

Utilización terapéutica de los campos magnéticos. I: Fundamentos del biomagnetismo

Therapeutic utilisation of magnetic fields. I: Principles of the biomagnetism

Investigador Científico
CSIC, Madrid

Madroñero de la Cal A.

RESUMEN

Se presenta una doble visión de la utilización de los campos magnéticos en aplicaciones clínicas. Se muestra primero una perspectiva histórica, de forma que aparece la relación entre los cada vez mejores resultados que la utilización de estas técnicas permitía, y el incesante perfeccionamiento de la doctrina del biomagnetismo.

Ello permite ver cómo se han ido encajando los distintos modelos que componen el conocimiento de los efectos de los campos magnéticos sobre las diferentes funciones y órganos que constituyen la anatomía humana. Los modelos de la activación de los iones por el campo magnético, la absorción de energía del campo según un modelo ciclotrónico, primero, y después su buena concordancia con el proceso de la resonancia electrónica paramagnética, permiten establecer que los distintos fenómenos bioelectromagnéticos son realmente facetas interrelacionadas del proceso de interacción.

Puede verse también que el desarrollo de estas técnicas ha sido muy desigual si comparamos la evolución de estas técnicas terapéuticas en los países de nuestro entorno occidental con lo que se desarrollaba en el entorno de los países del área liderada por la extinta Unión Soviética. En nuestro entorno próximo se usaban inicialmente como parte de la electroterapia y en problemas de reparación ósea, mientras que en los países del Este, los campos magnéticos se utilizaban principalmente en problemas más cotidianos de la medicina interna y, sobre todo, se aplicaba el campo magnético simultáneamente con otra forma de energía. Por ello en su literatura técnica se mencionaban términos como magnetoláser, magnetoiontoforesis, etc.

Palabras clave: *Biomagnetismo clínico, efectos biológicos, campos electromagnéticos pulsantes (CEMP), magnetoterapia, magnetosteogenia, imanterapia.*

Madroñero de la Cal A
Utilización terapéutica de los campos magnéticos.
I: Fundamentos del biomagnetismo
Patología del Aparato Locomotor, 2004; 2 (1): 22-37

ABSTRACT

A double vision of the utilisation of magnetic fields in clinical applications is presented. A historical perspective is shown first, that outlines the relation between the increasingly better results due to the utilisation of these techniques and the continuous improvement of the knowledge in biomagnetism.

It is possible to see a good agreement among the different models that make up the principles of the effects of the magnetic fields on the different functions and organs that constitute the human anatomy and physiology. The activation of the ions for the magnetic field, as a model for absorption of energy of the field according to a cyclotron process, first, and second the accordance of such process with the phenomenon known as paramagnetic electronic resonance, allow to establish that the different bioelectromagnetical phenomena really are related facets of the interaction process.

It is also possible to see that the development of these techniques has been very dissimilar if we compare their evolution in the countries of our western environment with that took place in the countries of the area led by the former Soviet Union. In our next environment the biomagnetism was initially used as a part of the electrotherapy and in osseous tissue repair. In the Eastern countries, it was mainly used for current problems of the internal medicine, and besides this, the magnetic field was applied simultaneously with other physical medicine techniques. In the technical literature it is frequent to find as habitual concepts, terms like magnetolaser, magnetoiontophoresis, etc.

Key words: *Clinical biomagnetics, magnetobiological effects, pulsed electromagnetic fields (PEMF), magnetotherapy, magnetotherapy.*

Madroñero de la Cal A
Therapeutic utilisation of magnetic fields.
I: Principles of the biomagnetism
Patología del Aparato Locomotor, 2004; 2 (1): 22-37

Correspondencia:

CENIM
Avda. Gregorio del Amo, 8
28040 Madrid
E-mail: inmac09@cenim.csic.es

INTRODUCCIÓN

La motivación del presente trabajo es presentar una guía, tan simple y rápida como sea posible, que permita obtener con gran comodidad y rapidez una información fiable y completa, a partir de las publicaciones científicas fácilmente accesibles, sobre lo que se ha publicado en referencia a la aplicación de los campos magnéticos en cada área clínica concreta.

Ello va encaminado, principalmente, a que personas sin una importante información técnica en el campo del biomagnetismo puedan escoger con buen criterio entre la amplia gama de campos que los equipos comerciales pueden suministrar. Usualmente, el fabricante de los equipos que se adquieren para las clínicas da unas indicaciones excesivamente simples, a fin de no comprometerse aconsejando dosis no óptimas. De este modo, el terapeuta se ve casi siempre en la perplejidad de que si compara las normas de uso de unos equipos con otros, advertirá, sin duda, que no hay unanimidad en las características del campo magnético que se aconseja para cada patología a tratar. Y en cuanto a los pequeños equipos para autotratamiento que se adquieren, por ejemplo, a través de anuncios en Internet, la situación es peor, pues parece que la única emisión de campo que ese preciso equipo procura, en opinión de su fabricante, actúa como curalotodo. Lo que equivale a decir que en la práctica aporta poco más que un efecto placebo.

Otro tanto podría decirse de los imanes permanentes que la propaganda etiqueta como «para uso terapéutico». Nadie explica por qué un imán más potente cura más que otro menos potente, y si realmente un imán muy potente puede resultar nocivo en alguna circunstancia. No se informa a partir de qué valor del campo un imán es terapéutico. No se dice en qué se diferencia un imán «terapéutico» de un imán «industrial», aparte de en el precio.

Por otra parte, si acudimos al alud de información que nos pueden suministrar las bases informáticas de documentación científica de calidad contrastada, se puede obtener una sensación de caos. Por ejemplo, las frecuencias de la red a las que profusos estudios acusan de originar cáncer en la población, resultan curativos en otros trabajos.

Por ejemplo, en el mismo NIH (National Institute of Health) americano hay comités que nor-

malizan las aplicaciones terapéuticas de los campos, mientras que otros tratan de recoger los resultados experimentales como base para propugnar la creación de normativas nacionales destinadas a imponer que el ambiente en el que viven los ciudadanos esté limpio de interferencias electromagnéticas indeseables.

La confusión, cuando se intenta entender el fenómeno desde la lógica perspectiva del conocimiento de la interacción campo-tejido obtenido sobre la base de resultados de experimentación animal, es inevitable. Se debe probablemente a que el acervo científico se ha establecido observando indistintamente la respuesta de una célula viva en animal sano, extrapolando casi directamente al ser humano, con un amplio espectro de patologías.

Ello equivaldría, haciendo un símil con la ingeniería de los circuitos electrónicos, a pensar que podemos saber **todo** lo que hace un transistor viendo su relación salida/entrada en un circuito. Lo real es que el transistor mostrará una relación salida/entrada según el circuito donde vaya montado, y que le inducirá a trabajar como amplificador, como elemento de corte, etc. Del mismo modo no es fácil pensar que la reacción de una célula por la exposición al campo sea casi independiente de que esa célula esté implementada en un músculo de rata o en un músculo humano. Así pues, conviene informarse de resultados de estudios llevados a cabo en clínicas, con valoración estadística, y que no estén costeados por ningún fabricante de equipos para electromedicina.

En lo que sigue vamos a exponer el esquema de lo que se conoce como los mecanismos de interacción del campo magnético sobre los organismos. Además, aportaremos un amplio conjunto, creemos que muy representativo, de citas bibliográficas de artículos publicados en revistas de la máxima calidad científica, de *peer papers*. Creemos que la breve referencia que de cada uno se hace, podrá permitir escoger un manejo de trabajos básicos, suficientes para el campo de aplicación completo que interese a cada lector.

Aconsejamos recurrir al estudio completo de las publicaciones originales, porque la simple lectura del resumen o reseña suele ser insuficiente. Por otro lado, la confusión es más que probable. Por ejemplo, tomando como muestra muy concreta la aplicación de los PEMF (Pulsed Electromagnetic Fields) para la reparación de cartílago, podemos encontrarnos con un trabajo en el que

se diga que el campo magnético no genera cartílago mientras que otros investigadores describen cómo la exposición a un campo estimula, de forma muy similar o incluso «casi igual», la formación de un perfecto cartílago. Aparentemente contradictorio, pero el nudo se desata en cuanto recabamos detalles finos de, por ejemplo, el campo que en cada caso se ha usado. Con excesiva frecuencia, en el texto del artículo queda reflejado solamente el que ha usado tal o cual aparato. Sin más detalles adicionales.

En lo que sigue, al resumir una amplia colección de trabajos que representan el fruto de los estudios de las diversas escuelas, hemos creído oportuno valorar positivamente el estilo de la escuela de los países del Este de Europa, cuyos trabajos, no se sabe bien por qué, no tuvieron la debida resonancia. Y en consecuencia, puede advertirse que, dentro de la aplicación clínica de los campos magnéticos, casi hay especialidades «occidentales» y especialidades del área «ex-soviética».

Entendemos que por esto puede ser de interés el exponer resultados por áreas terapéuticas, y no agruparlos atendiendo a la escuela o país en donde fueron publicados. Se intenta evitar así la ausencia de algunos segmentos de información en revisiones publicadas por muy significativas instituciones occidentales. Quizás las más conocidas sean las revisiones ampliamente difundidas a través de Internet, basadas generalmente en informes emitidos por el NIH de Estados Unidos. Pueden conseguirse, por ejemplo, en:

- a) Rahoff V. Harnessing electric and magnetic fields for healing and health. *Science News* 1999; 156 (29): 316-326. En: http://www.sciencenews.org/sn_arc99/11_13_99/bob2.htm
- b) Null G. Biomagnetic healing. En: <http://www.garynull.com/Documents/magnets.htm>

HISTORIA DEL USO CLÍNICO DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS

Hasta el siglo XIX no se puede hablar de verdadero comienzo de la utilización del electromagnetismo en Medicina; Lente (1) utiliza la corriente eléctrica continua (*direct current or galvanic current*) para resolver fracturas no unidas y

Hawtorne (2) utiliza imanes para resolver *super-numerary joints*. Pero ambos valiosos intentos se quedan sin encontrar la resonancia que merecían, como corresponde a los que tanto se adelantaban a su tiempo.

Es en la segunda mitad del pasado siglo XX cuando las instrumentaciones ya disponibles permiten la realización de estudios sobre efectos de los campos magnéticos en animales y plantas, naciendo así el biomagnetismo, como cuerpo de doctrina científica (3, 4).

Estaba recién terminada la Segunda Guerra Mundial cuando Fukada y Yasuda (5) publican un trabajo, que ha pasado a ser emblemático, y que describe «el efecto piezoeléctrico del hueso humano». Se refiere al tejido óseo seco, no *in vivo*.

Aparentemente parecía que el olvido iba a cubrir esta chispa de luz, como ya había sucedido el siglo anterior con el trabajo de Lente ya mencionado (1). Pero 20 años más tarde de la publicación de Fukada y Yasuda (5), dos escuelas americanas, la del Professor Andrew Bassett de la Universidad de Columbia, y la de los doctores Zacharias Friedenber y Carl Brighton, del Servicio Médico de la USA Navy, retomaron la antorcha de Fukada y Yasuda, y pusieron para siempre en marcha lo que es uno de los grandes campos de la actual Medicina.

El profesor Bassett realizó unos primeros estudios sobre el metabolismo óseo (6), en donde comprobaba que los esfuerzos mecánicos en el tejido, *in vivo*, daban lugar a un incremento de oxígeno, justificando así lo saludable que para el buen estado de las piezas óseas supone el ejercicio de la marcha. Posteriormente comprobaba que los esfuerzos mecánicos se traducían en la aparición de potenciales eléctricos (7, 8). Más tarde se comprobaba (9) 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, permitiendo esto establecer la hipótesis de que el crecimiento selectivo de tejido óseo, que se conoce por remodelación, está conducido por los impulsos eléctricos endógenos. Esto justifica claramente la habitual práctica ortopédica de reducir al mínimo el período de inmovilización, una vez fijada la fractura, para permitir la movilización lo antes posible.

En consecuencia, lo lógico parecía ser el imponer artificialmente unos impulsos eléctricos equivalentes a la marcha, para resolver no uniones y 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 corriente (10). Con ello nació la técnica no invasiva conocida como acoplamiento inductivo (*inductive coupling*) y que permitía acelerar el proceso de reparación ósea (11), resolviendo incluso no uniones en los grandes huesos del aparato locomotor (12, 13).

El grupo de la Navy comenzó publicando una medida empírica del potencial bioeléctrico que presenta una tibia de conejo *in vivo*. Dicho potencial es más pronunciado en las diáfisis, y más moderado en la epífisis, lo que se corresponde con el nivel de actividad metabólica de las distintas zonas de una pieza ósea (14). Si se realizaba una rotura experimental en la epífisis se daba lugar a la aparición instantánea de un pico de potencial bioeléctrico endógeno. Este pico es la respuesta biológica con la que una pieza ósea pone en marcha su proceso de reparación, pues significa la formación de un foco de atracción de iones de calcio, justo en el punto en el que la aportación del calcio es más necesaria para la constitución de tejido óseo.

La consecuencia inmediata fue el desarrollo de la técnica invasiva (15, 16) consistente en colocar unos pequeños electrodos en ambos bordes de una fractura, de forma que entre ambos bordes imponían una corriente continua (corriente galvánica o *direct current*) mediante una pila eléctrica que aplicaba un potencial a ambos bordes de la fractura a través de los electrodos metálicos allí insertados. La técnica fue desarrollada con posterioridad (17, 18), después de haber explicado de que los potenciales eléctricos controlan la tensión de oxígeno (19), que es el responsable del metabolismo del calcio. La generación de los biopotenciales eléctricos quedaba justificada en base a la diferente composición iónica (20) que presentan las sucesivas capas de tejido que constituyen una pieza ósea.

A fin de explicar la generación de potenciales

eléctricos por efecto de la marcha, dan lugar a una generalización de la pseudopiezoelectricidad de Fukada y Yasuda (5), conocida como modelo del potencial de arrastre (*streaming potential*) (21, 22). Ello consiste en un proceso por el que bolsas de líquido iónico ofrecen una resistencia viscosa a cambiar rápidamente de forma, dando una apariencia reológica al proceso de deformación mecánica de una pieza ósea.

Teniendo en cuenta que son los potenciales eléctricos los que ponen en marcha los procesos osteogénicos cuya finalidad es procurar una reparación ósea, este grupo de investigadores procedió a colocar la zona anatómica con el fallo de consolidación a tratar entre las dos placas de un condensador electrostático, de modo que el potencial exógeno del capacitor o condensador suplía la insuficiencia del potencial bioeléctrico (23). Como técnica no invasiva clínica que era, recibió el nombre de acoplamiento capacitivo (*capacitive coupling*) (24, 25), para ser diferenciada de la aplicación de campos magnéticos, que recibiría la denominación de acoplamiento inductivo (*inductive coupling*). El término acoplamiento pretende recordar la similitud con lo que sucede, por ejemplo, en un transformador eléctrico. Allí decimos que el devanado primario está acoplado con el devanado secundario mediante la inducción electromagnética. Y el efecto es que cuando aplicamos energía eléctrica en el primario se transfiere energía al secundario, sin que ambos estén conexiados. Del mismo modo la corriente que recorre las espiras induce con su campo la aparición de corriente en el tejido óseo.

El último paso dado por este grupo fue el poner operativa esta técnica del acoplamiento inductivo. En los inicios de estos desarrollos se procuraba que el campo magnético exógeno indujese unos impulsos de corriente en el tejido óseo similares a los que habían demostrado su eficacia como impulsos eléctricos (26) y como impulsos naturalmente producidos durante la marcha. Se trataba de aprovechar la comodidad que suponía el uso de una técnica no invasiva.

Como más tarde veremos, en la actualidad se diseñan los campos terapéuticos teniendo en cuenta los modelos físicos de la resonancia ciclotrónica y la resonancia electrónica paramagnética. Y podría decirse que es equivalente a cuando el hombre dejó de intentar reproducir en los aviones el vuelo de los pájaros, pasando a diseñar en base a la mecánica de fluidos. Es decir, es la

madurez en el tema.

El conocimiento no profundo de cómo influyen los parámetros del campo magnético que se aplica mediante la técnica del acoplamiento inductivo hizo que, en los primeros años, no se pudiese proceder a una optimización del campo magnético *versus* el tipo de problema a ser resuelto. Ello originó un gran número de descripciones de campos magnéticos diferentes que son producidos por equipos electrónicos específicos para cada caso. Así por ejemplo, pueden ser citados los trabajos de Sharrard (27), Rubin (28), McLeod (29, 30), Watson (31), de Haas (32), de Heckman (33) y de Lynch (34). El propósito era, ya que por aquel entonces no se podían diseñar los campos magnéticos con sus parámetros optimizados, conseguir una optimización empírica de los campos, sobre la base de ir seleccionando los tipos de campos con mejores resultados clínicos en ensayos comparativos realizados con grandes grupos de pacientes.

En el progreso en cuanto al nivel de conocimiento del mecanismo de la interacción campo magnético-tejido vivo es donde realmente ha estado siempre la clave de todas las mejoras en este tema que se han venido registrando en años posteriores.

Se publicó, en primer lugar, el modelo de interacción por actuación del campo magnético sobre los iones en relación con la membrana celular (35), que no es sino un modelo utilizado previamente para estudios de magnetobiología en trabajos anteriores (36).

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⁺, estando su cara intracelular tapizada de iones proteínicos A⁻. En la zona estable citoplasmática abundan aniones A⁻ acomplejados por iones K⁺, resultando un conjunto neutro y estable.

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 ión 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.

Añadiendo a este modelo el concepto de trayectoria ciclotrónica (trayectoria en espiral que un electrón o partícula cargada sigue en el acelerador de partículas que la física designa como «ciclotron») pudo Libboff (37, 38) establecer un modelo de resonancia, dependiente de la frecuencia, entre el campo magnético y el medio celular.

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 $f = (1/2\pi) (B) (q/m)$. Es decir, depende de la relación carga/masa de la partícula. De acuerdo con ello se pueden hacer unos cálculos sencillos, cuyos resultados se exponen en la Tabla I.

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, las frecuencias de baja frecuencia, de tan frecuente uso en clínica.

TABLA I. Frecuencias de resonancia ciclotrónica de los distintos iones

Especie iónica	q/m (unidades e.u.)	Frecuencia de resonancia ciclotrónica (hz)
H ⁺	0,99	760
Li ⁺	0,14	110
Mg ⁺	0,082	61,5
Ca ⁺⁺	0,050	38,7
Na ⁺	0,043	33,3
Fe ⁺⁺	0,036	27,9
Zn ⁺⁺	0,031	23,4
K ⁺	0,026	19,6
Sr ⁺⁺	0,023	17,3
Rb ⁺⁺	0,012	9,0

Es importante ver que los ejemplos considerados en la tabla anterior corresponden a iones «limpios», libres de cualquier adherencia hidratadora, y conviene considerar que dada la naturaleza del medio intracelular, estos iones «limpios» deben resultar raros, casi anecdóticos.

Lo lógico es realizar los cálculos de la tabla con iones hidratados, lo que supone que, al haberlos dotados de más masa, su relación carga/masa es menor, lo que se traduce en una reducción de la frecuencia de giro para un campo magnético dado. Por ejemplo, la frecuencia de un ión Na^+ , por el hecho de pasar a ser considerada hidratada, pasa de tener una frecuencia de giro de 33,3 hz, a corresponderle 18,6 hz, considerando que el campo es de 0,5 gauss.

A pesar de esto, no es desechable la circunstancia de que los iones puedan desempeñar su papel en correspondencia con su estado de «limpios» o «desnudos» en ciertos compartimentos de la célula que suponen transporte de carga en el núcleo o en la mitocondria así como en las membranas del plasma. Por ello cada valor de la frecuencia de la tabla debería ser desdoblado en no hidratado, monohidratado e hidratado-doble.

Este desdoblarse las frecuencias de resonancia en armónicos se aproxima a la conclusión de los experimentos de Blackman *et al.* (39), realizadas con total independencia de los trabajos de Liboff. Blackman estudió el papel de la interacción entre el campo magnético y la salida hacia el exterior de iones de calcio en células de cerebro de pollo cultivadas *in vitro*. Sus experimentos confirmaron que la salida de calcio dependía fuertemente de la intensidad del campo magnético terrestre local, observando que la máxima salida de iones Ca^{2+} se producía con la conjunción del campo magnético terrestre y un campo exógeno alterno de 0,38 gauss de intensidad y 15 hz de frecuencia. Cuando estos números se duplican a 0,76 y 30 hz respectivamente, se vuelve a maximizar el eflujo de Ca^{2+} .

Estos resultados sugieren la existencia de una serie de «ventanas» de interacción campo-tejido, que son congruentes con el campo magnético continuo natural de la Tierra B_0 , de frecuencias $f_n = (2n + 1) k B_0$

Conviene destacar que el modelo de Liboff y el de Blackman coinciden en el valor de las frecuencias básicas de resonancias de Ca^{2+} . Pero la ventaja a favor del modelo de Blackman estriba en que en este segundo caso se prevén la exis-

tencia de armónicos, lo que coincide con los resultados experimentales.

Siguiendo la línea de mantener la relación carga/masa se explica la acción de los campos sobre esas grandes moléculas conocidas como factores de crecimiento. La literatura técnica acerca de la regulación de la osteogénesis mediante la aplicación de campos magnéticos que actúan sobre los factores de crecimiento es muy abundante (40-43).

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 comentábamos anteriormente a partir de los resultados de Blackman (39).

Evaluaciones estadísticas de resultados de tratamiento en grandes grupos de pacientes han sido publicados por Meskens (44), Hinsemkamp (45), de Haas (46), Freedman (47), Stein (48) y Krempen (49) y Randoll (50) para el caso concreto de tratamientos de osteoporosis. No es fácil comparar unos con otros ya que no solamente 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.

Como final vamos a hacer una breve mención de artículos que eran revisiones del estado del arte. A finales de los años ochenta se daba por mayor de edad a la técnica (51) que había sido aprobada por la FDA (Federal Drug Administration) en 1979 (52), extendiéndose su aplicación a otros campos de la Medicina (53). En los países del entorno de la Unión Soviética se focalizaron los esfuerzos en simultanear los CMs con otra forma de energía (láser, ultrasonido, etc.) y en aplicarlos a un amplio espectro de tratamientos. Así por ejemplo, muestran la utilización de los modelos biofísicos (54). Los equipos productores de campos que los investigadores soviéticos describen producen campos muy simples (56). La experiencia en la República Checa está ampliamente recogida en (57).

MECANISMOS DE INTERACCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO CON EL ORGANISMO HUMANO

Los modelos ya comentados, el ciclotrónico y el de traspaso de la membrana celular por iones

ayudados por la fuerza de Lorentz, fueron los primeros intentos de establecer una interrelación entre el campo y los organismos, pero como se intentan explicar todos los hechos experimentales, fue necesario incrementar la complejidad de los modelos. Lo primero que había que entender era dónde radicaba la terapia, en el campo magnético o en la corriente eléctrica que el campo magnético creaba y que había demostrado capacidad biorreparadora. Afortunadamente estas tres teorías han confluído en el modelo IPR (*Ion Paramagnetic Resonance*) que explica el efecto de los campos alternos. El efecto del campo continuo puede explicarse como un caso de magnetociquímica.

Estas teorías, desarrolladas pensando en iones, han sido después extendidas a los factores de crecimiento, y han alcanzado con ello la capacidad de explicarnos razonablemente la interacción. Para explicar el efecto de campos extremadamente débiles, además del modelo IPR está el modelo de Jacobson (58).

Además estuvo vigente algún tiempo el modelo consistente en suponer que eran las corrientes eléctricas que el campo generaba las que ponían en marcha los mecanismos reparadores (59), pero esta teoría fue desestimada al comprobarse que campos magnéticos de muy baja intensidad, del orden de picoteslas y por ello incapaces de producir corriente alguna, manifestaban una clara capacidad curativa.

El modelo IPR se debe a Lednev y Blackman (60, 61), y explicaba la activación de iones a partir de la existencia de un campo continuo y un campo alterno superpuestos, con este último sintonizado a una frecuencia que depende del ión. Se puede decir, para describirlo muy brevemente, que es un fenómeno muy similar a lo que acontece cada vez que se trabaja haciendo una imagen con la resonancia magnética nuclear, sólo que en este caso se trabaja en resonancia con el ión H^+ y en el caso del IPR se trabaja con el ión Ca^{2+} . Se basa en que cualquier ión tiene un momento magnético y, por lo tanto, es resonable con el campo magnético. Solamente se necesita que haya un campo continuo que oriente los momentos de los átomos, y un campo alterno, de frecuencia sintonizada con un determinado tipo de átomos, que los haga entrar en resonancia.

El modelo IPR ha permitido entender muchos detalles biológicos de la interacción campo-organismo y, sobre todo, de la interacción campo-ner-

vios siguiendo los trabajos de la escuela de Blackman (62-66).

Blackman y cols. (62) dan cuenta de una investigación con cultivo de cerebro de pollo, al que someten a un campo continuo y a otro alterno simultáneos, con los que producen una emisión de iones de calcio. Esta emisión se produce cuando los campos continuo y alterno son perpendiculares, pero no cuando son paralelos.

Blackman y cols. (63) dan cuenta de experimentos realizados con cultivos de células PC-12, en un caldo con factor de crecimiento que determina el crecimiento de neuritas. El objeto era determinar si el efecto sobre la formación de neuritas se debía al propio campo magnético o era por el campo eléctrico que en el entorno de las células se forma. Resultó que el factor activo era el campo magnético.

Desde siempre es conocido el efecto de los campos magnéticos sobre los átomos e iones. A principios del siglo xx se le daba al holandés Lorentz un premio Nobel por explicar el porqué un campo magnético desdoblaba las rayas de los espectros. Bajo esa óptica, Blackman (64) desarrolló un modelo IPR según el cual la resonancia se produce cuando en el seno de un campo magnético constante se añade un campo alterno que actúa sobre los iones muy en función de su masa, algo parecido en cierto modo a la resonancia magnética nuclear.

Tomaron como parámetro la NO (*neurite outgrowth*) de las neuritas de células PC-12. La primera serie fueron mediciones del NO en células expuestas en un campo alterno de 45 Hz con intensidad que se escogía entre 77 y 468 miligauss, mientras que el campo continuo tenía una intensidad de 366 mgauss. En el segundo caso, el campo alterno iba de 7,9 a 21 con 45 Hz, mientras que el continuo iba a 20 mgauss. Finalmente, se usaron de 78 a 181 mgauss con 25 Hz y un continuo de 203 mgauss.

En todos los casos se observó que el máximo de NO se producía en las condiciones que preveía el modelo IPR.

Blackman y cols. (65) dan cuenta de la realización de experimentos similares pero contrarios a los descritos por ellos (63). Esta vez se habían colocado los campos magnéticos continuo y alterno paralelos, de forma que se podía conseguir la extinción. Se observó que las frecuencias con las que se conseguía seguían una regla de armónicos, de acuerdo con las predicciones del modelo IPR.

Blackman y cols. (66) muestran los resultados de múltiples experimentos con los que se barrían un amplio margen de frecuencias, de intensidades de campo magnético y de diferencia entre poner los campos alterno y continuo perpendiculares. Los resultados no fueron totalmente fáciles de explicar, pues si bien en la mayoría de los casos se cumplen con rigor las previsiones del modelo IPR, hay frecuencias para las que deja de cumplirse, sobre todo en lo que se refiere a la perpendicularidad/paralelismo de los campos alterno y continuo.

Como resumen de la aportación que supone el modelo IPR es, por una parte, el poner en escena la posibilidad del juego con las diferencias de orientación entre los campos magnéticos continuo y alterno. En los primeros años de esta técnica, las corrientes y frecuencias se mezclaban en un único devanado, por lo que obligadamente sucedía que todas las componentes de campo estaban integradas en la perpendicular a las espiras.

La otra gran aportación es el tema de los armónicos. En el modelo primitivo de la resonancia ciclotrónica, para un ión salía una frecuencia, y sólo una, de resonancia. Lo curioso es que mediante el transcurso de procesos matemáticos verdaderamente muy distintos, ambas vías, la resonancia ciclotrónica y el modelo IPR, llegan a un idéntico valor para el cálculo de la frecuencia fundamental de resonancia del calcio. La gran ventaja del modelo IPR es que nos quita la dicotomía mental que durante pasados años suponía el trabajar con el modelo ciclotrónico de una sola frecuencia y comprobar a través de la bibliografía que distintas frecuencias producían los mismos benéficos efectos. El lector a veces caía en la tentación subconsciente de pensar que todo el biomagnetismo tomaba la apariencia de un cierto efecto placebo.

La continuación de este modelo fue la aplicación al tema de la sinergia de los campos con los factores de crecimiento, en el refuerzo de su acción reparadora. Lo cual era lógico, porque si ambos tratamientos son técnicas reparadoras, lo esperable es que tengan un nexo común. Los vamos a comentar siguiendo el orden factor de crecimiento del nervio NGF (*nerve growth factor*), proteínas morfogenéticas del hueso BMP (*bone morphogenic proteins*) y factor de crecimiento fibroblástico FGF (*fibroblast growth factor*).

Con células nerviosas de la glándula adrenal

de ratas, Drucker-Colin y cols. (67) comprobaron que la exposición a campos magnéticos producía en las células cromofínicas el mismo tipo de evolución que el cultivo en un medio al que se había incorporado un NGF del tipo de la noradrenalina.

En células de ganglio dorsal de embriones de pollo (68) se había comprobado anteriormente en un cultivo con 50/100 ng/ml de NGF, que sólo con campo de baja frecuencia o con NGF por separado, el crecimiento de neuritas era más acusado que el que se producía en células de control. Cuando se simultaneaban ambos factores, el crecimiento era aún más pronunciado.

El nexo entre los efectos del campo magnético y los factores de crecimiento no podía ser otro que el ión Ca^{2+} , que tan importante papel desempeña en las diferenciaciones celulares en las que toma parte el NGF. Se tomaron (69) cultivos de células cromofínicas de glándula adrenal, a las que se sometía a ELF MF (*Extra Low Frequency Magnetic Field*) y/o NGF. Cuando al cultivo de las células se añadía un bloqueante como es la nifedipina (que impide el paso de los iones Ca^{2+}), simultáneamente a la aplicación de los campos, la diferenciación no tenía lugar. Por el contrario, cuando en vez de campos se estimulaba con NGF, el bloqueante no tenía efecto. Además, se observó que durante la exposición a campos, la adición de agonistas incrementaba el porcentaje de células diferenciadas y la longitud de las neuritas crecidas. Esto permite establecer que el mecanismo es el paso de los iones por los canales Ca^{2+} de la membrana celular.

La investigación ha traspasado el estadio de estudios biológicos en cultivos celulares. Longo *et al.* (70) describen los resultados de unos ensayos consistentes en efectuar transecciones en el nervio ciático medio de ratas, y exponerlas a PEMF (*Pulsed Electromagnetic Fields*) durante cuatro horas/día, dejando también animales sin exposición al campo como control. La actividad del NGF fue evaluada en segmentos de 5 mm, proximal y distal, comparándose con un segmento tomado de la pierna en la que no se había producido la transección. La actividad del NGF fue evaluada mediante un ensayo de sensorialidad neuronal en DRG (*Dorsal Root Ganglia*) de pollo.

En los nervios en los que no había habido transección, en zonas distal, proximal y contralateral, se notaba una disminución de la actividad.

En los casos en los que había habido transección, entre las 6 y las 24 horas aparecía un incremento de la actividad NGF en contralateral, pero no en ipsilateral. Esto parece indicar que los PEMF promueven la regeneración nerviosa prolongando la primera etapa en la que decrece el NGF.

El resumen de todos estos conocimientos es que la mejor baza para la actuación clínica es la aplicación del factor de crecimiento, como ya se viene empezando a hacer de forma habitual, pero conjuntándola con un campo de baja frecuencia, o incluso con imanes permanentes.

Algo muy similar podríamos decir de los estudios sobre la BMP. Bodamyali y cols. (71) examinaron el efecto de los PEMF en la osteogénesis *in vitro* durante la formación de nódulos de hueso y sobre la expresión en mRNA de proteínas morfogenéticas 2 y 4 mediante la reacción en cadena de polimerasa por transcripción inversa (RT-PCR) en cultivo de osteoblastos de cráneo humano. Con respecto a células de control se observó que la exposición a PEMF estimulaba la formación de un 39% más de nódulos óseos, con un incremento en longitud del 70%. Este efecto parecía ser proporcional a la duración de la aplicación de PEMF. Simultáneamente produce una transcripción en BMP-2 y 4 mRNA.

Por su parte, Yajima y cols. (72) hicieron un seguimiento de la influencia de los PEMF sobre la expresión genética de la proteína morfogenética ósea BMP-1 en células osteoblastos humanas, a través de la transcripción de la cadena de polimerasa. Las células fueron expuestas de modo continuo durante 1, 6, 12, 24 o 48 horas. El efecto es claramente el incremento de la mRNA, siendo máxima la estimulación para un tiempo de tratamiento de 12 horas. Estos resultados pueden explicar la estimulación que los PEMF hacen en las células osteoblásticas *in vivo*.

Y pasamos, por último, a ocuparnos de la relación entre campos magnéticos y el factor FGF, por su faceta de gran interés debido a su capacidad de regeneración del cartílago.

Liu y cols. (73) estudiaron el efecto de los PEMF sobre la composición y estructura molecular del cartílago proteoglicano en embriones de pollo de 16 días de incubación, a los que se exponía a PEMF tres horas/día durante dos días. En los explantes se observó que no había variación en el contenido en DNA, pero había una elevación en el contenido en GSM (glicosaminoglicano). Los GSM formados bajo PEMF eran indistinguibles de los for-

mados sin campo, en los embriones control. Un examen de embriones etiquetados con sulfato 35S demostraron que los PEMF impedían la degradación de los GSM preexistentes, formándose nuevos GSM. Parece esto establecer que los PEMF no afectan la estructura molecular de los GSM.

Esta capacidad para formar cartílago puede llegar a ser incluso inconveniente, pensando en algún tipo de aplicaciones, como por ejemplo, la unión de piezas de la espina dorsal. Guizzardi y cols. (74) estudiaron en modelo de ratas la influencia de los PEMF en la formación de callo durante la fusión de vértebras, estudiando la evolución de artrodesis postero lateral en la zona lumbar de la columna vertebral. Se procedía a una decortización y retirada del cartílago articular, aplicándose a continuación el campo magnético. Se mantenía un grupo de control sin aplicarles PEMF. Las ratas eran sacrificadas entre cuatro y ocho semanas después, comprobándose que en las sometidas a PEMF la formación del callo comenzaba justo desde el primer momento. Por el contrario, en los animales que no habían sido expuestos a los PEMF, la formación del callo tenía lugar a partir de la octava semana, teniendo el callo una naturaleza mayoritariamente cartilaginosa. Este resultado explica la ausencia de buenos resultados en muchos casos de fusiones de vértebras por procedimientos quirúrgicos convencionales.

Pero no se trata de que los campos tengan una tendencia innata a decantarse por la activación selectiva de tejido óseo o de tejido cartilaginoso. Aarón y cols. (75) llevaron a cabo estudios *in vitro* donde el campo promovía la síntesis de moléculas de la matriz extracelular. Asimismo, *in vivo* estimulaban la osificación endocondral. Es decir, los PEMF estimulan la síntesis del cartílago y la subsecuente calcificación endocondral. Los estudios histomorfométricos mostraban que la maduración de las trabéculas óseas resultaba asimismo estimulada por la aplicación de los PEMF.

Este puede ser el mecanismo que justifica la utilización clínica de los campos magnéticos en problemas de reparación de fracturas y fijación de placas.

Hay más pruebas de que los campos estimulan la formación de un cartílago sin alteraciones. Norton (76) estudió cultivos de condrocitos expuestos a PEMF. En unos casos se aplicaban los PEMF después de un crecimiento sin exposición al campo, mientras que en otro, por exposición

desde el momento inicial, todo el crecimiento tenía lugar bajo campo. Los ensayos del primer caso simulaban una no unión atrófica, y los segundos una no unión hipertrófica. En ambos grupos se midió la influencia del campo aplicado sobre la proliferación y diferenciación celular.

Resultó que los cultivos de crecimiento activado mostraban un rápido crecimiento en la actividad lisozomática, en la producción de hialuronatos y DNA. Aparecía también una disminución del contenido de glicosaminoglicanos. Los PEMF disminuían la síntesis de los glicosaminoglicanos, si bien este aspecto era abolido por la quitotriosa, un inhibidor específico de la lisozima. Otro tipo de inhibidores, como la cicloeximida, no tenían esta capacidad. La conclusión es que los PEMF actúan sobre la lisozima de la matriz, produciendo así un cartílago correcto.

La pista sobre cómo actuar para derivar el efecto de los campos magnéticos hacia la estimulación de hueso o de cartílago nos viene en cuanto examinamos el efecto de sustancias añadidas mientras tiene lugar la exposición. Sakai y cols. (77) estudiaron el efecto de los PEMF sobre la proliferación celular y síntesis de los glicosaminoglicanos (GAG) en una serie de experimentos sobre el crecimiento de cartílago en costillas de conejo y cultivo de células humanas de cartílago articular.

La estimulación era durante cinco días con dos variantes: *a*) exposición continua, y *b*) períodos de aplicación de 12 horas/día con otras 12 de reposo. En el caso *a*) aparecía proliferación celular y síntesis del GAG. En el caso *b*) era más intensa la proliferación celular pero la síntesis de GAG no tenía lugar.

El más eficaz de los agentes de tratamiento en cuanto al incremento de los efectos de los PEMF, era la lidocaína. La conclusión era que el campo más eficaz era el aplicado con intermitencia de 12 horas, y que la estimulación tiene lugar en el núcleo, no a través de la membrana.

Estas ideas pasaron del laboratorio a la tecnología y a la industria y, de hecho, hay patentes (78) en las que se indica cómo un campo PEMF aplicado a una zona en la que se suministró FGF sirve para determinar y estimular la formación de tejido cartilaginoso.

Sin darnos cuenta, hemos pasado de los campos de baja o extremadamente baja frecuencia, a los de frecuencia media o impulsos. Es decir, hemos pasado de la resonancia atómica o mole-

cular, del modelo ciclotrónico o IPR, al metabolismo de las reacciones químicas. Hemos entrado con ello en el ámbito de lo que se designa como magnetoquímica.

La teoría de las reacciones químicas se enmarca, en su concepción clásica, como un choque entre moléculas de reactantes para producir la reordenación de átomos que suponen la formación de productos de reacción. Normalmente, la cinética de la reacción se acelera propiciando estos choques, aumentando su frecuencia, o incrementando la energía cinética de las moléculas reactantes, a fin de que porten la energía suficiente como para que puedan permitirse el gasto de energía que supone la formación de los productos de la reacción.

Por ello el incremento de temperatura es el camino habitual para poner en marcha una reacción, recibiendo esta vía el nombre de termoquímica. Pero también podemos actuar haciendo que los reactantes absorban energía que les llega en forma de energía radiante o de energía en forma de campo. Así nacieron la sonoquímica (estimulación con ultrasonidos) y la láser-química, por ejemplo. Y es evidente que la utilización en fisioterapia del láser y los ultrasonidos no son sino una transferencia de estas posibilidades.

Del mismo modo podríamos hablar de la magnetoquímica, o arte de aprovechar los campos magnéticos para realizar en su seno las reacciones químicas que nos interesen, ahorrando la energía que supone la activación química por calentamiento indiscriminado. La característica fundamental de la magnetoquímica es que funciona más o menos en las moléculas, dependiendo del momento magnético de las moléculas reactantes. Es pues una activación muy selectiva. Una excelente revisión sobre estos temas puede encontrarse en Steiner y Ulrich (79), que acaba diciendo: «En esta revisión hemos intentado mostrar una revisión comprensible adecuada y simplemente estructurada de la visión actual del campo de la magnetocinética química, habiendo intentado dar la misma importancia a los aspectos teóricos y a los resultados experimentales».

La magnetocinética es una herramienta de uso en la ingeniería química, cuyas ventajas quedan recogidas en patentes. Así, por ejemplo, en (80) se describe cómo se puede controlar una reacción química variando la susceptibilidad a la reacción química mediante la aplicación de un **gra-**

diente de campo magnético. Si el gradiente de campo que se aplica es positivo, la reacción resulta acelerada. Si el gradiente que se aplica es negativo la reacción resulta aminorada.

Hay más patentes al respecto. Por ejemplo, Reinpell (81) nos describe cómo se puede influenciar la velocidad de las reacciones químicas de interés para la ingeniería industrial, orientando las moléculas de los reactantes según su momento magnético, mediante campos eléctricos/magnéticos antes de llegar a la reacción o, incluso, ya en la reacción, es decir, magnetizando a los reactantes inmediatamente antes de que lleguen al reactor, o cuando ya están en él. Conviene destacar que al leer este texto de química industrial, parece como si nos acabasen de repetir en un lenguaje ligeramente variado las bases de la «estimulación capacitiva» y «la estimulación inductiva», que veníamos conociendo a través de la literatura sobre biomagnetismo.

Lo primero que hay que entender es que cuando un campo magnético actúa sobre nuestro organismo lo está haciendo sobre un conjunto de sustancias, entre las que el agua es mayoría absoluta. Nos ciega el hecho de que tenemos en nuestro subconsciente intuitivo, por aquello de que el agua es «inodora, incolora e insípida», la suposición/creencia de que, de cara al campo magnético, el agua seguro que es casi un gas noble. Y macroscópicamente, por supuesto, el agua es diamagnética, parece inasequible al efecto de un imán. Pero a nivel del equilibrio entre las «fases» que componen el agua pura, el agua realmente es una sustancia enormemente compleja.

Y así es porque la combinación oxígeno-hidrógeno existe con diversas estructuras moleculares, la de H_2O que corresponde al agua común, la de H_2O_2 que corresponde al peróxido de hidrógeno, y la de trióxido H_2O_3 , que sólo es estable a bajas temperaturas. Y el equilibrio entre estas fases es complejo. Realmente, una proporción de moléculas de agua está desintegrándose e integrándose continuamente, y la relación entre el número de moléculas disociadas y las moléculas intactas, definida como pH, nos dan una medida del grado de acidez o basicidad.

La reacciones de asociación-disgregación (82) son: $H_2O = H^+ + OH^-$, $H_3O^+ + OH^- = 2H_2O$ y $H_9O_4^+ + H_7O_4^- = 8H_2O$. Es decir, el agua es un punto de equilibrio metaestable, límite entre la acidez y la alcalinidad entre iones compuestos de oxígeno e hidrógeno.

Esta forma de ver las cosas nos explica, además, el importante efecto de los campos magnéticos sobre la acidez del medio fisiológico, comprobado porque se traduce en un incremento de la velocidad de corrosión de los implantes metálicos insertados en un ser humano vivo (83).

No debe tomarse esto como un hecho que debería desaconsejar el uso de la magnetoterapia en pacientes con prótesis metálicas insertadas. El enemigo del acortamiento de la vida útil de las prótesis no es la corrosión generalizada, la que origina el campo magnético, sino otros tipos de corrosión localizada, como la tensocorrosión. Por otra parte la velocidad de corrosión propiciada por el campo magnético tardaría muchos años en disolver una prótesis, produciendo entre tanto visibles problemas de metalosis, que servirían de aviso acerca de que algo indeseable está ocurriendo.

La explicación del aumento de la corrosión por la exposición al campo magnético es pues una prueba clara de que la existencia del campo exógeno produce un cambio en el pH, que va a tener, por otro lado, una clara actuación en otros aspectos biológicos.

A partir de este punto, adquieren explicación las palabras de Null (84): «Hay muchas personas con un estado de salud deficiente debido a su mal equilibrado estado acidez/alcalinidad. El estado ácido supone una cierta actividad patológica asociada a menor conductividad eléctrica y una hipoxia (insuficiente nivel de oxígeno). Esta leve acidemia (exceso de acidez en el medio) expulsa fuera de la célula una cierta cantidad de calcio, originando procesos inflamatorios.

Esta acidez se corrige aplicando el polo sur de un imán. Este efecto se produce por el mecanismo de que los vasos sanguíneos introducen y extraen de zonas intensas del campo magnético generado por los imanes, a las complejas moléculas que componen el flujo sanguíneo, de forma que para cada molécula del torrente sanguíneo supone una subida y bajada de la intensidad del campo. Es como si un tren en un túnel se acercase a un punto en medio de su trayectoria donde hay un fuerte emisor acústico; a partir del momento en que se rebaja la zona ruidosa, la señal de ruido desciende.

Esta variación en el campo ambiental local, se traduce en una sacudida tracción-compresión sobre los agregados de biomonomeros, que se

fragmentan parcialmente. Ello permite absorber hidrogeniones del medio para neutralizar los radicales libres que aparecen a consecuencia de las roturas de puentes. Y por tanto supone un incremento en la alcalinidad».

El efecto del campo magnético continuo sobre la variación en el nivel de acidez del medio acuoso había sido ya reconocido como una posibilidad para explicar su capacidad de estimulación de la precipitación del calcio óseo (85) de un modo similar a como los imanes industriales colocados en tuberías que conducen agua dura, la convierten en agua blanda por precipitar las sales minerales. Y del mismo modo el efecto del campo magnético continuo producido por la Tierra sirve para mantener el calcio en el tejido óseo vivo. Cuando el campo terrestre se anula artificialmente, se produce automáticamente un proceso osteoporótico (86).

Por otra parte, la magnetocinética nos da la clave de porqué los imanes permanentes actúan sobre el dolor. Hay un amplio uso de la aplicación de imanes en magnetoacupuntura y magnetoauriculopuntura según la cual el campo norte produce relajación, mientras que el campo sur genera una estimulación, pero sin que nadie explique el porqué. Este uso a ciegas es el que ha determinado que el uso de los imanes sea considerado *vox populi* como un tema propio de medicinas marginales o alternativas, que se toleran porque son inocuos y funcionan como efecto placebo. El carácter de campo estático los resta credibilidad, ya que en todo en lo que venimos dando cuenta, las frecuencias del campo resultan un aspecto esencial.

El tema del tratamiento del dolor mediante la aplicación de imanes permanentes del más diverso tipo está ampliamente recogido en la literatura (87), con descripciones de las presentaciones comerciales, plantillas para magnetoreflexoterapia, envolturas, colchonetas, almohadillas, colchas, gargantillas, pulseras, etc. Lo presentan como una prolongación de la magnetoacupuntura, pero con unas presentaciones que no van a permitir una colocación exacta de los imanes; tal y como sería aceptable si prácticamente cualquier distribución fuese buena.

En Estados Unidos no están regulados los imanes permanentes para uso terapéutico. Sí lo están en Japón, donde se exige que sobre la piel del enfermo, los imanes produzcan un campo de 500 gauss. Como término de comparación podemos

decir que, por ejemplo, los imanes que se utilizan en el hogar para adherir una nota de papel en la puerta de la nevera suelen tener un campo de unos 200 gauss.

Excepto en pacientes con obesidad mórbida, en los que es difícil que el campo de los imanes llegue hasta donde se requiere, se obtienen buenos resultados, siempre que se tenga claro el cómo y dónde han de ser colocados los imanes. Y esta información también está publicada, a partir de los estudios de bastantes equipos de investigadores, entre los que cabe destacar (8-90) al grupo del Holcomb Medical Research Institute en la Universidad de Vanderbilt en Tennessee, Estados Unidos.

La idea básica es que la capacidad de los imanes permanentes para calmar o resolver el dolor se basa en **lo más o menos pronunciado del gradiente de su campo.**

El concepto físico de gradiente no es sino la rapidez de la variación con el espacio o la distancia. En términos de campo gravitatorio, el gradiente de la superficie de una carretera es la forma correcta para describir lo más o menos pronunciado de su pendiente. Un terreno llano tiene un gradiente gravitatorio cero, una cuesta ascendente tiene un gradiente gravitatorio positivo, y una cuesta descendente tiene un gradiente gravitatorio negativo. El gradiente de una cuesta suave se representa por un número bajo (positivo o negativo, según corresponda), y a una cuesta empinada le corresponde, como gradiente, una cifra alta (también positiva o negativa).

Los gradientes de campo magnético con imanes se logran fácilmente en la práctica asociando o agrupando pequeños imanes. Es muy fácil de entender imaginando un plano conformado por un mosaico de pequeñas teselas de geometría cuadrada, que en realidad son idénticos imanes permanentes. Si todas las teselas son imanes con la cara norte al exterior, la superficie equipotencial (la gráfica tridimensional del valor del campo en función de la distancia en el plano horizontal x-y) será un casi plano (más próximo a un plano cuanto más pequeñas sean las teselas) horizontal, con pequeños hundimientos en los vértices de las teselas. Si todas estuvieran colocadas con su cara sur al exterior, la situación sería idéntica, pero con la superficie equipotencial poseyendo un valor negativo.

Si ahora imaginamos un mosaico en ajedrezado, es decir, con polaridades norte-sur alter-

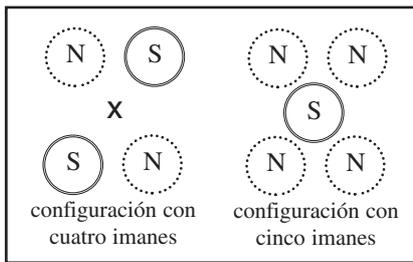


Fig. 1. Asociación de pequeños imanes para tratamientos antiálgicos en áreas puntuales.

nativas de modo similar a como se suceden los blancos y los negros en el tablero de ajedrez, la superficie equipotencial saltaría de una cara a otra, tomando la forma de protuberancias en alto-relieve y en bajo-relieve. Estaríamos con un sistema que produce un campo de capacidad terapéutica incrementada.

Nos encontramos así con la imagen que se necesita para utilizar adecuadamente los imanes en los tratamientos. Lo más frecuente es trabajar a cuatro o a cinco puntos, es decir, con cuatro o cinco imanes colocados con una configuración o colocación tal y como se muestra en la Figura 1.

A la luz de estas ideas es posible entender algo tan fascinante como es el hecho, avalado por la práctica de la magnetoacupuntura, de que un polo norte tenga el efecto fisiológico opuesto al de un polo sur, siendo realmente lo mismo, aunque con sentido opuesto. Si suponemos que la piel es una superficie equipotencial plana, al adjuntarle un imán se le produce una protuberancia en relieve o en bajo-relieve, es decir, una zona con gradiente positivo o negativo. Es decir, incrementamos o subimos la potencialidad de las reacciones químicas.

En la ya citada referencia (88) se hace una revisión de resultados publicados de estudios de imanes correctamente aplicados a problemas de dolor. Quedan con ello lejos las tentaciones de utilizar montajes comerciales con imanes, cuyo único efecto era el placebo, como por ejemplo los «collares magnéticos» (91).

La reseña del desarrollo del biomagnetismo, que por reciente no puede ser etiquetado como «historia», empieza con un malentendido. Lo primero fue que la corriente impuesta con artificiales generadores, propiciaba el crecimiento óseo. Después se vió que el campo magnético era estimulador, y mucho más cómodo por su carácter de «no invasivo», y se acuñó el término *inductive coupling*. Es decir, ponemos unos impulsos magnéticos de campo, que por una inducción

similar a la que tiene lugar en una dinamo, generan una bioelectricidad. Y es el efecto de deposición galvánica de estas corrientes, el que incrementa los depósitos cálcicos.

Ahora sabemos que no es así. El campo magnético es la causa, y la bioelectricidad es el efecto. El metabolismo desequilibra localmente el pH, y ello nos convierte en una pila viviente. Y la descarga de la pila mediante corrientes bioeléctricas se llama Vida. Así hay que entender el biomagnetismo, como la herramienta esencial que actúa sobre lo esencial de la vida. Ahora ya sabemos que inyectar un factor de crecimiento, extraído por concentración de la sangre del paciente, es equivalente a aplicar un campo magnético, ya que lo que el campo hace no es sino estimular la producción de dichos factores.

BIBLIOGRAFÍA

- LENTE F D. Cases of ununited fractures treated by electricity. *NYJ Medicine*. 1850; 5: 317-319.
- HAWTORNE E. On the causes and treatment of pseudoarthrosis and specially that form of it sometimes called supernumerary joints. *Amer Jour Med*. 1841; 1: 121-156.
- MARET G, KIEPENHEUER J, BOCCARA N (eds). *Biophysical effects of steady magnetic fields*. Berlín: Springer Verlag, 1986.
- BLANK M, FINDL E (eds). *Mechanistic approaches to the interactions of electric and electromagnetic fields with living systems*. New York: Plenum Press, 1987.
- FUKADA E, YASUDA I. On the piezo-electric effect in bone. *Jour Phys Soc Japan*. 1957; 12: 11-58.
- BASSET C A L, HERMANN I. Influence of oxygen concentration and mechanical factors on differentiation of connective tissues in vitro. *Nature*. 1961; 190: 460-461.
- BASSET C A L, BECKER R O. Generation of electric potentials by bone in response to mechanical stress. *Science*. 1962; 137: 1063-1064.
- BASSET C A L. Electrical effects in bone. *Scien American*. 1965; 213: 18-28.
- BASSET C A L, PAWLUK R J, BECKER R O. Effects of electric currents on bone formation in vivo. *Nature*. 1964; 204: 652-653.
- BASSETT C A L, PAWLUK R J, PILLAR A A. Augmentation of bone repair by inductively coupled electromagnetic fields. *Science*. 1974; 184: 575-577.
- BASSETT C A L, PAWLUK R J, PILLAR A A. Acceleration of fracture repair by electromagnetic field. A surgical non invasive method. *Ann New York Acad Scien*. 1974; 236: 242-262.
- BASSETT C A L, MITCHELL S N, GASTON S R. Tre-

- atment of ununited tibial diaphyseal fractures with pulsing electromagnetic fields. *J Bone Joint Surgery (American)*. 1981; 63: 511-523.
13. BASSETT C A L, PAWLUK R J. Non invasive methods for stimulating osteogenesis. *J Biomed Mater Res*. 1975; 9: 371-374.
 14. FRIEDELBERG Z B, BRIGTHON C T. Bioelectrical potentials in bone. *Jour Bone Joint Surg (Amer)*. 1966; 48: 915-918.
 15. FRIEDENBERG Z B, ROBERTS P G, DIDIZIAN N H, BRIGTHON C T. Stimulation of fracture healing by direct current in the rabbit fibula. *J Bone Joint Surg (Amer)*. 1971; 53: 1400-1408.
 16. BRIGTHON C T, FRIEDENBERG Z B, MITCHELL E I, BOOTH R E. Treatment of nonunion with constant direct current. *Clin Orthop*. 1977; 124: 106-123.
 17. FRIEDENBERG Z B, BRIGTHON C T. Bioelectricity and fracture healing. *Plastic Reconstr Surg*. 1981; 68: 435-453.
 18. BRIGTHON C T. Current concepts review: the treatment of non-unions with electricity. *J Bone Joint Surg (Amer)*. 1981; 63: 847-859.
 19. BRIGTHON C T, FRIEDENBERG Z B. Electrical stimulation and oxygen tension. *Ann New York Acad Sci*. 1974; 238: 314-320.
 20. BRIGTHON C T. Bioelectrical effects on bone and cartilage. *Clin Orthop*. 1997; 124: 2-4.
 21. PIENKOWSKI D, POLLACK S R. The origin of stress-generated potentials in fluid-saturated bone. *J Orthop Res*. 1983; 1: 20-41.
 22. CHAKKALAKAL D. Mechanoelectric transduction in bone. *J Mater Res*. 1989; 4: 1034-1046.
 23. BRIGTHON C T, POLLACK S R. Treatment of recalcitrant non-union with a capacitively coupled electrical field. *J Bone Surgery (American)*. 1985; 67: 577-585.
 24. RIJAL K P, KASHIMOTO O, SAKURAI M. Effect of capacitively coupled electric fields on an experimental model of delayed union of fracture. *J Orthop Res*. 1994; 12: 262-267.
 25. SCOTT G, KING J B. A prospective, double-blind trial of electrical capacitive coupling in the treatment of non-union of long bones. *J Bone Joint Surgery (American)*. 1994; 76: 820-826.
 26. POLLACK S, BRIGTHON C T, GRIFFITH N J, PIENKOWSKI D. Electromagnetic method and apparatus for healing living tissue. *Patent US5014699*.
 27. SHARRARD W J W, SUTCLIFFE M L, ROBSON M J, MACEACHERN A G. The treatment of fibrous nonunions of fractures by pulsing electromagnetic stimulations. *J Bone Joint Surgery (British)*. 1982; 64: 189-198.
 28. RUBIN C T, Mc LEOD K J, LANYON L E. Prevention of osteoporosis by pulsed electromagnetic fields. *J Bone Joint Surgery (American)*. 1989; 71: 411-417.
 29. Mc LEOD K J, RUBIN C T. Frequency specific modulation of bone adaptation by induced electric fields. *Theor Biol*. 1990; 145: 385-396.
 30. Mc LEOD K J, RUBIN C T. The effect of low frequency electrical fields on osteogenesis. *J Bone Joint Surgery (American)*. 1992; 74: 920-929.
 31. WATSON J, DOWNES E M. The application of pulsed fields to the stimulation of bone healing in humans. *Japan Jour Apply Phys*. 1978; 17: 215-218.
 32. DE HAAS W G, LAZAROVICI M A, MORRISON D M. The effect of low frequency magnetic fields on the healing of the osteotomized rabbit radius. *Clin Orthop*. 1979; 145: 245-251.
 33. HECKMAN J D, INGRAM A J, LLOYD R D. Nonunion treatment with pulsed electromagnetic fields. *Clin Orthop*. 1981; 161: 58-66.
 34. LYNCH A F, Mc AULEY P. Treatment of bone nonunion by electromagnetic therapy. *IJMS*. 1985; 154: 153-155.
 35. FARNDAL R W, MAROUDAS A, MARSLAND T P. Effect of low-amplitude pulsed magnetic fields on cellular ion transport. *Bioelectromagnetics*. 1987; 8: 119-125.
 36. DEL MORAL A, AZANZA M J. Model for the effect of static magnetic field on isolated neurons. *J Magn Magnetic Mat*. 1992; 114: 240-242.
 37. LIBBOFF A R. Electric field ion cyclotron resonance. *Bioelectromagnetics*. 1997; 18: 85-87.
 38. LIBOFF A R, McLEOD B R. Kinetic of channelized membrane ions in magnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 1988; 9: 39-51.
 39. BLACKMAN C F, BENANE S G, RABINOWITZ J R. A role for the magnetic field in the radiation-induced efflux of calcium ions from brain tissue in vitro. *Bioelectromagnetics*. 1985; 6: 327-337.
 40. NAGAI M, OTA M. Pulsating electromagnetic field stimulates mRNA expression of bone morphogenetic protein-2 and -4. *J. Dental Res*. 1994; 73: 1601-1605.
 41. SAHINOGLU T, BHATT B, GULLETT L. 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: 204-209.
 42. ZHUANG H, WANG W, SELDES R M. 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: 225-229.
 43. AARON R K, CIOMBOR D, JONES A R. 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: 548-554.
 44. MESKENS M, STUYCK J, MULLER J C. Treatment of delayed union and non union of the tibia by pulsed electromagnetic fields. A retrospective follow up. *Bull Hosp Jt Dis*. 1988; 48: 170-175.
 45. HINSENKAMP M, RYABY J, BURNY F. Treatment of nonunion by pulsing electromagnetic field: european multicenter study of 308 cases. *Reconstr Surg Traumatol*. 1985; 19: 147-157.
 46. 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: 50-55.
 47. FREDMAN L S. Pulsating electromagnetic fields in the treatment of delayed and nonunion of fractures: results from a district general hospital. *Injury*. 1985;

- 16: 315-323.
48. STEIN G A, ANZEL S H. A review of delayed union of open tibia fractures treated with external fixation and pulsing electromagnetic fields. *Orthopaedics*. 1984; 7: 428-436.
 49. KREMPEN J F, SILVER R A. External electromagnetic fields in the treatment of non-unions bones. A three year experience in private practice. *Orthop Rev*. 1981; 10: 33-39.
 50. RANDOLL U G. Elektromagnetische Felder bei der Behandlung der Osteoporose. *Therapeuticon*. 1992; 6: 144-150.
 51. BASSETT C A L. Fundamental and practical aspects of therapeutic uses of pulsed electromagnetic fields. *Crit Rev Biomed Eng*. 1989; 17: 451-529.
 52. BASSETT C A L. Pulsing Electromagnetic Field Treatment in ununited fractures and failed arthrodeses. *JAMA*. 1982; 247: 623-628.
 53. BASSETT C A L. Beneficial effects of electromagnetic fields. *J Cell Biochem*. 1993; 51: 387-393.
 54. ULASHCHIK V. Theoretical and practical aspects of general magnetotherapy. *Voprosy Kurortologii, Fizioterapii i Lechebnoi Fizicheskoi Kultury*. 2001; 5: 3-8.
 55. KOVALCHUCK V I. Use of extremely low frequency magnetic fields in clinical practice. *Fizicheskaja Meditsina*. 1994; 4: 87-91.
 56. ZASLAVSKY A. A low frequency impulse apparatus for physical therapy «Infita». *Med Tehk*. 1994; 5: 39-41.
 57. JERABEK J. Pulsed magnetotherapy in Czechoslovakia. A review. *Rev Environ Health*. 1994; 10: 127-134.
 58. JACOBSON J I. A theoretical look at genes as magneto-targets. *Indian J Theor Phys*. 1992; 40: 161-186.
 59. CHEN I I, SAHA S. Analysis of the current distribution in bone produced by pulsed electromagnetic field stimulation of bone. *Biomater Artif Cells Artif Organs*. 1987; 15: 737-744.
 60. LEDNEV V V. Bioeffects of weak combined, static and alternating magnetic fields. *Biofizika*. 1996; 41: 224-232.
 61. LEDNEV V V, SREBNITSKAYA L K, IL'YASOVA E N, ROZHDESTVENSKAYA Z E, KLIMOV A A, TIRAS Kh P. Magnetic parametric resonance in biosystems. Experimental verification of the theoretical predictions with the use of regenerative planarians *dugesia tigrina* as a test-system. *Biofizika*. 1996; 41: 815-825.
 62. BLACKMAN C F, BENANE S G, HOUSE D E, ELLIOTT D J. Importance of alignment between local DC magnetic field and an oscillating magnetic field in responses of brain tissue in vitro and in vivo. *Bioelectromagnetics*. 1990; 11: 159-167.
 63. BLACKMAN C F, BENANE S G, HOUSE D E. Evidence for direct effect of magnetic fields on neurite outgrowth. *Faseb Journal*. 1993; 7: 801-806.
 64. BLACKMAN C F. Empirical test of an ion parametric resonance model for magnetic field interactions with PC-12 cells. *Bioelectromagnetics*. 1994; 15: 239-260.
 65. BLACKMAN C F, BLANCHARD J P, BENANE S G, HOUSE D E. The ion parametric resonance model predicts magnetic field parameters that affect nerve cells. *Faseb Journal*. 1995; 9: 547-551.
 66. BLACKMAN C F, BLANCHARD J P, BENANE S G, HOUSE D E. Effect of AC and DC magnetic field orientation on nerve cells. *Biochem Biophys Res Commun*. 1996; 220: 807-811.
 67. DRUCKER-COLIN R, VERDUGO-DÍAZ L, MÉNDEZ M, CARRILLO-RUIZ J, MORGADO-VALLE C, HERNÁNDEZ-CRUZ A, CORKIDI G. Comparison between low frequency magnetic field stimulation and nerve growth factor treatment of cultured chromaffin cells, on neurite growth, noradrenaline release, excitable properties, and grafting in nigrostriatal lesioned rats. *Molecular and Cellular Neurosciences*. 1994; 5: 485-498.
 68. SUBRAMANIAN M, SUTTON C H, GREENEBAUM B, SISKEN B F. Interaction of electromagnetic fields and nerve growth factor on nerve regeneration in vitro. En: Brighthon C T, Pollack S R (eds), *Electromagnetics Medicine and Biology*. San Francisco Press, 1991, pp. 145-151.
 69. MORGADO-VALLE C, VERDUGO-DÍAZ L, GARCÍA D E, MORALES-OROZCO CH, DRUCKER-COLIN R. The role of voltage-gated Ca²⁺ channels in neurite growth of cultured chromaffin cells induced by extremely low frequency (ELF) magnetic field stimulation. *Cell and Tis Res*. 1998; 291: 217-230.
 70. LONGO F M, YANG T, HAMILTON S, HYDE J F, WALKER J, JENNES L, STACH R, SISKEN B F. Electromagnetic fields influence NGF activity and levels following sciatic nerve transection. *J Neuros Res*. 1999; 55: 230-237.
 71. BODAMYALI T. Pulsed electromagnetic fields simultaneously induce osteogenesis and upregulate transcription of bone morphogenetic proteins 2 and 4 in rat osteoblasts in vitro. *Biochem Biophys Res Comm*. 1998; 250: 458-461.
 72. YAJIMA A. Effect of pulsing electromagnetic fields on gene expression of bone morphogenetic proteins in cultured human osteoblastic cell line. *J Hard Tis Biol*. 2000; 9: 63-66.
 73. LIU H, ABBOTT J, BEE J A. Pulsed electromagnetic fields influence hyaline cartilage extracellular matrix composition without affecting molecular structure. *Osteoarthritis and Cartilage*. 1996; 4: 63-76.
 74. GUIZZARDI S, DI SILVESTRE M, GOVONI P, STROCCHI R, SCANDROGLIO R. Effects of pulsing electromagnetic fields (PEMF) on the course of vertebral fusion callus. A histological study. *Acta Bio-Médica de l'Ateneo Parmense*. 1990; 61: 227-235.
 75. AARON R K, CIOMBOR D M, JOLLY G. Stimulation of experimental endochondral ossification by low-energy pulsing electromagnetic fields. *J Bone Min Res*. 1989; 4: 227-233.
 76. NORTON L A. Effects of a pulsed electromagnetic field on a mixed chondroblastic tissue culture. *Clin Orthop Relat Res*. 1982; 167: 280-290.
 77. SAKAI A, SUZUKI K, NAKAMURA T, NORIMURA T, TSUCHIYA T. Effects of pulsing electromagnetic fields on cultured cartilage cells. *Intern Orthop*. 1991; 15:

- 341-346.
78. MARKOLL R. Electromagnetically stimulating cartilage tissue. *Patente DE19846685*.
 79. STEINER U E, ULRICH T. Magnetic effects in chemical kinetics and related phenomena. *Chem Rev.* 1989; 89: 51-147.
 80. WAKAYAMA N. Method for controlling chemical reaction. *Patente JP192132*.
 81. REIMPELL O. Process for influencing the rate of chemical reactions. *Patente DE4334192* (1994).
 82. PETRIANOV IV. *La substancia mas extraordinaria en el mundo*. Moscú: Editorial MIR, 1980.
 83. CHAMOUN E K, LEMONS J E, BUCHANAN R A, LUCAS L C. The effect of electromagnetic bone stimulation of biocorrosion behaviour of Cobalt-Chromium-Molybdenum alloys. *6th Annual Meeting of the Bragg Society*. Utrech: The Netherlands October 1986.
 84. NULL G. *Healing with magnets*. New York: Carroll and Graft Publishers, 1998.
 85. MADROÑERO A. Influence of magnetic fields on calcium salts crystal formation: an explanation of the «pulsed electromagnetic field» technique for bone healing. *J Biomed Eng.* 1990; 12: 410-414.
 86. GUILLÉN P, MADROÑERO A. Enhancement of bone healing by an exogenous magnetic field and the magnetic vaccine. *J Biomed Eng.* 1985; 7:157-160.
 87. OWEN L. *Pain-free with magnet therapy*. Roseville, CA: Prima Health, 2000.
 88. McLEAN M, ENGSTRÖM S, HOLCOMB R H. Static magnetic fields for the treatment of pain. *Epilepsy and Behaviour.* 2001; 2: s74-s80
 89. SEGAL N, HUSTON J, FUCHS H, HOLCOMB R, McLEAN M J. Efficacy of a static magnetic device against knee pain associated with inflammatory arthritis. *J Clin Rheum.* 1999; 5: 302-305.
 90. SEGAL N A, TODA Y, HOUSTON J, SAEKI Y, SHIMIZU M, FUCHS H, SHIMAOKA Y, HOLCOMB R, McLEAN M. Two configurations of static magnetic fields for treating rheumatoid arthritis of the knee: a double-blind clinical trial. *Arch Phys Med Rehabil.* 2001; 82: 1453-1460.
 91. HONG C Z, LIN J C, BENDER L F, SCHAEFFER J N, MELTZER R J, CAUSIN P. Magnetic necklace: its therapeutic effectiveness on neck and shoulder pain. *Arch Phys Med Rehabil.* 1982; 63: 462-466.