

Estimulación magnética transcraneal: evidencia clínica, seguridad y aplicaciones terapéuticas en trastornos psiquiátricos y neurológicos

Transcranial magnetic stimulation: clinical evidence, safety, and therapeutic applications in psychiatric and neurological disorders

José María De la Roca Chiapas ^a, Jose Eduardo Lepez ^b, Olga Estefania Escobar ^c, Blanca Murillo Ortiz ^d, Teodoro Cordova Fraga ^e, Angelica Hernández Rayas ^f

Abstract:

Transcranial magnetic stimulation (TMS) is a non-invasive technique that uses magnetic fields generated by electrical impulses applied to a coil, which induce electrical currents in specific regions of the brain to modulate neuronal activity. This technology enables safe and controlled modulation of neuronal activity and the brain function study. Over the years, TMS has evolved significantly, becoming a key tool in both neuroscientific research and the treatment of various neurological and psychiatric disorders. Its clinical applications continue to expand across multiple therapeutic areas. In psychiatry, regulatory agencies have approved for drug-resistant depression and, more recently, obsessive-compulsive disorder. In neurology, it has demonstrated effectiveness in managing of neuropathic pain, post-stroke motor rehabilitation, migraine treatment, and research on movement disorders such as Parkinson's disease. TMS maintain an excellent safety profile, with generally mild and transient adverse effects, supporting its growing clinical adoption. Ongoing research continues to expand its application, and future developments could provide new treatment possibilities for patients with complex brain disorders that currently lack effective solutions.

Keywords:

Transcranial magnetic stimulation, non-invasive technique, neurological disorders, psychiatric disorders, safety.

Resumen:

La estimulación magnética transcraneal (EMT) es un método no invasivo que emplea campos magnéticos producidos por impulsos eléctricos aplicados a una bobina, los cuáles generan corrientes eléctricas en áreas concretas del cerebro para modular su actividad. Esta tecnología permite la modulación segura y controlada de la actividad neuronal y el estudio de la función cerebral. A lo largo de los años, la EMT ha evolucionado significativamente, convirtiéndose en una herramienta clave tanto en la investigación neurocientífica como en el tratamiento de diversos trastornos neurológicos y psiquiátricos. Sus aplicaciones clínicas se expanden continuamente a múltiples áreas terapéuticas. En psiquiatría, las agencias reguladoras han aprobado su uso para la depresión resistente (DRT) a medicamentos y, más recientemente, para el trastorno obsesivo-compulsivo. En neurología, ha mostrado eficacia en el manejo del dolor neuropático, la rehabilitación motora tras accidentes cerebrovasculares, el tratamiento de la migraña y en el estudio de trastornos del movimiento, como la enfermedad de Parkinson. La EMT mantiene un excelente perfil de seguridad, con efectos adversos generalmente leves y transitorios, lo que respalda su creciente adopción clínica. Las investigaciones en curso continúan

^a Autor de Correspondencia, Universidad de Guanajuato, División de Ciencias de la Salud, Departamento de Psicología, León Guanajuato, México, <https://orcid.org/0000-0002-2563-403X>, Email: josema_delaroca@yahoo.com.mx

^b Universidad de Guanajuato, División de Ciencias de la Salud, Departamento de Psicología, León Guanajuato, México, <https://orcid.org/0000-0002-6920-4672>, Email: e.huertalepez@gmail.com

^c Universidad de Guanajuato, División de Ciencias de la Salud, Departamento de Psicología, León Guanajuato, México, <https://orcid.org/0000-0003-0196-9641>, olgestef@gmail.com

^d Unidad de Investigación en Epidemiología Clínica, OOAD Guanajuato, Instituto Mexicano del Seguro Social, Blvd. Adolfo López Mateos, 37320, León, Guanajuato, México, <https://orcid.org/0000-0003-4775-2755>, bomo907@hotmail.com

^e División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato campus León, Loma del Bosque 103, Lomas del Campestre, 37150 León, Guanajuato, México, <https://orcid.org/0000-0002-6486-7530>, theo@fisica.ugto.mx

^f División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato campus León, Loma del Bosque 103, Lomas del Campestre, 37150 León, Guanajuato, México, <https://orcid.org/0000-0002-2844-2922>, angelicahr@fisica.ugto.mx

ampliando su aplicación, y los desarrollos futuros podrían brindar nuevas posibilidades de tratamiento para pacientes con condiciones cerebrales complejas que actualmente carecen de soluciones efectivas.

Palabras Clave:

Estimulación magnética transcraneal, técnica no invasiva, trastornos neurológicos, trastornos psiquiátricos, seguridad.

Introducción

Los trastornos neurológicos y psiquiátricos representan un desafío global, que demanda intervenciones seguras, efectivas y tecnológicamente avanzadas. En este contexto, el desarrollo de dispositivos biomédicos ha permitido el surgimiento de herramientas como la estimulación magnética transcraneal (EMT), una técnica no invasiva capaz de modular la actividad cerebral sin requerir procedimientos quirúrgicos (Tubbs et al., 2025). A lo largo del tiempo, estos dispositivos han sido optimizados para potenciar los efectos terapéuticos y favorecer la mejoría clínica de diversos trastornos neurológicos y psiquiátricos (Abellaneda-Pérez, et al., 2023).

Diversos estudios han documentado remisiones que oscilan entre el 30% y el 50% de los pacientes tratados, dependiendo del protocolo aplicado. Por ejemplo, el protocolo de ráfaga theta intermitente (iTBS) ha mostrado tasas de remisión del 32% comparables al 27% obtenidas con TMS convencional a 10 Hz (Blumberger et al., 2018). En análisis de práctica clínica real, la TMS acelerada ha reportado tasas de remisión cercanas al 50,5% durante el primer mes de tratamiento (Roth et al., 2023). De forma similar, el uso de estimulación magnética profunda (Deep TMS) ha alcanzado remisiones del 60,3% en adultos mayores (Roth et al., 2024), y estudios de cohorte en veteranos han mostrado remisiones del 39% (Yesavage et al., 2018). Estos hallazgos sustentan la capacidad de la TMS para inducir remisión sintomática significativa en un número relevante de pacientes, aunque la persistencia de la mejoría varía según el protocolo y la población estudiada.

En el ámbito de la estimulación cerebral no invasiva, la estimulación eléctrica transcraneal ha evolucionado mediante el perfeccionamiento de sus métodos de aplicación, el diseño de electrodos y la optimización de las formas de onda, en concordancia con las regulaciones internacionales y los avances tecnológicos recientes (Pascual-Leone, 2008; Conde-Antón, et al., 2023). Estos progresos reflejan una creciente sofisticación médica y científica orientada a maximizar los beneficios terapéuticos de la neuromodulación.

El objetivo de este artículo es presentar una revisión reciente de las principales modalidades de estimulación cerebral no invasiva, con especial atención en la EMT. Se discuten sus aplicaciones clínicas, la evidencia científica disponible, su perfil de seguridad y sus efectos adversos.

Si bien el trastorno depresivo mayor (TDM) es la indicación con mayor respaldo empírico y será el foco principal del análisis, también se mencionan otras afecciones psiquiátricas y neurológicas en las que la EMT ha mostrado resultados prometedores.

Objetivo(s)

Proporcionar una revisión integral de las técnicas de estimulación cerebral comparadas, fundamentos neurofisiológicos, las aplicaciones clínicas y experimentales, las consideraciones de seguridad y efectividad en el TDM asociadas con la EMT. El propósito es ofrecer una visión actualizada, rigurosa y accesible de la EMT, integrando los hallazgos relevantes entre 2003 y 2025. Se pone especial énfasis en su eficacia terapéutica en el trastorno depresivo mayor (TDM), por ser la indicación con mayor respaldo empírico, además de revisar su potencial en otras condiciones psiquiátricas y neurológicas emergentes, como el TOC, el TEPT, las adicciones, la enfermedad de Parkinson, la enfermedad de Alzheimer y la rehabilitación post-ictus.

Método

Identificación de estudios.

Para este artículo, se realizó una revisión narrativa y crítica basada en la evidencia, centrada en la EMT y sus aplicaciones clínicas. Se llevaron a cabo búsquedas sistemáticas en bases de datos especializadas, entre ellas PubMed, Scopus, Web of Science y Google Académico, incluyendo la literatura publicada entre 2003 y 2025.

Las estrategias de búsqueda combinan los términos "transcranial magnetic stimulation," "repetitive transcranial magnetic stimulation," "deep TMS," "clinical applications," "efficacy," "safety," and "mechanisms", utilizando operadores booleanos y filtros temáticos. También se considerarán publicaciones relevantes sobre otras modalidades de estimulación cerebral (estimulación eléctrica transcraneal, estimulación cerebral profunda, terapia electroconvulsiva) para proporcionar una comparación contextual.

Criterios de selección

Se incluyeron estudios que cumplieron los siguientes criterios: (1) Investigación realizada en población humana y publicada en inglés o español (2), tamaño de muestra superior a 10 participantes en el caso de estudios primarios, (3) diseños metodológicos robustos

(ensayos clínicos, revisiones sistemáticas, guías de práctica clínica, estudios experimentales o de seguimiento) y (4) relevancia directa para el análisis de la justificación, la eficacia clínica o la seguridad de la EMT. Se excluyeron tesis, informes de casos aislados, literatura no indexada, artículos centrados exclusivamente en modelos animales o simulaciones por computadora, y publicaciones duplicadas u obsoletas.

Proceso de selección

El proceso de selección se llevó a cabo mediante un proceso de lectura secuencial: primero se evaluaron los títulos y resúmenes, y luego los textos completos. La inclusión final se basó en la relevancia temática y la calidad científica, priorizando los estudios con validez clínica, consistencia metodológica y resultados verificables. A diferencia de las revisiones sistemáticas convencionales, no se aplican los criterios PRISMA, ya que la naturaleza heterogénea de los estudios de neuromodulación requiere un enfoque interpretativo flexible que permita integrar diferentes líneas de evidencia sin excluir información relevante.

Análisis de la información

Para el análisis final, los estudios seleccionados fueron organizados en tres ejes temáticos principales: (1) Técnicas de estimulación cerebral comparadas, (2) Fundamentos neurofisiológicos de la EMT, (3) Aplicaciones y evidencia sobre la EMT, (4) perfil de seguridad y efectos adversos Y (5) Efectividad en el TDM. La síntesis de la evidencia se realizó mediante un análisis crítico narrativo, integrando hallazgos cuantitativos y cualitativos. Se compararon protocolos, parámetros de estimulación y poblaciones de estudio, identificando patrones de respuesta clínica y áreas de controversia. Este enfoque proporcionó una visión general actualizada del impacto terapéutico y la seguridad de la EMT, destacando su consolidación como una herramienta eficaz y bien tolerada en la práctica clínica moderna.

En total, se identificaron varias publicaciones recientes, entre 2003 y 2025, que cumplieran con los criterios establecidos de calidad metodológica y relevancia clínica. Los principales artículos incluidos fueron ensayos clínicos controlados, revisiones sistemáticas y guías de práctica clínica sobre EMT y técnicas comparativas de estimulación cerebral.

Para garantizar la validez y la actualidad de la información, se priorizó la evidencia publicada en revistas indexadas en bases de datos reconocidas como JCR y Scopus, así como en repositorios oficiales (PubMed, Web of Science, Google Scholar y Scopus). Este proceso garantizó que la síntesis final reflejara las tendencias más consistentes y los hallazgos con mayor respaldo científico de la literatura contemporánea.

Resultados y discusión

La EMT es una forma de estimulación no invasiva de la corteza cerebral en los humanos. Consiste en la producción de una corriente eléctrica muy breve que, al atravesar una bobina de alambre de cobre colocada sobre el cuero cabelludo, genera un campo magnético con la suficiente intensidad como para traspasar el cráneo y despolarizar las neuronas de la corteza que se encuentran aproximadamente de 1.5 a 2cm por debajo (Valero-Cabré, Payne, Pascual-Leone, 2011). La EMT puede administrarse en pulsos únicos o a manera de pulsos regulares repetitivos, de frecuencia y duración variables. En este último caso adopta el nombre de Estimulación Transcraneal Repetitiva (EMTr), siendo esta variante, mucho más efectiva a la hora de perturbar la corteza cerebral de forma duradera. Dos de sus características más sobresalientes y que la diferencian de la estimulación eléctrica transcraneal, es que no se difunde por la corteza, ni estimula terminaciones nerviosas sensitivas, por lo que es indolora (Wagner, Valero-Cabré, Pascual-Leone, 2007, Ortiz-Cruz, et al, 2021). En los últimos años está aumentando considerablemente el número de artículos en revistas de impacto y son cada vez más las reuniones científicas internacionales donde se abordan y ponen en común las últimas investigaciones sobre esta intervención neurobiológica. Con ello se intenta contribuir a consensuar normas para su empleo seguro, parámetros de administración, dosis, indicaciones, contraindicaciones, etc. (Fregni, Pascual-Leone, 2011; Acosta-Luna y Verdugo-Díaz, 2024).

Técnicas de estimulación cerebral comparadas

Entre los dispositivos biomédicos utilizados dentro del ámbito de la salud mental se encuentran: la estimulación de electroterapia craneal, la cerebral profunda, la transcraneal de corriente directa y la terapia electroconvulsiva, los cuales se explican brevemente a continuación.

En el caso de la Estimulación de Electroterapia Craneal (CES) donde un dispositivo aplica una corriente eléctrica a la cabeza del paciente para tratar el insomnio, la depresión o el estrés; la cual está aprobada por la FDA (Food and Drugs Administration) como un tratamiento experimental. Las investigaciones reportan una mejoría moderada y variable (Amr, 2013; Kirsch, 2013) hasta significativa (Zheng, 2016) en su tratamiento, dependiendo de su aplicación particular (Canelas, et al, 2021).

Procedimiento

La Estimulación Cerebral Profunda (DBS) es una terapia de intervención emergente para pacientes con enfermedades neuropsiquiátricas resistentes a tratamientos específicos. La eficacia del depende en

gran medida de la precisión de la colocación de un microelectrodo que envía impulsos eléctricos a una parte específica del cerebro que controla el movimiento y los síntomas afectivos (Bilger, 2011). Esta técnica no sólo es útil clínicamente, también puede proporcionar nuevos conocimientos sobre las funciones fundamentales del cerebro a través de la manipulación directa de las redes cerebrales tanto locales y distribuidas en muchas especies diferentes (Bravo, et al, 2023).

La Estimulación Transcraneal de Corriente Directa (tDCS) es una técnica no invasiva, de bajo costo y fácil de usar que se puede aplicar para modificar la excitabilidad cerebral. Esto se logra por las corrientes directas débiles para cambiar el potencial de reposo de las neuronas corticales. Estas corrientes se aplican uniendo dos electrodos a áreas distintas del cráneo (Steen-García, et al, 2024).

Diversas técnicas de estimulación cerebral no invasiva han demostrado efectos significativos en funciones motoras, sensoriales, atencionales y emocionales. En el trastorno depresivo mayor (TDM), la EMT modula la excitabilidad cortical durante horas posteriores a la sesión, con tasas de remisión cercanas al 18% frente al 5% en grupos simulados, aunque persiste una alta variabilidad entre estudios (Berlim et al., 2013). A su vez, la estimulación transcraneal por corriente directa (tDCS) ha mostrado efectos positivos en el rendimiento atencional y en la capacidad de inhibición de respuesta en adultos con TDAH, pero los resultados siguen siendo limitados y poco consistentes, requiriéndose investigaciones con mayor número de sesiones y muestras más amplias (Steen-García, et al, 2024).

Se han reportado efectos significativos de este tipo de estimulación en funciones motoras, visual, somato sensorial, atencionales, vestibular y cognitivo/emocional, así como para una variedad de trastornos neurológicos y psiquiátricos. En los pacientes con TDM, además de la EMTr, modula la excitabilidad cortical para horas después del final de la estimulación y se considera una opción terapéutica no invasiva prometedora, aunque se recomiendan muestras mayores y más representativas en futuros estudios por sus resultados poco claros (Berlim, 2012; Steen-García, et al, 2024).

La Terapia Electroconvulsiva (TEC) es un tratamiento para un reducido número de enfermedades mentales graves (Barnes, 2012). Originalmente fue desarrollado en la década de 1930 y fue utilizado ampliamente durante los años 1950 y 1960 para una variedad de condiciones: consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través del cerebro para producir un ataque electroconvulsivo (Arancibia, et al, 2023).

Ahora está claro que la TEC se debe utilizar solamente en un número menor de condiciones más graves. En la actualidad se usa con menos frecuencia. Entre 1985 y 2002 su uso en Inglaterra, por ejemplo, se redujo a más

de la mitad, posiblemente debido a mejores tratamientos y medicamentos psicológicos para la depresión (Barnes, 2012): sin embargo, sigue siendo la opción principal y el tratamiento más efectivo para los pacientes con TDM e incluso como indicación para disminución del suicidio (Fink, 2013; Lezcano, et al, 2022).

Empero, su uso está limitado por los efectos adversos significativos sobre la memoria y la cognición (Semkovska, et al 2010). Además, la TEC no posee focalidad en su aplicación, ya que depende de las vías imprevisibles de la conducción eléctrica a través del cerebro (Fink, 2013).

Fundamentos neurofisiológicos de la EMT

Sin embargo, a pesar de que su utilidad y efecto benéfico son evidentes, todavía los mecanismos bioquímicos, moleculares y celulares implicados en ellos no son conocidos con claridad, estando considerados actualmente involucrados fenómenos tan diversos como la liberación de neurotransmisores, la eficiencia sináptica, la expresión de genes, los fenómenos de la neuroplasticidad (Arias Carrión, 2008; León Ruiz, 2016)

Como se mencionó previamente, aún persisten debates respecto a la duración, magnitud y mecanismos neurofisiológicos que explican los efectos de la EM, ya que los procesos de plasticidad inducidos por esta técnica no están completamente esclarecidos (Jannati et al., 2023). Pese a ello, se ha sugerido que sus beneficios prolongados derivan de modificaciones transitorias en la eficacia sináptica de circuitos específicos, resultado de la estimulación cortical directa, lo cual coincide con hallazgos recientes sobre los efectos plásticos de EMTr en redes neuronales (Fitzsimons et al., 2014; Galanis et al., 2025). A partir de esta premisa, se han establecido paralelos con los procesos implicados en el TDM y con la potenciación sináptica a largo plazo, un mecanismo central en la consolidación de cambios sinápticos duraderos (Anil et al., 2023). En apoyo de esta analogía, estudios recientes han mostrado que la excitabilidad corticoespinal inducida por EMTr de baja frecuencia puede potenciarse cuando se antecede de un breve tren de estimulación de alta frecuencia, un fenómeno conocido como metaplasticidad, mediante el cual el estado previo de activación neuronal condiciona la capacidad de generar plasticidad subsecuente (Krauel et al., 2025). Esta relación entre activación previa, plasticidad y modulación sináptica ha sido destacada en estudios previos sobre TDM y potenciación sináptica a largo plazo (González- Chacón, 2022).

Existen además otros datos que apoyan la noción de que la EMTr realmente induce plasticidad sináptica duradera y cambios funcionales similares a la potenciación a largo plazo; sin embargo, correlatos

neurobiológicos más directos que trabajen estos mecanismos todavía son necesarios (Bhattacharya, 2025).

Los procesos bioquímicos y celulares mediante los cuales la EMTr ejerce sus efectos terapéuticos están siendo caracterizados con mayor detalle en investigaciones recientes. Una de las líneas más estudiadas es su capacidad para modular la expresión de genes de respuesta temprana, implicados en la activación rápida de mecanismos de reparación, plasticidad y neuroprotección tras lesiones cerebrales (Díaz y Acosta-Luna, 2024; Guan et al., 2025). Entre las vías reguladas por estos genes se encuentran factores de crecimiento esenciales, como el factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF), ampliamente asociado con la plasticidad sináptica y la reorganización funcional inducida por la estimulación repetitiva.

Los mecanismos bioquímicos, moleculares y celulares mediante los cuales la EMTr ejerce sus efectos terapéuticos se están clarificando gradualmente. Entre ellos, se ha descrito su capacidad para modular la expresión de genes de respuesta inmediata temprana, que participan en la reacción inicial al daño cerebral y a los procesos neurodegenerativos (Díaz y Acosta-Luna, 2024).

Una de las líneas de evidencia sugiere que la EMTr puede facilitar cambios plásticos en las conexiones sinápticas y la reorganización funcional del tejido nervioso, probablemente involucrando la modulación de las vías de señalización relacionadas con factores tróficos como el factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF), que se ha observado que aumenta después de la EMTr en estudios clínicos y experimentales (Riccitelli et al., 2025).

Además, se ha descrito que la rTMS influye en la plasticidad neuronal al alterar los procesos celulares asociados con el estrés oxidativo y la inflamación, posiblemente reduciendo las respuestas inflamatorias y mejorando el equilibrio redox, lo que sugiere una acción directa sobre los mecanismos de protección y supervivencia celular (Wang et al., 2025). También existe evidencia de que la rTMS modifica la dinámica de la transmisión sináptica al promover la liberación de ciertos neurotransmisores y neuromoduladores, así como la excitabilidad neuronal, lo que contribuye a la adaptación funcional de los circuitos estimulados (Yen et al., 2024).

Aplicaciones y evidencia sobre la EMT

En el campo de la psiquiatría, la investigación tanto fisiopatológica como terapéutica con técnicas de estimulación cerebral se ha centrado especialmente en los trastornos depresivos, aunque también ha aportado evidencia importante en cuadros como el trastorno obsesivo-compulsivo. En los trastornos depresivos se dispone de estudios con ensayos controlados que demuestran su eficacia clínica, aunque todavía es escasa

la evidencia experimental para respaldar su papel como tratamiento antidepresivo (Frye, Rotenberg, Ousley, Pascual-Leone, 2013; González-Chacón, 2022).

Se han llevado a cabo múltiples trabajos con la EMT en TDM, siendo la tasa de respuesta antidepresiva de aproximadamente hasta el 32% con respecto del 12% del control, ubicando a este método como una alternativa posible y eficaz en el tratamiento del TDM, y fue oficialmente aprobada por la Food and Drug Administration (FDA) en octubre de 2012.

Con respecto a los estudios que avalan la efectividad de esta intervención, existe evidencia robusta en revisiones sistemáticas. Por ejemplo, Liu y colaboradores (2014) analizaron numerosos ensayos clínicos que evaluaron la EMT como terapia complementaria al tratamiento farmacológico en trastornos depresivos. Encontraron que los pacientes que recibieron EMT adicional mostraron tasas de respuesta significativamente mayores en comparación con aquellos que recibieron solo tratamiento farmacológico (Liu et al., 2014).

Otro análisis sistemático realizado por Gaynes (2014) respalda hallazgos similares, evaluando la eficacia de la EMT en pacientes con DRT. En este caso, los resultados mostraron tasas de respuesta significativamente superiores en el grupo que recibió EMT así como tasas de remisión notablemente mayores en comparación con los controles (Gaynes et al., 2014).

En 2014, Donaldson y colaboradores realizaron una revisión centrada en la eficacia de la EMTr en adolescentes y adultos jóvenes con DRT. Identificaron varios ensayos clínicos que indicaron que la respuesta terapéutica se mantuvo durante un periodo prolongado, de hasta tres años después del tratamiento inicial. En cuanto a seguridad, los efectos adversos más frecuentes fueron cefalea, molestias en el cuero cabelludo y algunos casos aislados de hipomanía. En general, Donaldson concluyó que la EMTr resultó ser eficaz y bien tolerada en este grupo de paciente jóvenes.

Entre los estudios que han evaluado la eficacia de la EMTr para el tratamiento del TDM, sin distinguir entre episodios agudos o DRT, se destaca el metaanálisis de Berlim et al. (2014), que reunió 29 ensayos clínicos aleatorizados y controlados con placebo con un total de 1371 participantes, ofreciendo una de las síntesis más robustas sobre la eficacia terapéutica de la EMTr. Los autores encontraron que el tratamiento con EMTr de alta frecuencia se asoció con una tasa de respuesta del 29,3%, significativamente mayor que el 10,4% observado en los grupos placebo (OR=3,3; NNT=6). Asimismo, la tasa de remisión fue del 18,6% frente al 5% en placebo, también con diferencia significativa (OR=3,3; NNT= 8). Estos resultados respaldan la

eficacia clínica de la EMTr en población general con TDM, independiente del tipo de diagnóstico o estrategia terapéutica empleada.

En una revisión sistemática de metaanálisis realizada por Dell'Osso y colaboradores (2011), se analizaron 15 metaanálisis publicados entre 1980 y 2010 que incluyeron ensayos clínicos controlados sobre el uso de la EMT en diferentes TDM donde encontraron que la EMT produce efectos positivos significativos tanto en la reducción de los síntomas depresivos como en las tasas de remisión. El estudio también detalla el número de ensayos clínicos incluidos en cada metaanálisis, el tamaño de la muestra de participantes, las características específicas de las intervenciones (como frecuencia, intensidad y duración de la EMT), las áreas cerebrales estimuladas (principalmente la corteza prefrontal dorsolateral) y los instrumentos clínicos utilizados para medir los cambios en los síntomas depresivos como la Escala de Depresión de Hamilton.

En conjunto, la evidencia actual respalda la consideración de la EMT como una opción terapéutica no invasiva de primera línea en pacientes que han fracasado con al menos un antidepresivo, ya sea como monoterapia estructurada o como adyuvante, manteniendo el énfasis en protocolos, seguimiento y la selección de pacientes para maximizar la remisión sostenida (Rakesh et al., 2024).

La EMT cuenta con recomendaciones basadas en la evidencia que reconocen indicaciones con distintos niveles de apoyo (p. ej., depresión, dolor neuropático, rehabilitación postictus, TOC, adicciones), basándose en una actualización formal (2014-2018) realizada por un panel de expertos europeos y publicada en *Clinical Neurophysiology* (nivelación por patología y protocolo). Estas directrices son el documento de referencia más citado para el uso terapéutico de la EMTr y consolidan la madurez del campo para múltiples afecciones neuropsiquiátricas (Steel et al., 2020; Lefaucheur et al., 2020).

En 2018, la FDA autorizó la comercialización de un sistema de deep TMS (bobina H7) para el TOC, luego de evidencia que mostraba un beneficio clínico; un ensayo clínico multicéntrico posterior, publicado en el *American Journal of Psychiatry*, informó que el 38,1% de los pacientes tratados lograron una respuesta clínica (definida como una disminución igual o mayor al 30% en la escala Y-BOCS), en comparación con el 11,1% observado en el grupo control, con buena tolerabilidad, validando el objetivo en corteza prefrontal media y giro cingulado anterior (Carmi et al., 2018; U.S. Food and Drug Administration, 2018).

El uso de la EMT en el trastorno de estrés postraumático (TEPT) ha sido objeto de creciente investigación, aunque con resultados dispares y necesidad de estandarización. Una revisión sistemática reciente consideró que la evidencia disponible indica que la EMTr activa puede

producir poca o ninguna diferencia inmediata en comparación con la terapia simulada en la gravedad global del TEPT, con una estimación del efecto (MEE) de -0,14 (IC del 95 %: -0,54 a 0,27) basada en tres estudios con 99 participantes, y con una certeza moderada de la evidencia (Brown, 2024).

Sin embargo, otros estudios más específicos encuentran indicios prometedores: un ensayo aleatorizado que comparó EMT de baja frecuencia (1 Hz) con la de alta frecuencia (10 Hz) en la corteza prefrontal dorsolateral derecha (CPDL) en una población civil con TEPT informó una mejora significativa en la escala CAPS en el grupo de 1 Hz frente al grupo de tratamiento simulado (g de Hedges = -1,07), mientras que el protocolo de 10 Hz no mostró una diferencia significativa frente al grupo de tratamiento simulado en ese estudio (Leong, 2020).

La EMT se perfila como una herramienta prometedora para modular los circuitos de recompensa implicados en las adicciones. Li et al. (2025) investigaron cómo la rTMS aplicada a la CPDL influye en el ansia por fumar mediante cambios en el flujo sanguíneo cerebral. En su estudio, 5 días de estimulación de 10 Hz disminuyeron el flujo sanguíneo regional en la CPDL, y estas reducciones se correlacionaron con disminuciones en la puntuación de dependencia (Fagerström) y el deseo de fumar (Tiffany). Además, la rTMS aumentó la conectividad funcional entre la CPDL y otras regiones frontales y subcorticales, lo que sugiere que la mejora del ansia se produce mediante una reorganización de las redes cerebrales de control ejecutivo. Este hallazgo proporciona respaldo neurofisiológico para el uso de la rTMS como intervención en los trastornos por consumo de nicotina al mostrar mecanismos cerebrales objetivos que acompañan a la respuesta clínica.

En un estudio piloto aleatorizado, Terraneo et al. (2016) aplicaron EMT de 10 Hz sobre la CPDL en 32 pacientes con trastorno por consumo de cocaína. Durante la fase inicial de 29 días, el grupo de EMT presentó significativamente más resultados negativos en las pruebas de orina (es decir, sin cocaína) que el grupo control ($p = 0,004$) y mostró una disminución del ansia ($p = 0,038$). En el seguimiento (63 días adicionales), los pacientes del grupo control que recibieron EMT también mostraron mejoras, al igual que el grupo activo. El estudio reportó además que no ocurrieron efectos adversos graves, lo que respalda la seguridad del protocolo en esta población.

Addolorato et al. (2017) evaluó el efecto de la Deep EMT dirigida a la CPDL sobre la disponibilidad del transportador de dopamina (DAT) en pacientes con trastorno por consumo de alcohol, utilizando SPECT para medir los cambios neuroquímicos. Antes del tratamiento, se observó que los pacientes con alcoholismo presentaban una mayor disponibilidad de DAT que los controles sanos. Tras sesiones de

estimulación real (en comparación con sesiones simuladas), los participantes del grupo activo mostraron una reducción de DAT en el cuerpo estriado y una disminución medible del consumo de alcohol.

La EMT se ha consolidado como una valiosa herramienta complementaria en la rehabilitación motora post-ictus, con el objetivo de restablecer el equilibrio interhemisférico de la excitabilidad cortical y promover la reorganización neuroplástica. Un ensayo clínico aleatorizado comparó diferentes objetivos (M1, áreas premotoras, etc.) y demostró que la estimulación excitatoria del hemisferio lesionado y la inhibición del hemisferio contralesional producen patrones de reorganización diferenciales con beneficio motor clínico, lo que respalda las estrategias personalizadas (Zhao et al., 2024).

En otro ensayo clínico aleatorizado, se aplicó EMTr de baja frecuencia (1 Hz) al M1 contralesional, estratificando según el estado de los PME: los pacientes con PME conservado obtuvieron mejoras significativas en la función de las extremidades superiores y normalizaron la asimetría de la excitabilidad; en pacientes sin PME, los efectos fueron menores, lo que sugiere que la integridad del tracto corticoespinal determina la respuesta (Qian et al., 2024).

En trastornos motores como la enfermedad de Parkinson con *freezing of gait* (FOG), un ECA demostró que la EMTr de alta frecuencia sobre la M1 bilateral mejora la FOG y regula el estado afectivo (depresión/ansiedad), con efectos que se mantuvieron durante un seguimiento cercano (Song, 2024). Asimismo, un estudio clínico-experimental reciente sugiere que parte del beneficio motor podría estar mediado por la modulación inmunológica (aumento de Treg y atenuación de la neuroinflamación), lo que proporciona un mecanismo biológico plausible más allá de la plasticidad sináptica (Xie et al., 2024).

En la enfermedad de Alzheimer, estudios controlados que combinan rTMS con entrenamiento cognitivo han demostrado mejoras modestas en la memoria, las funciones ejecutivas y el rendimiento global; por ejemplo, un ensayo que midió los cambios en el flujo sanguíneo cerebral con rTMS-COG informó mejoras significativas en MMSE y en las actividades de la vida diaria, asociadas con reordenamientos del precúneo y el parahipocampo (Qin et al., 2023). Asimismo, en el trastorno del espectro autista, la EMT que modula las regiones frontolímbicas ha mostrado beneficios en la regulación emocional y la interacción social (Ortiz-Cruz et al., 2021).

Perfil de seguridad y efectos adversos

En cuanto a seguridad, la EMT presenta un buen perfil de seguridad debido a que en todos los escenarios estudiados los eventos adversos fueron no serios y con muy baja frecuencia. La información que existe acerca de la EMT es suficiente para fundamentar que es un método seguro el cual no ha presentado efectos adversos serios

en toda la secuencia de estudios referidos a lo largo del tiempo (Weigand, et al, 2018; Philip et al., 2018a; Philip et al., 2018b). La EMT presenta un buen perfil debido a que en todos los escenarios estudiados los eventos adversos fueron no serios y con muy baja frecuencia (Sonmez, et al, 2018; Kito, et al, 2019).

Los aspectos sobre seguridad de la EMT están ratificados por la larga experiencia que resultó de los estudios con estimulación magnética cortical en animales y humanos. Además, esta información recolectada desde 1985 apunta a la ausencia de efectos adversos adyacentes importantes derivados de la aplicación de pulsos magnéticos simples en personas sanas, aunque si se ha encontrado que podría inducir crisis epilépticas en personas con lesiones cerebrales estructurales. Sin embargo, la EMTr podría ocasionar cefaleas y cambios temporales del umbral de estimulación auditivo, pero todos de leve intensidad. Se ha puntualizado, además, como complicación más relevante, la posibilidad de inducir crisis epilépticas en pacientes con epilepsia e incluso en sujetos normales pero esta proporción se encuentra en menos del 0,1% (Chervyakov, 2015).

La EMT ha demostrado un perfil de seguridad donde puede producir efectos adversos leves, transitorios y bien tolerados por los pacientes, lo cual puede mejorar la adherencia, controlar los síntomas, disminuir costos y mejorar la calidad de vida de los pacientes.

En el proceso de revisión por la FDA se evaluaron exhaustivamente estudios sobre la EMTr, incluyendo un metaanálisis de Herrmann y Ebmeier (2006) que recopiló 33 ensayos en pacientes con TDM, concluyendo que el tratamiento es eficaz. Como resultado, en julio de 2011 la FDA emitió una regla final que reclasificó los sistemas de EMTr como dispositivos de Clase II (sometidos a controles generales y especiales), con el objetivo de garantizar seguridad y eficacia. En dicha normativa, el sistema se define como un dispositivo externo que entrega campos magnéticos pulsados capaces de inducir potenciales de acción neuronales en la corteza prefrontal, destinado a tratar síntomas de TDM en pacientes que han fallado al menos un tratamiento antidepresivo sin inducir convulsiones. Además, se emitió una guía de la FDA que precisa los controles especiales necesarios para dicha clasificación (U.S. Department of Health and Human Services, 2011).

El protocolo Internacional sobre el uso de EMT menciona que las sesiones individuales de la EMT o EMTr no conllevan riesgos significativos por exposición a campos magnéticos ya que el tiempo total es demasiado corto. Sin embargo, un curso de tratamiento típico de la EMTr en aplicaciones psiquiátricas suele ser de 10 Hz, en 20 sesiones divididas en cuatro semanas (Loo et al, 2008).

El estudio realizado por Rossi y colaboradores (2009), junto con el Grupo Consensuado de Seguridad de la EMT, revisó la eficacia y seguridad de esta técnica. En su análisis, se identificaron efectos secundarios que incluyen principalmente dolores de cabeza leves, molestias en el área tratada, dolor cervical, mareos y, en casos muy poco frecuentes, convulsiones. Sin embargo, estos efectos adversos son poco comunes y generalmente de baja intensidad, por lo que se considera que la EMT es una intervención segura bajo las condiciones y protocolos adecuados, incluso cuando se emplean diferentes modalidades de la técnica.

Efectividad en el TDM

Para ofrecer una visión comparativa de los hallazgos más relevantes, Anexo 1 resume los principales ensayos clínicos, metaanálisis y revisiones recientes que han evaluado la efectividad de la EMT en el TDM, considerando tipo de protocolo, duración, muestra, tasas de respuesta y remisión reportadas.

Pese a la evidencia sobre la efectividad de la EMT en el tratamiento del TDM, aún existe información limitada sobre la durabilidad de sus efectos a largo plazo. No obstante, en un estudio multicéntrico realizado por Janicak et al (2010), que incluyó a 301 pacientes con DRT y aplicó tres protocolos clínicos distintos, se observó una respuesta clínica sostenida con una tasa de recaída del 10% tras 24 semanas de seguimiento.

Hansen et al. (2001) reportaron en un estudio piloto que la EMT aplicada como terapia de mantenimiento puede prolongar la mejoría clínica en pacientes con TDM. En una serie de 10 pacientes, quienes recibieron entre una y dos sesiones semanales de EMT durante un periodo que varió de 6 meses hasta 6 años, siete mantuvieron una respuesta significativa a largo plazo. Estos hallazgos iniciales sugieren que la EMT no solo es efectiva para inducir la remisión, sino que también podría ser útil para prevenir recaídas mediante tratamientos de mantenimiento con protocolos individualizados y bien tolerados.

En los últimos años, la EMT ha demostrado respuestas clínicas significativas en un curso agudo de aproximadamente 4 a 6 semanas, con eficacia comparable a estrategias farmacológicas y un perfil de efectos adversos generalmente favorable (George et al., 2010). La no inferioridad de la iTBS frente a la EMTr convencional a 10 Hz en DRT confirmó la eficacia clínica con sesiones más breves (Blumberger et al., 2018). Metaanálisis recientes reafirman que la EMTr supera al tratamiento simulado en respuesta y remisión en la DRT y respaldan su uso como adyuvante en esquemas combinados (Vida et al., 2023). Además, consensos/revisiones de 2024 sintetizan evidencia clínica y de la práctica clínica real, incluyendo series amplias con remisiones aproximadas del 28-35 % en la práctica

rutinaria, y discuten parámetros y optimización del tratamiento (Trapp et al., 2024).

En protocolos acelerados, se reporta remisiones más rápidas y buena tolerabilidad (p. ej., 43 % de respuesta a las 4 semanas), sugiriendo beneficios en la DRT, aunque se requiere una mayor estandarización (Motamed et al., 2025). En la población de edad avanzada, metaanálisis y estudios clínicos recientes muestran que la EMTr es efectiva y bien tolerada, con tasas de remisión más altas que la terapia simulada y con predictores clínicos (p. ej., menor gravedad basal y menos fracasos previos) asociados a mayor probabilidad de remisión (Zhang et al., 2023).

En el TDM, los hallazgos revisados confirman una respuesta antidepressiva clínicamente significativa y consistente en diversos protocolos. Estudios pioneros establecieron tasas de remisión del 18-30 % frente a placebo (Berlim et al., 2014), y ensayos contemporáneos, como el de Blumberger et al. (2018), han demostrado que el protocolo iTBS no es inferior a la EMTr convencional de 10 Hz, reduciendo la duración de la sesión de 37 minutos a menos de 3 minutos sin pérdida de eficacia. Paralelamente, los protocolos acelerados y la estimulación profunda están ampliando su aplicabilidad clínica, mostrando remisiones cercanas al 50% y mejoras sostenidas en la práctica habitual (Zhang et al., 2023; Motamed et al., 2025).

Más allá del TDM, la EMT ha mostrado beneficios emergentes en otras afecciones psiquiátricas y neurológicas: reducción significativa de los síntomas en el trastorno obsesivo-compulsivo mediante la estimulación de la corteza prefrontal media/CgA (Carmi et al., 2018), mejoras funcionales en la rehabilitación post-ictus (Qian et al., 2024; Zhao et al., 2024) y efectos moduladores en adicciones y enfermedad de Parkinson. Sin embargo, la heterogeneidad metodológica (diferencias en los protocolos, la intensidad y el número de sesiones) limita la generalización de los resultados y subraya la necesidad de una estandarización internacional.

En cuanto a la seguridad, la EMT mantiene un perfil favorable, con efectos adversos leves y transitorios, como cefalea o molestias en el cuero cabelludo. Las crisis epilépticas son poco frecuentes (<0,1%) y suelen asociarse con afecciones predisponentes (Rossi et al., 2009). Este equilibrio entre eficacia y seguridad justifica su inclusión como opción terapéutica de primera línea para la depresión resistente y como tratamiento adyuvante en otros trastornos neuropsiquiátricos.

En general, la evidencia sintetizada sugiere que la EMT representa un avance clínico sólido y en constante evolución, con potencial para su integración en protocolos personalizados de neuromodulación combinada (EMT + entrenamiento cognitivo o EMT + psicoterapia). Futuros estudios multicéntricos deberían abordar la durabilidad de los efectos, los predictores de

respuesta (clínicos y neurobiológicos) y la optimización de parámetros para diferentes poblaciones.

Es importante considerar las limitaciones en cuatro sentidos en cuanto a la revisión de literatura: Primero, estos estudios principalmente presentan deficiencias en el tamaño de muestra utilizados teniendo en cuenta la prueba de hipótesis que ellos estaban evaluando y los desenlaces considerados. Segundo, el proceso de aleatorización, aunque fue utilizado en todos los estudios muchos de ellos no describen como fue realizado. Tercero, el ocultamiento es otro proceso que no fue mencionado en los artículos y puede ser fuente de sesgo. Finalmente, la falta de descripción de cómo se garantizó el proceso de cegamiento de los evaluadores durante el seguimiento de los pacientes, el cual es una característica muy importante cuando se están utilizando únicamente desenlaces subjetivos como el Inventario de la Depresión de Hamilton.

Conclusiones

Desde el punto de vista del impacto clínico de los resultados del presente estudio, la EMTr puede ser considerada una nueva alternativa para el tratamiento del TDM. Puede ser utilizado en casos que no respondan adecuadamente al tratamiento como terapia coadyuvante o en trastornos refractarios a los tratamientos psicofarmacológicos antidepresivos convencionales. También se abre la posibilidad de ofrecer un tratamiento a pacientes sensibles a los medicamentos antidepresivos, quienes presentan reacciones frecuentes o eventos adversos relacionados con estas prescripciones por lo cual se dificulta el manejo.

La EMT se ha consolidado como una herramienta terapéutica eficaz y segura dentro del arsenal de la neuromodulación no invasiva. Esta revisión narrativa destaca que, entre las diversas modalidades de estimulación cerebral, la EMT ofrece ventajas sustanciales en la focalización cortical, el control de parámetros y la tolerabilidad, lo que explica su expansión clínica en psiquiatría y neurología.

La EMT se posiciona como una estrategia terapéutica consolidada y segura, cuyo avance dependerá de la estandarización de protocolos y de su integración interdisciplinaria en la práctica clínica latinoamericana.

Se espera que, en los próximos años, la acumulación de estudios prospectivos con diseños metodológicos más robustos, muestras más grandes y periodos de seguimiento más prolongados fortalezca la evidencia disponible. Esto ayudará a responder las preguntas pendientes y facilitará la integración de la EMTr como parte estándar del enfoque terapéutico para pacientes psiquiátricos.

Referencias

- Abellana-Pérez, K., Miquel, L., Lusilla-Palacios, P., & Gual, A. (2023). Estimulación cerebral no invasiva combinada con neuroimagen: Hacia una medicina de precisión en el tratamiento de las adicciones. *Adicciones*, 35(1), 3-8. <https://doi.org/10.20882/adicciones.1923>
- Acosta-Luna, R., & Verdugo-Díaz, L. (2024). Efectos de la estimulación magnética transcranial en células gliales: Una revisión integrativa. *Horizonte Sanitario*, 23(2), 459-473.
- Addolorato, G., Antonelli, M., Cocciolillo, F., Vassallo, G. A., Tarli, C., Sestito, L., Mirijello, A., Ferrulli, A., Pizzuto, D. A., Camardese, G., Miceli, A., Diana, M., Giordano, A., Gasbarrini, A., & Di Giuda, D. (2017). Deep Transcranial Magnetic Stimulation of the Dorsolateral Prefrontal Cortex in Alcohol Use Disorder Patients: Effects on Dopamine Transporter Availability and Alcohol Intake. *European neuropsychopharmacology : the journal of the European College of Neuropsychopharmacology*, 27(5), 450-461. <https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2017.03.008>
- Amr, M., & El-Wasify, M. (2013). Cranial electrotherapy stimulation for the treatment of chronically symptomatic bipolar patients. *Journal of ECT*, 29(2), e31-e32. <https://doi.org/10.1097/YCT.0b013e31828a344d>
- Anil, S., Lu, H., Rotter, S., & Vlachos, A. (2023). Repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) triggers dose-dependent homeostatic rewiring in recurrent neuronal networks. *bioRxiv : the preprint server for biology*, 2023.03.20.533396. <https://doi.org/10.1101/2023.03.20.533396>
- Arancibia, M., Vargas, C., Abarca, M., Fernández, J., Peña, D., & Cavieres, Á. (2022). Posibles mecanismos de acción de la terapia electroconvulsiva en esquizofrenia: Revisión de la evidencia disponible en investigación con seres humanos. *Revista Médica de Chile*, 150(11), 1493-1500. <http://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872022001101493>
- Arias-Carrión, O. (2008). Basic mechanisms of rTMS: Implications in Parkinson's disease. *International Archives of Medicine*, 1, 2. <https://doi.org/10.1186/1755-7682-1-2>
- Barnes, R. (2012). *Information on ECT*. Royal College of Psychiatrists. <https://www.rcpsych.ac.uk/mental-health/treatments-and-wellbeing/ect>
- Bhattacharya, A., Darmani, G., Udupa, K., Nankoo, J. F., Ding, M. Y. R., & Chen, R. (2025). Induction of plasticity and metaplasticity using noninvasive brain stimulation. *Trends in neurosciences*, 48(10), 792-807. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2025.07.009>
- Berlim, M. T., van den Eynde, F., Tovar-Perdomo, S., & Daskalakis, Z. J. (2014). Response, remission and drop-out rates following high-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) for treating major depression: A systematic review and meta-analysis of randomized, double-blind and sham-controlled trials. *Psychological Medicine*, 44(2), 225-239. <https://doi.org/10.1017/S0033291713000512>
- Bilger, A., Dequidt, J., Duriez, C., & Cotin, S. (2011). Biomechanical simulation of electrode migration for deep brain stimulation.

Medical image computing and computer-assisted intervention: MICCAI. International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 14(Pt 1), 339–346. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23623-5_43

- Blumberger, D. M., Vila-Rodriguez, F., Thorpe, K. E., Feffer, K., Noda, Y., Giacobbe, P., Knyahnytska, Y., Kennedy, S. H., Lam, R. W., Daskalakis, Z. J., & Downar, J. (2018). Effectiveness of theta burst versus high-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with depression (THREE-D): a randomised non-inferiority trial. *Lancet* (London, England), 391(10131), 1683–1692. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)30295-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)30295-2)
- Bravo, L., Cantos, J., Campos, J. M., & Fuentes-Flores, R. (2023). Estimulación cerebral profunda como tratamiento de la agresividad refractaria: Una revisión bibliográfica. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 34(6), 411-420. <https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2023.09.008>
- Brown, R., Cherian, K., Jones, K., Wickham, R., Gomez, R., & Sahlem, G. (2024). Repetitive transcranial magnetic stimulation for post-traumatic stress disorder in adults. *The Cochrane database of systematic reviews*, 8(8), CD015040. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD015040.pub2>
- Canelas, F. D. G., Covarrubias, C. P., & Rosales, L. I. G. (2021). Facilitación neuromuscular propioceptiva y técnica de estimulación eléctrica craneal en paciente con síndrome de persona rígida. *Revista de Investigación e Información en Salud*, 16(40), 69-90. <https://doi.org/10.52428/20756208.v16i40.72>
- Carmi, L., Tendler, A., Bystritsky, A., Hollander, E., Blumberger, D. M., Daskalakis, J., Ward, H., Lapidus, K., Goodman, W., Casuto, L., Feifel, D., Barnea-Ygaël, N., Roth, Y., Zangen, A., & Zohar, J. (2019). Efficacy and Safety of Deep Transcranial Magnetic Stimulation for Obsessive-Compulsive Disorder: A Prospective Multicenter Randomized Double-Blind Placebo-Controlled Trial. *The American journal of psychiatry*, 176(11), 931–938. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2019.18101180>
- Chervyakov, A. V., Chernyavsky, A. Y., Sinitsyn, D. O., & Piradov, M. A. (2015). Possible mechanisms underlying the therapeutic effects of transcranial magnetic stimulation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 303. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00303>
- Conde-Antón, Á., Hernando-Garijo, I., Jiménez-del-Barrio, S., Mingo-Gómez, M. T., Medrano-de-la-Fuente, R., & Ceballos-Laita, L. (2023). Efectos de la estimulación transcraneal por corriente directa y de la estimulación magnética transcraneal en pacientes con fibromialgia: Revisión sistemática. *Neurología*, 38(6), 427-439. <https://doi.org/10.1016/j.nrl.2020.07.024>
- Dell’Osso, B., Mundo, E., D’Urso, N., Pozzoli, S., & Altamura, A. C. (2011). Meta-review of metanalytic studies with repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) for the treatment of major depression. *Clinical Practice & Epidemiology in Mental Health*, 7, 167-177. <https://doi.org/10.2174/1745017901107010167>
- Díaz, L. V., & Acosta-Luna, R. (2024). Efectos de la estimulación magnética transcraneal en células gliales: Una revisión integrativa. *Horizonte Sanitario*, 23(2). <https://doi.org/10.19136/hs.a23n2.5312>
- Donaldson, A. E., Gordon, M. S., Melvin, G. A., Barton, D. A., & Fitzgerald, P. B. (2014). Addressing the needs of adolescents with treatment resistant depressive disorders: A systematic review of rTMS. *Brain Stimulation*, 7(1), 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2013.09.012>
- Fink, M. (2013). *Electroconvulsive Therapy: The Basics*. Oxford University Press
- Fink, M., & Kellner, C. H. (2014). The role of ECT in suicide prevention. *Journal of ECT*, 30(1), 5-9. <https://doi.org/10.1097/YCT.0b013e3182a6ad0d>
- Fitzsimmons, S. M. D. D., Oostra, E., Postma, T. S., van der Werf, Y. D., & van den Heuvel, O. A. (2024). Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation-Induced Neuroplasticity and the Treatment of Psychiatric Disorders: State of the Evidence and Future Opportunities. *Biological psychiatry*, 95(6), 592–600. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2023.11.016>
- Food and Drug Administration, HHS (2011). Medical devices; neurological devices; classification of repetitive transcranial magnetic stimulation system. Final rule. *Federal register*, 76(143), 44489–44491.
- Food and Drug Administration. (2016). *Protocol of transcranial magnetic stimulation as a treatment of depression and other psychiatric/neurologic disorders*. U.S. Department of Health and Human Services.
- U.S. Food and Drug Administration. (2018). FDA permits marketing of transcranial magnetic stimulation for treatment of obsessive compulsive disorder.
- Fregni, F., & Pascual-Leone, A. (2007). Technology insight: Noninvasive brain stimulation in neurology—perspectives on the therapeutic potential of rTMS and tDCS. *Nature Clinical Practice Neurology*, 3(7), 383-393. <https://doi.org/10.1038/ncpneuro0530>
- Frye, R. E., Rotenberg, A., Ousley, M., & Pascual-Leone, A. (2007). Transcranial magnetic stimulation in child neurology: Current and future directions. *Journal of Child Neurology*, 23(1), 79-96. <https://doi.org/10.1177/0883073807307972>
- Galanis, C., Hananeia, N., Lenz, M., Vasheghani Farahani, M., Jedlicka, P., & Vlachos, A. (2025). Repetitive magnetic stimulation induces plasticity of excitatory synapses through cooperative pre- and postsynaptic activity. *Brain stimulation*, 18(5), 1641–1650. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2025.08.019>
- Gaynes, B. N., Lloyd, S. W., Lux, L., Gartlehner, G., Hansen, R. A., Brode, S., & Jonas, D. E. (2014). Repetitive transcranial magnetic stimulation for treatment-resistant depression: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Psychiatry*, 75(5), 477-489. <https://doi.org/10.4088/JCP.13r08815>
- George, M. S., Lisanby, S. H., Avery, D., McDonald, W. M., Durkalski, V., Pavlicova, M., Anderson, B., Nahas, Z., Bulow, P., George, M. W., Gruber, S., Sackeim, H. A. (2010). Daily left prefrontal transcranial magnetic stimulation therapy for major depressive disorder: A sham-controlled randomized trial. *Archives of General Psychiatry*, 67(5), 507–516. <https://doi.org/10.1001/archgenpsychiatry.2010.46>
- González-Chacón, C. M. (2022). Efectos a corto plazo de la estimulación magnética transcraneal repetitiva en pacientes con trastorno depresivo resistente al tratamiento. *PsicoInnova*, 6(2), 25-37. <https://doi.org/10.54376/psicoinnova.v6i2.139>

- Hansen, P., Madsen, M. K., & Kristensen, M. (2001). Maintenance repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with major depression: A pilot study. *Journal of Affective Disorders*, 63(1-3), 193–196. [https://doi.org/10.1016/S0165-0327\(00\)00227-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0327(00)00227-0)
- Herrmann, L. L., & Ebmeier, K. P. (2006). Factors modifying the efficacy of transcranial magnetic stimulation in the treatment of depression: A review. *Journal of Clinical Psychiatry*, 67(12), 1870–1876. <https://doi.org/10.4088/JCP.v67n1206>
- Janicak, P. G., Nahas, Z., Lisanby, S. H., Solvason, H. B., Sampson, S. M., McDonald, W. M., Marangell, L. B., Rosenquist, P., McCall, W. V., Kimball, J., O'Reardon, J. P., Loo, C., Husain, M. H., Krystal, A., Gilmer, W., Dowd, S. M., Demitrack, M. A., & Schatzberg, A. F. (2010). Durability of clinical benefit with transcranial magnetic stimulation (TMS) in the treatment of pharmacoresistant major depression: assessment of relapse during a 6-month, multisite, open-label study. *Brain stimulation*, 3(4), 187–199. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2010.07.003>
- Jannati, A., Oberman, L. M., Rotenberg, A., & Pascual-Leone, A. (2023). Assessing the mechanisms of brain plasticity by transcranial magnetic stimulation. *Neuropsychopharmacology : official publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 48(1), 191–208. <https://doi.org/10.1038/s41386-022-01453-8>
- Kirsch, D. L. (2006). Microcurrent electrical therapy (MET): A tutorial. *Practical Pain Management*, 6(7), 59–64.
- Kito, S., Miyazi, M., Nakatani, H., Matsuda, Y., Yamazaki, R., Okamoto, T., & Igarashi, Y. (2019). Effectiveness of high-frequency left prefrontal repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with treatment-resistant depression: A randomized clinical trial of 37.5-minute vs 18.75-minute protocol. *Neuropsychopharmacology reports*, 39(3), 203–208. <https://doi.org/10.1002/npr2.12066>
- Krauel, K., Brauer, H., Breitling-Ziegler, C., Freitag, C. M., Luckhardt, C., Mühlherr, A., Schütz, M., Boxhoorn, S., Ecker, C., Castelo-Branco, M., Sousa, D., Pereira, H. C., Crisóstomo, J., Schlechter, F., Wrachtrup Calzado, I., Siemann, J., Moliadze, V., Splittgerber, M., Damiani, G., Salvador, R. N., ... Prehn-Kristensen, A. (2025). Prefrontal Transcranial Direct Current Stimulation in Pediatric Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: A Randomized Clinical Trial. *JAMA network open*, 8(2), e2460477. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.60477>
- Lefaucheur, J. P., Aleman, A., Baeken, C., Benninger, D. H., Brunelin, J., Di Lazzaro, V., Filipović, S. R., Grefkes, C., Hasan, A., Hummel, F. C., Jääskeläinen, S. K., Langguth, B., Leocani, L., Londero, A., Nardone, R., Nguyen, J. P., Nyffeler, T., Oliveira-Maia, A. J., Oliviero, A., Padberg, F., ... Ziemann, U. (2020). Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS): An update (2014–2018). *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 131(2), 474–528. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.11.002>
- Leong, K., Chan, P., Ong, L., Zwicker, A., Willan, S., Lam, R. W., & McGirr, A. (2020). A Randomized Sham-controlled Trial of 1-Hz and 10-Hz Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS) of the Right Dorsolateral Prefrontal Cortex in Civilian Post-traumatic Stress Disorder: Un essai randomisé contrôlé simulé de stimulation magnétique transcrânienne répétitive (SMTTr) de 1 Hz et 10 Hz du cortex préfrontal dorsolatéral droit dans le trouble de stress post-traumatique chez des civils. *Canadian journal of psychiatry. Revue canadienne de psychiatrie*, 65(11), 770–778. <https://doi.org/10.1177/0706743720923064>
- León Ruiz, M., Rodríguez Sarasa, M. L., Sanjuán Rodríguez, L., Benito-León, J., García-Albea Ristol, E., & Arce Arce, S. (2018). Current evidence on transcranial magnetic stimulation and its potential usefulness in post-stroke neurorehabilitation: Opening new doors to the treatment of cerebrovascular disease. Evidencias actuales sobre la estimulación magnética transcraneal y su utilidad potencial en la neurorehabilitación postictus: Ampliando horizontes en el tratamiento de la enfermedad cerebrovascular. *Neurología*, 33(7), 459–472. <https://doi.org/10.1016/j.nrl.2016.03.008>
- Lezcano, A. E., Bergasa, J. C., Ruiz, E. B., Fuertes, P. G., Fernández, M. M., & Pérez-Hiraldo, M. P. C. (2022). Terapia electroconvulsiva de la técnica a la vivencia: Proyecto de investigación. *Revista Sanitaria de Investigación*, 3(12), 65.
- Li, S., Jiang, A., Ma, X., Yang, B., Ni, H., Zheng, Y., Wang, Z., & Dong, G. H. (2025). Repetitive transcranial magnetic stimulation reduces smoking cravings by decreasing cerebral blood flow in the dorsolateral prefrontal cortex. *Brain communications*, 7(2), fcaf101. <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcaf101>
- Liu, B., Zhang, Y., Zhang, L., & Li, L. (2014). Repetitive transcranial magnetic stimulation as an augmentative strategy for treatment-resistant depression: A meta-analysis of randomized, double-blind and sham-controlled study. *BMC Psychiatry*, 14, 342. <https://doi.org/10.1186/s12888-014-0342-4>
- Loo, C. K., McFarquhar, T. F., & Mitchell, P. B. (2008). A review of the safety of repetitive transcranial magnetic stimulation as a clinical treatment for depression. *The international journal of neuropsychopharmacology*, 11(1), 131–147. <https://doi.org/10.1017/S1461145707007717>
- Motamed, M., Fathi, A., Hajikarim-Hamedani, A., & Alaghband-Rad, J. (2025). Accelerated repetitive transcranial magnetic stimulation in the treatment of depressive disorder resistant to a course of antidepressant medication. *Annals of general psychiatry*, 24(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s12991-025-00572-y>
- Ortiz-Cruz, E. E., Vera-Romero, A. J., García-Juárez, M. R., Ayala-Guerrero, F., & Bernal-Hernández, J. (2021). Estimulación magnética transcraneal como estrategia de intervención en niños y adolescentes con trastorno del espectro autista: Una revisión sistemática. *Neuropsicología Latinoamericana*, 13(1), 1–19. <https://doi.org/10.5579/ml.2021.0672>
- Pascual-Leone, A., & Tormos-Muñoz, J. (2008). Estimulación magnética transcraneal: Fundamentos y potencial de la modulación de redes neurales específicas. *Revista de Neurología*, 46(Supl 1), S3–S10.
- Philip, N. S., Barredo, J., Aiken, E., & Carpenter, L. L. (2018a). Neuroimaging mechanisms of therapeutic transcranial magnetic stimulation for major depressive disorder. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 3(3), 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2017.10.007>
- Philip, N. S., Barredo, J., van't Wout-Frank, M., Tyrka, A. R., Price, L. H., & Carpenter, L. L. (2018b). Network mechanisms of clinical response to transcranial magnetic stimulation in posttraumatic stress disorder and major depressive disorder. *Biological Psychiatry*, 83(3), 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2017.07.021>
- Qian, W., Liao, X., Ju, X., Gao, Y., Wu, M., Xie, C., Zhang, Y., Long, X., Qian, S., & Gong, Y. (2024). Effects of low frequency repetitive transcranial magnetic stimulation on motor recovery in subacute stroke patients with different motor evoked potential status: a

- randomized controlled trial. *Frontiers in neurology*, 15, 1460925. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1460925>
- Qin, Y., Ba, L., Zhang, F., Jian, S., Zhang, M., & Zhu, W. (2023). Cerebral blood flow changes induced by high-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation combined with cognitive training in Alzheimer's disease. *Frontiers in neurology*, 14, 1037864. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1037864>
- Rakesh, G., Cordero, P., Khanal, R., Himelhoch, S. S., & Rush, C. R. (2024). Optimally combining transcranial magnetic stimulation with antidepressants in major depressive disorder: A systematic review and Meta-analysis. *Journal of affective disorders*, 358, 432–439. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2024.05.037>
- Riccitelli, G. C., Gironi, R., Melli, G., & Kaelin-Lang, A. (2025). The Effect of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Treatment on Plasma BDNF Concentration and Executive Functions in Parkinson's Disease: A Theoretical Translational Medicine Approach. *International journal of molecular sciences*, 26(3), 1205. <https://doi.org/10.3390/ijms26031205>
- Rossi, S., Hallett, M., Rossini, P. M., & Pascual-Leone, A. (2009). Safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research. *Clinical Neurophysiology*, 120(12), 2008-2039. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.08.016>
- Roth, Y., Hanlon, C. A., Pell, G., Zibman, S., Harmelech, T., Muir, O. S., MacMillan, C., Prestley, T., Purselle, D. C., Knightly, T., & Tendler, A. (2023). Real world efficacy and safety of various accelerated deep TMS protocols for major depression. *Psychiatry research*, 328, 115482. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2023.115482>
- Roth, Y., Munasifi, F., Harvey, S. A., Grammer, G., Hanlon, C. A., & Tendler, A. (2024). Never Too Late: Safety and Efficacy of Deep TMS for Late-Life Depression. *Journal of clinical medicine*, 13(3), 816. <https://doi.org/10.3390/jcm13030816>
- Semkovska, M., & McLoughlin, D. (2010). *Cognitive side-effects of electroconvulsive therapy: a systematic review*. *The Lancet Psychiatry*, 12(11), 104–110
- Song, W., Zhang, Z., Lv, B., Li, J., Chen, H., Zhang, S., Zu, J., Dong, L., Xu, C., Zhou, M., Zhang, T., Xu, R., Zhu, J., Shen, T., Zhou, S., Cui, C., Huang, S., Wang, X., Nie, Y., Aftab, K., ... Zhang, W. (2024). High-frequency rTMS over bilateral primary motor cortex improves freezing of gait and emotion regulation in patients with Parkinson's disease: a randomized controlled trial. *Frontiers in aging neuroscience*, 16, 1354455. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2024.1354455>
- Sönmez, A. İ., Çamsarı, D. D., Nandakumar, A. L., Voort, J. L. V., Kung, S., Lewis, C. P., & Croarkin, P. E. (2018). Accelerated TMS for depression: A systematic review and meta-analysis. *Psychiatry Research*, 273, 770-781. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2018.12.041>
- Steele V. R. (2020). Transcranial Magnetic Stimulation as an Interventional Tool for Addiction. *Frontiers in neuroscience*, 14, 592343. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.592343>
- Steen-García, L., Franco-Jiménez, R., & Ibáñez-Alfonso, J. A. (2024). Transcranial direct current stimulation (tDCS) in adults with attention deficit hyperactivity disorder. A systematic review. *Revista de neurologia*, 79(9), 239–246. <https://doi.org/10.33588/rn.7909.2024294>
- Terraneo, A., Leggio, L., Saladini, M., Ermani, M., Bonci, A., & Gallimberti, L. (2016). Transcranial magnetic stimulation of dorsolateral prefrontal cortex reduces cocaine use: A pilot study. *European neuropsychopharmacology : the journal of the European College of Neuropsychopharmacology*, 26(1), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2015.11.011>
- Trapp, N. T., Purgianto, A., Taylor, J. J., Singh, M. K., Oberman, L. M., Mickey, B. J., Youssef, N. A., Solzbacher, D., Zebley, B., Cabrera, L. Y., Conroy, S., Cristancho, M., Richards, J. R., Flood, M. J., Barbour, T., Blumberger, D. M., Taylor, S. F., Feifel, D., Reti, I. M., McClintock, S. M., ... National Network of Depression Centers Neuromodulation Task Group (2025). Consensus review and considerations on TMS to treat depression: A comprehensive update endorsed by the National Network of Depression Centers, the Clinical TMS Society, and the International Federation of Clinical Neurophysiology. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 170, 206–233. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2024.12.015>
- Trivedi, M. H., Rush, A. J., Wisniewski, S. R., Nierenberg, A. A., Warden, D., Ritz, L., & Fava, M. (2006). Evaluation of outcomes with citalopram for depression using measurement-based care in STAR*D: Implications for clinical practice. *American Journal of Psychiatry*, 163(1), 28-40. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.163.1.28>
- Tubbs, A., & Vazquez, E. A. (2024). Engineering and Technological Advancements in Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS): A Five-Year Review. *Brain sciences*, 14(11), 1092. <https://doi.org/10.3390/brainsci14111092>
- U.S. Department of Health and Human Services, Food and Drug Administration, Center for Devices and Radiological Health, Office of Device Evaluation, Division of Ophthalmic, Neurological, and Ear, Nose and Throat Devices, Neurodiagnostic and Neurotherapeutic Devices Branch. (2011, July 26). *Guidance for industry and FDA staff—Class II special controls guidance document: Repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) systems*. <https://www.fda.gov/media/80637/download>
- Valero-Cabré, A., Payne, B. R., & Pascual-Leone, A. (2007). Opposite impact on 14C-2-deoxyglucose brain metabolism following patterns of high and low frequency repetitive transcranial magnetic stimulation in the posterior parietal cortex. *Experimental Brain Research*, 176(4), 603-615. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0639-8>
- Vida, R. G., Sághy, E., Bella, R., Kovács, S., Erdősi, D., Józwiak-Hagymásy, J., Zemlényi, A., Tényi, T., Osváth, P., & Voros, V. (2023). Efficacy of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) adjunctive therapy for major depressive disorder (MDD) after two antidepressant treatment failures: meta-analysis of randomized sham-controlled trials. *BMC psychiatry*, 23(1), 545. <https://doi.org/10.1186/s12888-023-05033-y>
- Wagner, T., Valero-Cabre, A., & Pascual-Leone, A. (2007). Noninvasive human brain stimulation. *Annual review of biomedical engineering*, 9, 527–565. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.9.061206.133100>

- Wang, Y., Li, W., Dong, T., Xu, R., Ai, Q., Yang, L., Gai, X., & Li, L. (2025). Exploring the role of Transcranial magnetic stimulation in cognitive impairment and sarcopenia: a narrative review. *Frontiers in human neuroscience*, 19, 1601651. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1601651>
- Weigand, A., Horn, A., Caballero, R., Cooke, D., Stern, A. P., Taylor, S. F., & Fox, M. D. (2018). Prospective validation that subgenual connectivity predicts antidepressant efficacy of transcranial magnetic stimulation sites. *Biological Psychiatry*, 84(1), 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2017.10.028>
- Xie, F., Shen, B., Luo, Y., Zhou, H., Xie, Z., Zhu, S., Wei, X., Chang, Z., Zhu, Z., Ding, C., Jin, K., Yang, C., Batzu, L., Chaudhuri, K. R., Chan, L. L., Tan, E. K., & Wang, Q. (2024). Repetitive transcranial magnetic stimulation alleviates motor impairment in Parkinson's disease: association with peripheral inflammatory regulatory T-cells and SYT6. *Molecular neurodegeneration*, 19(1), 80. <https://doi.org/10.1186/s13024-024-00770-4>
- Yesavage, J. A., Fairchild, J. K., Mi, Z., Biswas, K., Davis-Karim, A., Phibbs, C. S., Forman, S. D., Thase, M., Williams, L. M., Etkin, A., O'Hara, R., Georgette, G., Beale, T., Huang, G. D., Noda, A., George, M. S., & VA Cooperative Studies Program Study Team (2018). Effect of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Treatment-Resistant Major Depression in US Veterans: A Randomized Clinical Trial. *JAMA psychiatry*, 75(9), 884–893. <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2018.1483>
- Yen, C., Valentine, E. P., & Chiang, M. C. (2024). The Use of Transcranial Magnetic Stimulation in Attention Optimization Research: A Review from Basic Theory to Findings in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder and Depression. *Life (Basel, Switzerland)*, 14(3), 329. <https://doi.org/10.3390/life14030329>
- Zhang, M., Mo, J., Zhang, H., Tang, Y., Guo, K., OuYang, X., Huang, L., Zhong, X., & Ning, Y. (2023). Efficacy and tolerability of repetitive transcranial magnetic stimulation for late-life depression: A systematic review and meta-analysis. *Journal of affective disorders*, 323, 219–231. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2022.11.027>
- Zhao, L., Chen, L., Wang, C., Li, S., & Wan, C. (2024). Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation at different targets on brain function in stroke patients: a randomized controlled trial. *Frontiers in neurology*, 15, 1454220. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1454220>
- Zheng, Y., Fan, W., Zhang, X., & Dong, E. (2016). Gestational stress induces depressive-like and anxiety-like phenotypes through epigenetic regulation of BDNF expression in offspring hippocampus. *Epigenetics*, 11(2), 150-162. <https://doi.org/10.1080/15592294.2016.1146850>

Anexo 1. Efectividad clínica de la EMT en el TDM.

Autor/Año	Protocolo	Duración	n	Tasa de respuesta (%)	Tasa de remisión
O'Reardon et al., 2007	EMTr 10 HZ	37,5 min/ 5 días x 4 sem	301	24,5%	17
Berlim et al., 2014	EMTr 10 Hz	Variable (2-6 sem)	1371 (29 ensayos)	29,3	18,6
Gaynes et al., 2014	Revisión sistemática FDA	10 Hz CPDLI	N/A	33	22
Blumberger et al., 2018	iTBS vs EMTr 10 Hz	600 pulsos x 20 días	414	49 (iTBS) vs 47 (10 Hz)	32 vs 27
Zhang et al., 2023	EMTr 10 Hz en adultos mayores	4-6 sem	132 (metaanálisis ECA)	45	33
Motamed et al., 2025	EMT acelerada 5 ses/día x 5 días	iTBS CPDLI + 10 Hz bilateral	112	62	43
Roth et al., 2024	Deep TMS (bobina H1)	20 min x 30 ses	195	55	38