de gradiente alto es adecuado para aplicar el tratamiento en procesos que requieren una activación inicial (fig 3a) y, una vez activados, se automantienen. Por el contrario, un aplicador que genera un campo uniforme está indicado para tratamientos en los que haya que inducir o mantener incesantemente un proceso de regeneración (fig. 3b).

INFLUENCIA DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE LA BIOQUÍMICA DEL CEREBRO, SEGÚN LA EXPERIMENTACIÓN EN MODELOS ANIMALES

Resulta curioso que la investigación en modelos animales haya sido posterior a la mayoría de los estudios realizados en la clínica, y no al revés.

Existe un buen número de publicaciones acerca de los cambios que la aplicación de campos magnéticos exógenos produce en el cerebro de cobayas en ensayos perfectamente controlados. Vamos a intentar aquí dar una leve reseña de los resultados, aunque no podemos pretender que sea exclusiva, pues una parte muy significativa de estos trabajos aparecen publicados en revistas científicas del área de la antigua Unión Soviética, por lo que su difusión fue mucho más reducida de lo que su calidad e interés merecían.

Básicamente, el campo magnético continuo tiene el efecto de suprimir los procesos de aminación en el cerebro, pero no interfiere con la síntesis de neurotransmisores como la noradrenalina. Los cambios detectados en la función de la enzima monoaminoxidasa eran transitorios y reversibles².

Esto induciría a suponer que el campo magnético natural terrestre tendría poca influencia. Sin embargo, los trabajos de Martynyuk y Martynyuk³ mostraron la influencia que sobre el metabolismo del cerebro de muchos animales tiene un campo magnético de 8 Hz, que es precisamente la frecuencia del a veces llamado campo ecológico, es decir, la frecuencia de la componente oscilante del campo natural terrestre. Además de esto, quedó de manifiesto que el hemisferio derecho del cerebro está controlado por los campos de frecuencia extremadamente baja.

En especial, el efecto del campo magnético terrestre sobre la glándula pineal fue descrito por Semm⁴ a partir de sus resultados con hámsters y palomas. Aproximadamente el 20% de las células de la glándula pineal notaban la variación en intensidad y orientación del campo magnético terrestre. La actividad de la glándula pineal se valoraba midiendo la actividad secretora de la glándula y la actividad de la N-acetiltransferasa sobre la serotonina.

Si durante la noche se procedía a una inversión de la componente horizontal del campo magnético terrestre, se daba lugar a un decrecimiento de ambos parámetros. Se puede deducir que, muy probablemente, el sistema nervioso central es el responsable de la detección/transmisión de la información magnética ambiental.

De acuerdo con los resultados de Narayan et al⁵, parece que es muy importante el ángulo de orientación del cerebro con el campo magnético cuando éste son pulsos de muy baja frecuencia. Se realizaron experimentos sobre los efectos de campos magnéticos pulsados de frecuencia extremadamente baja (0,01-10 Hz) y con muy baja densidad de flujo de 5 a 50 nanoteslas (recordemos que el campo natural terrestre es de unos 400 microteslas), sometiendo a estas condiciones a ratas albinas y a individuos humanos. Examinaron el efecto de la orientación del eje de simetría del cerebro con respecto a la dirección del campo pulsante y del campo natural terrestre sobre los procesos electrofisiológicos, neuroquímicos y bioquímicos. El efecto de los campos pareció ser especialmente intenso cuando el cerebro estaba orientado hacia el norte o hacia el este.

En cuanto a la influencia de la intensidad del campo, hay conclusiones diferentes. Los campos intensos fueron estudiados por Nosova et al⁶, con experimentos consistentes en someter a unas ratas a un campo constante de 0,3 teslas de intensidad durante 3 h. El efecto resultó ser un incremento en el contenido en ácido láctico y un ligero decrecimiento del ATP en ambos hemisferios. Otros 6 compuestos sometidos a vigilancia no mostraron variación con respecto a los controles. La lactosa y el ATP llegaron a alcanzar los límites máximo y mínimo, respectivamente, del intervalo permitido para estos metabolitos. Esto indica que el metabolismo cerebral de las ratas resultó incrementado por el campo.

Los campos magnéticos débiles fueron estudiados por Kabuto et al⁷, que pusieron de manifiesto que el efecto

de los campos varía de unas zonas a otras dentro del cerebro. Comprobaron en ensayos con ratas que aparecía una sinergia entre la aplicación de campos magnéticos y el estado de reposo obligado como factores de estrés. Manteniendo a unos animales como control, las cobayas fueron mantenidas durante 4 h en unas jaulas de acero inoxidable que impedían toda movilidad mientras eran sometidas a un campo magnético de 1 mT y 60 Hz. Al término de cada tratamiento, se determinaban las monoaminas y sus metabolitos.

Resultaron ser bajos los valores de serotonina (5-HT) para los animales ensayados, así como los valores de 5-HIAA en la glándula pineal, en comparación con el grupo de control. Por el contrario, el valor de 5-HIAA en el hipocampo era más elevado en los animales expuestos al campo magnético. El valor de melatonina en la glándula pineal era bajo en comparación con los animales del grupo de control.

Como la alteración en el metabolismo de las monoaminas está muy relacionada con la existencia de estrés, los resultados anteriores pueden ser interpretados como una prueba de que la exposición a los campos magnéticos estimula la aparición de estrés en los animales.

BIOINGENIERÍA PARA APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS CON CAMPOS MAGNÉTICOS

Gran parte de la información relativa a cómo pueden utilizarse los campos magnéticos está descrita en las patentes internacionales, cuya consulta resulta, por ello, de gran interés ya que, si bien una idea recogida en una patente no debe ser considerada como la mejor de las posibles soluciones, sí debe pensarse que se trata de una idea que al menos funciona aceptablemente bien, ya que de otro modo no se hubiese procedido a la realización y mantenimiento de una costosa patente industrial. Por otra parte, en el texto de cada patente se incluye la información para localizar al fabricante, que puede proporcionar comercialmente el equipo o sistema.

Vamos a hacer aquí una leve reseña de estos contenidos. Para mayor facilidad de exposición, agruparemos las patentes en cuatro categorías. La primera la forman las patentes que ponen su énfasis en el tipo de campo magnético que proponen, perfectamente pensado para el fin terapéutico. En los documentos de la segunda categoría ponen el énfasis en la descripción del método de uso, explicando la ejecutoria sobre la base, más o menos, de un modelo teórico biomagnético.

Incluimos en el tercer rango a patentes más circunscritas a describir un aplicador específico para utilizaciones concretas. Entre las de cuarto rango están incluidas las patentes que describen generadores y aplicadores, gra-

cias a los cuales se puede conjuntar la aplicación de varias formas de energía a la vez, con el fin de conseguir una sinergia terapéutica. Por ejemplo, produciendo y aplicando simultáneamente campo magnético y campo eléctrico o ultrasonidos.

Por último, en el quinto grupo se referencian patentes desarrolladas para describir equipos de campos magnéticos concebidos precisamente para tratamiento de enfermedades neurodegenerativas que afectan a la capacidad de la mente. Pretendemos con ello mostrar que en este campo hay ya disponibles interesantes logros industriales de la ingeniería electromédica.

Entre las patentes del primer grupo conviene destacar una de las primeras, la de Pollak et al⁸, que presentan un pequeño generador portátil que produce una señal de 0 a 5 volts constituida por impulsos elementales de 2 a 10 ms. Pueden tener forma de onda cuadrada simétrica, de onda senoidal simétrica y de impulso triangular. Estos impulsos van empaquetados en períodos de 1 a 10 ms, y entre estos paquetes, hay períodos de silencio total que duran de 60 a 65 ms.

Más imaginativa era la patente de Ostrow y Tannenbaum⁹, donde muestran un generador que produce una frecuencia alta modulada por una frecuencia baja. Este campo, por pasar la corriente de una pareja de espiras a la pareja siguiente, resulta ser un campo magnético giratorio.

De una gran facilidad es el equipo descrito por Drolet y Gaétan¹⁰, consistente en un circuito de descarga de un condensador a través de una resistencia, produciéndose la carga a través de otra resistencia. Regulando el valor de ambas resistencias se controla la duración del pulso de corriente y el espacio entre pulsos. La señal se amplifica y se lleva a una de entre varias espiras. Cada una de ellas representa un aplicador para rodilla, pie, cintura, etc.

Comentaremos ahora las patentes del segundo grupo, donde lo más significativo es el método de aplicación del tratamiento.

Vamos a comenzar por las aportaciones de Jacobson, que tienen de esencial poner en juego unos campos magnéticos muy débiles, del orden de los 10^{-20} gauss (repetimos que el campo magnético terrestre es de 0,35-0,40 gauss). En una primera patente¹¹ se presenta una piscina de unos 3 m de diámetro donde el paciente se coloca mientras toma su tratamiento (posición decúbito, prono, nadando, etc.). Se aprovecha la geometría cilíndrica de la piscina para envolverla con dos devanados que, en conjunto, constituyen una bobina de Helmholtz. Las frecuencias que se imponen son siempre inferiores a 100 Hz.

En una patente posterior¹², Jacobson emplea como aplicador una pequeña bobina de Helmholtz, donde el paciente introduce la zona a tratar, que suele ser un miembro del aparato locomotor. Las intensidades de

campo y las frecuencias suelen ser semejantes al caso de la patente anterior.

Mayor resonancia tuvieron las patentes de Liboff et al¹³. Su idea básica es colocar una serie de bobinas de forma que el campo magnético total (suma del campo producido por las diversas bobinas) se mantenga siempre orientado de acuerdo con el eje del hueso donde se aplica. Como frecuencia usa las resonantes del ion calcio, tal y como hemos comentado en otro apartado anterior.

Las últimas tendencias giran en torno a la idea de activar diversos devanados cuyos campos se superponen precisamente en el espacio en el que se produce la exposición de la zona anatómica a tratar¹⁴. La técnica pivota sobre dos ideas básicas: a) la utilización simultánea de devanados independientes, alimentados cada uno a una frecuencia, y b) la consecución de un campo terapéutico dotado de un gradiente muy pronunciado. Es justo lo contrario de los equipos convencionales de magnetoterapia, normalmente una camilla, que disponen de un único y gran aplicador tubular y trabajan en cada sesión de tratamiento con una única frecuencia.

Frente a esto, la arquitectura de varios devanados con una orientación espacial específica para cada uno hace posible que los distintos componentes se sumen con un cierto ángulo, lo cual parece ser más ventajoso, habida cuenta de lo establecido por el modelo físico IPR (*ionic paramagnetic resonance*; apéndice), en el que conviene que el campo continuo pueda ser perpendicular o paralelo al campo alterno.

Además, existe la posibilidad de procurar una superposición de campos originados con distintas frecuencias. Como cada una de las frecuencias tiene un efecto terapéutico propio, el solapamiento puede y debe dar lugar a una sinergia. Al igual que en un medicamento, se incorporan unos fármacos secundarios escogidos en concordancia con el fármaco genérico.

Citaremos de pasada algunas de las más conocidas dentro del amplio tercer grupo de las patentes que describen aplicadores cómodos, fácilmente utilizables, sin entrar a discutir las frecuencias de trabajo ni los fundamentos de la actuación de los campos que producen.

Como ejemplo representativo citaremos la patente de Edwards¹⁵, en la que se muestran unos aplicadores a modo de espiral plana en cuyo centro se encuentra un minúsculo generador alimentado por una pila de reloj. Lo mejor es que el conjunto forma como un parche, semirrígido pero deformable, que se aplica a cualquier punto del aparato locomotor, muñeca, tobillo, puente del pie, y por su adaptabilidad y mantenimiento de la forma queda colocado y se mantiene fijado, aplicando el tratamiento.

Dentro de las patentes del cuarto grupo, en las que se incluyen sistemas para aplicar simultáneamente energía

bajo diversos campos, podemos citar a Giangregorio¹⁶, que muestra un equipo capaz de suministrar al paciente campo eléctrico y campo magnético, y a Ostrow¹⁷, que muestra un sistema portátil capaz de proporcionar al paciente, simultáneamente, magnetoterapia, iontoforesis y TENS (*transcutaneous electro neuro stimulation*).

Finalmente, haremos referencia a las descripciones de sistemas de ingeniería existentes, concebidos y preparados para el tratamiento de problemas neurodegenerativos. Arrancan todos ellos de las posibilidades abiertas por la administración del NGF (*nerve growth factor*) para el tratamiento de la enfermedad de Alzheimer¹⁸, que abrieron el camino a patentes como la de Kessler y Apfel¹⁹, que describe la utilización, para tratamientos de neuropatías inducidas por fármacos, de diversos factores neuronotróficos, como el NGF, CNTF (*ciliary derived neuro trophic factor*), BDNF (*brain derived neuro trophic factor*), NT-3 (*neurotrophin-3*), FGF (*fibroblast growth factor*), EGF (*epidermal growth factor*), TGF- β (*transforming growth factor- β*) y otros.

Desde un punto de vista empírico, estaba comprobado que los campos magnéticos tenían influencia sobre el efecto del NGF en el crecimiento de neuritas^{20,21}, por lo que la aplicación de los campos a problemas de degeneración neurológica está justificada. En la primera patente que conocemos al respecto²² se describe cómo la aplicación de un campo alterno de adecuadas intensidad y frecuencia mejora las alteraciones neurológicas y mentales asociadas a una deficiente neurotransmisión de la serotonina y a una deficiente función de la glándula pineal; en dicha patente se presenta una amplia bibliografía al respecto. En el texto de Sandyck²³ se explica cómo el deterioro neurológico por la edad puede ser explicado como una consecuencia de una disminución en la producción de melatonina en la glándula pineal. Por ello, resulta útil la aplicación de campo magnético alterno de adecuada intensidad, frecuencia y forma de onda. Es muy aconsejable que esta aplicación vaya acompañada de la administración de hormonas, lo que puede hacerse con una inclusión de aminoácido triptófano en la dieta. También puede ser coadyudante el suministro simultáneo de hormona del crecimiento. Asimismo, en otros textos de Sandyck^{24,25} se describen con detalle la frecuencia y la intensidad de los componentes del campo magnético con más capacidad terapéutica, siendo éstos un campo alterno, un campo continuo y un ruido electromagnético de baja frecuencia. Finalmente, Fischell y Upton²⁶ muestran la eficacia de una aplicación transcraneal de campo magnético de baja frecuencia en el cerebro de un paciente, de modo que se da lugar a la producción de corrientes eléctricas de efecto terapéutico sin la necesidad de aplicar las corrientes a través de los habituales electrodos.

También puede ser útil para estos estudios disponer de un sistema auxiliado por ordenador²⁷ que, por comparación con anteriores registros y de acuerdo con la in-

formación que la propia patente suministra, permite el seguimiento de la evolución de un proceso neurológico, ya sea debido al efecto de toxinas, de traumatismos, de infecciones o de enfermedades crónicas, como es el caso de la enfermedad de Alzheimer.

Esto puede resultar de interés debido a la posibilidad de que el uso de un equipo como el descrito en esta patente pudiera ahorrar las técnicas de seguimiento de la evolución del proceso de Alzheimer por la vía bioquímica, mediante la medición de los valores de proteína tau y β -amiloide²⁸ en muestras de líquido cefalorraquídeo, necesariamente obtenidas mediante punción lumbar.

PANORÁMICA DE LA APLICACIÓN DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS AL TRATAMIENTO DE LAS ENFERMEDADES DEGENERATIVAS FRECUENTES DE LA TERCERA EDAD

En todo lo comentado anteriormente en relación con los tratamientos en traumatología y rehabilitación, la intensidad de los campos magnéticos era del orden de algunas decenas de mT (militesla). Como el campo magnético terrestre es del orden de media diezmilésima de T (tesla), equivale a decir que el campo terapéutico es del orden de entre 5 y 20 veces el valor del campo magnético terrestre.

Por el contrario, cuando se tratan problemas neurodegenerativos como los que aquí comentaremos, los campos que dan buen resultado son del orden de un picotesla, es decir, una millonésima de millonésima de tesla. O, dicho de otro modo, el campo magnético terrestre es del orden de 50 millones de picoteslas.

Es bien sabido que una de las causas de la depresión es la escasez por falta de estimulación de la glándula pineal, un formidable sensor que se estimula igualmente con un campo magnético del orden de picoteslas²⁹ igual que cuando se estimula con un láser. Se ha comprobado que los campos incrementan el valor de serotonina³⁰ y resincronizan la secreción de melatonina.

Esto sintoniza perfectamente con el hecho de que un tratamiento con estos campos tan débiles mejora el biorritmo de pacientes de edad avanzada con alteraciones sencillas de memoria, o con enfermedad de Alzheimer. En pacientes con esta enfermedad, el tratamiento con campos tan débiles, con frecuencias entre 5 y 8 Hz, hace mejorar sus funciones cognitivas, incluyendo la orientación espacial, el estado de ánimo, la memoria inmediata y la habilidad para las relaciones sociales³¹.

Del mismo modo, la aplicación de estos campos magnéticos mientras se trata la enfermedad con fármacos resulta de gran interés en la enfermedad de Parkinson³². De hecho, el tratamiento con campos va reduciendo la dosis hasta poder llegar a sustituir la medicación a las 3-4 semanas en algunos casos³³.

Estas posibilidades terapéuticas podrían ser extendidas sin duda alguna a casuísticas similares, como la del síndrome de piernas/muslos sin descanso (RLS) (*Restless Legs Syndrome* o también *Restless Limbs Syndrome*)³⁴. Estos pacientes, que «se arrastran sobre sus piernas» y que sólo alivian su molestia con el movimiento continuo, presentan siempre alguna relación con alguna neuropatía³⁵. Su similitud con los pacientes con enfermedad de Alzheimer se comprobó con la eficacia limitada de tratamientos con levodopa³⁶, aunque por el momento no conozcamos ninguna publicación definitiva al respecto. Lo que sí es cierto es que se han desarrollado medicamentos específicos para el tratamiento del RLS³⁷⁻⁴⁰, por lo que es más que previsible que se pueda comprobar que su eficiencia mejora con una administración acompañada de aplicación de campos magnéticos.

Parece que algunos medicamentos inicialmente destinados a los problemas epilépticos resultan útiles⁴¹, y que los derivados de la nicotina⁴², de claro interés para el tratamiento de los pacientes con enfermedad de Alzheimer, se muestran prometedores para tratamientos de RLS. Es más, una reciente patente japonesa⁴³ recomienda tratar RLS con opioáceos de rango de aplicación general en el campo de las psiconeurosis.

Como comentario final, referido a todas estas casuísticas de problemas neurodegenerativos, podemos decir que con sólo el tratamiento con campos de picoteslas, sin acompañamiento de quimioterapia, mejoran la percepción motora y la percepción espacial⁴⁴, y eso en muy pocas sesiones. También se corrige el desajuste entre ambos hemisferios cerebrales⁴⁵. Pacientes que solamente dibujan micrografías (dibujos a muy pequeño tamaño, sin guardar una verdadera proporción) experimentan una rápida mejoría al corregir su deficiencia dopaminérgica.

Un poco menos eficaz, y desde luego con mucho más tiempo de tratamiento hasta que empieza a apreciarse una clara mejoría, es el efecto sobre la esclerosis múltiple⁴⁶. También en estos casos, la actuación de los campos se realiza a través de la glándula pineal⁴⁷. Una dosis típica para estos tratamientos es un campo de 7,5 pT, una frecuencia de 5 Hz y una sesión diaria de 20 min⁴⁸.

CONCLUSIONES

En el campo de la traumatología y la rehabilitación, el uso de los campos magnéticos en problemas de reparación ósea parece estar consolidado. Actualmente, la mayor eficacia de estos tratamientos ha desarrollado una nueva indicación para combatir el dolor.

En el campo de las enfermedades neurodegenerativas, los tratamientos con campos magnéticos de intensidad débil parecen de especial interés, ya que podría ser una herramienta potente de fácil disposición, por más que

los protocolos de uso todavía no estén divulgados, y que podría compaginarse, con una positiva sinergia de efectos, con la farmacopea convencional.

De cara al diseño de los sistemas de aplicación de campos magnéticos para el tratamiento de las enfermedades degenerativas, hay que tener en cuenta que se requieren tratamientos individualizados en muchas enfermedades. Por ello, los sistemas han de poder regular los siguientes parámetros: nivel de intensidad bajo o alto, frecuencia extremadamente baja o simplemente baja y aplicador que genere un campo con gradiente o uniforme.

Con respecto al tránsito de la investigación a la práctica clínica, la Federal Drug Agency (FDA) americana muestra claramente el camino⁴⁹⁻⁵¹ al aprobar la utilización del biomagnetismo clínico para 8 campos terapéuticos y permitiéndola en otros 2 de resultados de que hayan sido establecidas las dosis adecuadas y seguras.

Para el caso del tratamiento de las enfermedades degenerativas, estamos en este segundo supuesto. Sería deseable que en el futuro próximo se publicasen informaciones completas referentes a los parámetros (intensidad de campo, frecuencia y forma de impulsos, tipo de aplicador) que regulen la eficiencia de estos tratamientos. Esto permitiría la realización de ensayos clínicos controlados que facilitarían el establecimiento de dosis optimizadas.

APÉNDICE. BIOFÍSICA DE LA INTERACCIÓN CAMPO-ORGANISMO

Magnetismo y fisiología

Al estudiar la interacción entre el campo magnético y la vida nos encontramos con una integración del hombre en el universo físico. Por una parte, las neuronas trabajan con unos impulsos de frecuencia tal, que prácticamente están sintonizados con una tenue componente del campo magnético ambiental, concretamente con la componente minoritaria de campo que nos llega generado desde más allá de nuestra atmósfera, desde el cinturón de Van Hallen constituido por partículas cargadas. El que la Tierra gire en su interior equivale a que el cinturón sea una espira por la que circula una corriente. El leve campo así generado se suma al generado por el interior del planeta.

Por otra parte, los primeros experimentos biológicos que se llevaron a cabo fuera del campo magnético terrestre, a bordo de satélites artificiales, mostraban que las ratas presentaban de inmediato una desbocada osteoporosis que se curaba sin más que retornar al campo magnético terrestre⁵². Nuestro metabolismo está, pues, controlado por el campo magnético que se genera en el interior de nuestro planeta, y es por ello sensible a campos magnéticos exógenos del mismo orden de magnitud, es decir, con una densidad de flujo de militeslas (mT) (en

el sistema de unidades internacional, el campo magnético se mide en teslas. En el sistema c.g.s de unidades antiguo se medía en gauss, siendo la equivalencia $1 \text{ T} = 10^4$ gauss. Como idea de la magnitud de estas unidades, se puede decir que el campo magnético terrestre es del orden de 0,4 gauss, o sea, de 4 centésimas de militesla).

El mecanismo de esta interacción campo magnético-organismo se explica con algo tan clásico en la física como es el movimiento ciclotrónico de las partículas cargadas, o en el marco más elaborado de la EPR (resonancia paramagnética del electrón).

Por otra parte, el funcionamiento de los procesos cerebrales, relacionados con la conciencia, aparece abordado en el marco de la física cuántica, tal y como se expone en el trabajo de Pastor-Gómez⁵³.

La física cuántica parte del principio de que todos los intercambios de energía se realizan en cantidades múltiples de un «cuanto» de energía $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ J.s. Tan mínima es esta cantidad que puede decirse que los procesos cuánticos se activan con unas energías extremadamente tenues.

En el esquema cuántico del Universo hay dos grandes familias de partículas: los fermiones y los bosones.

Los primeros tienen masa, y el más conocido es el electrón. Los bosones son partículas portadoras de fuerza y pueden tener o no tener masa. Los más representativos son los fotones (componentes, por ejemplo, de la radiación láser) y los gravitones. Estos últimos hacen que los seres vivos sean sensibles al campo gravitatorio.

El fotón fue una creación de Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico, donde al estudiar la emisión producida por luz de distintos colores se observó que no regía el modelo de la teoría de ondas. La conclusión de Einstein fue que, en lo referente a la interacción con la materia, la luz está compuesta de partículas sin masa, bautizadas como fotones. La mejor demostración de esta hipótesis la hizo Compton al comprobar que los rayos X interaccionaban con una lámina de grafito, perdiendo su energía según el modelo de los choques elásticos.

El estudio del campo gravitatorio hizo, por otra parte, generalizar el modelo newtoniano de la materia como creadora de la geometría. En esencia, se trata de un campo estático que rodea a cualquier masa y que existe desde siempre, o lo que es lo mismo, se propaga con velocidad infinita en un espacio plano continuo cartesiano.

La teoría de la relatividad rechazaba cualquier propagación a velocidad infinita, y sobre la base de la constatación de la curvatura del espacio durante el eclipse del año 1919 (comprobación de la deflexión de la luz por efecto de la proximidad de la masa) estableció la teoría

de unificación de campos con sólo tres constantes universales: la constante de la gravitación de Newton, el cuanto de energía de Plank y la velocidad de la luz.

Sobre esta base, el campo magnético está constituido por gravitones, que explican la interacción del campo magnético con cualquier tipo de materia. La conexión entre el campo gravitatorio y el campo magnético está constatada al comprobar que cuando masas de partículas se desplazan por el espacio, además de generar un campo magnético, como corrientes eléctricas que son, alteran el campo gravitatorio.

No estamos hablando de sólo una teoría, porque la realidad del gravitón fue comprobada con el experimento Gravity Probe B de la NASA y consistía en desplazar por una órbita espacial a un giróscopo que constataba tenues cambios en el campo gravitatorio. Y aplicando a los gravitones un modelo similar al conocido para explicar la absorción de fotones en la función clorofílica, puede justificarse el geotropismo de las plantas, o sea, la orientación del crecimiento de los tallos vegetales de acuerdo con las líneas de fuerza del campo gravitatorio (verticalidad en el crecimiento de los tallos de las plantas). La conexión entre los campos gravitatorio y magnético explica que nuestro organismo reaccione similarmente ante ambos.

Los bosones son susceptibles de presentar la condensación de Bose-Einstein (CBE), que consiste en que en un confinamiento puede haber multitud de partículas idénticas indistinguibles, lo cual es opuesto al conocido carácter de los electrones, que van ocupando los subniveles de la corteza electrónica sin que pueda haber dos iguales, por lo que para ir incrementando el número de electrones hay que irlos colocando en otras órbitas diferentes, más alejadas del núcleo. Se forman así las distintas cortezas electrónicas que diferencian a unos átomos de otros.

Otro hecho importante es que dos partículas *entangled*, es decir, expresables por una misma función de onda (la mecánica ondulatoria muestra que una partícula puede ser representada indistintamente por un corpúsculo o por una onda), permanecen comunicadas continuamente por la resonancia que supone estar en la misma onda. Y esto se seguiría manteniendo aunque las partículas estuvieran separadas por una distancia de kilómetros. Esta transmisión instantánea de la acción, está ahora en discusión teórica por si supone *de facto* una violación del principio einsteniano de que nada puede transmitirse a mayor velocidad que la de la luz.

Estas ideas de la física cuántica no sólo han servido para explicar y fundamentar las interacciones de los componentes fundamentales del universo con los seres vivos, sino que han propiciado teorías para explicar el funcionamiento de estructuras biológicas para cumplir funciones cuyos fundamentos nos son todavía totalmente desconocidos, como podrían ser las funciones cognitivas superiores del cerebro.

La teoría de Zohar⁵⁴ de la conciencia cuántica aprovecha la posibilidad de que un sistema de partículas puede estar constituido con una parte de ellas formando una fase continua única y condensada. El resto de las partículas en situación de no condensada están esencialmente conexas a sus cónyuges ubicadas en la fase continua.

En la mencionada teoría de Zohar, la fase continua es la conciencia, y las partículas no condensadas son los dipolos eléctricos de las membranas cerebrales. La comunicación entre unas y otras se lleva a cabo por medio de una resonancia que supone la emisión de fotones virtuales. La actividad eléctrica que muestra el cerebro no es sino la materialización de esta comunicación.

En la fase condensada tiene su ubicación el subconsciente, y es la actividad eléctrica del cerebro el fundamento de todo proceso consciente.

Así pues, la acción sobre los iones contenidos en nuestros electrólitos por los campos naturales terrestres y las resonancias cuánticas de partículas de nuestro cerebro sensibles a las tenues influencias provenientes de más allá de la atmósfera son las dos caras de la moneda de nuestra realidad. Cada uno de nosotros somos, pues, un punto de conexión entre la Tierra y el firmamento.

Desarrollo del biomagnetismo clínico

Hasta el siglo XIX no se puede hablar de verdadero comienzo de la utilización del electromagnetismo en medicina. Es a partir de Lente⁵⁵, con la publicación de su *Direct current or galvanic current* para resolver fracturas no unidas, cuando quedó abierta esta posibilidad que, por cierto, hubo de pagar el precio de adelantarse a su tiempo, siendo relegada en el olvido. Del mismo modo, Hawtorne⁵⁶ utilizó imanes para resolver *supernumerary joints*, corriendo la misma suerte.

Es en la segunda mitad del pasado siglo XX cuando se produce un nuevo despegue. Estaba recién terminada la Segunda Guerra Mundial cuando Fukada y Yasuda⁵⁷ publican un trabajo paradigmático que describe «el efecto piezoeléctrico del hueso humano». Se refiere al tejido óseo seco, no *in vivo*.

Aparentemente, parecía que el olvido iba a apagar también esta chispa de luz, como ya había hecho con los trabajos de Lente y Hawtorne. Pero 20 años más tarde de la publicación de Fukada y Yasuda⁵⁷, la escuela americana del profesor Andrew Bassett de la Universidad de Columbia retomaba las ideas de Fukada y Yasuda, y puso para siempre en marcha lo que está resultando ser una potente herramienta para la medicina.

Bassett realizó unos primeros estudios comprobando que los esfuerzos mecánicos *in vivo* se traducían en la aparición de potenciales eléctricos óseos^{58,59}. Más tarde comprobaba⁶⁰ que al imponer, con un electrodo y una

pila eléctrica, una corriente eléctrica, se daba lugar a la formación de tejido óseo.

Se completaba con ello el modelo de que el ejercicio que supone la marcha, a través de la producción de impulsos eléctricos endógenos, da lugar al crecimiento del tejido óseo, lo que permite justificar la clásica observación del crecimiento selectivo de tejido óseo, que se conoce como remodelación.

Esto dio paso a la idea de imponer artificialmente unos impulsos eléctricos equivalentes a la marcha. Se pudo comprobar que esto servía para resolver la falta de uniones y las uniones retardadas.

El paso siguiente fue pasar a utilizar unos devanados adjuntados a la zona aquejada de un fallo de consolidación. Estos arrollamientos de hilos de cobre estaban recorridos por impulsos de corriente, de forma que se daba lugar a un campo magnético exógeno. La gran aportación fue comprobar que las variaciones de campo magnético se traducían en aparición de impulsos de corriente⁶¹. Con ello nació la técnica no invasiva conocida como *inductive coupling*, y que permitía acelerar el proceso de reparación ósea⁶², resolviendo incluso no uniones en los grandes huesos del aparato locomotor^{63,64}.

La gran ventaja del campo magnético sobre la corriente eléctrica es que en este último caso, cuando aplicamos una corriente con unos electrodos, sabemos donde se inyecta y donde se recoge la corriente, pero el camino detallado del flujo de las cargas entre ambos puntos depende en cada caso de las particularidades anatómicas del paciente, de la composición y distribución de sus tejidos (ligamentoso, muscular óseo, graso, etc.). Por el contrario, cuando sumergimos un miembro en tratamiento en el seno de un campo magnético que hemos generado con unas espiras, todos los tejidos y piezas anatómicas quedan envueltos por el campo exógeno que hemos producido según nuestros deseos.

La manejabilidad de esta tecnología, junto con su inocuidad, hizo que surgieran muchos desarrollos consistentes en aplicar a un devanado de hilos de cobre unas complejas corrientes constituidas por una serie de impulsos eléctricos. Como el campo magnético es proporcional a la intensidad de la corriente que recorre la espira generadora, se consiguieron así complejos campos con sus efectos terapéuticos mejorados⁶⁵⁻⁷².

Justificación de los efectos del campo magnético en las células

La primera de las teorías para explicar el efecto del campo magnético sobre las células fue la de la acción sobre los iones.

En este modelo se supone que la membrana celular está compuesta por biopolímeros orientados, de forma

que ambas caras de la membrana presentan una densidad de carga eléctrica.

En la cara intercelular se acumulan los iones Na^+ y la cara intracelular está tapizada de iones proteínicos A^- . En la zona estable citoplasmática abundan aniones A^- acomplejados por iones K^+ , resultando conjuntos neutros y estables.

De vez en cuando, una molécula de agua golpea a un complejo A^-K^+ , pudiendo llegar a producirse la separación brusca de ambos iones. El ion K^+ puede alcanzar la suficiente energía como para traspasar la membrana a través de uno de sus túneles o canales, alcanzando la zona intercelular. Es el conocido efecto de bombeo selectivo de la membrana celular.

El efecto del campo magnético resulta fácil de explicar, pues a partir de que se rompe el par A^-K^+ , el campo tiende a dirigir el movimiento de ambos iones A^- y K^+ en sentido opuesto.

A este modelo se añadió el concepto de trayectoria ciclotrónica, así llamada por ser la trayectoria en espiral que un electrón o partícula cargada sigue en el acelerador de partículas que en la física elemental se conoce como «ciclotrón». Con este simplísimo modelo, pudo Libboff^{73,74} establecer un modelo de resonancia que se activa a una frecuencia muy concreta del campo magnético. Es decir, cuando la frecuencia del campo exógeno cumple una cierta condición de resonancia, matemáticamente muy simple, el ion toma un movimiento repetitivo, sin fin, en una órbita circular. Lo cual no es sino un mecanismo de absorción de energía. En muchos textos de física americanos, a esta resonancia se la conoce indistintamente como ciclotrónica o paramagnética.

Básicamente, el modelo ciclotrónico se basa en el hecho de que una partícula cargada, en el seno de un campo magnético, adquiere una trayectoria circular del mismo modo que una piedra lanzada al aire toma una trayectoria parabólica. El período de giro es independiente del radio de giro, lo que permite definir una resonancia cuando la frecuencia del campo aplicado coincide con la frecuencia que se impone en el recinto físico, en este caso la célula, donde se produce el fenómeno.

Se calcula fácilmente que la frecuencia de resonancia vale, para un campo magnético de densidad de flujo B , siendo m la masa del ion, y q su carga:

$$f = (1/2\pi) (1/B) (q/m)$$

Es decir, depende de la relación carga/masa de la partícula. De acuerdo con ello se pueden hacer unos cálculos sencillos, obteniéndose los resultados que se muestran en la figura 4.

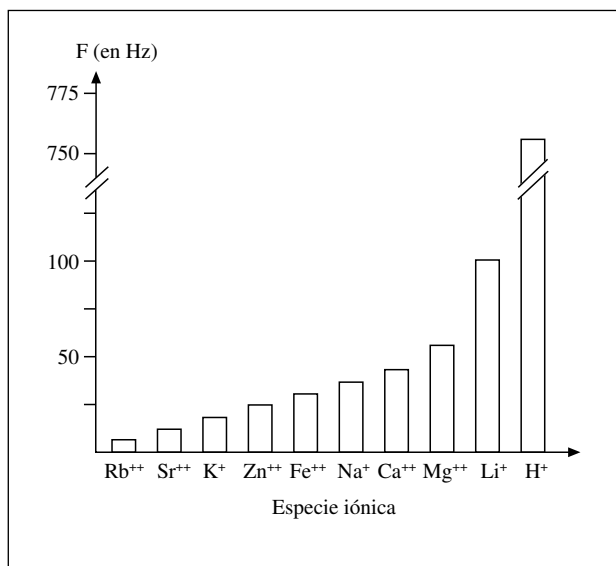


Figura 4. Representación de las frecuencias de resonancia ciclotrónicas para algunos de los iones más frecuentes en los procesos biológicos.

Los valores aquí obtenidos para la frecuencia de resonancia resultan perfectamente congruentes con las comprobaciones experimentales de que la interacción del campo magnético con las células vivientes tiene lugar preferentemente a frecuencias inferiores a 110 Hz.

Es importante comprender que todos estos cálculos están hechos suponiendo que el campo es perpendicular a la velocidad inicial del ion. Si así no fuese, la trayectoria sería una espiral, como un muelle; es decir, un avance lineal junto con un giro en el plano transversal a la dirección del avance.

Así pues, tenemos que un campo magnético alterno o a impulsos resuena con los iones de la célula según un mecanismo ciclotrónico. Y esta acción es especialmente intensa cuando se da la perpendicularidad entre el campo exógeno y el movimiento inicial de los iones.

Esto abre la posibilidad de utilizar dos campos cruzados o perpendiculares, uno continuo que mueve las partículas o iones con movimiento constante y otro pulsante de baja frecuencia que las hace entrar en resonancia. Es decir, las hace absorber energía del campo exógeno. Como la energía se absorbe en forma de energía cinética, aplicar un campo magnético equivale a «calentar» los iones sin subir la temperatura de la totalidad del tejido.

Esto es equivalente a decir que el biomagnetismo no es sino un caso particular de lo conocido como «magnetoquímica». En efecto, en química industrial, cuando se quiere acelerar una reacción sin subir la temperatura, lo habitual es recurrir a una aportación de energía por otros medios, o lo que es lo mismo, a la «laserquímica» o aportación adicional de energía con una radiación láser,

a la «sonoquímica», o aplicación de energía mediante un haz ultrasónico, o a la magnetoquímica o aportación de energía mediante un campo magnético que pone paralelos a los spines de los iones, aumentando así la probabilidad de que una colisión ocasione una reacción química entre las dos moléculas que impactan⁷⁵. El interés económico de estas técnicas es evidente, por ser bien cierto el aforismo industrial de que cuanto más fría sea una reacción, más barato será el coste económico de realizarla. Cuando en la industria se usan estas técnicas, no se trata de variar la química de un proceso sino, simplemente, de abaratarlo.

La aplicación clínica de los campos magnéticos en el tratamiento de enfermedades óseas o faltas de consolidación se encuentra ampliamente referenciada en la bibliografía. Aquí citaremos sólo las publicaciones de Meskens et al⁷⁶, Hinsemkamp et al⁷⁷, De Haas et al⁷⁸, Fredman⁷⁹, Stein et al⁸⁰, Krempen et al⁸¹ y Randoll⁸². No es fácil comparar los resultados de unos con otros, ya que no sólo están realizados con grupos de pacientes sensiblemente diferentes, sino que no hay coincidencia en lo que se refiere a las definiciones de los fallos a tratar y sus distintos niveles de morbilidad o discapacidad.

La bibliografía moderna expresa la interacción campo/célula como una regulación de la osteogénesis mediante la aplicación de campos magnéticos que actúan sobre los factores de crecimiento⁸³⁻⁸⁶.

Lo que sí parece razonablemente establecido es que la mejor efectividad se consigue con una mezcla de campo alterno y campo continuo (DC), tal y como obtuvo Blackman et al⁸⁷ a partir de un modelo físico cuántico más elaborado que la resonancia ciclotrónica, la IPR o resonancia paramagnética de los iones, pero que llega además a las mismas frecuencias que hemos indicado en el histograma de la figura 4, con el añadido de la posibilidad de que la acción de una frecuencia de campo magnético se ve reforzada por la aplicación superpuesta de campos frecuencias armónicas a la frecuencia terapéutica.

No es precisamente la IPR un fenómeno extraño, obsoleto. Por describirlo brevemente, diremos que como cada órbita de un electrón en un átomo es una espira con corriente, se comporta como la aguja de una brújula y determina la intracción entre un campo magnético y la materia. El tipo de interacción divide a las sustancias en tres clases: diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas. En las diamagnéticas, el campo propio de cada órbita se coloca en oposición a un campo externo en las sustancias diamagnéticas. En las paramagnéticas y ferromagnéticas se orienta de modo que se suma al campo exterior, con la diferencia de que en las ferromagnéticas se hace de forma irreversible. El modelo cuántico para explicar la interacción en el caso del paramagnetismo es la IPR.

Como final haremos una simple mención de artículos que eran publicaciones sucesivas que iban mostrando el estado del arte. A finales de los años ochenta se daba por mayor de edad a la técnica⁸⁸ que había sido aprobada por la FDA en 1979⁸⁹, extendiéndose su aplicación a otros campos de la medicina⁹⁰. En los países del entorno de la entonces Unión Soviética se focalizaron los esfuerzos en simultanear los campos magnéticos con otra forma de energía (láser, ultrasonido, etc.) y en aplicarlos a un amplio espectro de tratamientos. La visión desde aquel ámbito ruso la tenemos en Ulashchik⁹¹, Kovalchuck⁹² y Zaslavsky et al⁹³, y más concretamente desde la actual República Checa en Jerabek⁹⁴.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Adolfo Toledano Gasca, Investigador del Instituto Ramón y Cajal, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, su ayuda y estímulo durante la realización del presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. McLean M, Engström S, Holcomb FH. Static magnetic fields for the treatment of pain. *Epilepsy Behaviour* 2001;2:S74-80.
2. Borets VM, Ostrovskii Yu, Bankovskii A, Dudinskaya TF. Brain monoamine oxidase activity under the effect of various magnetic fields. *Zdravookhranenie Belorussii* 1986;3:43-5.
3. Martynyuk VS, Martynyuk SB. Influence of ecologically significant variable magnetic field on metabolic parameters in brain of animals. *Biofizika* 2001;46:910-4.
4. Semm P. Neurobiological investigations on the magnetic sensitivity of the pineal gland in rodents and pigeons. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A. Molecular & Integrative Physiology* 1983;76A:683-9.
5. Narayan PVS, Subrahmanyam S, Satyanarayana M, Rajeswari K, Srinivasan TM. Effects of pulsating magnetic fields on the physiology of test animals and man. *Curr Sci* 1984;53:59-65.
6. Nosova EA, Kurkina LM. Effect of a constant magnetic field on some aspects of energy and nitrogen metabolism in the cerebral hemispheres of rats. *Kosmicheskaya Biologiya i Aviakosmicheskaya Meditsina* 1979;13:72-4.
7. Kabuto H, Yokoi I, Namba Y, Ogawa N, Mori AL, Robert P. Magnetic fields and physical restraint alter the levels of monoamines and their metabolites in the rat brain. *J Brain Sci* 1999;25:45-54.
8. Pollack SR, Brighthon CT, Plenkowski D, Griffith NJ. Electromagnetic method and apparatus for healing living tissue. Patente US005014699.
9. Ostrow A, Tannenbaum J. PEMF biophysical stimulation field generator device and method. Patente WO0078267A2.
10. Drolet RA, Gaétan C. Electro-magnetic therapeutic system and method. Patente EP0048451A1.
11. Jacobson JI. Method for ameliorating the aging process and the effects thereof utilizing electromagnetic energy. Patente US006004257A.
12. Jacobson JI. Magnetic field generating device and method of generating and applying a magnetic field for treatment of specified conditions. Patente US006099459A.
13. Liboff AR, McLeod BR, Smith SD. Techniques for controlling osteoporosis using non-invasive magnetic fields. Patente US005267939A. Puede verse también en: Method and apparatus for controlling tissue growth with an applied fluctuating magnetic field. Patente US005123898A.
14. Madroñero A. Device of multiple magnetic fields for their use in magnetotherapy and magneto acupuncture. European Patent Application No 03380110.1.
15. Edwards JD. Orthotic devices incorporating pulsed electromagnetic field therapy. Patente WO 95/27533.

16. Giangregorio S. Device for stimulating the natural defenses of a person or of any cellular system. Patente WO 95/ 07729.
17. Ostrow AS. Magnetotherapy apparatus. Patente WO09413357.
18. Marx J. NFG and Alzheimer's: hopes and fears. *Science* 1990;247:408-10.
19. Kessler JA, Apfel SC. Use of NGF growth factors to treat drug-induced neuropathy. Patente US005604202A.
20. Blackman CF, Blanchard JP, Benane SG, House DE, Elder JA. Double blind test of magnetic field effects on neurite outgrowth. *Bioelectromagnetics* 1998;19:204-9.
21. Macias MY, Battocletti JH, Sutton CH, Pntar FA, Maiman DJ. Directed and enhanced neurite growth with pulsed magnetic field stimulation. *Bioelectromagnetics* 200;21:272-86.
22. Sandyk R. Treatment of neurological and mental disorders. Patente US005470846A.
23. Sandyk R. Compositions and methods which retard the ageing process and which improve age-related disease conditions. Patente WO 97/ 46244.
24. Sandyk R. Compositions and methods useful for the treatment of neurological and mental disorders. Patente WO 99/ 13884.
25. Sandyk R. Methods useful for the treatment of neurological and mental disorders related to deficient serotonin neurotransmission and impaired pineal melatonin function. Patente US005885976A.
26. Fischell DR, Upton AFM. Low frequency magnetic neurostimulator for the treatment of neurological disorders. Patente US 2003/ 0028072A1.
27. Comrie McD, Erlanger DM, Kaplan DF, Theodoropoulos A, Yee P, Shchogolev V. Neurological pathology diagnostic apparatus and methods. Patente EP 1 122 679 A2 (2001).
28. Gómez Tortosa E, Gonzalo I, Fanjul S, Cantarero S, Cuadrado N, García Yébenes J, et al. Niveles de proteína tau y betaamiloide en la demencia con cuerpos de Lewy en comparación con la enfermedad de Alzheimer. *Mapfre Medicina* 2003;14:118-24.
29. Sandyk R, Anninos PA, Tsagas N. Magnetic fields and seasonality of affective illness: implications for therapy. *Int J Neuroscience* 1991;58:261-7.
30. Sandyk R. Suicidal behaviour is attenuated in patients with multiple sclerosis treatment with electromagnetic fields. *Int J Neuroscience* 1996;87:5-15.
31. Sandyk R, Anninos PA, Tsagas N. Age related disruption of circadian rhythms: possible relationship to memory impairment and implications for therapy with magnetic fields. *Int J Neurosci* 1991;59:259-62.
32. Sandyk R. Magnetic fields in the therapy of parkinsonism. *Int J Neurosci* 1992;66:209-35.
33. Sandyk R. Treatment of Parkinson disease with magnetic field reduces the requirement for antiparkinsonian medications. *Int J Neurosci* 1995;74:191-201.
34. Earley CJ. Restless legs syndrome. *N Engl J Med* 2003;348:2103-9.
35. Allen FP, Earley CJ. Restless leg syndrome: a review of clinical and pathophysiological features. *J Clin Neurophysiol* 2001;18:128-47.
36. Polydefkis M, Allen FP, Hauer P, Early CJ, Griffin JW, McArthur JC. Subclinical sensory neuropathy in late-onset restless legs syndrome. *Neurology* 2000;55:1115-21.
37. McBrinn S, Anderson RV. Treatment for restless legs. Patente US2002107257.
38. Oertel W, Meier D, Gómez-Mancilla B, Montplaisir J. Use of pramipexole in the treatment of restless legs syndrome. Patente WO 9831362.
39. Schueler P. Use of cabergoline in the treatment of restless legs syndrome. Patente WO 9948484.
40. Horowski R, Tack J, Engler A. Transdermal therapeutic system for treating restless legs syndrome. Patente WO 0215889.
41. Abuzzahab FS. Anticonvulsant derivatives useful for the treatment of restless limb syndrome and periodic limb movement disorder. Patente WO03026676.
42. Saltarelli MD. Nicotinic acetylcholine receptor antagonist in the treatment of restless legs syndrome. Patente US20030134844A1.
43. Kumagai H, Utsumi J. Remedies for psychoneurosis. Patente WO02078744.
44. Sandyk R, Iacono FP. Reversal of visual neglect in Parkinson's disease by treatment with picotesla range magnetic fields. *Int J Neurosci* 1993;73:93-107.
45. Sandyk R. Weak electromagnetic fields reverse visuospatial hemi-inattention in Parkinson's disease. *Int J Neuroscience* 1995;81:47-65.
46. Sandyk R. Progressive cognitive improvement in multiple sclerosis from treatment with electromagnetic fields. *Int J Neurosci* 1997;89:39-51.
47. Sandyk R. Therapeutic effects of alternating current pulsed electromagnetic fields in multiple sclerosis. *J Alter Compl Medicine* 1997;3: 365-86.
48. Sandyk R. Rapid normalization of visual evoked potentials pico tesla range magnetic fields in chronic progressive multiple sclerosis. *Int J Neurosci* 1994;77:243-59.
49. Rahoff V. Harnessing electric and magnetic fields for healing and health. *Science News* 1999;156:316-26. En: [http:// www.sciencenews.org/ sn arc99/ 11 13 99/ bob2.htm](http://www.sciencenews.org/snarc99/111399/bob2.htm)
50. Null G. Biomagnetic healing. En: [http:// www.garynull.com/ Docu- ments/ magnets.htm](http://www.garynull.com/Documents/magnets.htm)
51. Rubik B, Beker FO, Flower RG, Hazlewood CF, Liboff AR, Walleczek J. Bioelectromagnetics applications in medicine. *Nitt*. En: [http:// niehs.nih.gov/ emfrapid/ html/ Symposium3/ Tissue Heal.html](http://niehs.nih.gov/emfrapid/html/Symposium3/TissueHeal.html)
52. Guillén García P, Madroñero de la Cal A. Enhancement of bone healing by an exogenous magnetic field and the magnetic vaccine. *J Biomed Eng* 1985;7:157-60.
53. Pastor-Gómez J. Mecánica cuántica y cerebro: una revisión crítica. *Rev Neurol* 2002;35:87-94.
54. Zohar D. La conciencia cuántica. Barcelona: Plaza y Janés, 1990.
55. Lente FD. Cases of ununited fractures treated by electricity. *NY J Med* 1850;5:317-9.
56. Hawtorne E. On the causes and treatment of pseudoarthrosis and specially that form of it sometimes called supernumerary joints. *Am J Med* 1841;1:121-56.
57. Fukada E, Yasuda I. On the piezo-electric effect in bone. *J Phys Soc Japan* 1957;12:11-58.
58. Bassett CAL, Becker FO. Generation of electric potentials by bone in response to mechanical stress. *Science* 1962;137:1063-4.
59. Bassett CAL. Electrical effects in bone. *Sci Am* 1965;213:18-28.
60. Bassett CAL, Pawluk RJ, Becker FO. Effects of electric currents on bone formation in vivo. *Nature* 1964;204:652-3.
61. Bassett CAL, Pawluk RJ, Pillar AA. *Science* 1974;184:575-7.
62. Bassett CAL, Pawluk RJ, Pillar AA. Acceleration of fracture repair by electromagnetic field. A surgical non invasive method. *Ann NY Acad Sci* 1974;236:242-62.
63. Bassett CAL, Mitchell SN, Gaston SR. Treatment of ununited tibial diaphyseal fractures with pulsing electromagnetic fields. *J Bone Joint Surg* 1981;63:511-23.
64. Bassett CAL, Pawluk RJ. Non invasive methods for stimulating osteogenesis. *J Biomed Mater Res* 1975;9:371-4.
65. Sharrard WJW, Sutcliffe ML, Robson MJ, Maceachern AG. The treatment of fibrous nonunions of fractures by pulsing electromagnetic stimulations. *Bone Joint Surg* 1982;64:189-98.
66. Rubin CT, McLeod KJ, Lanyon LE. Prevention of osteoporosis by pulsed electromagnetic fields. *Bone Joint Surg* 1989;71:411-7.
67. McLeod KJ, Rubin CT. Frequency specific modulation of bone adaptation by induced electric fields. *J Theor Biol* 1990;145:385-96.
68. McLeod KJ, Rubin CT. The effect of low-frequency electrical fields on osteogenesis. *Bone Joint Surg* 1992;74:920-9.
69. Watson J, Downes EM. The application of pulsed fields to the stimulation of bone healing in humans. *Jap J Apply Phys* 1978;17:215-8.
70. De Haas WG, Lazarovici MA, Morrison DM. The effect of low frequency magnetic fields on the healing of the osteotomized rabbit radius. *Clin Orthop* 1979;145:245-51.
71. Heckman JD, Ingram AJ, Lloyd FD, Luck JV, Mayer PW. Nonunion treatment with pulsed electromagnetic fields. *Clin Orthop* 1981;161:58-66.
72. Lynch A F, MacAuley P. Treatment of bone nonunion by electromagnetic therapy. *IJMS* 1985;154:153-5.
73. Libboff AR. Electric field ion cyclotron resonance. *Bioelectromagnetics* 1997;18:85-7.
74. Liboff AR, McLeod BR. Kinetic of channelized membrane ions in magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 1997;19:39-51.
75. Steiner UE, Ulrich T. Magnetic effects in chemical kinetics and related phenomena. *Chem Rev* 1989;89:51-147.
76. Meskens M, Stuyck J, Muller JC. Treatment of delayed union and non union of the tibia by pulsed electromagnetic fields. A retrospective follow up. *Bull Hosp Jt Dis* 1988;48:170-5.
77. Hinsenkamp M, Ryaby J, Burny F. Treatment of nonunion by pulsing electromagnetic field: european multicenter study of 308 cases. *Reconstr Surg Traumatol* 1985;19:147-53.

78. De Haas W G, Beaupre A, Cameron H, English E. The Canadian experience with pulsed electromagnetic fields in the treatment of ununited tibial fractures. *Clin Orthop* 1986;208:50-5.
79. Fredman LS. Pulsating electromagnetic fields in the treatment of delayed and nonunion of fractures: results from a district general hospital. *Injury* 1985;16:315-23.
80. Stein GA, Anzel SH. A review of delayed union of open tibia fractures treated with external fixation and pulsing electromagnetic fields. *Orthopaedics* 1984;7:428-36.
81. Krempein JF, Silver FA. External electromagnetic fields in the treatment of non-union bones. A three year experience in private practice. *Orthop Rev* 1981;10:33-9.
82. Pandoll UG. Elektromagnetische Felder bei der Behandlung der Osteoporose. *Therapeuticon* 1992;6:144-50.
83. Nagai M, Ota M. Pulsating electromagnetic field stimulates mRNA expression of bone morphogenetic protein-2 and -4. *J Dent Res* 1994;73:1601-5.
84. Bodamyali T, Bhatt B, Hughes FJ, Winrow VR, Kanczler JM, Simon B, et al. Pulsed electromagnetic fields induce osteogenesis and unregulate bone morphogenetic protein-2 and -4 mRNA in rat osteoblast in vivo. *Trans Orthop Res Soc* 1996;21:204-9.
85. Zhuang H, Wang W, Seldes FM, Tahernia AD, Fan H, Brighton CT. Electrical stimulation induces the level of FGF-B1 mRNA in osteoblastic cells by a mechanism involving calcium/calmodulin pathway. *Biochem Biophys Res Comm* 1997;237:225-9.
86. Aaron FK, Ciombor D, Jones AR. Bone induction by decalcified bone matrix and mRNA of TGF β and IGF-1 are increased by ELF field stimulation. *Trans Orthop Res Soc* 1997;22:548-54.
87. Blackman CF, Benane SG, Rabinowitz JR, House DE, Joines WT. A role for the magnetic field in the radiation-induced efflux of calcium ions from brain tissue in vitro. *Bioelectromagnetics* 1985;6:327-37.
88. Bassett CAL. Fundamental and practical aspects of therapeutic uses of pulsed electromagnetic fields. *Crit Rev Biomed Eng* 1989;17:451-529.
89. Bassett CA, Mitchell SN, Gaston SR. Pulsing electromagnetic field treatment in ununited fractures and failed arthrodeses. *JAMA* 1982;247:623-8.
90. Bassett CA. Beneficial effects of electromagnetic fields. *J Cell Biochem* 1993;51:387-93.
91. Ulashchik V. Theoretical and practical aspects of general magnetotherapy. *Voprasy Kurortologii, Fizioterapii i Lechebnoi Fizicheskoj Kultury* 2001;5:3-8.
92. Kovalchuck VI, et al. Use of extremely low frequency magnetic fields in clinical practice. *Fzicheskaia Meditsina* 1994;4:87-92.
93. Zaslavsky A, Markarov GS. A low frequency impulse apparatus for physical therapy «Infita». *Med Tehk* 1994;5:39-41.
94. Jerabek J. Pulsed magnetotherapy in Czechoslovakia. A review. *Rev Environ Health* 1994;10:127-34.