

# Magnetorrecepción: la piedra angular de la orientación aeroespacial, balance y locomoción humana

Carlos V. Rizzo-Sierra,<sup>\*,†</sup> Edgardo A. Bayona,<sup>‡</sup> Fidas E. Leon-Sarmiento<sup>†,§,||</sup>

\* Unidad de Innovación en Salud y Ciencias de la Vida (IESV), Departamento de Física y Geología, Universidad de Pamplona, Pamplona.

† Unidad de Parkinson y Movimientos Anormales, Medicencias Research Group, Bogotá.

‡ Neuro.net-Laboratorio de Neurociencias Clínicas, Fundación Neuromédica Colombo-Americana Ramon & Cajal, Bogotá.

§ Unidad de Medicina Aeroespacial, Universidad Nacional, Bogotá.

|| The Smell and Taste Center, Department of Otorhinolaryngology: Head and Neck Cancer, University of Pennsylvania, PA, USA.

**Magnetoreception:**  
*the angular stone in aerospace orientation,  
human balance and locomotion*

## ABSTRACT

*Current research is in agreement with the presence of a magnetic compass in living beings including humans. The two most accepted explanations that demonstrate the existence of magnetoreceptors in living beings are, the radical pair and the biogenic magnetite, which are discussed here with its respective experimental evidence and support. It indicates the presence of magnetite crystals in otoliths, among different inferior species of animals. Moreover, the magnetite found in several organs of human body allows predicting the existence of such element, in otoliths of vestibular system as well; further, anticipates that human magnetoreception is an additional function of the vestibular system. These geomagnetic signals would modulate balance, movement and spatial positioning of man in concordance of gravity values. This new field of otomagnetism opens new research areas for understanding the mechanisms involved in balance, equilibrium, orientation, and space positioning in normal and disease populations. Likewise, this could be the starting point for application of new human neurorehabilitation procedures, in those magnetoreception-associated neurological disorders that happen in the earth, the sea or the air.*

**Key words.** Vestibular apparatus. Magnetite. Otoliths. Spatial orientation. Neurorehabilitation.

## RESUMEN

Las investigaciones actuales son indicativas de la presencia de una brújula magnética en los seres vivos, incluyendo los humanos. Las dos explicaciones más aceptadas que demuestran la existencia de magnetorreceptores en seres vivos se conocen como par radical y explicación magnetita, las cuales se presentan aquí con sus respectivos soportes experimentales. Las evidencias indican la presencia de cristales de magnetita en otolitos de diferentes especies de animales inferiores; por ello, la magnetita encontrada en diferentes órganos en humanos permite anticipar la existencia de este elemento, también en los otolitos del sistema vestibular y, además, respalda el que la magnetorrecepción sea una función adicional del sistema vestibular humano. Estas señales geomagnéticas modularían el equilibrio, movimiento y posición espacial del cuerpo humano, de acuerdo con los valores de gravedad existente. Este novedoso campo de otomagnetismo abre nuevas áreas de investigación, que serán muy útiles para la comprensión de los mecanismos relacionados con el balance, equilibrio, orientación y posición del cuerpo humano en el espacio, tanto en individuos normales como en pacientes con trastornos de balance, marcha y movimiento. Se considera, por lo tanto, que éste podría ser el punto de partida para la aplicación de nuevos programas de neurorehabilitación humana en aquellos trastornos neurológicos asociados con alteraciones en la magnetorrecepción humana que ocurran por tierra, mar o aire.

**Palabras clave.** Aparato vestibular. Magnetita. Otolitos. Orientación espacial. Neurorehabilitación.

## INTRODUCCIÓN

La capacidad que poseen los seres vivos de ubicar el campo geomagnético es extraordinaria,<sup>1</sup> aunque aún se conoce poco sobre los mecanismos neurales y biofísicos involucrados en esta habilidad sensorial. Llama la atención que mientras los receptores de la mayoría de las modalidades sensoriales humanas se han caracterizado y estudiado a profundidad, no sucede lo mismo con los receptores primarios, involucrados en la detección de campos magnéticos.<sup>2</sup>

El hecho de que un campo magnético penetre libremente a través del tejido humano implica que los magnetorreceptores pueden estar ubicados en cualquier parte del cuerpo. De manera adicional, dichos magnetorreceptores pueden ser de tamaño muy reducido y, además, estar dispersos a través de un volumen grande de tejido.<sup>3</sup>

Se presentan evidencias que incriminan a la magnetita biogénica (implicada en enfermedades neoplásicas y neurodegenerativas)<sup>6-10</sup> como la piedra angular de la magnetorrecepción humana,<sup>4</sup> necesaria para mantener el control del equilibrio, movimiento y posición del cuerpo humano en el espacio.<sup>11</sup>

## MAGNETO-TEORÍAS

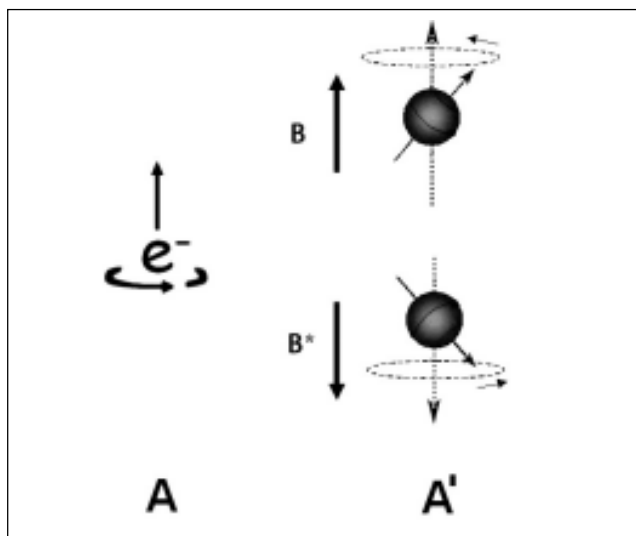
La magnetorrecepción se explica por dos teorías introducidas hacia los años 70's del siglo XX,<sup>12,13</sup> ampliadas recientemente,<sup>14,15</sup> conocidas como par radical y explicación magnetita.

### Par radical

La teoría del par radical<sup>12,14</sup> postula que la magnitud del campo magnético terrestre modula complejas reacciones bioquímicas en la retina e involucra la producción de pares de radicales.

El proceso comienza con un electrón transferido de una molécula donante a una molécula receptora. Como consecuencia, cada molécula queda con un electrón en el nivel orbital más externo, llamado electrón sin aparear, el cual rota<sup>16</sup> en la misma u opuesta dirección.<sup>17</sup>

Independientemente de la dirección que asuma dicho electrón, la rotación –o espín que realiza– describe un movimiento de precesión, similar a un trompo, donde el eje de rotación cambia ligeramente. El movimiento de precesión en los espines se origina por las interacciones de los electrones con el ambiente magnético local, determinado por el campo magnético generado por los espines mismos, siendo éste la sumatoria de los movimientos orbitales de los



*Figura 1. A. El espín del electrón obedece la regla de la mano derecha y se representa como un vector (flecha hacia arriba); la rotación del electrón es antihoraria como indica la flecha en semicírculo. A'. Dados dos electrones independientes, en presencia de dos campos magnéticos externos también independientes ( $B$  y  $B^*$ ) aplicados a cada electrón en direcciones opuestas, como muestran las flechas, el espín de cada electrón realizaría un movimiento de precesión, en este caso semicircular, alrededor de la dirección del campo magnético al cual está sometido, que para el caso sería  $B$  hacia arriba y  $B^*$  hacia abajo. En ausencia de un campo magnético externo el espín no precesa, o sea, está en equilibrio, como se muestra en A. B: campo magnético externo.*

electrones desapareados, del núcleo magnético y de cualquier otro campo magnético externo existente<sup>2</sup> (Figura 1).

Luego de cierto tiempo, el electrón transferido vuelve a la molécula donante. Dependiendo del tiempo de retorno y de la velocidad de precesión de los dos electrones sin aparear, el estado original de la molécula donante se puede preservar o alterar.<sup>2</sup>

Si el electrón retorna a la molécula donante en aproximadamente  $< 100$  nanosegundos (ns), los espines de los electrones sin aparear habrían precesado lo suficiente y permanecerían en su estado original, opuestos o paralelos entre sí. Como consecuencia de esto, la molécula donante y la receptora quedarían sin cambios. Por otro lado, si el tiempo de retorno del electrón a su donante es  $> 100$  ns, las diferencias en velocidad de precesión entre los dos electrones sin aparear pueden alterar la relación inicial entre los dos espines e influir en las reacciones moleculares siguientes.<sup>2</sup>

Estos pares de radicales mencionados se generan al excitar, en este caso, la retina con una onda que –como la luz, por ejemplo– posee un campo eléctrico y otro magnético.<sup>14</sup> De manera interesante, estos pa-

res de radicales también pueden generarse al excitar el cuerpo entero con luz.<sup>14</sup> Las respuestas electrofisiológicas debidas a campos magnéticos captadas en el cerebro de algunas aves, luego de aplicar estímulos visuales, soportan esta teoría.<sup>1,18</sup>

Como apoyo de esta teoría, se sabe que el núcleo de la raíz óptica basal y el *tectum* óptico de la paloma doméstica (*columba livia* doméstica), responden a cambios en la dirección del campo magnético<sup>19,20</sup> y, además, la magnitud de sus respuestas depende de la longitud de onda de la luz que incida en el ojo de estos animales.<sup>20</sup>

Otros estudios muestran relación entre magnetorrecepción y la glándula pineal de estas palomas.<sup>21-23</sup> Específicamente, sus células pineales responden a cambios graduales, ascendentes y descendentes, de la magnitud del campo magnético terrestre.<sup>24</sup> Dichas respuestas magnéticas disminuyen, pero no se eliminan cuando los nervios ópticos, que son una fuente de entrada a la glándula pineal, se lesionan. Esto implicaría que células sensibles a campos magnéticos existen en la glándula pineal *per se*.<sup>24</sup>

### Explicación magnetita

La segunda teoría<sup>13,15</sup> postula que el campo geomagnético interactúa con inclusiones de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) presentes en los tejidos corporales; esta última convierte la energía magnética en estímulo mecánico, con posterior deformación del tejido circundante detectado por mecanorreceptores adyacentes y genera una señal neural. La evidencia más fuerte que soporta esta teoría proviene de estudios con peces<sup>25,26</sup> y palomas.<sup>27,28</sup>

En truchas, por ejemplo, se demostró que el *lamellae* olfativo contiene cristales de magnetita de clase simple.<sup>26</sup> La región en la nariz de la trucha que contiene estas células está inervada a una ramificación del nervio trigémino y responde a cambios bruscos en la magnitud del campo magnético, lo que sugiere que estas células de la trucha contienen magnetita y funcionan como magnetorreceptores.<sup>2</sup>

### MAGNETORRECEPCIÓN CORPORAL

El hecho de que cristales de clase simple de magnetita existan en el tejido animal, muy similares a los cristales de magnetita bacteriana, hace a la teoría magnetita más interesante que la del par radical para comprender la magnetorrecepción.<sup>31</sup>

Se sabe que varias especies de bacterias y algas unicelulares orientan sus movimientos usando las líneas magnéticas terrestres.<sup>32</sup> Mejor aún, esta clase

de magnetita se ha encontrado en abejas, aves, salmones, tortugas de mar y otros animales que se orientan de acuerdo con el campo magnético terrestre.<sup>33</sup> La mayoría de magnetita encontrada en animales es de cristales de clase simple, como en la bacteria magnética.

Dichos cristales son minúsculos magnetos (~50 nm diámetro), magnetizables de forma permanente que giran dependiendo del campo magnético presente, siempre tomando una misma dirección y alineándose con el campo magnético terrestre.<sup>2</sup>

Estos cristales, al parecer, ejercen torque o presión en receptores secundarios como los de elasticidad, células ciliadas y mecanorreceptores, el cual surge cuando las partículas de magnetita rotan al alinearse con el campo geomagnético. Otra posibilidad es que la rotación de cristales de magnetita intracelular, al parecer, abren canales iónicos de forma directa, mediados por los filamentos citoesqueléticos al conectar dichos cristales a canales iónicos<sup>2</sup> (Figura 2).

En palomas (*columba livia* doméstica) los cristales de magnetita son más pequeños que los de clase simple y se consideran superparamagnéticos, con diferentes propiedades magnéticas que los cristales de magnetita de clase simple, incluyendo la ausencia de un momento magnético permanente; por esto no pueden rotar y alinearse con el campo magnético terrestre.<sup>37</sup>

Debido a dicha falta de rotación, el eje magnético del cristal superparamagnético ubica el eje de cual-

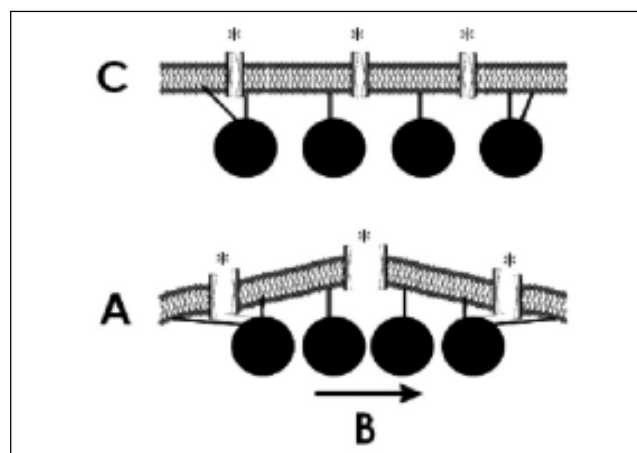


Figura 2. En respuesta a la presencia del campo magnético externo (B), las vesículas que contienen cristales de magnetita (círculos negros) y que están unidas a una membrana por medio de enlaces proteicos, se acercan entre sí, deformando la membrana celular con posterior apertura de los canales iónicos. A. Canales iónicos abiertos. C. Canales iónicos cerrados.

quier campo magnético presente, cuyas líneas de campo atraviesen dicho cristal, aunque el cristal superparamagnético permanezca estacionario.<sup>36,38</sup> Esto hace que, en presencia de campos magnéticos de la magnitud del terrestre, los cristales superparamagnéticos puedan generar campos magnéticos adicionales que pueden atraer o repeler otros cristales superparamagnéticos cercanos.

Estas interacciones intercristales tienen el potencial de deformar una matriz, dentro de la cual estos cristales se encuentran embebidos.<sup>36,38</sup> Así las cosas, conjuntos completos de cristales superparamagnéticos pueden atraerse y repelerse<sup>39</sup> y podrían, en principio, permitir al sistema nervioso detectar la expansión o contracción en un conjunto, o arreglo de conjuntos, de estas partículas superparamagnéticas<sup>27,37,39</sup> detectando así, la dirección y magnitud del campo magnético.

Con respecto a los humanos, se ha encontrado magnetita en forma de nanocristales en el cerebro,<sup>5</sup> meninges, hipocampo,<sup>29</sup> corazón, hígado y el bazo.<sup>30</sup> Dicha magnetita trasduce información geomagnética y gravimétrica al sistema nervioso por medio del momento-fuerza que se genera en el oído interno,<sup>34-36</sup> el cual se relaciona con el campo gravitacional (debido a las propiedades físicas de la Tierra) que proviene de la presencia de sus metales y su masa. De esta manera, el apropiado funcionamiento del oído, y más específicamente del sistema vestibular, ayudaría a la orientación y locomoción, con modulación de las aceleraciones lineales y angulares,<sup>11</sup> como se verá a continuación.

### MAGNETORRECEPCIÓN VESTIBULAR

El sistema vestibular humano, ubicado en el oído interno, consiste en dos receptores sensoriales interconectados, denominados canales semicirculares y órganos otolíticos involucrados en equilibrio, movimiento y orientación espacial del cuerpo humano (Figura 3).<sup>11</sup>

Los canales semicirculares perciben movimientos rotatorios de la cabeza, mientras que los otolitos, que son concreciones carbonatadas de calcio embebidos en material gelatinoso, actúan como acelerómetros lineales que perciben fuerzas lineales actuando sobre la cabeza.<sup>11</sup>

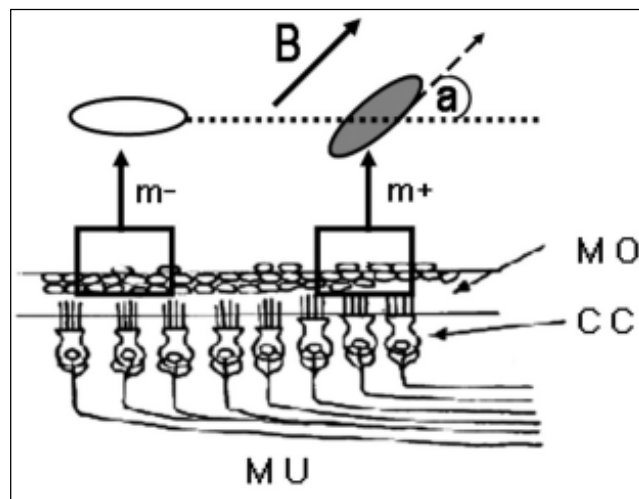
De manera interesante, se han encontrado cristales de magnetita en otolitos saculares de varias especies de peces como el perro y el tiburón escualiforme.<sup>40,41</sup> En el pez guitarra se encontró magnetita titanada, concentrada en bandas, a lo largo de la membrana sacular.<sup>40</sup> Otolitos ricos en hierro también

se han detectado en la membrana lagena de palomas y en especies de peces como el teleosteo.<sup>42</sup>

Dado que la magnetita es más densa que el carbonato de calcio puede, adicionalmente, ayudar a modular el momento resultante de las fuerzas gravitacionales existentes, para ayudar a mantener el sentido de posición y equilibrio de los humanos.

Con base en lo anterior, estudios preliminares hechos en nuestro laboratorio permiten sugerir que los órganos otolíticos funcionan, además de lo conocido, como sensores otomagnéticos en humanos (observaciones no publicadas). Esta acción dependería de la concentración y tipo de cristal de magnetita presentes en el órgano otolítico y del torque magnético que la magnetita genere para producir una señal fisiológica.<sup>43</sup>

Esto implicaría que la magnetorrecepción humana es una función adicional y, muy posiblemente, más importante que todo lo discutido a la fecha con respecto al sistema vestibular humano y sugiere, por primera vez, que una señal geomagnética sea la que module el equilibrio y movimiento, y oriente la posición del cuerpo en el espacio, siendo estas funciones dependientes de la gravedad terrestre. De manera interesante, mamíferos como vacas y venados orientan su posición espacial siguiendo patrones geomagnéticos en el eje terrestre norte-sur.<sup>44,45</sup>



**Figura 3.** Ante un campo magnético externo ( $B$ , flecha gruesa, continua, oblicua) los otolitos magnéticos ( $m+$ ), como pequeñas brújulas, se orientan de acuerdo con  $B$ . Un otolito magnético representativo (rectángulo a la derecha), se amplía (ovoide gris) y permite ver cómo forma un ángulo de " $a$ " grados (flecha a trazos). De otro lado, el otolito convencional ( $m-$ ) ampliado (rectángulo a la izquierda) no modifica su posición ante  $B$  (ovoide blanco). OM: Membrana otolítica. CC: Células filiares. MU: Mácula utricular.

Adicionalmente, el magnetismo genera plasticidad neural sobre el sistema sensori-motor humano,<sup>46</sup> el cual –en condiciones gravitacionales diferentes a la terrestre– puede producir aberraciones neurales originando mareos, migrañas y la enfermedad del movimiento espacial (en inglés: *space motion sickness*).<sup>47</sup> Esta última patología, asociada a viajes espaciales, explicaría los efectos gravitacionales sobre desorientación espacial que padecen los astronautas,<sup>47</sup> debida a las transiciones marcadas de gravedad y geomagnetismo que deben padecer estos individuos; este problema es secundario, al parecer, al establecimiento de una canalopatía magnética.<sup>48</sup>

Las canalopatías son un grupo de condiciones relacionadas con desequilibrios iónicos, algunos de las cuales se han implicado como causa del tinitus,<sup>49,50</sup> cuya hiperactividad de la descarga otoneural, dependería principalmente del intercambio iónico anormal.<sup>49</sup> Como soporte de esto se encuentra el efecto benéfico que poseen moduladores, farmacológicos y no farmacológicos, sobre los canales de calcio involucrados en la desintegración sensori-motora que se experimenta en diversos trastornos neurales como el vértigo, la migraña y el tinitus.<sup>49-61</sup>

Adicionalmente, la lidocaína, un bloqueador de canales de sodio, también ha mostrado su utilidad en el tinitus.<sup>50</sup> La estimulación magnética transcraneal<sup>62-64</sup> (la cual modifica la neurotransmisión a través de diversas sustancias,<sup>65,66</sup> incluyendo una denominada de forma preliminar por los autores como neuromagnetina<sup>67,68</sup>) también alivia el tinitus.<sup>51</sup>

Finalmente, otros neuromoduladores ayudarían a inferir cómo el sistema vestibular posee actividad ferromagnética. Tal es el caso de la estimulación galvánica vestibular que, de acuerdo con la ley de Ampere, puede producir un campo magnético alterando los sensores vestibulares de orientación y movimiento anteriormente descritos.<sup>57</sup> Así las cosas, serían las señales neuromagnéticas originadas en las diferentes estructuras del sistema vestibular que, en últimas modularían el equilibrio, movimiento y posicionamiento espacial del cuerpo humano, reguladas por los campos geomagnéticos existentes.<sup>52-56,58</sup>

Por todo lo anterior, se considera que los mecanismos discutidos aquí deberán ser tenidos en cuenta, de ahora en adelante, dentro de los diferentes esquemas y programas de neurorehabilitación<sup>69,70</sup> que involucren seres humanos que padezcan de trastornos de la marcha, deambulación, postura, balance, movimiento, caminata, locomoción o transporte corporal humano, con el fin de brindarles una mejor calidad de vida a los individuos afectados, independiente de que dichos trastornos se hayan originado

por los campos gravitacionales generados por tierra, mar o aire.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Richard L. Doty por su apoyo durante la elaboración de este manuscrito. El Dr. Fidas E. Leon-Sarmiento fue apoyado por un grant del Dept. of Defense, USA (USA MRAA, W81XWH-09-1-0467).

Partes de este trabajo se presentaron en el Congreso Mundial de Neurotecnología, celebrado en Roma, Italia, del 10 al 12 de octubre 2010.

## REFERENCIAS

1. Wiltschko R, Wiltschko W. Magnetic Orientation in Animals. Berlin: Springer; 1995.
2. Johnsen S, Lohmann KJ. The physics and neurobiology of magnetoreception. *Nat Rev Neurosci* 2005; 6: 703-12.
3. Kirschvink JL. Birds, bees and magnetism: a new look at the old problem of magnetoreception. *Trends Neurosci* 1982; 5: 160-7.
4. Kirschvink JL, Walker MM, Diebel CE. Magnetite based magnetoreception. *Curr Opin Neurobiol* 2001; 11: 462-7.
5. Kirschvink JL, Kobayashi-Kirschvink A, Woodford BJ. Magnetite biomineralization in the human brain. *Proc Natl Acad Sci USA* 1992; 89: 7683-7.
6. Dobson J, Grassi P. Magnetic properties of human hippocampal tissue-evaluation of artifact and contamination sources. *Brain Res Bull* 1996; 39: 255-9.
7. Beyhum W, Hautot D, Dobson J, et al. Magnetic biomineralization in Huntington's disease transgenic mice. *J Phys Conf Ser* 2005; 17: 50-3.
8. Dobson J. Nanoscale biogenic iron oxides and neurodegenerative disease. *FEBS Lett* 2001; 496: 1-5.
9. Hautot D, Pankhurst QA, Khan N, et al. Preliminary evaluation of nanoscale biogenic magnetite in Alzheimer's disease brain tissue. *Proc R Soc Lond B* 2003; 270(Suppl.): S62-S64.
10. Kobayashi A, Yamamoto N, Kirschvink J. Studies of inorganic crystals in biological tissue: magnetite in human tumor. *J Japan Soc Powder Metall* 1997; 44: 294-300.
11. Tascioglu AB. Brief review of vestibular system anatomy and its higher order projections. *Neuroanatomy* 2005; 4: 24-7.
12. Schulten K, Swenberg CE, Weller A. A biomagnetic sensory mechanism based on magnetic field modulated coherent electron spin motion. *Z Phys Chem NF* 1978; 111: 1-5.
13. Walcott C, Gould JL, Kirschvink JL. Pigeons have magnets. *Science* 1979; 205: 1027-9.
14. Ritz T, Adem S, Schulten K. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophys J* 2000; 78: 707-18.
15. Shcherbakov VP, Winklhofer M. The osmotic magnetometer: a new model of a magnetite-based magnetoreceptor in animals. *Eur Biophys J* 1999; 28: 380-92.
16. Townsend JS. A modern approach to quantum mechanics. New York: University Science Books; 2000.
17. Lemmens P, Millet P. Spin-Orbit-Topology, a triptych. *Lect Notes Phys* 2004; 645: 433-77.
18. Carpenter DO, Airapetyan S. Biological Effects of Electric and Magnetic Fields: Sources and Mechanisms. London: Academic Press; 1994.
19. Semm P, Nohr D, Demaine C, et al. Neural basis of the magnetic compass: interactions of visual, magnetic and vestibular

- inputs in the pigeon's brain. *J Comp Physiol A* 1984; 155: 283-8.
20. Semm P, Demaine C. Neurophysiological properties of magnetic cells in the pigeon's visual system. *J Comp Physiol A* 1986; 159: 619-25.
  21. Semm P, Nohr D, Demaine C, et al. Neural basis of the magnetic compass: interactions of visual, magnetic and vestibular inputs in the pigeon's brain. *J Comp Physiol A* 1984; 155: 283-8.
  22. Semm P, Nohr D, Demaine C, et al. Avian Navigation. New York: Springer; 1982.
  23. Deutschlander ME, Borland SC, Philips JB. Extraocular magnetic compass in newts. *Nature* 1999; 400: 324-5.
  24. Demaine C, Semm P. The avian pineal gland as an independent magnetic sensor. *Neurosci Lett* 1985; 62: 119-22.
  25. Walker MM, Diebel CE, Haugh CV, et al. Structure and function of the vertebrate magnetic sense. *Nature* 1997; 390: 371-6.
  26. Diebel CE, Proksch R, Green CR, et al. Magnetite defines a vertebrate magnetoreceptor. *Nature* 2000; 406: 299-302.
  27. Fleissner G, Holtkamp-Rötzler E, Hanzlik M, et al. Ultrastructural analysis of a putative magnetoreceptor in the beak of homing pigeons. *J Comp Neurol* 2003; 458: 350-60.
  28. Winklhofer M, Holtkamp-Rötzler E, Hanzlik M, et al. Clusters of superparamagnetic magnetite particles in the upper-beak tissue of homing pigeons: evidence of a magnetoreceptor. *Eur J Mineral* 2001; 13: 659-69.
  29. Schultheiss-Grassi P, Dobson J. Magnetic analysis of human brain tissue. *Biomaterials* 1999; 12: 67-72.
  30. Schultheiss-Grassi P, Heller F, Dobson J. Analysis of magnetic material in the human heart, spleen and liver. *Biomaterials* 1997; 10: 351-5.
  31. Mann S, Sparks NH, Walker MM, et al. Ultrastructure, morphology and organization of biogenic magnetite from sockeye salmon, *Oncorhynchus nerka*: implications for magnetoreception. *J Exp Biol* 1988; 140: 35-49.
  32. Bazyliniski DA, Frankel RB. Magnetosome formation in prokaryotes. *Nature Rev Microbiol* 2004; 2: 217-30.
  33. Kirschvink JL, Douglas SJ, MacFadden BJ. Magnetite biomineralization and magnetoreception in organisms. New York: Plenum; 1985.
  34. Kirschvink JL, Walker MM, Diebel CE. Magnetite based magnetoreception *Curr Opin Neurobiol* 2001; 11: 462-7.
  35. Presti D, Pettigrew JD. Ferromagnetic coupling to muscle receptors as a basis for geomagnetic field sensitivity in animals. *Nature* 1980; 285: 99-101.
  36. Kirschvink JL, Gould JL. Biogenic magnetite as a basis for magnetic field detection in animals. *Biosystems* 1981; 13: 181-201.
  37. Shcherbakov VP, Winklhofer M. The osmotic magnetometer: a new model for magnetite-based magnetoreceptors in animals *Eur Biophys J* 1999; 28: 380-92.
  38. Bacri JC, Cabuil V, Cebers A, et al. Flattening of ferro-vesicle undulations under a magnetic field. *Europhys Lett* 1996; 33: 235-40.
  39. Davila AF, Fleissner G, Winklhofer M, et al. A new model for a magnetoreceptor in homing pigeons based on interacting clusters of superparamagnetic magnetite. *Phys Chem Earth* 2003; 28: 647-52.
  40. Vilches-Troya J, Dunn RF, O'Leary DP. Relationship of the vestibular hair-cells to magnetic particles in the otolith of the guitarfish sacculus. *J Comp Neurol* 1984; 226: 489-94.
  41. Hanson M, Westerberg H, Oblad M. The role of magnetic statoconia in dogfish (*Squalus acanthias*). *J Exp Biol* 1990; 151: 205-18.
  42. Harada Y, Taniguchi M, Namatame H, et al. Magnetic materials in otoliths of bird and fish lagena and their function. *Acta Laryngol* 2001; 121: 590-5.
  43. Winklhofer M, Kirschvink JL. A quantitative assessment of torque-transducer models for magnetoreception. *J R Soc Interface* 2010; 7(Suppl.): S273-S289.
  44. Begall S, Cervený J, Neef J, et al. Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer. *Proc Natl Acad Sci USA* 2008; 105: 13451-5.
  45. Burda H, Begall S, Cervený J, et al. Extremely low-frequency electromagnetic fields disrupt magnetic alignment of ruminants. *Proc Natl Acad Sci USA* 2009; 106: 5708-13.
  46. Leon-Sarmiento FE, Bayona-Prieto J, Cadena Y. Plasticidad neuronal, neurorehabilitación y trastornos del movimiento: el cambio es ahora. *Acta Neurol Col* 2008; 24: 40-2.
  47. Clément G, Reschke MF. Neuroscience in Space. New York: Springer; 2008.
  48. Rizzo-Sierra CV, Leon-Sarmiento FE. Pathophysiology of movement disorders due to gravity transitions: The channelopathy linkage in human balance and locomotion. *Med Hypoth* 2011; 77: 97-100.
  49. Davies E, Knox E, Donaldson I. The usefulness of nimodipine, an L-calcium channel antagonist, in the treatment of tinnitus. *Br J Audiol* 1994; 28: 125-9.
  50. Baguley DM, Jones S, Wilkins I, et al. The inhibitory effect of intravenous lidocaine infusion on tinnitus after translabyrinthine removal of vestibular schwannoma: a double-blind, placebo-controlled, crossover study. *Otol Neurotol* 2005; 26: 169-76.
  51. Marcondes RA, Sanchez TG, Kii MA, et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation improve tinnitus in normal hearing patients: a double-blind controlled, clinical and neuroimaging outcome study. *Eur J Neurol* 2010; 17: 38-44.
  52. Bent L, McFadyen B, Merkley V, et al. Magnitude effects of galvanic vestibular stimulation on the trajectory of human gait. *Neurosci Lett* 2000; 279: 157-60.
  53. Balter S, Stokroos R, Akkermans E, et al. Habituation to galvanic vestibular stimulation for analysis of postural control abilities in gymnasts. *Neurosci Lett* 2004; 366: 71-5.
  54. Fitzpatrick R, Wardman D, Taylor J. Effects of galvanic vestibular stimulation during human walking. *J Physiol* 1999; 517: 931-9.
  55. Rosengren SM, Colebatch JG. Cervical dystonia responsive to acoustic and galvanic vestibular stimulation. *Mov Disord* 2006; 21: 1495-9.
  56. Scinicariello AP, Eaton K, Inglis JT, et al. Enhancing human balance control with galvanic vestibular stimulation. *Biol Cybernet* 2001; 84: 475-80.
  57. Fitzpatrick R, Day B. Probing the human vestibular system with galvanic stimulation. *J Appl Physiol* 2004; 96: 2301-16.
  58. Kirschvink JL, Winklhofer M, Walker MM. Biophysics of magnetic orientation: strengthening the interface between theory and experimental design. *J R Soc Interface* 2010; 7(Suppl.): S179-S191.
  59. Olesen J. Calcium entry blockers in the treatment of vertigo. *Ann N Y Acad Sci* 1988; 522: 690-7.
  60. Perin P, Soto E, Vega R, et al. Calcium channels functional roles in the frog semicircular canal. *NeuroReport* 2000; 11: 417-20.
  61. Yu W, Horowitz SH. Treatment of sporadic hemiplegic migraine with calcium-channel blocker verapamil. *Neurol* 2003; 60: 120-1.
  62. Hallett M. Transcranial magnetic stimulation: a primer. *Neuron* 2007; 55: 187-99.
  63. Silvano J, Pascual-Leone A. State-dependency of transcranial magnetic stimulation. *Brain Topogr* 2008; 21: 1-10.
  64. Leon-Sarmiento FE, Elfakhani M, Boutros NN. The motor evoked potential in AIDS and HAM/TSP: state of the evidence. *Arq Neuropsiquiatr* 2009; 67: 1157-63.

65. Teo JT, Swayne OB, Rothwell JC. Further evidence for NMDA-dependence of the after-effects of human theta burst stimulation. *Clin Neurophysiol* 2007; 118: 1649-51.
66. Lang N, Speck S, Harms J, et al. Dopaminergic potentiation of rTMS-induced motor cortex inhibition. *Biol Psychiat* 2008; 63: 231-33.
67. Leon-S FE, Torres-Hillera M. Clinical Neurophysiology in Neurotoxicology. En: Uribe MG (ed.). Neurotoxicología. Bogotá: Exlibris; 2001, p. 287-99.
68. Uribe CS, Franco A, Hernández D, Leon-Sarmiento FE. Electrodiagnóstico, electroencefalografía, potenciales evocados, electromiografía, estimulación magnética transcraneal. En: Uribe CS, Arana A, Lorenzana P (eds.). Neurología. 7a ed. Medellín: CIB; 2009, p. 40-80.
69. Leon-Sarmiento FE, Bayona-Prieto J, Bayona E. Neurorehabilitación: Otra revolución para el siglo XXI. *Act Med Col* 2009; 34: 88-92.
70. Bayona-Prieto J, Leon-Sarmiento FE, Bayona E. Neurorehabilitation. En: Uribe CS, Arana A, Lorenzana P (eds.). Neurología. 7a ed. Medellín: CIB; 2009, p. 745-8.

*Reimpresos:*

**Dr. Fidias E. Leon-Sarmiento,**  
Medicencias Research Group  
Calle 50, No. 8-27 (604)  
Bogotá, Colombia.  
Tel.: 6089597  
Fax: 4006964  
Correo electrónico: feleones@gmail.com

*Recibido el 11 de octubre 2010.  
Aceptado el 24 de marzo 2011.*