

ESTIMULACIÓN MAGNÉTICA TRANSCRANEAL: PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES EN LA ACTIVIDAD FÍSICA Y EL DEPORTE

Fernández del Olmo, M. & Cudeiro Mazaira, J.
Grupo de Neurociencia y Control Motor (NEUROcom), Departamento de Medicina
e INEF-Galicia. Universidad de A Coruña, Spain.

RESUMEN

La Estimulación Magnética Transcraneal (EMT) es un técnica novedosa que permite estimular la corteza cerebral humana de forma no invasiva, indolora y sin efectos secundarios siempre y cuando se respeten los protocolos de seguridad establecidos. Su utilidad cubre un amplio abanico extendiéndose desde el estudio de la corteza motora hasta los correlatos fisiológicos de las funciones cognitivas, pasando por el tratamiento de determinadas enfermedades neurológicas o por el estudio del tiempo de reacción. En este trabajo, ofrecemos una introducción a las características de la EMT y revisamos sus principales aplicaciones haciendo énfasis en su posible validez como instrumento de investigación aplicado a las Ciencias del Deporte.

ABSTRACT

Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) is a novel technique which permits painless stimulation of the cerebral cortex in humans without requiring open access to the brain, and if used following appropriate guidelines, is devoid of important side effects. TMS has been broadly used. It began as a tool for studying motor cortex function, but is now being used to look at cognitive functions, to treat neurological disorders or to study the reaction time. In this article we like to review the technical aspects of TMS and its main applications, and discuss the possibility of using TMS as a research tool to study Sport Sciences.

1. INTRODUCCIÓN

¿Cómo es posible interferir en la actividad cerebral de forma no invasiva?. Esta pregunta ha ocupado a los interesados en la fisiología del sistema nervioso desde que Berger (1938) sentase las bases de la electroencefalografía, demostrando que se podía registrar desde el exterior y de manera incruenta el funcionamiento del cerebro humano. La respuesta nos la proporciona una de las herramientas más recientemente incorporadas a la neurociencia, la estimulación magnética transcraneal (EMT) que permite la estimulación de la corteza cerebral del ser humano. Se trata de una técnica segura y esencialmente indolora si se siguen las normas de seguridad establecidas. Desde el desarrollo por Barker et al. en 1985 del primer estimulador compacto y aplicable en la práctica neurofisiológica, la utilización de pulsos magnéticos simples ha demostrado ser de gran utilidad en el estudio de las vías motoras centrales, tanto en pacientes como en sujetos sanos.

Un estimulador magnético consiste en una bobina conectada a uno o más capacitadores que almacenan una gran energía eléctrica que puede ser descargada en un breve período de tiempo. Esta descarga alcanza cerca de los 5000 amperios de intensidad y se realiza muy rápidamente, alrededor de los 200 μ s, finalizada la cual la intensidad se hace cero. De acuerdo con la ley de Faraday, este cambio rápido en la intensidad del campo eléctrico induce un campo magnético con líneas de flujo perpendiculares a la bobina y que puede alcanzar valores por encima de los 3 Tesla (Barker et al., 1985). A su vez, el campo magnético producido sobre el cuero cabelludo induce una corriente eléctrica a distancia que afecta a un área relativamente restringida del cerebro (Rothwell et al., 1987). El voltaje de la corriente primaria y la geometría de la bobina de estimulación determinarán la amplitud y morfología del campo magnético originado, que, a su vez, determina la densidad y focalidad de la corriente secundaria inducida en el tejido. Podemos decir, por tanto, que la EMT nos proporciona una vía de estimulación cortical sin electrodos, donde el campo magnético inducido actúa de puente entre la corriente primaria y la corriente secundaria. El campo eléctrico que se genera en la corteza cerebral, afectará la actividad eléctrica de las neuronas y consecuentemente, de forma general a la actividad cerebral.

Una de las grandes ventajas de la estimulación magnética sobre la estimulación eléctrica realizada hace dos décadas por Merton and Morton (1980a,b) en áreas motoras del cerebro humano es la ausencia de sensaciones dolorosas, lo que junto a su alta seguridad e inocuidad ha permitido abrir nuevas fronteras en los esfuerzos investigadores relativos al comportamiento motor (Rossini et al., 1985). En este trabajo nos proponemos presentar, a modo de introducción, una revisión de las posibilidades de la EMT en la investigación de las funciones cerebrales, los protocolos más utilizados y sus aplicaciones, valorando, finalmente, la posibilidad de la utilización de la EMT en el estudio del control motor aplicado a las Ciencias del Deporte.

2. ¿PARA QUÉ SE UTILIZA LA EMT?

Medida del Umbral Motor

Cuando la EMT es aplicada sobre la corteza motora a una intensidad apropiada es posible obtener potenciales motores evocados (PME) que se registran mediante electrodos de superficie colocados sobre los músculos contralaterales al hemisferio estimulado. Estos potenciales representan la activación de las fibras musculares correspondientes a las unidades motoras estimuladas (Ilmonemi et al., 1999; Cohen et al., 1998; Hallett 2000). La amplitud del PME dependerá de factores técnicos como la intensidad de la EMT, la orientación de la bobina sobre el cuero

cabelludo (anterior-posterior, posterior-anterior o lateral-medial), el ángulo formado por la bobina y la línea del surco central (Mills et al., 1992), además de todos aquellos factores que puedan afectar la excitabilidad corticoespinal (Pascual-Leone et al., 1998). Por ejemplo, la contracción voluntaria de un músculo incrementa y facilita el PME en respuesta a la EMT (Hess et al., 1986; Thompson et al., 1991) al igual que ocurre con la mera imagen mental de la contracción de ese músculo (Rösler 2001; Abbruzzese y Trompetto, 2002). El término umbral motor (UM) se refiere a la menor intensidad de la EMT que permite obtener un PME de un tamaño mínimo (50-100 microvoltios en reposo o 100-200 microvoltios durante la contracción muscular) en, por lo menos, 5 veces de 10 consecutivos intentos separados 5 segundos (Iyer et al., 2003).

Tiempo de Conducción

La *latencia del potencial motor evocado*, esto es, el tiempo que transcurre desde la aplicación del estímulo magnético hasta que se registra la actividad electromiográfica del músculo estimulado, es, aproximadamente, de 20 ms para los músculos del brazo y de 30 ms para los músculos de la pierna, aunque estas medidas pueden verse influenciadas por la orientación de la bobina (Werhahn et al., 1994). Esta latencia está constituida por dos componentes: (1) el tiempo necesario para activar las motoneuronas espinales alfa (*tiempo de conducción motora central*) y (2) el tiempo desde la activación de estas motoneuronas hasta la respuesta muscular (*tiempo de conducción motora periférica*) (Di Lazzaro et al., 1998). Es posible obtener el *tiempo de conducción motora periférica* mediante estimulación magnética transcutánea sobre las raíces de nervios espinales (De Noordhout et al., 1999). Si restamos el valor obtenido de la *latencia del potencial motor evocado* obtendremos el *tiempo de conducción motora central* (Ziemann, 2002) (figura 1).



Figura 1. Para la obtención del *tiempo de conducción central* obtenemos primeramente la *latencia de un potencial motor evocado* en el músculo seleccionado estimulando directamente sobre el cuero cabelludo (imagen izquierda). A continuación obtenemos la latencia de estos potenciales mediante estimulación magnética transcutánea a través de las raíces nerviosas (imagen derecha), esto es, el *tiempo de conducción periférica*. El *tiempo de conducción central* será la diferencia

entre la *latencia del potencial motor evocado* menos el *tiempo de conducción periférica*.

Periodo de Silencio Cortical

El periodo de silencio cortical se define como una interrupción parcial o completa de la actividad electromiográfica tónica voluntaria en el músculo activado mediante la EMT (Abbruzzese et al., 1997; Di Lazzaro et al., 1998) y se mide desde el final del PME hasta que comienza nuevamente la actividad electromiográfica. Este periodo de silencio varía con la intensidad de la estimulación y está poco afectado por el nivel de contracción muscular (Inghilleri et al., 1993). También es posible obtener un periodo de silencio en el músculo ipsilateral, aunque con una duración (30 a 50 ms) menor en comparación con el periodo de silencio contralateral (200 a 300 ms) (Wassermann et al., 1991) (figura 2).

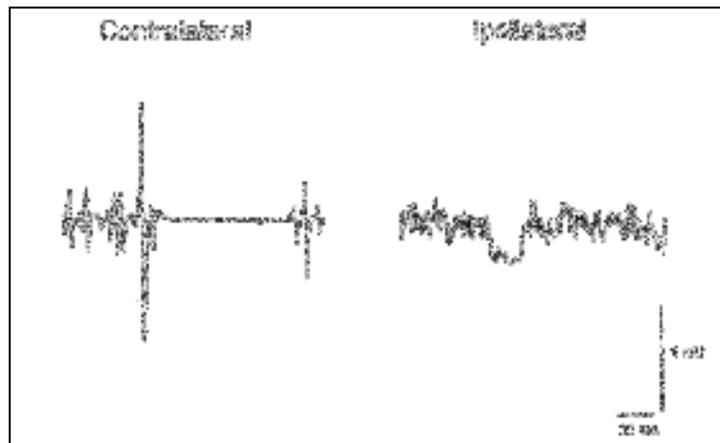


Figura 2. Registro electromiográfico (EMG) del primer interóseo dorsal de un sujeto normal durante una contracción voluntaria mantenida. Aplicando la EMT a una intensidad elevada se puede observar primeramente un incremento en la amplitud de la señal electromiográfica seguida de un periodo de silencio en el músculo contralateral al hemisferio estimulado. En el interóseo dorsal ipsilateral también se observa un periodo de silencio pero de menor duración al registrado en el contralateral.

ESTIMULACIÓN TRANSCRANEAL PAREADA

En ocasiones se utiliza la estimulación transcraneal pareada consistente en aplicar dos pulsos separados por un pequeños intervalo de tiempo (entre 1 y 20 ms) con el objetivo de explorar la función de las interneuronas inhibitorias intracorticales (Kujirai et al., 1993). Tanto la inhibición como la facilitación intracortical ha sido estudiada por este método.

PARÁMETROS DE ESTIMULACIÓN Y SEGURIDAD

Con la utilización de la EMT puede obtener efectos compatibles con la excitación o la inhibición de la corteza lo que dependerá de los parámetros de estimulación utilizados (Hallet 2000). La *intensidad* de la estimulación magnética (si ésta es superior o inferior al umbral motor), la *frecuencia* de estimulación (si son pulsos aislados, o bien se repiten en el tiempo, se habla entonces de estimulación magnética repetitiva, pudiendo ser de baja frecuencia, por debajo de 1 Hz, o bien de alta frecuencia, hasta 30 Hz.), duración de los *trenes* en los que se aplica una intensidad y frecuencia determinada, el número de estímulos por tren, el intervalo entre trenes y el número total de trenes serán parámetros a tener en cuenta no solamente por su efecto sobre la corteza sino también por aspectos de seguridad (Chen et al., 1997) (figura 3).

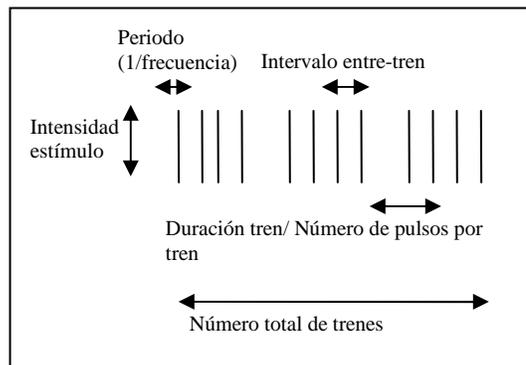


Figura 3. Parámetros que pueden influir en la aparición de efectos adversos en estudios de EMT repetitivo. Cada línea representa un pulso de EMT

En la mayoría de los estudios, se han aplicado estímulos simples sobre la corteza motora a intervalos de 2 o más segundos con el objetivo de obtener PME en los músculos contralaterales (Jahanshahi et al., 1997). Varios estudios realizados sobre la seguridad de la EMT han sugerido que los estímulos simples pueden ser usados sin riesgo de efectos colaterales graves como ataques epilépticos o deterioro transitorio de la memoria en sujetos normales (Bridgers y Delaney, 1989; Dressler et al., 1990). Aunque en algunas ocasiones se ha documentado que la EMT puede inducir ataques epilépticos en sujetos afectados de epilepsia parcial o general (Tassinari et al., 1990; Hufnagel y Elger, 1991; Classen et al., 1995), los numerosos estudios realizados en diversos grupos de pacientes, incluyendo enfermos de Parkinson (Ridding et al., 1995), esclerosis múltiple (Mayr et al., 1991) e incluso epilépticos (Tassinari et al., 1990) demuestran un alto grado de seguridad. Sin embargo varios trabajos han mostrado que la estimulación repetitiva a frecuencias superiores a los 10Hz pueden inducir ataques epilépticos generalizados incluso en personas sin historia de epilepsia conocida (Pascual-Leone et al., 1993; Wassermann

et al., 1996a). En vista de ello, se han realizado varios estudios para establecer unas líneas generales de seguridad en función de los diferentes parámetros de estimulación a utilizar que deben de ser consultados por los lectores interesados en trabajar con EMT (Pascual-Leone et al., 1993, 1994a; Wassermann et al., 1996a,b; Chen et al., 1997).

¿DE QUE MANERA ES POSIBLE MODULAR LA EXCITABILIDAD CORTICAL CON LA EMT?

Evidentemente mediante la utilización de los diferentes parámetros de estimulación. Cuando la EMT es aplicada en trenes de múltiples estímulos en una misma área del cerebro, la excitabilidad cortical puede incrementarse o disminuirse de una manera sostenida dependiendo de la frecuencia y de la intensidad. El trabajo de Pascual-Leone et al., (1994a) ha demostrado que tras la aplicación de diferentes frecuencias de estimulación se obtiene un efecto que dura varios minutos después de la finalización de la estimulación. Cuando la estimulación magnética repetitiva es aplicada sobre la corteza motora primaria a intensidades por debajo del umbral motor no se consiguen potenciales motores evocados y no se observan cambios en la excitabilidad espinal mientras que si la intensidad se incrementa por encima del umbral motor un efecto excitatorio o inhibitorio puede ser provocado dependiendo de la frecuencia de estimulación utilizada (Chen et al., 1997; Tergau et al., 1997).

De los diversos estudios revisados sobre el efecto de la EMT en la corteza motora primaria podemos dar como indicaciones las siguientes: frecuencias elevadas (> 5Hz) e intensidades supraumbral incrementan el tamaño del PME (efecto excitador) (Wu et al., 2000); frecuencias elevadas e intensidades subumbral incrementan el tamaño del PME (Maeda et al., 2000); frecuencias bajas (1-5 Hz) e intensidades supraumbral disminuyen el tamaño del PME (efecto inhibitorio) (Chen et al., 1997); frecuencias bajas e intensidades subumbral disminuyen el tamaño del PME (Maeda et al., 2000); frecuencias por debajo de 1 Hz e intensidades por debajo del 90% del umbral motor no parecen tener ningún efecto sobre los PME (Gerschlagel et al., 2001).

3. APLICACIONES DE LA EMT

EMT EN NEUROLOGÍA CLÍNICA Y APLICACIONES TERAPÉUTICAS

Dado que la EMT es una técnica indolora y carente de efectos adversos serios siempre y cuando se respeten los protocolos de seguridad, se ha introducido como un método de rutina en los laboratorios de neurofisiología clínica para la exploración de pacientes con trastornos neurológicos (Rösler 2001). Parámetros como la amplitud, latencia del PME, la conducción central y periférica son los más utilizados para abordar a los enfermos con alguna afectación de los tractos motores, como pueden ser pacientes con accidente cerebro-vasculares, enfermedad de Parkinson,

miopatía cervical, enfermedad de la motoneurona, esclerosis múltiple, distonía, enfermedad de Huntington, mioclonías, ataxia cerebelosa, síndrome de Tourette, síndrome de piernas inquietas, epilepsia...

A pesar del claro valor de la EMT como herramienta diagnóstica en la intervención clínica, los estudios referentes a su utilización con fines terapéuticos no aportan, todavía, evidencias contundentes de los posibles beneficios, por lo que, aún hoy, su utilidad en este sentido no está exenta de controversias. Las principales limitaciones para el uso de la EMT como tratamiento son, para sus detractores, los pocos estudios referentes a un efecto duradero de la EMT y la limitación de la corriente inducida por el estimulador magnético en cuanto a su penetración en zonas profundas del cerebro responsables, en muchos casos, del desorden neurológico (Wassermann y Lisanby 2001). No obstante, diversos estudios han comprobado beneficios mediante la aplicación de EMT en la depresión, desordenes obsesivo-compulsivos, la esquizofrenia así como en desordenes motores como la enfermedad de Parkinson y las distonías funcionales (para más información Wassermann y Lisanby 2001).

EMT PARA EL ESTUDIO DE LA PLASTICIDAD CORTICAL

Para Siebner y Rothwell (2003) la EMT se emplea en la actualidad para explorar la plasticidad de la corteza humana de tres maneras diferentes (tabla 1). La primera de ellas es la posibilidad de “mapear” cambios que se relacionan con el patrón de conexiones dentro y entre diferentes áreas corticales o de sus proyecciones espinales. Ejemplo de ello serían los estudios sobre la organización topográfica de la corteza motora como respuesta a intervenciones quirúrgicas, inmovilizaciones o adquisición de una nueva habilidad (Cohen et al., 1991; Brasil Neto et al., 1992; Liepert et al., 1995; Ridding y Rothwell 1995; Ridding et al., 2001; Zanette et al., 1997). Una segunda aplicación viene dada por el uso de la EMT para crear “lesiones virtuales” (debido a la propiedad de la EMT de bloquear la actividad cortical) (Walsh y Rushworth 1999) e interferir con el patrón normal de actividad neuronal durante la percepción sensorial, la ejecución motora o los procesos cognitivos (Jahanshahi y Rothwell 2000), y conocer qué cambios acontecen en la organización cerebral. Ejemplos de estas “lesiones virtuales” serían el incrementar el tiempo de reacción ante un estímulo (Day et al., 1989a,b), alterar la percepción visual del movimiento (Hotson et al., 1994), provocar la aparición de fosfenos (Stewart et al., 1999) etc...Una última manera de estudiar la plasticidad cortical mediante EMT es la de producir cambios en la excitabilidad de los circuitos corticales, que se mantienen más allá del periodo de estimulación (ver apartado de parámetros de estimulación y seguridad).

Tabla 1. Resumen de las diferentes aproximaciones que pueden ser adoptadas para investigar la plasticidad en el cerebro humano mediante la utilización de la estimulación magnética transcranial según Siebner y Rothwell, 2003.

Método	Sistema funcional	Tipo de EMT
1 Explorando cambios dinámicos de representación funcional		
1.1 Mapa de representaciones corticomotoras	Sistema motor ejecutivo	EMT pulso simple
1.2 Medida de los cambios en la excitabilidad corticomotor	Sistema motor ejecutivo	EMT pulso simple/pareado
1.3 Medida de los cambios en el umbral de fosfenos	Sistema visual	EMT pulso simple/pareado
2. Medida de la relevancia funcional de la reorganización		
2.1 Perturbación de distintas funciones cerebrales ^a	Redes funcionales ^b	EMT pulso simple/pareado
2.2 Mejora de distintas funciones cerebrales	Redes funcionales ^b	EMT repetitiva trenes cortos
3 Fomento de la plasticidad representativa con estimulación magnética transcranial repetitiva		
3.1 Condicionamiento de la excitabilidad cortical	Sistema motor y visual	EMT repetitiva
3.2 Modulación duradera de distintas funciones cerebrales	Redes funcionales ^b	EMT repetitiva
3.3 Técnicas de imagen para la reorganización funcional inducida por EMT repetitiva.	Redes funcionales ^b	EMT repetitiva

^aEMT es capaz de modular un variedad de funciones cerebrales, incluyendo la percepción, el control motor, el humor y la cognición. ^bRedes de trabajo.

EMT PARA EL ESTUDIO DEL CONTROL MOTOR

Es importante destacar en este apartado la aplicación de la EMT en el estudio de la coordinación de los movimientos del miembro superior y fundamentalmente en aquellos centrados en la musculatura de la mano, en acciones como la función de “pinza” entre el pulgar y el índice o de agarre de todos los dedos (Lemon et al., 1995), en la coordinación de los dedos para producir una determinada fuerza (Latash et al., 2003; Danion et al., 2003), en el estudio del papel del cerebelo para la ejecución de diferentes tareas con el dedo, y en el estudio de los movimientos repetitivos, como puede ser el golpeo a la máxima velocidad o en relación con un sonido (Theoret et al., 2001; Jäncke et al., 2004). También son numerosos los trabajos que investigan mediante la EMT el papel del área motora suplementaria en los movimientos de coordinación bimanual (Serrien et al., 2002; Steyvers et al., 2003).

LA EMT PARA EL ESTUDIO DEL TIEMPO DE REACCIÓN

Mediante la EMT es posible interferir en los procesos cerebrales cuando se intenta responder mediante el movimiento a la aparición de un estímulo, permitiendo, de este modo, conocer la fisiología del tiempo de reacción (Pascual-Leone et al., 1994b). El estudio de Starr et al., (1988) ha permitido identificar dos fases en el tiempo de reacción, una primera fase donde la corteza motora permanece relativamente “inexcitable” y un segundo periodo de creciente excitabilidad cortical que tiene lugar a medida que se prepara para realizar el movimiento (figura 4). Este último período marcará el tiempo requerido para el inicio del movimiento, ya que de él dependerá la activación de las células cortico-motoneuronales responsables de la activación electromiográfica (Pascual-Leone et al., 1991a). Si se aplican estímulos magnéticos transcraneales de alta intensidad muy cerca del tiempo de inicio del movimiento, el tiempo de reacción puede verse prolongado (Day et al., 1989b), mientras que si se utilizan estímulos magnéticos de menor intensidad se acortará el tiempo de reacción (Pascual-Leone et al., 1991a,b); acortamiento que podrá ser de hasta 30 ms, independiente de la modalidad sensorial de la señal de inicio y limitado a la estimulación de la corteza motora (Pascual-Leone et al., 1994b).

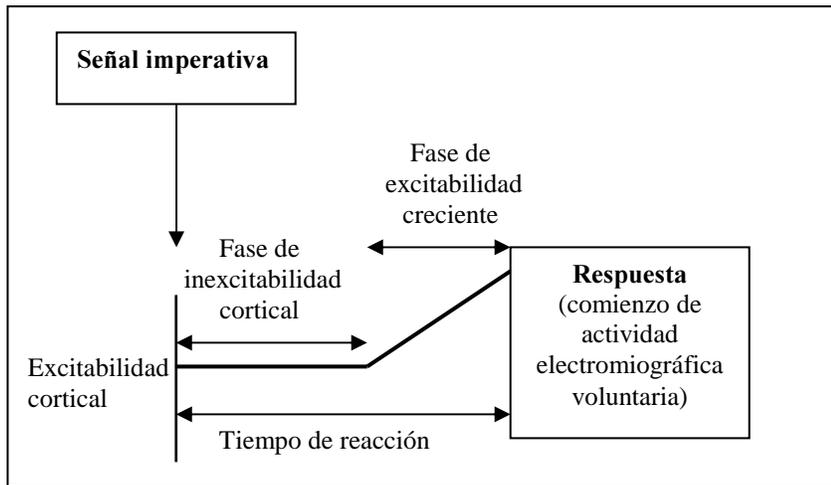


Figura 4. Modelo del curso de la excitabilidad cortical durante el tiempo de reacción según Starr et al., 1988. A un primer periodo de relativa inexcitabilidad cortical le acompaña un segundo periodo de creciente excitabilidad que se desarrolla a medida que el sujeto se prepara para iniciar el movimiento.

LA EMT PARA EL ESTUDIO DE LA FATIGA POST-EJERCICIO

La fatiga se define como “cualquier reducción inducida por el ejercicio en la habilidad de ejercer fuerza muscular, al margen de si la tarea puede o no ser mantenida” (Gandevia 2001). Esta fatiga puede ser periférica (más allá de la función

neuromuscular) o central (las proyecciones hasta el asta anterior de la médula espinal) (Bigland-Ritchi y Woods 1984; Samii et al., 1997). La combinación de electromiografía junto con EMT es una estrategia muy utilizada para la medición de los componentes periféricos y centrales de la fatiga muscular (McKay et al., 1995). Estudios con EMT sobre la corteza motora han revelado cambios en la excitabilidad corticoespinal durante y después del ejercicio (Brasil-Neto et al., 1993; Gandieva et al., 1996; Samii et al., 1996). Por ejemplo, durante el mantenimiento de contracciones isométricas el PME incrementa su área y amplitud (Mills y Thomson 1995; Taylor et al., 1996). En estudios después del ejercicio, estos cambios consisten en un incremento de los PEMs (facilitación post-ejercicio) por un periodo de aproximadamente 3 minutos después de cesar el ejercicio seguido de una disminución de los PEMs (depresión post-ejercicio). La duración y magnitud de estos cambios dependerán de los músculos testados y de la intensidad y duración de los ejercicios (Humphry et al., 2004); de hecho, parece constatado, que el trabajo anaeróbico produce una mayor depresión post-ejercicio de los PEMs que el ejercicio aeróbico (Hollge et al., 1997) y que la duración de esta depresión está relacionado con la intensidad del ejercicio (Sacco et al., 2000). No obstante aún son pocos los estudios sobre fatiga realizados en deportistas mediante la EMT, solamente un estudio realizado en deportistas de élite, concretamente remeros (Fulton et al., 2002) ha investigado los cambios inducidos por la fatiga en el tracto corticoespinal comparándolos con sujetos no remeros encontrando una menor depresión de los PME post-ejercicio en el grupo de remeros y una mayor latencia indicativa de un mayor reclutamiento de unidades motoras lentas. La técnica de la EMT pareada ha sido también utilizada para conocer la inhibición o facilitación intracortical post-ejercicio de fuerza, mostrando variaciones de la facilitación intracortical selectivas al músculo entrenado sugiriendo los autores que la EMT pareada puede ser una herramienta en el control de entrenamiento de deportistas permitiendo detectar estados de fatiga central que puedan conducir a un sobreentrenamiento (Tergau et al., 2000).

LA EMT PARA EL ESTUDIO DE LAS ADAPTACIONES NEURONALES AL EJERCICIO

Es sabido que el entrenamiento motor va acompañado de adaptaciones que tienen lugar en el sistema nervioso central si bien se han realizado pocos experimentos para demostrar las adaptaciones específicas en respuesta a diferentes tipos de entrenamiento (Carroll et al., 2001). Parece lógico pensar que el número de experimentos que han usado la EMT para investigar la naturaleza de estas adaptaciones sean también escasos. Pearce et al., 2000 no encontró diferencias en la excitabilidad cortical o en la inhibición intracortical entre los músculos de la mano

dominante y no dominante en jugadores de bádminon, si bien algunos de ellos mostraban un menor umbral motor en la mano entrenada que en la no entrenada. Classen et al. (1998) encontró que realizando movimientos rápidos con el pulgar durante 30 minutos cambiaba la dirección de las fibras que eran estimuladas por la EMT hacia la dirección en la cual el pulgar se movía durante el entrenamiento. Entrenamientos de fuerza de 4 semanas de duración muestran una mejora significativa de la contracción voluntaria máxima acompañada de un incremento significativo en la amplitud del PME (Griffin y Cafarelli 2003). Cabe destacar en este apartado el estudio realizado por Pascual-Leone et al.(1995), en el que se comprobó como después de 5 días de práctica de movimientos del dedo sobre un piano, 2 horas al día, el número de zonas del cuero cabelludo en el cual se podían originar los PMEs mediante EMT en los músculos flexores y extensores del dedo entrenado se había incrementado. Más sorprendente fue el encontrar esos mismos cambios en un grupo que realizaba únicamente una práctica mental estructurada de ese movimiento. Las posibles explicaciones a estos hallazgos escapan a esta revisión.

POSIBLES APLICACIONES EN EL ÁMBITO DEL ENTRENAMIENTO DEPORTIVO

Se ha mencionado en los apartados anteriores la utilización de la EMT tanto para el conocimiento de las adaptaciones neuronales a diferentes tipos de ejercicio, como de los mecanismos del sistema nervioso vinculados a la fatiga. Es obvio pensar que un mejor conocimiento de estas cuestiones podrían tener una aplicación en el ámbito del entrenamiento deportivo y/o de la actividad física en general. También se ha mostrado de que manera, mediante la EMT, se puede modificar la excitabilidad cortical ya sea facilitándola o disminuyéndola. La pregunta que surge es, ¿sería posible favorecer el rendimiento motor mediante la aplicación sistemática y controlada de la EMT?, previamente a esta cuestión, se deben responder otras preguntas cómo ¿es posible conseguir un efecto mantenido en el tiempo de la EMT? y ¿es segura la aplicación duradera de la EMT?. En relación a estas cuestiones no existen estudios en poblaciones de deportistas donde se haya investigado el efecto del rendimiento motor como consecuencia de la estimulación magnética transcranial y menos aún el tiempo de duración del posible efecto. La mayoría de los estudios que nos podrían servir como guía de referencia se centran en grupos de pacientes neurológicos, como por ejemplo pacientes con Parkinson, donde se ha comprobado que es posible mejorar su disfunción motora y mantenerla en el tiempo (Sandyk et al., 1992; Mally y Stone, 1999). De todos modos la extrapolación de estos resultados a personas sanas es, a todas luces, arriesgada. En vista a la relativamente cercana

aparición de la EMT (Barker et al., 1985) habrá que esperar para conocer todas las posibilidades de esta técnica y cuál puede ser su papel dentro del ámbito del entrenamiento deportivo.

4. CONCLUSIONES

La EMT es una técnica no invasiva e indolora que permite alterar eléctricamente la actividad neuronal de la corteza cerebral humana, con numerosas aplicaciones para profundizar en nuestro conocimiento de cómo funciona el sistema nervioso. Por ello, el estudio del control motor durante la actividad física y el deporte puede verse beneficiado con la utilización de esta técnica, si bien los numerosos interrogantes sobre su aplicación han de ser resueltos paralelamente.

REFERENCIAS

- ABBRUZZESE, G. (2003). Transcranial Magnetic Stimulation in Clinical Neurology. *Course G, Transcranial magnetic stimulation*. San Francisco, California, USA. 19-26.
- ABBRUZZESE, G., y TROMPETTO, C. (2002). Clinical and research methods for evaluating cortical excitability. *J Clin Neurophysio*, 81, 202-208.
- ABBRUZZESE, G., MARCHESE, R., y TROMPETTO, C. (1997). Sensory and motor evoked potentials in multiple system atrophy: a comparative study with Parkinson's disease. *Mov Disord*, 12, 315-321.
- BARKER, A.T., JALINOUS, R., FREENSTON, I.L., y JARRATT, J.A. (1985). Clinical evaluation of conduction time measurements in central motor pathways using magnetic stimulation of human brain. *Lancet*, 1, 1325-1326.
- BERGER, H. (1938). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. Vierzehnte Mitteilung. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 108, 407-431.
- BIGLAND-RITCHIE, B., y WOODS, J.J. (1984). Changes in muscle contractile properties and neural control during human muscular fatigue. *Muscle nerve*, 7, 691-699.
- BRASIL-NETO, J.P., PASCUAL-LEONE, A., VALLS-SOLÉ, J., CAMMAROTA, A., COHEN, L.G., y HALLET, M. (1993). Postexercise depresión of motor evoked potentials; a measure of central nervous system fatigue. *Exp Brain Res*, 93, 181-184.

- BRASIL-NETO, J.P., COHEN, L.G., PASCUAL-LEONE, A., JABIR, F.K., WALL, R.T., y HALLET, M. (1992). Rapid reversible modulation of human motor outputs after transient deafferentation of the forearm: a study with transcranial magnetic stimulation. *Neurology*, 42, 1302-1306.
- BRIDGERS, S.L., y DELANEY, R.C. (1989). Transcranial magnetic stimulation: An assessment of cognitive and other cerebral effects. *Neurology*, 39, 417-419.
- CARROLL, T.J., RIEK, S., y GARSON, R.G. (2001). Corticospinal responses to motor training revealed by transcranial magnetic stimulation. *Exerc Sport Sci Rev*, 29, 54-59.
- CHEN, R., CLASSEN, J., GERLOFF, C., CELNIK, P., WASSERMANN, E.M., HALLET, M., y COHEN, L.G. (1997). Depression of motor cortex excitability by low-frequency transcranial magnetic stimulation. *Neurology*, 48, 1398-1403.
- CLASSEN, J., WITTE, O.W., SCHLAUG, G., SEITZ, R.U., HOLTAUSEN, H., y BENECKE, R. (1995). Epileptic seizures triggered directly by focal transcranial magnetic stimulation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 94, 19-25.
- CLASSEN, J., LIEPERT, J., WISE, S.P., HALLET, M., y COHEN, L.G. (1998). Rapid plasticity of human cortical movement representation induced by practice. *J Neurophysiol*, 79, 1117-1123.
- COHEN, L.G., ZIEMANN, U., CHEN, R. y COL. (1998). Studies of neuroplasticity with transcranial magnetic stimulation. *J Clin Neurophysiol*, 15, 333-343.
- COHEN, L.G., BANDINELLI, S., TOPKA, H.R., FUHR, P., ROTH, B.J. y HALLET, M. (1991). Topographic maps of the human motor cortex in normal and pathological conditions: mirror movements, amputations and spinal cord injuries. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, S43, 36-50.
- DANION, F., LATASH, M.L., y LI, S. (2003). Finger interactions studied with transcranial magnetic stimulation during multi-finger force production tasks. *Clin Neurophysiol*, 114, 1445-1455.
- DAY, B.L., DRESSLER, D., DE NOORDHOUT, A.M., MARSDEN, C.D., NAKASHIMA, K., ROTHWELL, J.C., y THOMPSON, P.D. (1989a). Electric and magnetic stimulation of the human motor cortex: Surface EMG and single motor unit responses. *J Physiol*, 412, 449-473.

- DAY, B.L., ROTHWELL, J.C., THOMPSON, P.D., DE NOORDHOUT, A.M., NAKASHIMA, K., SHANNON, K., y MARSDEN, C.D. (1989b). Delay in the execution of voluntary movement by electrical or magnetic brain stimulation in intact man: Evidence for the storage of motor programs in the brain. *Brain*, 112, 649-663.
- DE NOORDHOUT, A.M., RAPISARDA, G., BOGACZ, D., GERARD, P., DE PASQUA, V., PENNISI, G., y DELWAIDE PJ (1999). Corticomotoneuronal synaptic connections in normal man: an electrophysiological study. *Brain*, 122, 1327-1340.
- DI LAZZARO, V., RESTUCCIA, D., OLIVIERO, A., PROFICE, P., FERRARA, L., INSOLA, A., MAZZONE, P., TONALI, P., y ROTHWELL, J.C. (1998). Effects of voluntary contraction on descending volleys evoked by transcranial stimulation in conscious humans. *J Physiol*, 508, 625-633.
- DRESSLER, D., VOTH, E., FELDMANN, M., y BENECKE, R. (1990). Safety aspects of transcranial brain stimulation tested with single photon emission tomography. *Neurosci Lett*, 119, 153-155.
- FULTON, R.C., STRUTTON, P.H., MCGREGOR, A.H., y DAVEY, N.J. (2002). Fatigue-induced change in corticospinal drive to back muscles in elite rowers. *Exp Physiol*, 87.5, 593-600.
- GANDIEVA, S.C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev*, 81, 1725-1789.
- GANDIEVA, S.C., ALLEN, G.M., BUTLER, J.E., y TAYLOR, J.L. (1996). Supraspinal factors in human muscle fatigue: evidence for suboptimal output from the motor cortex. *J Physiol Lond*, 490, 529-536.
- GERSCHLAGER, W., SIEBNER, H.R., y ROTHWELL, J.C. (2001). Decreased corticospinal excitability after subthreshold 1 Hz rTMS over lateral premotor cortex. *Neurology*, 57, 449-455.
- GRIFFIN, L., y CARAFELLI, E. (2003). Neural excitability following resistance training studied with transcranial magnetic stimulation. *Medicine science sports exercise*, 35 (S1), s 293.
- HALLET, M. (2000). Transcranial magnetic stimulation and the human brain. *Nature*, 406, 147-150.
- HESS, C.W. MILLS, K.R., y MURRAY, N.M. (1986). Magnetic stimulation of the human brain: facilitation of motor responses by voluntary contraction of ipsilateral and contralateral muscles with additional observations on an amputee. *Neurosci Lett*, 71, 235-240.

- HUFNAGEL, A., y ELGER, C.E. (1991). Induction of seizures by transcranial magnetic stimulation in epileptic patients. *J Neurol*, 238, 109-110.
- HUMPHRY, A.T., LLOYD-DAVIES, E.J., TEARE, R.J., WILLIAMS, K.E., STRUTTON, P.H., y DAVEY, N.J. (2004). Specificity and functional impact of post-exercise depression of cortically evoked motor potentials in man. *Eur J Appl Physiol*, 92, 211-218.
- HOLLGE, J., KUNDEL, M., ZIEMANN, U., TERGAU, F., GEEWSE, R., y REIMERS, C.D. (1997). Central fatigue in sports and daily exercise. A magnetic stimulation study. *Int J Sport Med*, 18, 614-617.
- HOTSON, J.R., BRAUN, D., HERZBERG, W., y BOMAN, D. (1994). Transcranial magnetic stimulation of extrastriate cortex degrades human motion direction discrimination. *Vision Research*, 34, 2115-2123.
- ILMONEMI, R.J., RUOHONEN, J., y KARHU, J. (1999). Transcranial magnetic stimulation: a new tool for functional imaging of the brain. *Crit Rev Biomed Eng*, 27, 241-284.
- INGHILLERI, M., BERARDELLI, A., CRUCCU, G., y MANFREDI, M. (1993). Silent period evoked by transcranial stimulation of the human cortex and cervicomedullary junctions. *J Physiol*, 466, 521-534.
- IYER, M.B., SCHLEPER, N., y WASSERMANN, E.R. (2003). Priming stimulation enhances the depressant effect of low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation. *J Neurosci*, 23, 10867-10872.
- JAHANSHAH, M., y ROTHWELL, J.C. (2000). Transcranial magnetic stimulation studies of cognition: an emerging field. *Exp Brain Res*, 131, 1-9.
- JAHANSHAH, M., RIDDING, M.C., LIMOUSIN, P., PROFICE, P., FOGEL, W., DRESSLER, D., FULLER, R., BROWN, R.G., BROWN, P., y ROTHWELL, J.C. (1997). Rapid rate transcranial magnetic stimulation – a safety study. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 105, 422-429.
- JÄNCKE, L., STEINMETZ, H., BENILOW, S., y ZIEMANN, U. (2004). Slowing fastest finger movement of the dominant hand with low-frequency sTMS of the hand area of the primary motor cortex. *Exp Brain Res*, 155, 196-203.
- KUJIRAI, T., CARAMIA, M.D., ROTHWELL, J.C., DAY, B.L., THOMPSON, B.D., y FERBERT, A. (1993). Cortico-cortical inhibition in human motor cortex. *J Physiol London*, 471, 501-520.

- LATASH, M.L., YARROW, K., y ROTHWELL, J.C. (2003). Changes in finger coordination and responses to single pulse TMS of motor cortex during practice of a multifinger force production task. *Exp Brain Res*, 151, 60-71.
- LEMON, R.N., JOHANSSON, R.S., y WESTLING, G (1995). Corticospinal control during reach, grasp, and precision lift in man. *J Neurosci*, 15, 6145-6156.
- LIEPERT, J., TEGENTHOFF, M., y MALIN, J.P. (1995). Changes of cortical motor area size during immobilization. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 97, 382-386.
- MAEDA, F., KEENAN, J.P., TORMOS, J.M., TOPKA H., y PASCUAL-LEONE, A. (2000). Modulation of corticospinal excitability by repetitive transcranial magnetic stimulation. *Clin Neurophysiol*, 111, 800-805.
- MALLY, J., y STONE, T.W. (1999). Therapeutic and “dose-dependent” effect of repetitive microelectroshock induced by transcranial magnetic stimulation in Parkinson’s disease. *J Neurosci Res*, 7, 1-6.
- MAYR, N., BAUMGARTNER, C., ZEITLHOFER, J., y DEECKE, L. (1991). The sensitivity of transcranial cortical magnetic stimulation in detecting pyramidal tract lesions in clinically definite multiple sclerosis. *Neurology*, 41, 556-566.
- MCKAY, W.B., TUEL, S.M., SHERWOOD, A.M., STOKIC, D.S., y DIMITRIJEVIC, M.R. (1995). Focal depression of cortical excitability induced by fatiguing muscle contraction: a transcranial magnetic stimulation study. *Exp Brain Res*, 105, 276-282.
- MERTON, P.A., y MORTON, H.B. (1980a). Stimulation of the cerebral cortex in the intact human subjects. *Nature*, 285, 227.
- MERTON, P.A., y MORTON, H.B. (1980b). Electrical stimulation of human motor and visual cortex through the scalp. *J Physiol London*, 305, 9-10.
- MILLS, K.R., y THOMSON, C.C. (1995). Human muscle fatigue investigated by transcranial magnetic stimulation. *Neuroreport*, 6, 1966-1968.
- MILLS, K.R., BONIFACE, S.J., y SCHUBERT, M. (1992). Magnetic brain stimulation with a double coil: the importance of coil orientation., 85, 17-21.
- PASCUAL-LEONE, A., TORMOS, J.M., KEENAN, J., TARAZONA, F., CANETE, C., y CATALA, M.D. (1998). Study and modulation of human

- cortical excitability with transcranial magnetic stimulation. *J Clin Neurophysiol*, 15, 333-343.
- PASCUAL-LEONE, A., DANG, N., COHEN, L.G., BRASIL-NETO, J.P., CAMAROTA, A., y HALLET, M. (1995). Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *J Neurophysiol*, 74, 1037-1045.
- PASCUAL-LEONE, A., VALLS-SOLÉ, J., WASSERMANN, E.M., y HALLET, M. (1994a). Responses to rapid-rate transcranial stimulation of the human motor cortex. *Brain*, 117, 847-858.
- PASCUAL-LEONE, A., VALLS-SOLÉ, J., HERNÁNDEZ, S., y HALLET, M. (1994b). La acinesia en la enfermedad de Parkinson: patofisiología e implicaciones terapéuticas. *Neurología*, 9, 287-294.
- PASCUAL-LEONE, A., HOUSER, C.M., REEVES, K., SHOTLAND, L.I., GRAFMAN, J., SATO, J., VALLS-SOLÉ, J., BRASIL-NETO, J.P., WASSERMANN, E.M., COHEN, L.G., y HALLET, M. (1993). Safety of rapid-rate transcranial magnetic stimulation in normal volunteers. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 89, 120-130.
- PASCUAL-LEONE, A., VALLS-SOLÉ, J., BRASIL-NETO, J y COL (1991a). Effect of focal transcranial magnetic stimulation on simple reaction time to visual, acoustic and somatosensory stimuli. *Brain*, 115, 1045-1059.
- PASCUAL-LEONE, A., BRASIL-NETO, J., VALLS-SOLÉ, J., y COL (1991b). Simple reaction time to focal transcranial magnetic stimulation: comparison with reaction time to acoustic, visual, and somatosensory stimuli. *Brain*, 115, 109-122.
- PEARCE, A.J., THICKBROOM, G.W., BYRNES, M.L., y MASTAGLIA, F.L. (2000). Functional reorganisation of the corticomotor projection to the hand in skilled racquet players. *Exp Brain Res*, 130, 238-243.
- RIDDING, M.C., MCKAY, D.R., THOMPSON, P.D., y MILES, T.S. (2001). Changes in corticomotor representations induced by prolonged peripheral nerve stimulation in humans. *Clin Neurophysiol*, 112, 1461-1469.
- RIDDING, M.C., INZELBERG, R. y ROTHWELL, J.C. (1995). Changes in excitability of motor cortical circuitry in patients with Parkinson's disease. *Ann Neurol*, 37, 181-188.
- RIDDING, M.C., y ROTHWELL, J.C. (1995). Reorganisation in human motor cortex. *Can J Physiol Pharmacol*, 73, 218-222.

- RÖSLER, K.M. (2001). Transcranial magnetic brain stimulation: a tool to investigate central motor pathways. *News Physiol Sci*, 16, 297-302.
- ROSSINI, P.M., MARCIANI, M.G., CARAMIA, M., ROMA, V., y ZAROLA, F. (1985). Nervous propagation along 'central' motor pathways in intact man: characteristics of motor responses to 'bifocal' and 'unifocal' spine and scalp non-invasive stimulation. *Electroenceph clin Neurophysiol*, 61, 272-286.
- ROTHWELL, J.C., THOMPSON, P.D, DAY, B.L., DICK, J.P., KACHI, T., COWAN, J.M. y COL. (1987). Motor cortex stimulation in intact man. 1. General characteristics of EMG response in different muscles. *Brain*, 110, 1173-1190.
- ROTHWELL, J.C., THOMPSON, P.D, DAY, B.L., BOYD, S., y MARSDEN, C.D. (1991). Stimulation of the human motor cortex through the scalp. [Review]. *Exp Physiol*, 76, 159-200.
- SACCO, P., THICKBROOM, G.W., BYRNES, M.L., y MASTAGLIA, F.L. (2000). Changes in corticomotor excitability after fatiguing muscle contraction. *Muscle Nerve*, 23, 1840-1846.
- SAMII, A., WASSERMANN, E.M., y HALLET, M. (1997). Post-exercise depression of motor evoked potentials as a function of exercise duration. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 105, 352-356.
- SAMII, A., WASSERMANN, E.M., IKOMA, K., MERCURI, B., y HALLET, M. (1996). Characterization of postexercise facilitation and depression of motor evoked potentials to transcranial magnetic stimulation. *Neurology*, 46, 1376-1382.
- SANDYK, R., ANNIMOS, P.A., TSAGAS, N., y DERPAPAS, K. (1992). Magnetic fields in the treatment of Parkinson's disease. *Int J Neurosci*, 63, 141-150.
- SERRIEN, D.J., STRENS, L.H., OLIVEIRO, A. y BROWN P. (2002). Repetitive transcranial magnetic stimulation of the supplementary motor area (SMA) degrades bimanual movement control in humans. *Neurosci Lett*, 328, 89-92.
- SIEBNER, H.R, y ROTWELL, J.C. (2003). Transcranial magnetic stimulation: new insights into representational cortical plasticity. *Exp Brain Res*, 148, 1-16.
- STARR, A., CARAMIA, M., ZAROLA T. y COL. (1988). Enhancement of motor cortical excitability in humans by non-invasive electrical stimulation appears prior to voluntary movement. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 70, 26-32.

- STEWART, L.M., BATTELLI, L., WALSH, V., y COWEY, A. (1999). Motion perception and perceptual learning studied by magnetic stimulation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 51, 334-350.
- STEYVERS, M., ETOH, S., SAUNER, D., LEVIN, O., SIEBNER, H.R., SWINNEN, S.P., y ROTHWELL, J.C. (2003). High-frequency transcranial magnetic stimulation of the supplementary motor area reduces bimanual coupling during anti-phase but not in-phase movements. 151, 309-317.
- TASSINARI, C.A., MICHELUCCI, R., FORTI, A., PLASMATI, R., TRONI, W., SALVI, F., BLANCO, M., y RUBBOLI, G. (1990). Transcranial magnetic stimulation in epileptic patients : Usefulness and Safety. *Neurology*, 40, 1132-1133.
- TAYLOR, J.L., BUTLER, J.E., ALLEN, G.M., y GANDEVIA, S.C. (1996). Changes in motor cortical excitability during human muscle fatigue. *J Physiol Lond*, 490, 519-528.
- TERGAU, F., TORMOS, J.M., PAULUS, W., ZIEMANN, U., y PASCUAL-LEONE, A. (1997). Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation on cortico-spinal and cortico-cortical excitability. *Neurology*, 48: A107
- TERGAU, F., GEESE, R., BAUER, A., BAUR, S., PAULUS, W., y REIMERS, C.D. (2000). Motor cortex fatigue in sports measured by transcranial magnetic double stimulation. *Medicine science sport exercise*, 32, 1942-1948.
- THEORET, H., HAQUE, J., y PASCUAL-LEONE, A. (2001). Increased variability of paced finger tapping accuracy following repetitive magnetic stimulation of the cerebellum in humans. *Neurosci Lett*, 306, 29-32.
- THOMPSON, P.D., DAY, B.L., CROCKARD, H.A., CALDER, I., MURRAY, N.M., ROTHWELL, J.C., y MARSDEN, C.D. (1991). Intra-operative recording of motor tract potentials at the cervico-medullary junction following scalp electrical and magnetic stimulation of the motor cortex. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 54, 618-628.
- WALSH, V., y RUSHWORTH, M. (1999). A primer of magnetic stimulation as a tool for neuropsychology. *Neuropsychologia*, 37, 125-135.
- WASSERMANN, E.M., FUHR, P, COHEN, L.G., y HALLET, M. (1991). Effects of transcranial magnetic stimulation on ipsilateral muscles. *Neurology*, 41, 1795-1799.

- WASSERMANN, E.M., COHEN, L.G., FLITMAN, S.S., CHEN, R., y HALLET, M. (1996a). Seizures in healthy people with repeated 'safe' trains of transcranial magnetic stimuli (Letter). *Lancet*, 347, 825.
- WASSERMANN, E.M., GRAFMAN, J., BERRY, C., HOLLNAGEL, C., WILD, K., CLARK, K., y HALLET M. (1996b). Use and safety of a new repetitive transcranial magnetic stimulator. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 101, 412-417.
- WASSERMANN, E.M., y LISANBY, S. (2001). Therapeutic application of repetitive transcranial magnetic stimulation: a review. *Clin Neurophysiol*, 12, 1367-1377.
- WERHAHN, K.J., FONG, J.K., MEYER, B.U., PRIORI, A., ROTHWELL, J.C., DAY, B.L., y THOMPSON, P.D. (1994). The effect of magnetic coil orientation on the latency of surface EMG and single motor unit responses in the first dorsal interosseous muscle. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 93, 138-146.
- WU, T., SOMMER, M., TERGAU, F., y PAULUS, W. (2000). Lasting influence of repetitive transcranial magnetic stimulation on intracortical excitability in human subjects. *Neurosci Lett*, 287, 37-40.
- ZANETTE, G., TINAZZI, M., BONATO, C., DI SUMMA, A., MANGANOTTI, P., POLO, A., y FIASCHI, A. (1997). Reversible changes of motor cortical outputs following immobilization of the upper limb. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 105, 269-279.
- ZIEMANN, U. (2002). Assessment of motor cortex and descending motor pathways. En Brown, W.F., Bolton, C.F., Aminoff M.J. (eds). *Neuromuscular function and disease. Basic, clinical and electrodiagnostic aspects*. Philadelphia: WB Saunders, 189-221