



## Neuronas espejo y sistemas neuronales asociados al aprendizaje clínico. Una revisión de la literatura

*Mirror neurons and neural systems associated with clinical learning. A review of the literature*

Paulo Orquera,\* Juan José Valenzuela,†,§ Mathias Orellana-Donoso,¶||  
Marjorie Gold,§ Nancy Abascal||,\*\*

### Palabras clave:

simulación clínica,  
aprendizaje, neuronas  
espejo, imitación.

### Keywords:

clinical simulation,  
learning, mirror  
neurons, imitation.

\* Doctorado en Ciencias de la Salud, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Anáhuac, Campus Norte. Rectoría, Centro Mexicano Universitario de Ciencias y Humanidades. México.

† Departamento de Morfología y Función, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad de las Américas, Santiago, Chile.

§ Departamento de Morfología, Facultad de Medicina, Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile.

¶ Escuela de Medicina, Universidad Finis Terrae, Santiago, Chile.

|| Departamento de Ciencias Morfológicas, Facultad de Medicina y Ciencias, Universidad San Sebastián, Santiago, Chile.

\*\* Facultad de Contaduría Pública de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

Recibido: 23/03/2023  
Aceptado: 22/06/2023

doi: 10.35366/112734

### RESUMEN

**Introducción:** se ha sugerido que las neuronas espejo (MN, por sus siglas en inglés) desempeñan un papel fundamental en los procesos sociales de orden superior, incluido el aprendizaje motor, la comprensión de la acción, el aprendizaje por imitación, la toma de perspectiva, la comprensión de las emociones faciales y la empatía. Sin embargo, aún no existen estudios que evalúen y demuestren un papel importante de las MN en el aprendizaje por imitación en instancias como la simulación clínica para estudiantes universitarios de carreras de ciencias de la salud. **Objetivo:** describir cómo algunos mecanismos neuronales pueden contribuir al aprendizaje basado en la imitación y discutir su papel en la simulación clínica. **Material y métodos:** se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos electrónicas, con el fin de recopilar la literatura disponible sobre el tema. **Resultados:** se incluyeron 22 artículos después de aplicar los criterios de inclusión y exclusión. Siete de ellos abordaron el proceso de aprendizaje a través de neuronas espejo, siete lo hicieron a través de la imitación y dos más trataron el aprendizaje sensoriomotor a través de MN. **Conclusiones:** aunque parece que el sistema de las MN tiene implicaciones que podrían subyacer al aprendizaje basado en simulación clínica, se necesitan más estudios primarios con alto rigor metodológico y experimentos para medir la actividad del sistema de las MN en el aprendizaje basado en simulación clínica y su papel para establecer conclusiones más concretas.

### ABSTRACT

**Introduction:** mirror neurons (MN) have been suggested to play a fundamental role in higher order social processes, including motor learning, understanding action, imitation learning, taking perspective, understanding facial emotions, and empathy. However, there are still no studies that evaluate and demonstrate an important role of MN in imitation learning in instances such as clinical simulation for university students of health-sciences majors. **Objective:** to describe how some neural mechanisms can contribute to imitation based learning and discuss their role in clinical simulation. **Material and methods:** a systematic search was carried out in electronic databases, in order to compile the available literature on the subject. **Results:** twenty-two articles were included after applying the inclusion and exclusion criteria. Seven articles addressed the learning process through mirror neurons, seven addressed learning through imitation and two more treated sensorimotor learning through MN. **Conclusions:** although it seems that the MN system has implications that could underlie clinical simulation-based learning, more primary studies with high methodological rigor and experiments are needed to measure the activity of the MN system in clinical simulation-based learning and its role in order to establish more concrete conclusions.

### INTRODUCCIÓN

Se ha sugerido que las neuronas espejo (MN) desempeñan un papel fundamental en los procesos sociales de orden superior, incluido el aprendizaje motor, la comprensión de la

acción, el aprendizaje por imitación, la toma de perspectiva, la comprensión de las emociones faciales y la empatía. Sin embargo, aún no existen estudios que evalúen y demuestren un papel importante de las MN en el aprendizaje por imitación en instancias como la simulación

**Citar como:** Orquera P, Valenzuela JJ, Orellana-Donoso M, Gold M, Abascal N. Neuronas espejo y sistemas neuronales asociados al aprendizaje clínico. Una revisión de la literatura. Rev Latinoam Simul Clin. 2023; 5 (2): 60-74. <https://dx.doi.org/10.35366/112734>



clínica para estudiantes universitarios de carreras de ciencias de la salud.

## NEUROANATOMÍA Y NEUROFISIOLOGÍA GENERAL

La neurona es una célula diferenciada compuesta por un cuerpo celular con extensiones desde el soma llamadas dendritas, más un único y extenso proceso llamado axón (*Figura 1*). Tanto las dendritas como el axón son las estructuras de comunicación entre las neuronas. Este proceso se lleva a cabo a través de sinapsis químicas mediadas por neurotransmisores, moléculas químicas que activan o inhiben la neurona postsináptica. La neurona es la unidad funcional del tejido nervioso y está protegida por células de sostén llamadas neuroglia. El sistema nervioso es una red compleja interconectada de neuronas y glía que controla y modula las respuestas vitales del cuerpo humano. La estructura del sistema nervioso se caracteriza principalmente por dos grandes tipos de sustancia: la materia gris que contiene la mayor parte de los cuerpos celulares y la materia blanca con estructuras como los axones.<sup>1,2</sup>

El sistema nervioso tiene la capacidad de percibir el ambiente externo e interno al mismo tiempo a través de un lenguaje común. Este medio de comunicación es el potencial de acción, con características bioeléctricas y generado por un proceso complejo y sorprendente. Comienza con la llegada de la fuente de energía externa, que activa un receptor; luego, se genera una transducción de señales que se internaliza en el sistema nervioso para llegar, entre otros lugares, a la corteza cerebral donde se produce la percepción de los estímulos.<sup>1,2</sup> Este proceso se inicia

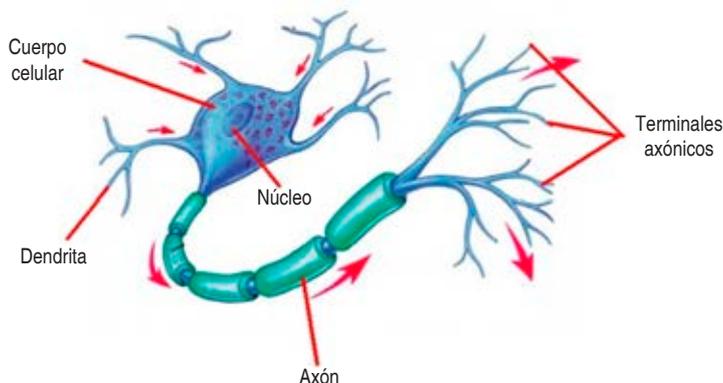
con la entrada de calcio intercelular, producto de un cambio de polarización dentro de la célula, activando los filamentos de miosina intracelular, que a su vez participan en el movimiento de vesículas llenas de neurotransmisores hacia el espacio sináptico, con el objetivo de producir una comunicación mediada por la activación de receptores postsinápticos que pueden activarse (p. ej., canales iónicos para replicar la fuerza del potencial presináptico en la neurona postsináptica). Este efecto es dependiente del receptor que se activa, debido a que existe una probabilidad de despolarización de la membrana, lo que a su vez conduce a la posibilidad de desencadenar un potencial de acción, o a una hiperpolarización del mismo, generando una probabilidad de inhibición del potencial de acción. Este mecanismo es clave para el buen funcionamiento del sistema nervioso.<sup>3,4</sup>

Cada vez que se genera un movimiento humano se activa el sistema musculoesquelético, combinación perfecta del sistema óseo, muscular y articular, que influye en la percepción de fuentes físicas como la gravedad, la luz y la fuerza de reacción del suelo durante la marcha.<sup>3</sup> Cuando esta acción se integra tanto en el sistema piramidal como en el extrapiramidal se desencadenan acciones automáticas o automatizadas como medio de respuesta a diferentes estímulos transducidos desde el exterior o el interior del cuerpo humano para poder realizar el ciclo de la marcha.<sup>3,4</sup>

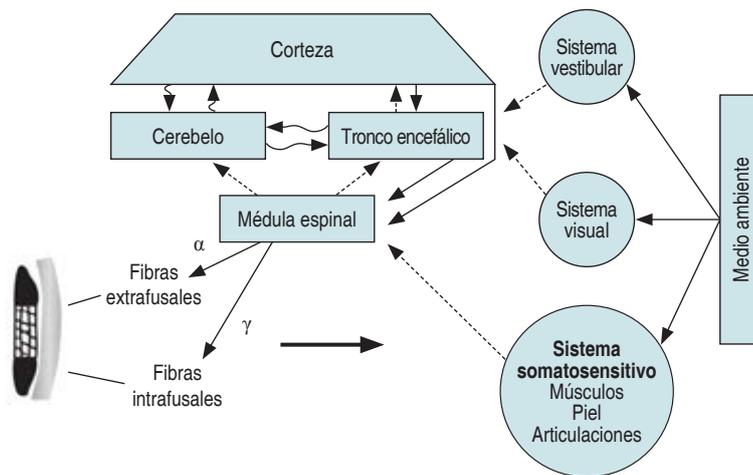
Desde un punto de vista neurofisiológico, cuando a un movimiento se le da una intención y tiene un objetivo funcional se le denomina acto o tarea motora.<sup>3</sup> Este acto motor está directamente relacionado con el proceso de aprendizaje motor de una habilidad o destreza,<sup>3</sup> el cual integra una serie de procesos asociados a la práctica repetitiva y la vivencia de un movimiento para que este aprendizaje se produzca. El aprendizaje comienza con una fase cognitiva del acto motor, luego una fase asociativa de los mecanismos centrales y periféricos involucrados en este acto, y finalmente este aprendizaje se consolida en una fase autónoma, donde todos los mecanismos se activan con sólo pensar o imaginar el acto motor.<sup>4</sup>

Si se revisa el funcionamiento interno desde el estímulo visual o sensitivo hasta el acto motor se podría resumir en (*Figura 2*):

**Sistema visual:** detecta la luz y, en consecuencia, crea una imagen del movimiento humano en la corteza visual, como parte del engranaje del aprendizaje de una habilidad.



*Figura 1:* Estructura de la neurona.



**Figura 2:** El sistema sensoriomotor incorpora todos los componentes de procesamiento e integración aferentes, eferentes y centrales involucrados en el mantenimiento de la estabilidad funcional de la articulación. Los mecanorreceptores periféricos residen en la piel, los músculos, las articulaciones y los ligamentos. Las vías aferentes (líneas de puntos) transmiten información a los tres niveles de control motor y áreas asociadas, como el cerebelo. La activación de las neuronas motoras puede ocurrir en respuesta directa a entradas sensoriales periféricas (reflejos) o a órdenes motoras descendentes, que pueden ser moduladas o reguladas por las áreas asociadas (líneas grises). Las vías eferentes de cada uno de los niveles de control motor (líneas sólidas) convergen en las neuronas motoras alfa y gamma ubicadas en las astas ventrales de la médula espinal. Las contracciones de las fibras musculares extrafusales e intrafusales hacen que se presenten nuevos estímulos a los mecanorreceptores periféricos.

**Sistema vestibular:** se encarga de posicionar la cabeza y los ojos en relación con el objeto de interés de lo que se está observando y mantiene una correcta ubicación espacial de los segmentos corporales y del cuerpo humano en su conjunto con la fuerza de la gravedad.

**Sistema somatosensorial:** se activa por medio de los diferentes receptores para traducir la energía externa y comunicarla al sistema nervioso en un lenguaje común mediado por el potencial de acción, transfiriendo la información sensorial a las diferentes estructuras del sistema nervioso y alimentando la corteza cerebral, para la percepción del mundo externo o interno.

**Médula espinal:** integra información sensorial y motora a través de los tractos ascendentes y descendentes que comunican a las diferentes estructuras encefálicas del sistema nervioso central que participan en la percepción del acto motor y el aprendizaje de una habilidad.

**Tronco encefálico:** a través de sus tres secciones interviene en el control ocular y del movimiento, además de intercomunicar las distintas estructuras de los sistemas nerviosos piramidales

y extrapiramidal que intervienen en los actos motores.

**Cerebelo:** es un órgano que integra los mecanismos motores y sus componentes, actuando como medio de comparación entre el programa motor a ejecutar y el resultado una vez ejecutado para orientar y controlar la calidad de los actos motores que comanda la corteza cerebral, por lo que la repetición de un mismo acto motor puede hacerlo más eficiente y eficaz.

**Fibras musculares:** participan como estructura funcional de los actos motores por la contracción de sus diferentes fibras según los requerimientos del proceso de aprendizaje de la motricidad.

**Corteza cerebral:** es la estructura somatosensorial que genera la percepción consciente del acto motor y que participa en el aprendizaje de la destreza, activando el complejo neuronal espejo de las áreas motora y visual.

## APRENDIZAJE SENSORIOMOTOR

El aprendizaje sensoriomotor se refiere a la mejora a través de la práctica del desempeño del comportamiento motor guiado por sensores.<sup>5</sup> Esto involucra diferentes estructuras del sistema nervioso central que componen el sistema sensoriomotor. El sistema sensoriomotor (Figura 2) es un subcomponente del sistema de control motor del cuerpo, y el término sistema sensoriomotor fue adoptado por los participantes del Taller de Investigación y Educación de la Fundación de Medicina del Deporte (1997) para describir la integración y el procesamiento de los componentes motor y central, y los componentes implicados en el mantenimiento de la homeostasis articular durante los movimientos corporales (estabilidad articular funcional).<sup>6</sup>

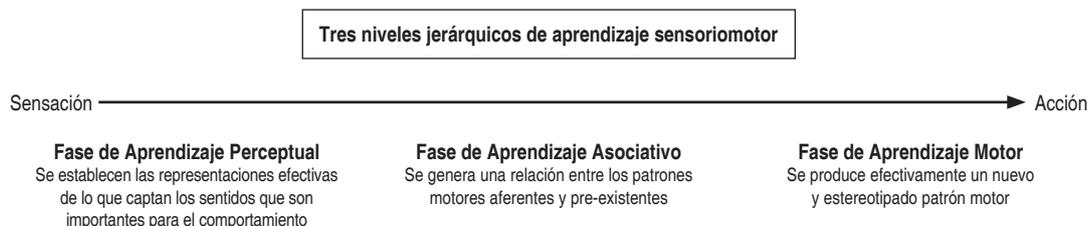
Los componentes que dan lugar a la estabilidad articular funcional deben ser flexibles y adaptables porque los niveles requeridos varían entre personas y tareas. Éstos deben interactuar para que, en primer lugar, los diferentes componentes de la tarea puedan aprenderse para un desempeño calificado, incluida la recopilación eficiente de información sensorial relevante para la tarea, la toma de decisiones, la selección de estrategias y la implementación de ambos predictivos y mecanismos de control reactivo (Figura 2). Luego se evalúa el grado de error y/o recompensa, así como su influencia en el aprendizaje.<sup>7,8</sup> Finalmente, las representaciones neuronales de la memoria motora que influyen en cómo asignamos crédito durante el aprendizaje y cómo éste

se generaliza a nuevas situaciones determinan en gran medida el grado de optimización de la capacidad motora. Para lograr esto y adquirir un desempeño calificado en una tarea determinada, el aprendizaje depende de cuatro áreas clave: desarrollar una estrategia efectiva para recopilar información (dónde buscar); adquirir conocimiento de las características clave de la tarea (pasos necesarios en el procedimiento); aprender habilidades de alto nivel como la toma de decisiones y la anticipación; y desarrollar y perfeccionar las habilidades motrices.<sup>7,8</sup> Observar el desempeño de un modelo puede contribuir al desarrollo de las cuatro áreas. Primero, durante la observación, los participantes tienden a producir movimientos oculares predictivos, dirigiendo la atención hacia los objetos antes de interactuar con ellos, como lo hace el modelo, lo que sugiere que se pueden desarrollar estrategias efectivas de recolección de información a través de la observación. En segundo lugar, la adquisición del conocimiento de las características clave de la tarea se ha demostrado en una variedad de estudios de observación, como cuando se aprenden secuencias simples de movimientos de la mano. En tercer lugar, las estrategias de tareas en labores sensoriomotoras se pueden aprender directamente de un modelo, lo que contribuye a las habilidades de toma de decisiones de alto nivel.<sup>7,8</sup>

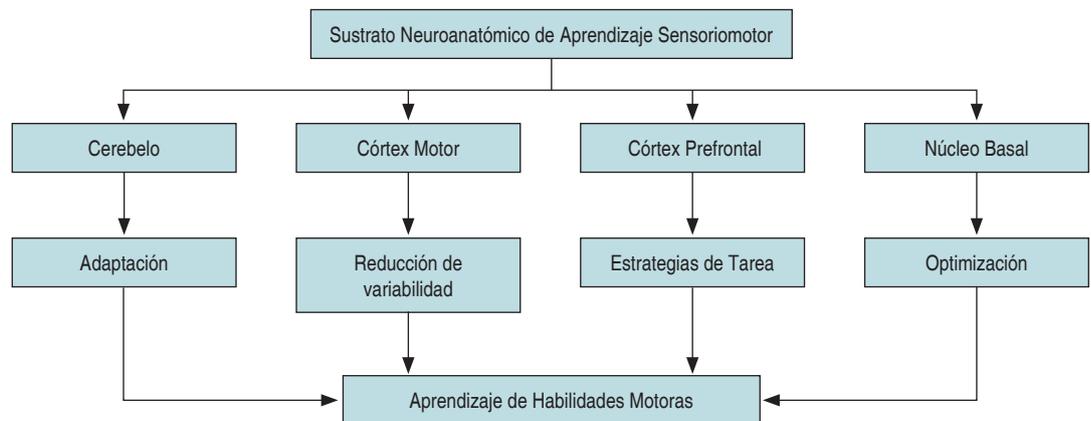
Por otro lado, el aprendizaje sensoriomotor se puede ordenar en tres niveles jerárquicos consecutivos (*Figura 3*): el primero es el nivel sensorial perceptivo, que implica una mayor discriminación y detección neural de un estímulo importante, que a su vez dependerá de las experiencias del sujeto, así como una propagación empírica dirigida a establecer representaciones afectivas de importantes estímulos conductuales. Esto puede cambiar de un momento a otro y también indica un control inicial desde los centros superiores del sistema nervioso hacia la periferia (control *top-down* agudo).<sup>9</sup> El segundo nivel es el aprendizaje asociativo sensoriomotor, que genera una

relación basada en la recompensa entre la entrada sensorial y la salida motora, generando así relaciones adaptativas entre la entrada sensorial y los patrones motores preexistentes a través de circuitos cortos y rápidos entre las áreas sensoriales y motoras. Y como último eslabón, el tercer nivel jerárquico se entiende por el aprendizaje de la motricidad. Para lograr la generación efectiva de un patrón motor estereotipado y novedoso, el sujeto debe explorar la actividad de los patrones motores y los movimientos asociados, generar una selección basada en la retroalimentación y, finalmente, refinar el patrón de movimiento seleccionado a través de la práctica.<sup>9</sup>

Desde el punto de vista neuroanatómico (*Figura 4*), en términos generales cabe mencionar que el cerebelo, la corteza motora primaria, la corteza prefrontal y los núcleos basales son estructuras clave dentro del proceso de aprendizaje sensoriomotor: el aprendizaje de la habilidad motora estará mediado por la corteza prefrontal para generar las estrategias de la tarea, la corteza motora estará reduciendo la variabilidad motora y los núcleos basales optimizarán la habilidad motora que se está aprendiendo. A su vez, el cerebelo estará midiendo el grado de error a través de procesos complejos como generar una copia eferente del acto motor que se está realizando con base en lo que se espera como consecuencia sensorial, comparándolo con el resultado final y así adaptarlo a las habilidades motoras.<sup>9</sup> Además, los investigadores han sugerido la importancia del sistema de neuronas espejo (MNS, por sus siglas en inglés), que se describe como el sistema de “resonancia” de acción canónica en el cerebro. El MNS ha evolucionado para usar o compartir muchos de los mismos circuitos involucrados en el control motor, especialmente en la imitación o simulación de las acciones de otros.<sup>8,9</sup> Varios investigadores incluso han propuesto que las representaciones compartidas de las acciones motrices, o las propiedades de acción-comprensión de este sistema, pueden constituir una piedra



*Figura 3: Tres niveles jerárquicos de aprendizaje sensoriomotor, de la sensación a la acción.*



**Figura 4:** Principales estructuras cerebrales implicadas en el aprendizaje sensoriomotor y su contribución.

angular fundamental para los procesos sociales de orden superior, incluido el aprendizaje motor, la comprensión de la acción, la imitación, la toma de perspectiva, la comprensión, las emociones faciales y la empatía.<sup>10-12</sup>

### SISTEMA DE NEURONAS ESPEJO

Durante la década de 1990, Giacomo Rizzolatti, de la Universidad de Parma en Italia, investigó primates de la especie *Macaca nemestrina* buscando propiedades visuales en el sistema motor. Para hacer esto, implantó quirúrgicamente electrodos en sus cerebros y dirigió su atención a las áreas de la corteza premotora. Esta parte de la neocorteza es responsable de planificar, seleccionar y ejecutar movimientos, además de codificar comportamientos motores específicos. Uno de los investigadores de su grupo, el neurólogo Vittorio Gallese, notó la actividad neuronal de ciertas neuronas motoras asociadas con los movimientos de prensión en un primate que inesperadamente lo observaba tomar un objeto con la mano. Lo llamativo de este hecho fue que el animal permaneció inmóvil. Este evento inicialmente generó confusión, ya que no era fácil comprender el hecho de que las neuronas motoras se activaran simplemente por la percepción de las acciones o desplazamientos de otro individuo, sin que se generara ningún movimiento. Este interesante fenómeno tendría inicialmente un significado muy relevante en términos de comprensión de las relaciones sociales. Posteriormente, los autores concluyeron que estas neuronas motoras tenían funciones no motoras adicionales, relacionadas con la comprensión de las acciones de otros

individuos y la comprensión de la intención detrás de dichas acciones. Esto llevó a sugerir que las neuronas espejo (MN) aparecieron en cierto punto de la evolución de las especies para proporcionar un mecanismo para reconocer y comprender las acciones de los individuos en entornos sociales.<sup>13,14</sup>

A las MN se les han atribuido una amplia variedad de funciones. Los estudios primarios están relacionados con la comprensión de la acción y con una integración desde las diferentes áreas cerebrales para generar un nuevo aprendizaje y una nueva conexión neuronal.<sup>15,16</sup> No obstante, las MN también han captado la atención y la imaginación de neurocientíficos, psicólogos y filósofos, ya que también han sido implicadas en simulación corporal,<sup>17</sup> empatía,<sup>18</sup> reconocimiento de emociones,<sup>19</sup> lectura de intenciones,<sup>20</sup> adquisición del lenguaje,<sup>21</sup> evolución del lenguaje,<sup>22</sup> comunicación manual,<sup>16</sup> procesamiento del lenguaje de señas,<sup>23</sup> percepción del habla,<sup>24</sup> producción del habla,<sup>25</sup> procesamiento de música,<sup>26</sup> orientación sexual<sup>27</sup> y experiencia estética.<sup>28</sup> Además, se ha sugerido que la disfunción de MN contribuye a una serie de trastornos, incluidos el autismo, la esquizofrenia, el síndrome de Down, la esclerosis múltiple, la adicción al cigarrillo y la obesidad.<sup>29</sup> Sin embargo, aún no existen estudios que evalúen y demuestren un papel importante de las MN en el aprendizaje por imitación en instancias basadas en simulación clínica para estudiantes universitarios de carreras de ciencias de la salud.

Por lo tanto, el objetivo de esta revisión es describir cómo algunos mecanismos neuronales pueden contribuir al aprendizaje basado en la imitación y discutir su papel en la simulación clínica.

### MATERIAL Y MÉTODOS

Esta revisión bibliográfica busca describir los conceptos teóricos y prácticos de los mecanismos neuronales que subyacen al aprendizaje basado en la imitación de tareas, dado que, al no incluirse estudios de intervención, sólo se deben reportar resultados cualitativos; para lo cual se siguieron estas pautas: la revisión consideró artículos científicos específicos y libros de anatomía humana, escritos en español o inglés, publicados entre 2000 y 2020.

Se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos electrónicas, con el fin de recopilar la literatura disponible sobre el tema. El proceso de búsqueda se realizó en las siguientes bases de datos: Medline, SciELO, WOS, CINAHL, Scopus y Google Scholar, utilizando como términos de búsqueda "simulación clínica", "sistema sensoriomotor", "neurons learning", "mirror neuron system", "aprendizaje", "aprendizaje visual", para lo cual se utilizaron los operadores booleanos ("Y", "O"

y "NO") con la siguiente estrategia: aprendizaje O aprendizaje visual O aprendizaje de neuronas O simulación clínica Y sistema de neuronas espejo O sistema sensoriomotor. El algoritmo de búsqueda se muestra en la *Figura 5*.

Los criterios de inclusión fueron artículos que aborden el tema del aprendizaje por imitación y el aprendizaje sensoriomotor, que buscaran los mecanismos subyacentes al papel del sistema de neuronas espejo en el aprendizaje basado en simulación clínica. Los criterios de exclusión fueron estudios que no conceptualizaban el aprendizaje a través de algunos de los conceptos incluidos, los relacionados con algún tipo de patología o condición clínica, los que muestran sólo resultados preliminares y finalmente cartas al editor, cartas de comentarios y comentarios al editor.

### RESULTADOS

Después de aplicar estos criterios de exclusión quedaron 22 estudios. Para realizar la descripción

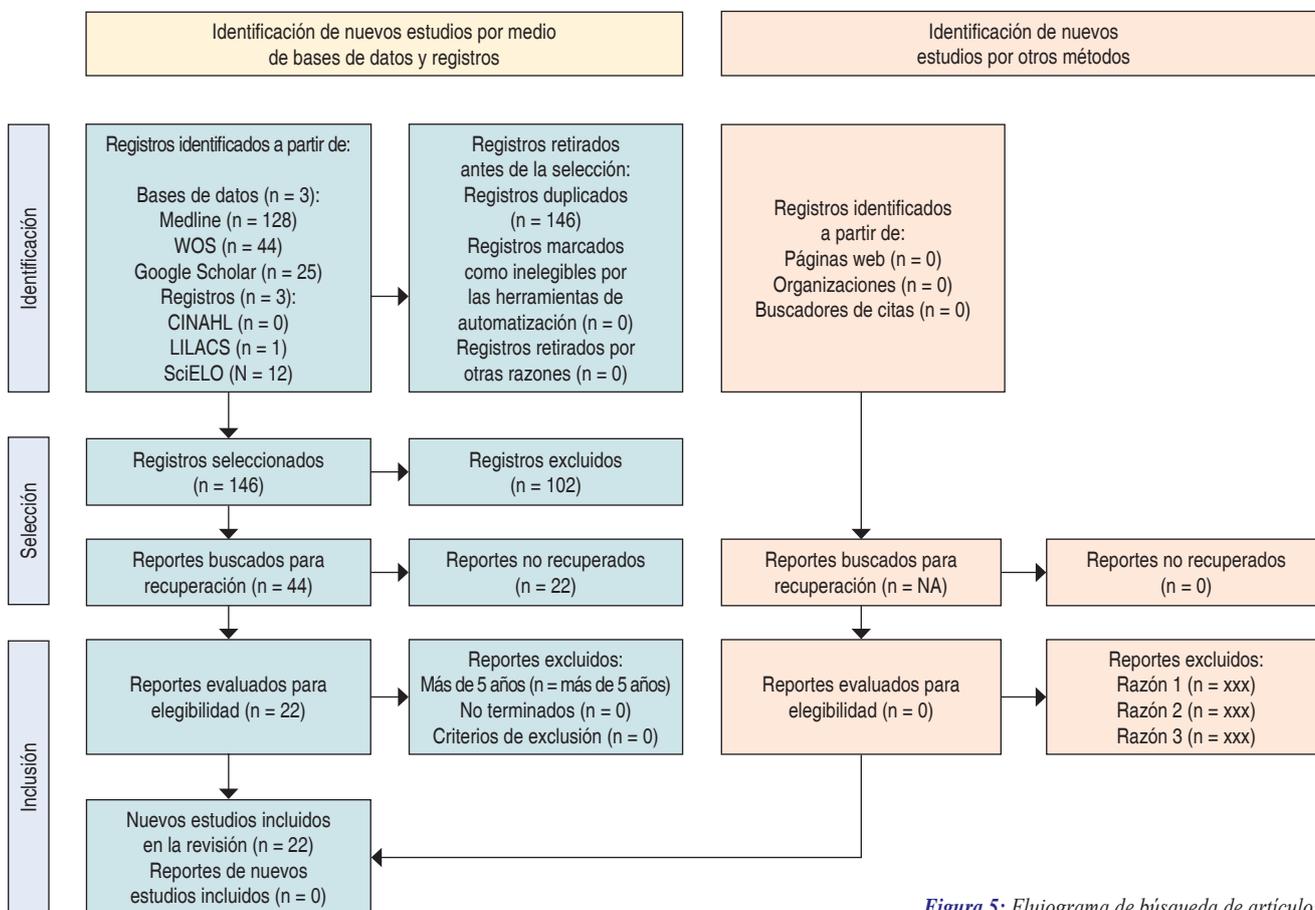


Figura 5: Flujograma de búsqueda de artículos.

cualitativa de los resultados presentados en esta revisión, identificamos los diferentes mecanismos propuestos analizados en los artículos, los cuales se muestran en la *Tabla 1*.

### **APRENDIZAJE A TRAVÉS DEL SISTEMA DE NEURONAS ESPEJO**

Para el aprendizaje mediado por el MNS, se encontraron siete artículos que correlacionaron el aprendizaje con las MN.<sup>30-36</sup> De éstos, sólo un estudio<sup>32</sup> describió la participación de MN en el aprendizaje en 44 pacientes. Los autores plantean la posibilidad de que existan proyecciones entre distintas regiones de la corteza cerebral, por ejemplo, entre los lóbulos frontal y parietal, que subyacen al aprendizaje y desempeño de alguna actividad motora. Otra hipótesis propuesta es que las MN tienen una conexión fluida entre las regiones visuales de la corteza cerebral y la corteza motora, a lo que se atribuye el aprendizaje a través de los recuerdos visuales. En consecuencia, esto permitiría el aprendizaje asociativo de forma dinámica y permanente.<sup>32</sup> Estas descripciones apoyan fuertemente la existencia de un sistema de emparejamiento de observación de desempeño (MNS), que establece un sistema de circuitos compartidos que permiten, a través de simulaciones, que el sistema de transformación aprenda y represente los cambios de coordenadas extrínsecas a intrínsecas cuando un imitador observa a un demostrador que además es entrenable, se puede mejorar con el tiempo y puede tener un aprendizaje permanente y significativo.<sup>10</sup>

### **NEURONAS ESPEJO E IMITACIÓN**

Para el aprendizaje mediado por MNS e imitación se encontraron ocho estudios, seis de los cuales fueron descriptivos y dos en pacientes, con un total de 66 individuos.<sup>37-44</sup> Esta conceptualización de MN e imitación tiene un sustento teórico desde el punto de vista del aprendizaje asociativo en acciones no dirigidas a un objetivo.<sup>43</sup> En cuanto a las acciones dirigidas a objetivos, Catmur y colaboradores<sup>43</sup> encontraron en sus resultados que, para acciones dirigidas a objetivos, los mismos mecanismos asociativos subyacen al desarrollo de las propiedades de correspondencia de MN (el sustrato neuronal de la capacidad de imitar). Por lo tanto, afirman que estas neuronas codifican preferentemente acciones dirigidas al objetivo. Es probable que las representaciones de gestos hábiles relacionados con los objetos estén estre-

chamente vinculados a sistemas evolutivamente más primitivos que controlan el agarre de objetos. Emergen de un mapeo entre la información de los objetos y las acciones codificadas por corrientes ventrales y dorsales, y están lateralizados hacia la izquierda, el hemisferio humano, que sitúa el aprendizaje por imitación y la MN en un punto medio entre la imitación para realizar tareas sencillas y la activación de la MN para actividades más complejas. En este sentido, si fuera una mera imitación, se trataría de patrones de aprendizaje sin asociación con otras funciones intelectuales superiores. Pero este modelo híbrido de aprendizaje es más extrapolable a situaciones de la vida cotidiana que al aprendizaje de nuevos conocimientos profesionales.<sup>38-42</sup>

### **APRENDIZAJE SENSORIOMOTOR POR NEURONAS ESPEJO**

Para el aprendizaje sensoriomotor se encontraron dos estudios<sup>42,43</sup> que demostraron el aprendizaje por MN y el aprendizaje por imitación. El estudio de Giret y su equipo<sup>42</sup> es una revisión de la literatura en la que analizan descubrimientos recientes sobre el MNS, proponen cómo la plantilla de representación de una acción podría interactuar con el MNS en el contexto del aprendizaje por imitación. Sugieren que los patrones estructurados de actividad espontánea expresados durante el sueño juegan un papel crucial en los mecanismos subyacentes a las propiedades de MN. Tanto en los humanos como en los monos se cree que las propiedades especulares de las neuronas individuales surgieron a través de la experiencia sensoriomotora. Ellos plantean la hipótesis de que los patrones de activación neuronal relacionados con el aprendizaje aparecen durante la actividad espontánea cuando el individuo está tranquilo o dormido, y los patrones de actividad neuronal relacionados con la experiencia sensoriomotora podrían explicar el ajuste de las propiedades de las MN en primates, ya que en ellos los registros simultáneos en el motor, somatosensorial y la corteza parietal han proporcionado evidencia de que las células en estas regiones corticales se activan simultáneamente durante una tarea motora repetitiva, un comportamiento de alcance secuencial.<sup>42</sup> Proponen un modelo en el que la actividad neuronal fuera de línea durante el sueño o el descanso contribuye a dar forma a las propiedades del espejo de los núcleos del sistema de la canción, en el que la reactivación de la memoria durante el sueño puede ser una

Tabla 1: Artículos incluidos para el análisis cualitativo.

Autor	Mecanismo propuesto	Fundamento teórico	Número de participantes y consideraciones importantes
Oh et al, 2019 <sup>36</sup>	Neuronas espejo	Presentan un modelo neuronal para investigar la dinámica entre el sistema frontoparietal de neuronas espejo y los procesos visoespaciales durante la observación e imitación de una acción de alcanzar y tomar, que muestra que las neuronas espejo de estas cortezas se activan al desempeñar esta actividad	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Iacoboni et al, 2009 <sup>38</sup>	Neuronas espejo e imitación	Aproximaciones a la activación desde el factor de la psicología social a través de la activación de las neuronas espejo por imitación	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Giret et al, 2017 <sup>42</sup>	Neuronas espejo, imitación y aprendizaje sensoriomotor	Proponen que la reactivación de los conjuntos neuronales durante los periodos fuera de línea contribuye a la integración de la información de retroalimentación sensorial y al establecimiento de la actividad refleja sensoriomotora a nivel neuronal	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Catmur et al, 2019 <sup>43</sup>	Neuronas espejo, imitación y aprendizaje sensoriomotor	Se han encontrado pruebas de que el desarrollo de la imitación depende del aprendizaje asociativo sólo para las acciones no dirigidas a un objetivo. Una de las razones de la falta de investigación sobre las acciones dirigidas a un objetivo es que la imitación de tales acciones se confunde comúnmente con la tendencia a responder de forma espacialmente compatible	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Buxbaum et al, 2005 <sup>37</sup>	Neuronas espejo e imitación	Es probable que las representaciones de los gestos hábiles relacionados con los objetos estén estrechamente vinculadas a sistemas evolutivamente más primitivos que controlan la prensión de objetos, surjan de un mapeo entre la información de los objetos y las acciones codificadas por las corrientes ventral y dorsal, y estén lateralizadas al hemisferio izquierdo en los humanos	44 pacientes con enfermedad vascular encefálica (EVE)
Vogt y Thomaschke, 2007 <sup>54</sup>	Imitación	A pesar del claro impacto de la observación de la acción en las representaciones motoras, recientes trabajos de neuroimagen también indican el solapamiento del aprendizaje por imitación con procesos no imitativos de adquisición de habilidades. A pesar del claro impacto de la observación de la acción en las representaciones motoras, recientes trabajos de neuroimagen también indican el solapamiento del aprendizaje por imitación con procesos no imitativos de adquisición de habilidades	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Dawood y Loo, 2016 <sup>35</sup>	Neuronas espejo	Las neuronas espejo son neuronas visuales-motoras que se encuentran en los primates y se cree que son importantes para el aprendizaje por imitación. La proposición de que las neuronas espejo son el resultado del aprendizaje asociativo mientras el recién nacido observa sus propias acciones ha recibido un notable apoyo empírico	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Simpson et al, 2014 <sup>41</sup>	Neuronas espejo e imitación	La imitación neonatal no debería considerarse exclusivamente a nivel poblacional; en su lugar, proponen que los hallazgos inconsistentes sobre su ocurrencia son el resultado de importantes diferencias individuales en las respuestas imitativas. También pone de relieve lo que consideramos una falsa dicotomía de los relatos genéticos frente al desarrollo de las neuronas espejo de aprendizaje y, en su lugar, sugieren una perspectiva epigenética más parsimoniosa	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Sale y Franceschini, 2012 <sup>39</sup>	Neuronas espejo e imitación	Se ha demostrado que los seres humanos aprenden acciones motoras mediante la ejecución (como en el aprendizaje motor tradicional), la imitación, la observación (como en el aprendizaje observacional) y las imágenes motoras. La activación de estas áreas del cerebro (lóbulo parietal inferior y corteza premotora ventral, así como la parte caudal de la circunvolución frontal inferior [IFG]) tras la observación o las imágenes motoras puede facilitar la ejecución del movimiento posterior al hacer coincidir directamente la acción observada o imaginada con la simulación interna de dicha acción	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual

## Continúa la Tabla 1: Artículos incluidos para el análisis cualitativo.

Autor	Mecanismo propuesto	Fundamento teórico	Número de participantes y consideraciones importantes
Wu et al, 2017 <sup>44</sup>	Neuronas espejo e imitación	Por lo tanto, nuestros hallazgos proporcionan pruebas del efecto único de las palabras objeto sobre el sistema de neuronas espejo durante la imitación de acciones, lo que también puede confirmar el papel clave de la inferencia de objetivos en la imitación de acciones	22 participantes saludables
Vogt et al, 2007 <sup>55</sup>	Aprendiendo por imitación	Durante la observación de las acciones no practicadas, el sistema de neuronas espejo (SNM), que consiste en las áreas parietal inferior y premotora ventral, se activó con más fuerza que para las acciones practicadas. Este hallazgo indica un papel importante del SNM en las primeras etapas del aprendizaje por imitación	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Marshall y Meltzoff, 2014 <sup>40</sup>	Neuronas espejo e imitación	Los bebés humanos son imitadores prolíficos. La imitación infantil indica vínculos entre la observación y el desempeño en el cerebro antes del lenguaje y el aprendizaje prolongado	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Canevari et al, 2013 <sup>56</sup>	Imitación	En este artículo, el objetivo era modelar un mecanismo de aprendizaje por imitación basado en el motor en el reconocimiento automático del habla (ASR). Probamos la utilidad de una estrategia de normalización del hablante que utiliza representaciones motoras del habla y la comparamos con estrategias que ignoran el dominio motor. En concreto, primero entrenamos un regresor mediante técnicas de aprendizaje automático de última generación para construir un mapeo auditivo-motor, en cierto modo imitando a un estudiante humano que intenta reproducir expresiones producidas por otros hablantes	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Triesch, 2013 <sup>57</sup>	Aprendiendo por imitación	Se presenta una hipótesis sobre el desarrollo del aprendizaje por imitación que tiene sus raíces en las motivaciones intrínsecas. Se deriva de una forma recientemente propuesta de aprendizaje intrínsecamente motivado (IML) para la codificación eficiente en la percepción activa, en la que un agente aprende a desempeñar acciones con sus órganos sensoriales para facilitar la codificación eficiente de los datos sensoriales	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Oh et al, 2011 <sup>34</sup>	Neuronas espejo y aprendizaje	Las simulaciones revelan que: i) el sistema de transformación puede aprender y representar los cambios de coordenadas extrínsecas a intrínsecas cuando un imitador observa a un demostrador; ii) el modelo inverso del sistema frontal de neuronas espejo del imitador puede entrenarse para proporcionar los planes motores de las acciones imitadas	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Iacoboni, 2005 <sup>58</sup>	Aprendiendo por imitación	Los últimos avances en nuestra comprensión de los mecanismos neuronales del mimetismo sugieren que existe un circuito central del mimetismo que comprende el surco temporal superior y el “sistema de neuronas espejo” formado por la circunvolución frontal posterior inferior y el córtex premotor ventral adyacente, así como el lóbulo parietal inferior rostral. Este circuito central se comunica con otros sistemas neuronales en función del tipo de imitación realizada. El aprendizaje imitativo se apoya en la interacción del circuito central de la imitación con el córtex prefrontal dorsolateral y quizás con las áreas de disposición motora, es decir, las áreas frontal-mesial, premotora-dorsal y parietal-superior. Por el contrario, la imitación como forma de reflexión social se apoya en la interacción del circuito central de la imitación con el sistema límbico	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual

## Continúa la Tabla 1: Artículos incluidos para el análisis cualitativo.

Autor	Mecanismo propuesto	Fundamento teórico	Número de participantes y consideraciones importantes
Iacoboni y Mazziotta, 2007 <sup>31</sup>	Neuronas espejo	Las neuronas espejo proporcionan un mecanismo neural sencillo para comprender las acciones de los demás. En los humanos, las áreas parietal anterior, inferior, posterior y rostral inferior tienen propiedades espejo. Estas áreas humanas son relevantes para el aprendizaje imitativo y el comportamiento social. De hecho, la condición de aislamiento social del autismo se asocia a un déficit en las áreas de neuronas espejo. Recientemente, se han utilizado estrategias inspiradas en la investigación de las neuronas espejo en el tratamiento del autismo y en la rehabilitación motora tras un ictus	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Del Giudice et al, 2009 <sup>33</sup>	Neuronas espejo	Aunque se ha avanzado considerablemente en la descripción de su función y localización en el cerebro humano primate y adulto, aún sabemos poco sobre su ontogenia. La idea de que las neuronas espejo son el resultado de un aprendizaje hebbiano mientras el niño observa/escucha sus propias acciones ha recibido un notable apoyo empírico en los últimos años. Aquí añadimos un nuevo elemento a esta propuesta, sugiriendo que el sistema perceptivo-motor del bebé está optimizado para proporcionar al cerebro la entrada correcta para el aprendizaje hebbiano, facilitando así la asociación entre la percepción de acciones y sus correspondientes programas motores	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Buccino et al, 2004 <sup>30</sup>	Neuronas espejo	En humanos, mediante un estudio de RMf, se ha demostrado que la observación de acciones realizadas con la mano, la boca y el pie conduce a la activación de diferentes sectores del área de Broca y del córtex premotor, en función del efector implicado en la acción observada, siguiendo un patrón somatotópico que se asemeja al clásico homúnculo del córtex motor. Estos resultados apoyan firmemente la existencia de un sistema de coincidencia rendimiento-observación (sistema de neuronas espejo)	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Carmo et al, 2012 <sup>59</sup>	Aprendiendo por imitación	En la tarea de imitación, la negatividad frontal izquierda sostenida fue más pronunciada para las acciones sin sentido que para las acciones con sentido, desde una ventana temporal temprana. Por el contrario, la observación de acciones desconocidas frente a familiares con la intención de discriminarlas dio lugar a marcadas diferencias en las regiones del cuero cabelludo centro-posterior derecho, tanto en la ventana temporal media como en la última. Estos resultados sugieren que la imitación y la comprensión de la acción pueden apoyarse en mecanismos disociables	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Lopes y Santos-Victor, 2005 <sup>60</sup>	Aprendiendo por imitación	Este enfoque está motivado por el hallazgo de neuronas visomotoras en el área F5 del cerebro del macaco que sugieren que el reconocimiento/imitación de gestos se lleva a cabo en términos motores (espejo) y se basa en el uso de las posibilidades de los objetos (canónicas) para manejar acciones ambiguas. Estos resultados demuestran que este enfoque puede superar a otros métodos más convencionales (por ejemplo, los puramente visuales)	Sin participantes, fue sólo descriptivo y conceptual
Newman-Norlund et al, 2007 <sup>32</sup>	Neuronas espejo	Evaluaron el papel del sistema de neuronas espejo (SNM) humano en las acciones complementarias utilizando imágenes de resonancia magnética funcional mientras los participantes se preparaban para desempeñar acciones imitativas o complementarias. La señal BOLD en la circunvolución frontal inferior derecha y los lóbulos parietales inferiores bilaterales fue mayor durante la preparación de acciones complementarias que durante las imitativas, lo que sugiere que el SNM puede ser esencial para acoplar dinámicamente la observación de la acción con la ejecución de la misma	44 pacientes

característica de un proceso de aprendizaje general en los vertebrados y puede cumplir diferentes funciones, incluyendo el aprendizaje de canciones en pájaros cantores. Como mecanismo adicional, proponen que la codificación del propio canto del pájaro (BOS, por sus siglas en inglés), es decir, el subcanto a, da forma a la actividad espontánea de las áreas auditivas, que a su vez da forma a la actividad espontánea de los núcleos del sistema de canto. También asumen que la actividad similar a un espejo depende de la reactivación espontánea de la red. En ausencia de tal reactivación, la red no se puede ajustar y la exposición experimental a una reproducción del BOS no debe inducir respuestas auditivas similares a las de un espejo. En su modelo hipotético, la actividad espontánea podría utilizar potencialmente una “comunicación basada en paquetes”, donde es probable que las relaciones temporales entre las descargas neuronales se conserven en respuesta a diversos estímulos acústicos e incluso a sonidos espectralmente complejos, como los sonidos de comunicación a nivel temporal”.<sup>42</sup>

## DISCUSIÓN

El aprendizaje es un proceso permanente que puede ocurrir con cualquier tipo de situación o experiencia del día a día, ya sea consciente o inconsciente, en los diferentes ámbitos de la vida. Depende de la frecuencia, el entorno y la intensidad del estímulo para adquirir nuevos conocimientos. Para que sea permanente y significativo existen procesos para fortalecer algunas conexiones neuronales que son relevantes para el aprendizaje a lograr, para debilitar y/o eliminar las que no contribuyen al aprendizaje esperado y para crear nuevas, que con la práctica se fortalecen, permitiéndole perdurar en el tiempo.<sup>7-9</sup>

En este estudio analizamos el aprendizaje a través de tres principios: 1) MN, 2) MN e imitación, y 3) imitación y aprendizaje sensoriomotor. A través de estos principios podemos establecer que aprender con una intención o con una tarea establecida por un moderador (quien dará alguna indicación o mostrará la forma correcta de realizar la tarea a través de un modelo) es un mecanismo que no se basa únicamente en poder realizar una actividad que está predeterminada o demostrada de antemano, pero también tiene una función de interconexión neuronal entre diferentes regiones, como la corteza frontal, parietal, temporal y occipital para realizar esta función. Esto sugiere que debe haber más que una imitación, sino una in-

tegración que permita un proceso de aprendizaje permanente y solidificado a través de la práctica de la actividad, y en ambos casos hay una participación de MN.<sup>45-47</sup> Por ejemplo, un neurocirujano que realiza por primera vez una craneotomía necesitará la enseñanza de un mediador, pero si es capaz de integrar la técnica en las siguientes cirugías, podrá realizarla muchas más veces sin necesidad para un estímulo primario.

Si nos centramos en el modelo MN más imitativa, se puede definir como una actividad imitativa que se integra a través de un mecanismo MN que necesita menos conexiones cerebrales, ya que para imitar un acto motor no es necesario integrar ni tener un aprendizaje teórico previo para ser capaz de realizar la actividad; por ejemplo, al lanzar un dardo a una diana, primero se debe enfocar y analizar el acto motor y la dirección del dardo, y aquí es donde interviene el sistema de MN. La imitación está muy estudiada en monos e infantes que imitan algunas formas de actividad con algún tipo de intención de supervivencia que no necesitan mayor procesamiento neuronal y que sólo involucran áreas corticales más primitivas asociadas al homínulo motor.<sup>14</sup>

En cuanto al sistema sensoriomotor, actúa como mediador de la acción de aprendizaje y siempre será necesario para todo tipo de actividades motrices más complejas que provienen del desarrollo ontogenético del individuo. Se ha sugerido que los efectos del entrenamiento sensoriomotor sobre la imitación y las respuestas MN podrían surgir no a través de mecanismos asociativos, sino como resultado de estrategias cognitivas basadas en reglas.<sup>48,49</sup> Por ejemplo, en lugar de formar asociaciones excitatorias entre representaciones sensoriales y motoras de diferentes acciones y/o asociaciones inhibitorias entre representaciones sensoriales y motoras de las mismas acciones, los participantes en el grupo de entrenamiento del contraespejo podrían aprender la regla “haz lo que de otro modo” durante el entrenamiento y luego implemente esta regla después de la prueba para que los tiempos de respuesta se aceleren con pruebas incompatibles y/o se ralenticen con pruebas compatibles.<sup>43</sup> Sin embargo, los experimentos que respaldan el aprendizaje basado en reglas no han demostrado que la instrucción contra el espejo sea suficiente para reducir o eliminar un efecto de compatibilidad imitativa.

Bardi y colegas<sup>49</sup> encontraron un menor efecto de compatibilidad imitativa tras un tratamiento en el que se exponía a los participantes a una

sucesión de estímulos de movimiento y se les animaba, mediante instrucciones preliminares, a imaginarse realizando la acción contraria en respuesta a cada estímulo, es decir, siguiendo un tratamiento que se espera apoye el aprendizaje asociativo. Además de lo anterior, en estos estudios hubo un intervalo de 24 horas entre el entrenamiento contraespejo y el postest, pero en los estudios que pretenden favorecer un conteo basado en reglas, el postest continuó con el tratamiento del espejo.<sup>49</sup> Por lo tanto, mientras que el tratamiento de contraespejo redujo el efecto de la compatibilidad imitativa a través de una ruta basada en reglas en lugar de asociativa, estos estudios no muestran que una regla, en lugar del aprendizaje asociativo, sea responsable cuando hay un retraso sustancial antes de la prueba.

Por otro lado, es probable que las mismas representaciones, mediadas por el lóbulo parietal inferior izquierdo y el surco intraparietal, sean evocadas en la producción y reconocimiento de acciones actuadas con relación al objeto. Las representaciones de gestos hábiles están activas incluso sin la presencia física de objetos y, a diferencia de las MN, parecen codificar posturas manuales y corporales específicas para el uso funcional de objetos particulares. Sin embargo, a pesar de sus diferencias, la evidencia de que las mismas representaciones subyacen a la percepción y la acción para versiones abstractas (pantomimas) de acciones funcionales complejas, así como para agarrar interacciones con objetos físicos, sugiere que la propiedad del “espejo” puede ser una de las prioridades del cerebro como principios organizativos básicos.<sup>37</sup>

Además, Bhat y su grupo<sup>50</sup> encontraron similitudes en la activación de regiones corticales que forman parte del MNS, entre la ejecución de acciones y la sincronía interpersonal (IPS, por sus siglas en inglés). Las cortezas temporales superiores estuvieron activas durante la observación de la acción y las cortezas frontoparietal y temporal superior estuvieron más activas durante la ejecución de la acción y la IPS, lo que sugiere que el control neuronal de IPS se asemeja más a su ejecución que a los aspectos observacionales. En segundo lugar, los comportamientos de la IPS requerían un poco más de activación del lado derecho (frente a ejecución/observación), lo que sugiere que la IPS es un proceso de orden superior que implica activación bilateral en las regiones parietal inferior y frontoparietal durante la IPS en comparación con la ejecución de la acción y las condiciones de observación de la acción.<sup>50</sup>

Anatómicamente, las áreas motoras se pueden subdividir en subáreas indicadas con la letra F (frente), seguida de un número del 1 al 7 (F1-F7). Cada una de estas áreas está conectada a un área diferente del lóbulo parietal o la corteza prefrontal. Las subáreas F1-F5 están estrictamente conectadas a diferentes sectores del lóbulo parietal, mientras que las áreas F6 y F7 están conectadas a diferentes áreas dentro de la corteza prefrontal. Además, las subáreas relacionadas con el lóbulo parietal se proyectan hacia la médula espinal, a diferencia de la corteza prefrontal, que no se proyecta hacia la médula espinal. Por otro lado, en cada una de estas subáreas, hay una representación de un segmento del cuerpo (por ejemplo, la boca o la mano) que forma una especie de mapa motor de cada región del cuerpo, de manera que se puede representar un mismo efector biológico varias veces para diferentes propósitos motores. Se han descrito múltiples representaciones motoras de los miembros superiores y la boca en las áreas F4 y F5. Las neuronas de estas áreas se descargan durante la ejecución de acciones dirigidas a objetos realizadas con la mano y/o la boca. Algunas neuronas están activas durante el agarre, la manipulación de objetos o la introducción de alimentos en la boca. Por lo tanto, se considera que estas neuronas forman un repertorio de acciones que, como un vocabulario de palabras, pueden utilizarse en varios contextos.<sup>14,51</sup>

La evidencia experimental apoya la idea de que algunas áreas dentro del sistema motor no sólo juegan un papel fundamental en la planificación y ejecución de la acción, sino que también están dotadas de propiedades sensoriales; de hecho, algunas neuronas F5 están activas durante la presentación de estímulos visuales. Según sus propiedades visuales, las neuronas F5 se han subdividido en dos clases: el sistema de neuronas canónicas, que se descargan durante la presentación visual de un objeto, siempre que su forma y/o dimensiones se ajusten a la acción codificada por esa misma neurona; y el sistema de MN, que forma parte de la corriente dorsal y contribuye globalmente a la transformación sensoriomotora necesaria para actuar sobre los objetos e interactuar con otros individuos.<sup>51</sup> Por tanto, el MNS juega un papel específico en la comprensión de la acción y en el procesamiento e interpretación de las intenciones de las acciones de los demás, es decir, en la fase de aprendizaje perceptivo,<sup>9</sup> que es fundamental para transformaciones sensoriomotoras,<sup>51</sup> mientras que las neuronas canónicas pueden codificar las características de los objetos

que son relevantes para su manipulación y/o interacción con ellos.<sup>9,51</sup>

Por otro lado, se ha identificado una correspondencia auditivo-vocal en varias áreas del cerebro que juegan varios roles en la comunicación vocal y en varias especies de pájaros cantores. En los pájaros cantores, se ha supuesto que el aprendizaje del canto se basa, al menos en parte, en el ajuste de los comandos motores utilizando información de retroalimentación auditiva y en el establecimiento de propiedades del espejo auditivo-motor. Sin embargo, la forma en que la información de retroalimentación auditiva en el transcurso del desarrollo de la canción genera cambios en las propiedades de las neuronas que exhibirán propiedades de espejo auditivo-motor en adultos aún no se ha resuelto y se tendrán que abordar más estudios.<sup>42</sup> Pero presenta un modelo teórico de cómo las MN juegan un papel en el aprendizaje motor utilizando la retroalimentación auditiva, que es fundamental para el aprendizaje de técnicas complejas que algunos profesionales de la salud deben aprender en su formación.

Todo esto presenta un sustento teórico para evaluar el papel del MNS en instancias educativas que lo ameritan, como la utilidad de las salas de simulación en el aprendizaje de habilidades clínicas importantes para la formación de estudiantes de carreras de ciencias de la salud, y que han demostrado mayores efectos en el conocimiento y desempeño de los estudiantes de enfermería frente a otros métodos de enseñanza,<sup>52</sup> así como en la toma de conciencia de la situación que es de suma importancia para detectar, mitigar y responder al deterioro de la paciente.<sup>53</sup> Esto posiblemente abre una línea de investigación aún no suficientemente explotada respecto al papel del MNS en el aprendizaje basado en simulación clínica, ya que se necesitan estudios primarios con una metodología de alto rigor con experimentos para medir su relevancia en la simulación clínica, con técnicas de medición cerebral que evalúan las regiones corticales en las que se encuentran los MN.

## CONCLUSIÓN

Hemos visto que el MNS participa en el aprendizaje por imitación centrado en objetivos, con patrones de activación cortical similares en tareas motoras y sociales, diferenciándose particularmente en la bilateralidad de activación en aspectos sociales. Las aplicaciones pedagógicas son variadas, y nuestros resultados y discusión

plantean un marco teórico sobre el MNS que podría fundamentar los resultados del aprendizaje basado en simulación clínica. Sin embargo, son necesarios más estudios primarios con alto rigor metodológico y experimentos que midan el papel y la actividad del MNS durante el proceso de aprendizaje basado en simulación clínica, para poder establecer conclusiones más concretas.

## AGRADECIMIENTOS

A todas nuestras instituciones educativas que facilitaron el tiempo para dedicar en esta investigación.

## REFERENCIAS

1. Silverthorn D, Johnson B. Fisiología humana. 8a ed. México: Editorial Médica Panamericana; 2019.
2. Splittgerber RS. Neuroanatomía clínica. 8e ed. Barcelona: Wolters Kluwer; 2019.
3. Shumway-Cook A, Woollacott M. Motor control. 5th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer; 2017.
4. Ibacache Palma A, Araya Quintanilla F, Aguilera Eguía R, Muñoz Yañez MJ. Aprendizaje motor y neuroplasticidad en el dolor crónico: narrativa. *Rehabilitación*. 2005; 52 (4): 259-266.
5. Krakauer JW, Mazzoni P. Human sensorimotor learning: adaptation, skill, and beyond. *Curr Opin Neurobiol*. 2011; 21 (4): 636-644.
6. Riemann BL, Lephart SM. The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of functional joint stability. *J Athl Train*. 2002; 37 (1): 71-79.
7. Wolpert DM, Diedrichsen J, Flanagan JR. Principles of sensorimotor learning. *Nature Reviews Neuroscience*. 2011;12(12):739-51.
8. Pineda JA. Sensorimotor cortex as a critical component of an 'extended' mirror neuron system: Does it solve the development, correspondence, and control problems in mirroring? *Behav Brain Funct*. 2008; 4: 47.
9. Makino H, Hwang EJ, Hedrick NG, Komiyama T. Circuit Mechanisms of Sensorimotor Learning. *Neuron*. 2016;92(4):705-21.
10. Hurley S. The shared circuits model (SCM): how control, mirroring, and simulation can enable imitation, deliberation, and mindreading. *Behav Brain Sci*. 2008; 31 (1): 1-22; discussion 22-58.
11. Rizzolatti G, Craighero L. The mirror-neuron system. *Annu Rev Neurosci*. 2004; 27: 169-92.
12. Lyons DE, Santos LR, Keil FC. Reflections of other minds: how primate social cognition can inform the function of mirror neurons. *Curr Opin Neurobiol*. 2006; 16 (2): 230-234.
13. Press C, Heyes C, Kilner JM. Learning to understand others' actions. *Biol Lett*. 2011; 7 (3): 457-460.
14. Rizzolatti G, Luppino G, Matelli M. The organization of the cortical motor system: new concepts. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1998; 106 (4): 283-296.

15. Gallese V, Sinigaglia C. What is so special about embodied simulation? *Trends Cogn Sci*. 2011; 15 (11): 5120-5129.
16. Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, Fogassi L. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Res Cogn Brain Res*. 1996; 3 (2): 131-141.
17. Aziz-Zadeh L, Wilson SM, Rizzolatti G, Iacoboni M. Congruent embodied representations for visually presented actions and linguistic phrases describing actions. *Curr Biol*. 2006; 16 (18): 1818-1823.
18. Avenanti A, Buetti D, Galati G, Aglioti SM. Transcranial magnetic stimulation highlights the sensorimotor side of empathy for pain. *Nat Neurosci*. 2005; 8 (7): 955-960.
19. Eticott PC, Johnston PJ, Herring SE, Hoy KE, Fitzgerald PB. Mirror neuron activation is associated with facial emotion processing. *Neuropsychologia*. 2008; 46 (11): 2851-2854.
20. Iacoboni M, Molnar-Szakacs I, Gallese V, Buccino G, Mazziotta JC, Rizzolatti G. Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. *PLoS Biol*. 2005; 3 (3): e79.
21. Théoret H, Pascual-Leone A. Language acquisition: do as you hear. *Curr Biol*. 2002; 12 (21): R736-R737.
22. Arbib MA. From monkey-like action recognition to human language: an evolutionary framework for neurolinguistics. *Behav Brain Sci*. 2005; 28 (2): 105-124; discussion 125-167.
23. Corina DP, Knapp H. Sign language processing and the mirror neuron system. *Cortex*. 2006; 42 (4): 529-539.
24. Glenberg AM, Sato M, Cattaneo L, Riggio L, Palumbo D, Buccino G. Processing abstract language modulates motor system activity. *Q J Exp Psychol (Hove)*. 2008; 61 (6): 905-919.
25. Kühn S, Brass M. Testing the connection of the mirror system and speech: how articulation affects imitation in a simple response task. *Neuropsychologia*. 2008; 46 (5): 1513-1521.
26. Gridley MC, Hoff R. Do mirror neurons explain misattribution of emotions in music? *Percept Mot Skills*. 2006; 102 (2): 600-602.
27. Ponseti J, Bosinski HA, Wolff S, Peller M, Jansen O, Mehdorn HM, et al. A functional endophenotype for sexual orientation in humans. *Neuroimage*. 2006; 33 (3): 825-833.
28. Gallese V, Di Dio C. Neuroesthetics: The Body in Esthetic Experience. *Encyclopedia of Human Behavior*. 2012;687-93.
29. Cohen DA. Neurophysiological pathways to obesity: below awareness and beyond individual control. *Diabetes*. 2008; 57 (7): 1768-1773.
30. Buccino G, Binkofski F, Riggio L. The mirror neuron system and action recognition. *Brain Lang*. 2004; 89 (2): 370-376.
31. Iacoboni M, Mazziotta JC. Mirror neuron system: basic findings and clinical applications. *Ann Neurol*. 2007; 62 (3): 213-218.
32. Newman-Norlund RD, van Schie HT, van Zuijlen AM, Bekkering H. The mirror neuron system is more active during complementary compared with imitative action. *Nat Neurosci*. 2007; 10 (7): 817-818.
33. Del Giudice M, Manera V, Keyser C. Programmed to learn? The ontogeny of mirror neurons. *Dev Sci*. 2009; 12 (2): 350-363.
34. Oh H, Gentili RJ, Reggia JA, Contreras-Vidal JL. Learning of spatial relationships between observed and imitated actions allows invariant inverse computation in the frontal mirror neuron system. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2011; 2011: 4183-4186.
35. Dawood F, Loo CK. View-invariant visuomotor processing in computational mirror neuron system for humanoid. *PLoS One*. 2016; 11 (3): e0152003.
36. Oh H, Braun AR, Reggia JA, Gentili RJ. Fronto-parietal mirror neuron system modeling: Visuospatial transformations support imitation learning independently of imitator perspective. *Hum Mov Sci*. 2019; 65: S0167-9457(17)30942-9.
37. Buxbaum LJ, Kyle KM, Menon R. On beyond mirror neurons: internal representations subserving imitation and recognition of skilled object-related actions in humans. *Brain Res Cogn Brain Res*. 2005; 25 (1): 226-239.
38. Iacoboni M. Imitation, empathy, and mirror neurons. *Annu Rev Psychol*. 2009; 60: 653-670.
39. Sale P, Franceschini M. Action observation and mirror neuron network: a tool for motor stroke rehabilitation. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2012; 48 (2): 313-318.
40. Marshall PJ, Meltzoff AN. Neural mirroring mechanisms and imitation in human infants. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2014; 369 (1644): 20130620.
41. Simpson EA, Fox NA, Tramacere A, Ferrari PF. Neonatal imitation and an epigenetic account of mirror neuron development. *Behav Brain Sci*. 2014; 37 (2): 220.
42. Giret N, Edeline JM, Del Negro C. Neural mechanisms of vocal imitation: The role of sleep replay in shaping mirror neurons. *Neurosci Biobehav Rev*. 2017; 77: 58-73.
43. Catmur C, Heyes C. Mirroring 'meaningful' actions: sensorimotor learning modulates imitation of goal-directed actions. *Q J Exp Psychol (Hove)*. 2019; 72 (2): 322-334.
44. Wu H, Tang H, Ge Y, Yang S, Mai X, Luo YJ et al. Object words modulate the activity of the mirror neuron system during action imitation. *Brain Behav*. 2017; 7 (11): e00840.
45. Gallese V, Fadiga L, Fogassi L, Rizzolatti G. Action recognition in the premotor cortex. *Brain [Internet]*. 1996;119(2):593-609. Available from: <https://academic.oup.com/brain/article/119/2/593/382476>
46. Rizzolatti G, Sinigaglia C. The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations. *Nature Reviews Neuroscience*. 2010;11(4):264-74.
47. Rizzolatti G, Fogassi L. The mirror mechanism: recent findings and perspectives. *Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B, Biological sciences [Internet]*. 2014;369(1644):20130420. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24778385>
48. Ménoret M, Curie A, Vincent Des Portes, Nazir TA, Yves Paulignan. Motor resonance facilitates movement execution: an ERP and kinematic study. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2013;7.
49. Bardi L, Bundt C, Notebaert W, Brass M. Eliminating mirror responses by instructions. *Cortex*. 2015;70:128-36.
50. Bhat AN, Hoffman MD, Trost SL, Culotta ML, Eilbott J, Tzuzuki D, et al. Cortical activation during action

- observation, action execution, and interpersonal synchrony in adults: a functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) study. *Front Hum Neurosci*. 2017; 11: 431.
51. Binkofski F, Buccino G. The role of the parietal cortex in sensorimotor transformations and action coding. 2018;467-79.
  52. La Cerra C, Dante A, Caponnetto V, Franconi I, Gaxhja E, Petrucci C, et al. Effects of high-fidelity simulation based on life-threatening clinical condition scenarios on learning outcomes of undergraduate and postgraduate nursing students: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open*. 2019; 9 (2): e025306.
  53. Walshe NC, Crowley CM, O'Brien S, Browne JP, Hegarty JM. Educational interventions to enhance situation awareness: a systematic review and meta-analysis. *Simul Healthc*. 2019; 14 (6): 398-408.
  54. Vogt S, Thomaschke R. From visuo-motor interactions to imitation learning: behavioural and brain imaging studies. *J Sports Sci*. 2007; 25 (5): 497-517.
  55. Vogt S, Buccino G, Wohlschlagel AM, Canessa N, Shah NJ, Zilles K, Eickhoff SB, et al. Prefrontal involvement in imitation learning of hand actions: effects of practice and expertise. *Neuroimage*. 2007; 37 (4): 1371-1383.
  56. Canevari C, Badino L, D'Ausilio A, Fadiga L, Metta G. Modeling speech imitation and ecological learning of auditory-motor maps. *Front Psychol*. 2013; 4: 364.
  57. Triesch J. Imitation learning based on an intrinsic motivation mechanism for efficient coding. *Front Psychol*. 2013; 4: 800.
  58. Lacoboni M. Neural mechanisms of imitation. *Curr Opin Neurobiol*. 2005; 15 (6): 632-637.
  58. Carmo JC, Rumiati RI, Vallesi A. Understanding and imitating unfamiliar actions: distinct underlying mechanisms. *PLoS One*. 2012; 7 (10): e46939.
  60. Lopes M, Santos-Victor J. Visual learning by imitation with motor representations. *IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern*. 2005; 35 (3): 438-449.

**Conflicto de intereses:** los autores de esta investigación no declaran ningún tipo de conflicto de intereses.

**Correspondencia:**

**Paulo Orquera**

**E-mail:** pauloorquera@hotmail.com