

Neurociencias cognitivas y control motor: un estudio epistemológico

Santiago Marengo
santima5@hotmail.com

Licenciatura en Filosofía
Director de TFL: A. Nicolás Venturelli
Recibido: 31/05/20 - Aceptado: 11/08/20

Resumen

El objetivo de este artículo es caracterizar desde un punto de vista epistemológico los abordajes del control motor desarrollados en el marco de la teoría de la simulación motora (en adelante: TSM) propuesta en Jeannerod (2006, 2001) y la teoría bayesiana del cerebro¹ (en adelante: TBC) propuesta en Friston *et al.* (2011), Friston *et al.* (2010) y Friston (2009, 2005). La caracterización se basa en las herramientas conceptuales y metodológicas implementadas en ambas teorías, focalizando en aquellas que resultan novedosas para el área del control motor. El trabajo pretende hacer un aporte desde la epistemología de las ciencias cognitivas hacia el área de estudio del control motor.

Palabras clave: control motor; teoría de la simulación motora; procesamiento predictivo.

1. Introducción

La TSM y la TBC son dos teorías neurocientíficas que abordan la interacción entre los dominios de la cognición, la percepción y la acción con vistas a comprender los mecanismos cognitivos y cerebrales implicados en esa relación (Gentsch *et al.* 2016). Característicamente, ambos casos encarnan propuestas sustentadas en la hipótesis de que esos dominios se encuentran estrechamente entrelazados. A partir de ello hacen aportes significativos y novedosos a diferentes áreas de las ciencias cognitivas especializadas en estudiar diferenciadamente esos dominios. Tal es particularmente el caso del área del control motor, que se dedica al estudio de la acción o más precisamente de la capacidad del sistema nervioso para producir movimientos coordinados (Schmidt *et al.* 2018; Edwards, 2010). En este contexto, el objetivo del presente trabajo es caracterizar desde un punto de vista epistemológico los abordajes del control motor desarrollados en la TSM y la TBC focalizando en las herramientas conceptuales y metodológicas que resultan novedosas para el área del control motor. Para alcanzar este objetivo propongo comparar conjuntamente las teorías neurocientíficas consideradas con aquellas que la literatura del área control motor (cuyos máximos referentes en la actualidad son Schmidt *et al.* 2018; Schmidt *et al.* 2014; Danion y Latash, 2012; Latash, 2012; Edwards, 2010; Rosenbaum, 2009)

asume como dominantes; me refiero a la teoría del procesamiento de la información aplicada al control motor (Schmidt *et al.* 2018; Schmidt *et al.* 2014; Schmidt, 1975; Adams, 1971) –en adelante: TPI– y la teoría de los sistemas dinámicos aplicada al control motor (Latash, 2012; Latash *et al.* 2007; Haken *et al.* 1985) –en adelante: TSD. En línea con ese objetivo y el camino propuesto para alcanzarlo voy a defender dos hipótesis. La primera de ellas, a desarrollar en la segunda sección, es que la TSM y la TBC se diferencian de la TPI en que aquellas abordan el control motor desde un punto de vista corporizado mientras que esta última lo hace desde una perspectiva computacionalista. La segunda hipótesis, a desarrollar en la tercera sección, es que si bien la TSM, la TBC y la TSD coinciden en abordar el control motor desde un punto de vista corporizado, las primeras lo hacen desde un enfoque corporizado diferente al de esta última. Concretamente, la TSM y la TBC adhieren a un enfoque corporizado representacionalista, mientras que la TSD hace lo propio con un enfoque corporizado antirrepresentacionalista.

2. Computacionalistas vs corporizadas

2.a. Computacionalistas en el área del control motor

A mediados del siglo pasado la teoría computacional de la mente (o computacionalismo) se consolidó como un punto de vista dominante dentro de la psicología planteando que los fenómenos mentales son manifestaciones de estados internos que resultan de un procesamiento de información. Esta idea se asienta en la hipótesis de que el cerebro es algo afín a, o comparable con, una máquina (universal) de Turing; es decir, una máquina que manipula símbolos y arroja resultados luego de transformar la información en base a reglas sintácticas muy simples (Bermúdez, 2014; Horst, 2011). Bajo esos términos, la teoría computacional de la mente ha dado lugar a una abstracción teórica de la cognición respecto de los detalles físicos específicos donde esta se implementa. Tal abstracción ha permitido a los científicos cognitivos concentrar sus esfuerzos en el procesamiento de la información sin atender a los aspectos físicos vinculados al mismo (Horst, 2011). Hurley (2001) considera que esta característica propia del computacionalismo habilita una especie de “modelo sándwich” para abordar las funciones cognitivas. Esto es, un modelo donde la cognición, la única instancia del procesamiento de la información considerada (en esta perspectiva) relevante para describir el comportamiento inteligente, se encuentra atrapada entre medio de dos funciones de menor relevancia: la percepción y la acción. Así entendido el funcionamiento de la mente, los sistemas dedicados a la percepción y a la acción adquieren roles secundarios. Esto es, al sistema perceptual solo se le atribuye la función de traducir las entradas sensoriales en símbolos que puedan ser computados en los sistemas propiamente cognitivos dedicados a la atención, la memoria, el razonamiento, la toma de decisiones, la imaginación, etc. Al sistema motor solo se le atribuye la función de ejecutar las órdenes resultantes de esos cómputos (Hurley, 2001).

Los desarrollos filosóficos más representativos del computacionalismo seguramente sean Fodor (1983) y Fodor y Pylyshyn (1988). Estos trabajos han propuesto algunos lineamientos teóricos y metodológicos muy influyentes (aun por estos días) en las investigaciones de los científicos cognitivos. Tales lineamientos (como se verá en los siguientes párrafos) se reflejan en el área del control motor a través de la TPI. Fodor (1983) presenta el modularismo. Una hipótesis acerca de la cognición en la cual se defiende que los sistemas periféricos (esto es, aquellos dedicados a la percepción y la acción) procesan la información de una manera diferente que los sistemas dedicados a la cognición. El meollo de los argumentos de Fodor en ese texto es que los sistemas periféricos son modulares, es decir, operan solo sobre cierta información muy específica y con independencia de la actividad de otros sistemas. Por tomar un ejemplo, un sistema periférico puede estar dedicado solamente a reconocer el color rojo. En este caso, el sistema se activaría solo cuando recibe información acerca de ese color. Luego, procesa esa información de manera automática e independientemente de la actividad de otros sistemas tales como los dedicados a la forma de los objetos, por ejemplo. En cambio, los sistemas dedicados a la cognición no son específicos de dominio. Funcionan de marea horizontal, es decir, procesan (todos) un mismo tipo de información –símbolos abstractos– y de manera similar –en base a reglas sintácticas bien definidas (Bryson, 2005). En línea con la hipótesis modularista, Fodor y Pylyshyn (1988) sostienen que los estados representacionales, es decir, aquellos estados mentales que están referidos al mundo, son las unidades fundamentales del pensamiento y la cognición (cfr. Chemero, 2009, pp. 20-22). En ese contexto, defienden que los estados representacionales tienen una estructura sintáctica y semántica combinatoria. Más concretamente, que el contenido de las representaciones es el producto de las operaciones computacionales llevadas a cabo por los sistemas centrales, los cuales combinan y recombinan un mismo conjunto de símbolos abstractos para dar lugar a diferentes representaciones. Bajo estos criterios el conocimiento puede expresarse de manera proposicional, es decir, como una oración que es o bien verdadera, o bien falsa, y cuyos símbolos constituyentes pueden combinarse de diferentes maneras para dar lugar a diferentes proposiciones (Foglia y Wilson, 2013). Por ejemplo, la proposición “el perro de María es marrón” puede ser verdadera o falsa, al tiempo que sus símbolos (“María”, “perro” y “marrón”) pueden recombinarse para dar lugar a otra proposición que sea o bien verdadera o bien falsa tal como “María es un perro marrón”.

En el área del control motor el computacionalismo se introdujo a través de la TPI. Esta teoría propone que los movimientos coordinados son el resultado de una serie de procesos centrales, los cuales producen programas motores que ordenan al sistema motor la ejecución de ciertos movimientos. Los programas motores son constructos teóricos propuestos para representar las estructuras cognitivas que organizan y controlan centralmente los muchos grados de libertad involucrados en la ejecución de una acción. Son fundamentales en la TPI dado que son consideradas como las unidades informacionales básicas mediante las cuales las estructuras anatómicas de los centros superiores del sistema nervioso (áreas motoras corticales del cerebro)

controlan los centros eferentes: regiones del cerebelo, tallo cerebral, médula espinal, unidades motoras y músculos (Schmidt *et al.* 2018, Edwards, 2010). La literatura especializada suele reconocer dos modelos sobresalientes basados en este constructo: el modelo de bucle cerrado de Adams (1971) y el modelo de bucle abierto de Schmidt (1975). Con una finalidad ilustrativa, a continuación voy a presentar el segundo de esos modelos, dado que es el único que sigue defendiéndose enfáticamente en la actualidad (por ejemplo en Schmidt *et al.* 2018 y Schmidt *et al.* 2014).

El modelo de bucle abierto describe un mecanismo de control en el cual la producción de los movimientos depende casi exclusivamente de los sistemas centrales. El flujo de información en el modelo es el siguiente. Los sistemas centrales seleccionan una acción. Luego, activan el programa motor específico que pueda producir esa acción. Tal selección se transforma en una orden al sistema motor para que este movilice los segmentos corporales correspondientes con cierta velocidad y con cierta fuerza. Una vez ejecutados los movimientos, y habiendo obtenido los resultados de la acción (esto es, las consecuencias sensoriales que registran los sistemas perceptuales), los sistemas centrales evalúan la eficacia de los programas motores. A partir de ello, corrigen la performance del mecanismo o bien modificando los programas motores implementados, o bien creando otros nuevos. En la figura 1 puede apreciarse cómo fluye la información en el modelo de bucle abierto y la importancia dada tanto a los programas motores como al control centralizado del mecanismo.

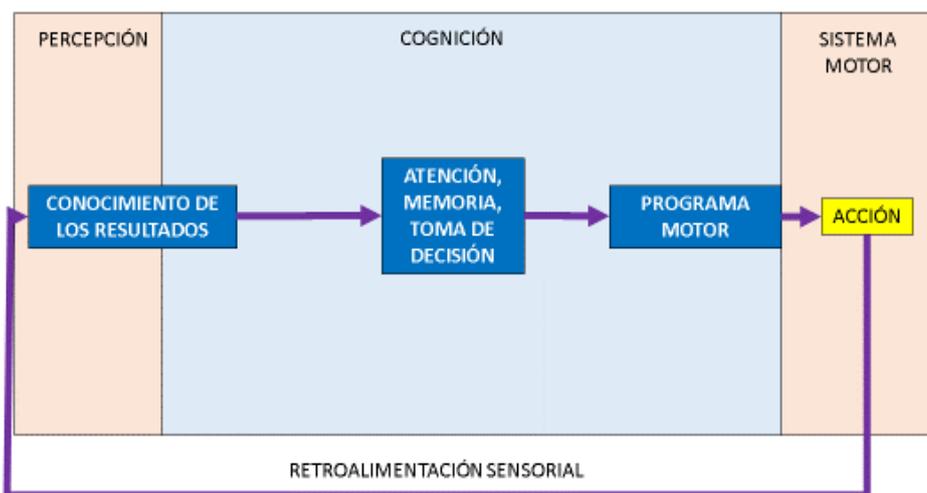


Figura 1: Flujo de información en el modelo de bucle abierto.

2.b. Líneas corporizadas y control motor

En la actualidad la TPI y el modelo de bucle abierto gozan de un amplio reconocimiento dentro del área de estudio del control motor. Son usualmente considerados como un tipo de abordaje teórico dominante e influyente en el área (por ejemplo en Schmidt *et al.* 2018 y en Edwards,

2010). Sin embargo, ya desde fines de la década de 1980 coexisten con la TSD, la cual es una propuesta teórica alternativa y crítica que aborda el control motor desde una perspectiva corporizada de la cognición. En la actualidad, se suman a esta perspectiva corporizada, aunque no con críticas directas a la TPI, la TSM y la TBC.

El rasgo más característico de las líneas de investigación corporizadas de la cognición es, prácticamente sin discusión, su énfasis en criticar aspectos centrales del computacionalismo. Entre ellos, la idea (mencionada arriba) de que la cognición puede abstraerse de los estados corporales y estudiarse como el mero resultado de una serie de operaciones abstractas (Foglia y Wilson, 2013; Hurley, 2001). Para ahondar en esta crítica podrían diferenciarse dos aspectos particulares del computacionalismo a los cuales se aplica. Por un lado, hacia aquella propuesta de que el conocimiento se representa de manera proposicional y de que el significado de lo representado surge de las relaciones entre los símbolos abstractos constituyentes, en cuyo caso los estados perceptuales y motores resultan irrelevantes. Por otro lado, hacia la propuesta de que la interacción entre la cognición y los sistemas periféricos se reduce a una mera subordinación de estos últimos a aquella por la cual la percepción solo es considerada como una fuente de información para los sistemas centrales y el sistema motor un ejecutor las instrucciones centrales (Foglia y Wilson, 2013; Hurley, 2001).

Otro de los aspectos característicos de las líneas de investigación corporizadas es su énfasis en considerar y atender a una serie de hallazgos científicos que, en contra del desprestigio del cuerpo propuesto por el computacionalismo para abordar la cognición, sugieren que la actividad perceptual y motora influye decididamente en la actividad cognitiva. Por ejemplo, el hecho de que los gestos que realizamos cuando hablamos no solo afectan la comunicación interpersonal y el procesamiento del lenguaje, sino que también se retroalimentan y cambian el pensamiento del propio gestor (Foglia y Wilson, 2013, p. 321). Esto es, los gestos que se realizan mientras se describe oralmente una acción alteran la forma en la que el hablante razona. Otro hallazgo de grandísimo interés en los abordajes corporizados acerca del rol del cuerpo en la cognición fueron las neuronas espejo (en Di Pellegrino *et al.* 1992). Este conjunto neuronas puede definirse como un sistema que se activa tanto cuando observamos una acción realizada por otros como cuando nosotros mismos la ejecutamos. Desde un punto de vista corporizado, algunos trabajos (entre ellos, Rizzolatti *et al.* 1996 y el propio Di Pellegrino *et al.* 1992) sugieren que el patrón de activación de estas neuronas indica que ese sistema codifica tanto la información perceptual como la información motora en base a un mismo mecanismo. Con lo cual, queda socavada aquella idea propia del computacionalismo de que entre el sistema perceptual y el sistema motor opera algún tipo sistema de procesamiento de la información centralizado.

Dentro de aquel contexto crítico hacia el computacionalismo y con el ojo puesto en estos hallazgos científicos (entre otros), las líneas de investigación corporizadas se proponen objetivos novedosos, soslayados por los abordajes clásicos vinculados al computacionalismo: en particular, investigar el rol que tiene el cuerpo en la cognición. En relación a este punto, las líneas de

investigación corporizadas pueden caracterizarse de manera muy general como propuestas guiadas por la idea de que las capacidades que puedan plausiblemente ser consideradas cognitivas integran necesariamente el entrelazamiento complejo del cerebro y el cuerpo del agente, así como también de algunos rasgos relevantes del medio ambiente donde este interactúa (Venturelli, 2013; Foglia y Wilson, 2013; Wilson, 2002). Sin embargo, cabe aclarar que esta idea tan general acerca de la naturaleza de la cognición no da lugar a un marco que pueda considerarse unificado; es decir, que incorpore o proponga lineamientos conceptuales y metodológicos precisos al estilo de lo que sucede con las propuestas de Fodor y Pylyshyn para el computacionalismo. Más bien, esta idea es un punto de partida para una variedad de propuestas de investigación en ciencias cognitivas que, a pesar de que todas están interesadas en investigar el rol del cuerpo en la cognición, lo hacen a partir de hipótesis diferentes y que en muchos mantienen grandes disparidades entre sí. Por tomar un ejemplo, Wilson (2002) reconoce al menos seis hipótesis asociadas a las ciencias cognitivas corporizadas, las cuales paso a enumerar y describir sucintamente a fin de ilustrar la variedad de propuestas de investigación suscritas a las ciencias cognitivas corporizadas:

1. La cognición es situada: la actividad cognitiva tiene lugar en el contexto de un entorno del mundo real, e implica intrínsecamente la percepción y la acción.
2. La cognición es el resultado de constricciones temporales: la cognición debe entenderse en términos de cómo funciona bajo las presiones de la interacción en tiempo real con el entorno.
3. La cognición se basa en la descarga de trabajo en el medio ambiente: nuestras capacidades de procesamiento de información (por ejemplo, de atención o memoria de trabajo) se asientan en la información que podemos incrustar en el entorno para reducir la carga de trabajo cognitiva. Para esta perspectiva, hacemos que el medio ambiente retenga o incluso manipule la información para nosotros en objetos como ordenadores, libros o señales de tránsito.
4. La cognición está entrelazada con el medio ambiente: el flujo de información entre la mente y el mundo es tan denso y continuo que, para los científicos que estudian la naturaleza de la actividad cognitiva, la mente sola no es una unidad de análisis significativa.
5. La cognición está orientada a la acción: la función de la mente es guiar la acción, y que la percepción o los mecanismos cognitivos, deben comprenderse en términos de su contribución final al comportamiento motor apropiado para la situación en la que el agente se está desarrollando.
6. La cognición fuera de línea, esto es, la actividad que se desarrolla en ausencia de entradas físicas relevantes para la tarea, se basa en el cuerpo: incluso cuando se desacopla del entorno, la actividad de la mente se basa en mecanismos que evolucionaron para la

interacción con el entorno. Es decir, en los mecanismos de procesamiento sensorial y control motor.

Cada una de estas hipótesis se sostiene en diferentes posicionamientos teóricos, o acerca de qué es la cognición corporizada, y metodológicos, o acerca de cómo debe ser abordada. En la tercera sección de este artículo ahondaré en una de las tensiones que surgen entre dos de estos posicionamientos en las ciencias cognitivas corporizadas: la disputa entre antirrepresentacionistas y representacionistas. En lo que sigue de esta sección no entraré en detalles acerca de estas tensiones y me dedicaré a explicitar algunas de las características de la TSD, la TSM y la TBC que permiten suscribirlas conjuntamente a la perspectiva corporizadas, lo cual las diferencia (conjuntamente) de la TPI.

La TSD se introdujo en el área del control motor a fines de los ochenta como una alternativa crítica a la TPI. El foco de la discrepancia estaba puesto principalmente sobre la noción de programa motor propuesta en la TPI. En contra de esa noción, la TSD defiende que el control de los movimientos no está regulado por ningún tipo de estructura cognitiva, entidad mental o estado interno que ejerza algún tipo de control centralizado. En cambio sostiene que esta capacidad es una propiedad que emerge de una interacción dinámica entre el sistema motor y el ambiente (Edwards, 2010; Kelso, 1988). Un sistema dinámico es un conjunto de variables cuantitativas que cambian continua, concurrente e interdependientemente a lo largo del tiempo de acuerdo con leyes que pueden describirse mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas (Chemero, 2009). Una de las características más importantes de estos sistemas es que son no lineales. Es decir, poseen un comportamiento no expresable como la suma de los comportamientos de sus partes componentes. En el marco de la TSD, la aplicación de estos conceptos al caso particular del control motor generalmente es acompañada por tres principios. El primero de ellos dice que el sistema motor está constreñido por el ambiente y que solo puede evolucionar dentro de ciertos límites físicos (de espacio y de tiempo). El segundo principio dice que de la interacción entre el sistema motor y el ambiente emergen patrones de movimientos autoorganizados, los cuales le permiten al organismo adaptarse al entorno. El tercero dice que ante diferentes constricciones ambientales, el sistema tiende a producir ciertos patrones de movimientos específicos y predeterminados (Edwards, 2010). En suma, la TSD arroja un marco descriptivo del control motor en el cual se aborda la capacidad desestimando la injerencia de aspectos cognitivos y focalizando en el rol del cuerpo y el ambiente para su desarrollo.

Por su parte, la TSM se focaliza en abordar lo que en el marco de la teoría se ha dado en llamar cognición motora; esto es, la forma en que pensamos y concebimos las acciones (cfr. Sommerville y Decety, 2006, p. 179). Para ello se apoya en un constructo teórico particular: la simulación motora. Esta puede definirse como un mecanismo subyacente a la actividad cognitiva referida a las acciones que, si bien se implementa en las instancias previas a la puesta en práctica de los movimientos, compromete la actividad neuronal del sistema motor vinculada a ellos, incluidos los mecanismos de control motor (Gentsch, 2016). En la tercera sección de este artículo

profundizaré acerca de cómo se describen estos mecanismos en el marco de la teoría. El concepto de simulación motora se sustenta en una serie de hallazgos que capturaron la atención de muchos neurocientíficos a mediados de la década de 1990. Especialmente de quienes propusieron por aquel entonces la TSM. Tales hallazgos indican que al imaginar y al ejecutar una acción se activan las mismas áreas cerebrales². En concreto, Decety (1996) y Jeannerod (1994) detectaron que algunas áreas del sistema motor (el córtex motor primario, la vía corticoespinal, el córtex premotor, algunas áreas del cerebelo y el ganglio basal) y algunas áreas corticales de asociación (córtex prefrontal y córtex parietal) se activan de manera similar al ejecutar una acción y al imaginarla. Los proponentes de la TSM interpretaron estos hallazgos como una especie de ventana para estudiar los mecanismos subyacentes a la cognición motora (cfr. Jeannerod, 2006, pp. 23-44). Ello a partir de considerar que la imaginación motora, al ser una actividad que se desarrolla en ausencia de entradas y salidas físicas relevantes (o en modo fuera de línea), permite estudiar todos los aspectos cognitivos de la acción sin, o antes de, que estas se ejecuten. En suma, la TSM aborda la cognición motora focalizando en la imaginación motora y bajo la idea de que los mecanismos subyacentes a esta capacidad se basan en la actividad de los recursos neuronales propios del sistema motor dedicados a las funciones motoras.

Por último, la TBC ofrece un marco unificado que no está focalizado en una función o capacidad cognitiva en particular como en el caso de la TSD y la TSM, sino que alcanza a una variedad de fenómenos psicológicos y cerebrales. Entre los fenómenos alcanzados se incluye el control motor. Dicho marco está sujeto a la idea de que el funcionamiento general del cerebro puede explicarse en base a un conjunto de mecanismos, los cuales pueden ser descritos en términos de un procesamiento predictivo de la información (Colombo y Hartman, 2015). Concretamente, la TBC aborda el cerebro como si este órgano fuera una máquina cuyo objetivo principal es reducir sus niveles de incertidumbre acerca de los estados sensoriales futuros. En línea con ello, propone que para cumplir con ese objetivo implementa dos mecanismos profundamente entrelazados: uno denominado inferencia perceptual y otro denominado inferencia activa. En el primer caso, esta máquina produce representaciones estadísticas acerca de las causas en el mundo de los datos registrados en el pasado. De tales representaciones, deriva predicciones acerca de las sensaciones que se registrarán en el futuro. Si las predicciones son acertadas, los niveles de incertidumbre bajan. De lo contrario, los niveles de incertidumbre se elevan. En el segundo caso, el cerebro produce acciones para intervenir en el mundo y adecuarlo a sus propias representaciones y a las predicciones que se derivan de ellas. Si esas acciones efectivamente logran adecuar el mundo a las representaciones y las predicciones derivadas de ellas, los niveles de incertidumbre bajan (Friston, 2010).

Una de las características más importantes del marco unificado que ofrece la TBC es la matemática bayesiana que implementa para describir a nivel algorítmico³ el funcionamiento del cerebro. Formalmente, el teorema de Bayes expresa la probabilidad condicional de una proposición A dado B, o $P(A|B)$, en base a la distribución de la probabilidad condicional de la

proposición B dado A, o $P(B|A)$, y la distribución de la probabilidad marginal de A. La forma de la función es la siguiente:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}$$

Tal forma permite calcular el modo en que los valores de probabilidad de una proposición condicional cambian ante una variación en el valor marginal de la proposición condicionalizada (Papineau 2012; Chater *et al.* 2006). En la interpretación de la TBC, la función describe la dinámica de cambio en los grados de probabilidad que las representaciones estadísticas asignan a las entradas sensoriales a medida que se registran otras nuevas. Bajo estas condiciones, el control motor es descripto como el resultado de un procesamiento de la información que, a diferencia de lo que ocurre en la TPI, implica una interacción dinámica entre el sistema perceptual, los sistemas dedicados a las funciones de alto nivel tales como representar, el sistema motor y el ambiente.

3. Corporizadas antirrepresentacionistas vs. Corporizadas representacionistas

Tal como adelanté en la sección anterior, en la presente me abocaré a una de las controversias más importantes entre las líneas de investigación corporizadas: sus diferentes posicionamientos en torno al representacionismo. Al respecto, Chemero (2009) reconoce dos enfoques al que adhieren las líneas de investigación corporizadas: el enfoque antirrepresentacionista y el enfoque representacionista. El primero se caracteriza por rechazar el computacionalismo y el segundo por rechazar solo la versión clásica del mismo. El propio autor caracteriza la versión clásica del computacionalismo como un tipo particular de representacionismo, el cual se afirma puntualmente en las ideas de Fodor y Pylyshyn presentadas en la sección anterior. Tal como lo he desarrollado allí, estos autores proponen que las representaciones mentales son en rigor un conjunto de procesos (cómputos) organizados centralmente, los cuales manipulan símbolos abstractos según algunas reglas sintácticas bien definidas –otras versiones de representacionismo, en cambio, proponen que las representaciones no se estructuran sintácticamente (cfr. Chemero 2009, p. 20). Además de rechazar el computacionalismo, el autor entiende que las líneas de investigación corporizadas antirrepresentacionistas consideran que para explicar la cognición es necesario utilizar las herramientas matemáticas de la teoría de los sistemas dinámicos. Es decir, abordar los fenómenos psicológicos como si estos fueran una propiedad que emerge de la interacción de algunas variables, en este caso un agente y el ambiente en el que se desenvuelve, la cual puede representarse con un conjunto de ecuaciones matemáticas. Por su parte, las líneas corporizadas representacionistas, aunque aceptan el computacionalismo para explicar la cognición, lo hacen con algunos reparos respecto de las posturas clásicas. Particularmente en torno a la idea clásica de que la cognición se basa en un

sistema centralizado que computa símbolos abstractos, no referidos a estados corporales concretos. En línea con ello, proponen que la cognición se basa en una estructura del procesamiento de la información descentralizada que manipula símbolos referidos a estados corporales concretos, tal como los estados neuronales de los sistemas perceptual y motor, o el propio movimiento de los segmentos corporales.

El marco de análisis que propone Chemero permite hacer explícitas algunas de las diferencias existentes desde un punto de vista epistemológico entre el abordaje del control motor desarrollado en la TSD y aquellos desarrollados en la TSM y la TBC. Concretamente, permite señalar que la TSD adhieren al enfoque antirrepresentacionista, mientras que la TSM y la TBC adhieren al enfoque representacionista. A continuación voy a caracterizar los abordajes del control motor propuestos por todas estas teorías, concentrándome en aquellos rasgos que permiten visibilizar cómo suscriben a esos respectivos enfoques.

La adherencia de la TSD al enfoque antirrepresentacionista resulta bastante evidente dado lo expuesto en la sección 1. Allí indiqué que esta surge como una alternativa crítica a la TPI, en particular a la noción de programa motor, y que aborda el control motor con las herramientas de la teoría de los sistemas dinámicos. Sin embargo hay todavía que ilustrar cómo se instancia la TSD en un modelo específico del control motor. Tal ilustración permite reconocer en profundidad cuáles elementos descriptivos en la TSD se ajustan a los requerimientos del enfoque antirrepresentacionista. El modelo Haken-Kelso-Bunz (Haken *et al.* 1985), o modelo HKB, acerca de la coordinación bimanual resulta muy adecuado a estos fines dado que, además de ser paradigmático dentro del área del control motor, es una referencia casi obligada para comprender la TSD (véase por ejemplo en Edwards, 2010 o en Latash, 2012). La coordinación bimanual es uno de los fenómenos que históricamente más ha llamado la atención en el área. Puede definirse como un cambio repentino y sin control consciente en el patrón de los movimientos que desarrollan los dedos índices cuando se mueven a velocidad creciente hacia los laterales. Característicamente, el cambio repentino se da solo cuando los agentes aceleran la frecuencia del movimiento asimétrico (o patrón fuera de fase) –esto es, que los dos dedos índices se mueven hacia un mismo lateral. Alcanzada una frecuencia determinada, los movimientos cambian bruscamente a un modo simétrico (o patrón en fase) –esto es, que los dos dedos se mueven hacia diferentes laterales. En la figura 2 se ilustran gráficamente los movimientos en fase y fuera de fase.

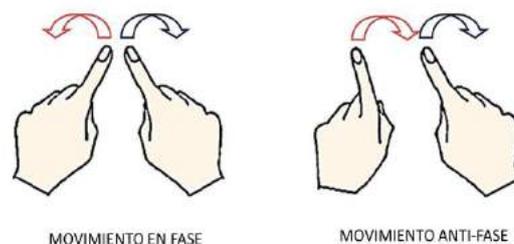


Figura 2: Movimiento en fase y fuera de fase (Sleimen-Malkoun *et al.*)

En 1981, J. A. Scott Kelso desarrolló un experimento para medir algunas variables asociadas a este fenómeno. En él, se les indicó a los agentes que realizaran los movimientos fuera de fase ajustando el ritmo a los sonidos de un metrónomo. Los resultados del experimento mostraron que cuando el metrónomo alcanzaba cierta frecuencia, se producía un cambio espontáneo a patrones en fase (véase: Kelso, 1981). En función de esos datos, Haken *et al.* (1985) construyeron un modelo basado en la TSD, que describe el cambio en los patrones de movimiento como un ajuste hacia dos atractores: uno que organiza el sistema motor hacia el patrón antifase y otro que lo hace hacia el patrón fase. Según el modelo, cuando el ritmo del metrónomo tiene velocidades bajas, ambos atractores están activos y proporcionan al sistema una estabilidad suficiente como para que el agente pueda elegir libremente entre los dos patrones de movimiento. Sin embargo, cuando la velocidad aumenta hasta cierto punto crítico, el sistema se desequilibra y en respuesta se autoorganiza hacia un solo atractor: el patrón en fase.

En el caso de la TSM y la TBC, sus respectivas suscripciones al enfoque representacionista se visibilizan al exponer algunos rasgos del computacionalismo que incorporan en sus abordajes del control motor. En la TSM, el computacionalismo es incorporado tanto para describir el mecanismo de simulación motora como para señalar aquellos recursos del sistema motor en los cuales se basa la cognición motora. Concretamente, Jeannerod (2006, 2001) utiliza el modelo computacional de Wolpert *et al.* (1995), el cual fue originalmente propuesto para explicar el control motor, a fin de señalar los mecanismos subyacentes a la simulación motora. El modelo describe el control motor como el resultado de una interacción dinámica entre dos dispositivos de procesamiento de la información: un controlador y un predictor. El controlador tiene como entrada una acción deseada y datos acerca del grado de error entre la acción seleccionada y los movimientos ejecutados. Como salida tiene una señal eferente, la cual activa aquellos comandos motores que corregirán los movimientos para producir la acción seleccionada. El predictor tiene como entrada una copia de aquella señal, o también, "copia de la eferencia", que activa los comandos motores. Como salida tiene una señal que estima o predice el grado de error de los movimientos que generaría tal activación, la cual es enviada al controlador. La figura 3 ilustra cómo fluye la información entre este sistema de modelos internos para controlar los movimientos.

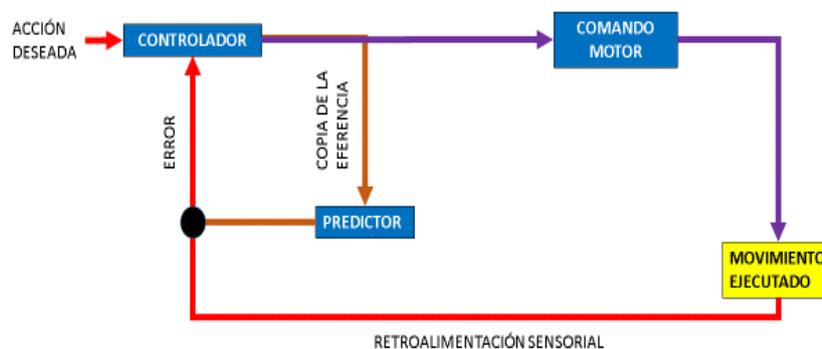


Figura 3: Flujo de información entre el controlador y el predictor.

Jeannerod (2006, 2001), siguiendo casi al pie de la letra el modelo de Wolpert y compañía, propone que cuando la cognición motora opera en modo fuera de línea, como en el caso de la imaginación motora, las señales que activan los comandos motores son inhibidas. En consecuencia el sistema motor no ejecuta los movimientos que producirían la acción seleccionada sino solamente una simulación de los errores que se registrarían al reclutar esos comandos motores. De ese modo, y tal como se puede apreciar en la figura 4, el mecanismo de simulación motora es descrito computacionalmente solo con el bucle que incluye la actividad del predictor y el controlador.

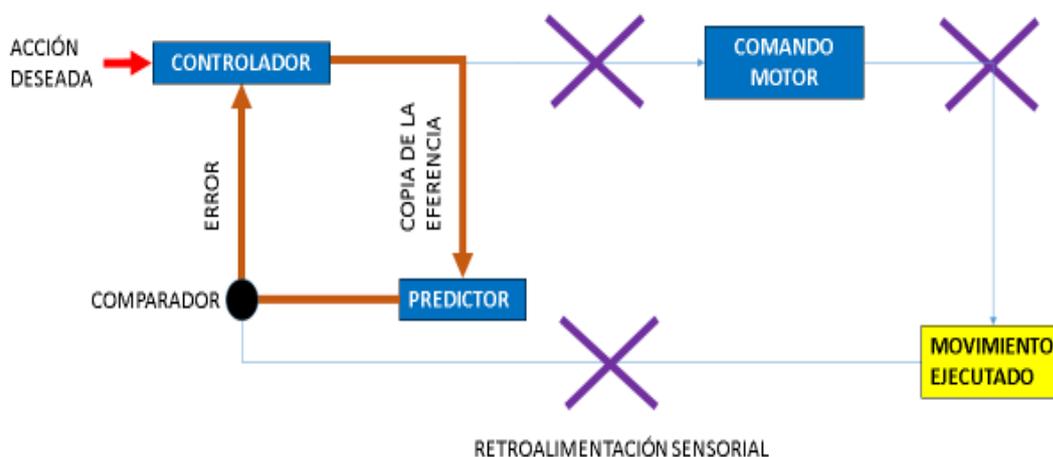


Figura 4: Flujo de información durante la simulación motora.

Con el modelo de Wolpert y compañía, Jeannerod da sustento a la idea de que la simulación es una actividad mental que, si bien no compromete la movilización de los segmentos corporales, está referida a los mecanismos neuronales dedicados al control motor en los que aquellos sí se comprometen (O'Shea y Moran, 2017). Bajo esas consideraciones, es posible decir que la TSM introduce un modelo computacional para describir la manera en que la cognición motora se basa en ciertas modalidades específicas: concretamente, en la actividad neuronal del sistema motor. Este modo de encarar el abordaje de la cognición motora visibiliza la adhesión de la teoría a un enfoque corporizado representacionalista.

En la TBC el computacionalismo es incorporado como un elemento del marco unificado mencionado en la sección anterior, con el cual se describen las tareas que lleva a cabo el cerebro para reducir la incertidumbre en los mecanismos de inferencia perceptual e inferencia activa. Friston *et al.* (2011), Friston *et al.* (2010), Friston (2009, 2005) proponen que el cerebro funciona como un sistema de control jerarquizado, y al mismo tiempo descentralizado, cuyo objetivo es

reducir las señales de error predictivo que ingresan. Tal sistema procesa información probabilística en base a una organización de capas constituidas por modelos generativos⁴, las cuales se superponen verticalmente unas con otras. A su vez, al interior de estas capas, los modelos generativos están interconectados horizontalmente entre sí. Bajo este esquema, cuando ingresan datos sensoriales, se activa un conjunto de modelos generativos localizados en diversas capas superpuestas que luego envían señales predictivas de arriba hacia abajo y señales de error predictivo de abajo hacia arriba (Clark, 2015). En la figura 5 puede apreciarse cómo fluye la información entre y dentro de las capas.

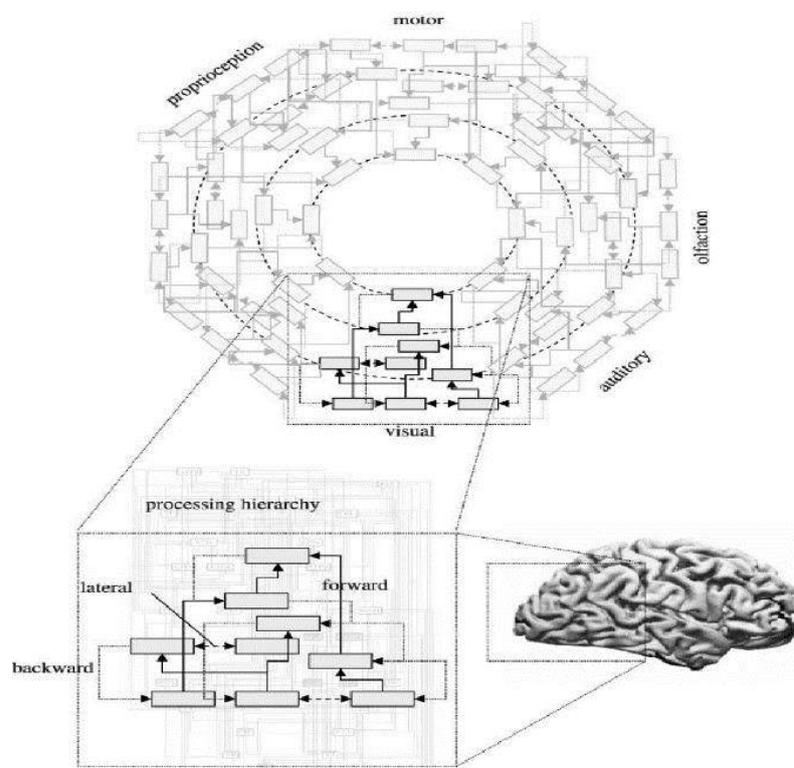


Figura 5: La estructura jerárquica de modelos generativos en el cerebro bayesiano (Friston, 2005, p. 818).

Cuando los receptores sensoriales (visuales, olfativos, gustativos, vestibulares, articulares, musculares, auditivos y táctiles) son estimulados, las capas inferiores de la jerarquía envían señales de error predictivo hacia arriba. Las capas superiores de la jerarquía integran la información sensorial que se registra en los niveles inferiores y producen nuevos modelos generativos. Luego estos últimos derivan predicciones ajustadas a los nuevos datos. Este es el mecanismo computacional que está implicado en la inferencia perceptual. Cuando la propagación de aquellas predicciones alcanza los niveles más bajos de la jerarquía, se pone en marcha el mecanismo de inferencia activa. En este caso, las señales predictivas activan aquellos

comandos motores que obliguen al ambiente a producir datos que satisfagan las predicciones derivadas de los modelos generativos (cfr. Clark, 2015, pp. 135-149). La figura 6 ilustra la interacción dinámica entre los modelos generativos, los comandos motores y el mundo implicada en la inferencia perceptual y la inferencia activa.



Figura 6: flujo de información entre los modelos generativos, los comandos motores y el mundo.

Con lo expuesto arriba es posible concluir que la TBC incorpora una versión del computacionalismo que no es clásica. Esto es, una versión que explica el funcionamiento general del cerebro como el resultado de un procesamiento de la información basado en un entrelazamiento de los sistemas perceptual y motor, así como también del ambiente. En concreto, describe un sistema que computa descentralizadamente la información, y en interacción dinámica tanto con los estados del cuerpo del agente como con el ambiente en el cual este se desenvuelve. Por estas razones, la TBC adhiere al enfoque representacionista de la visión corporizada.

4. Conclusiones

En este trabajo caractericé las herramientas conceptuales y metodológicas con las cuales la teoría de la simulación motora y la teoría bayesiana del cerebro abordan el control motor. A fin de hacer evidentes las novedades del caso para el área del control motor, comparé esas herramientas con aquellas implementadas en la teoría del procesamiento de la información y la teoría de los sistemas dinámicos, las cuales son señaladas por la literatura especializada como las dos teorías dominantes acerca de esta capacidad. Los resultados del tratamiento indican que las herramientas implementadas en la teoría de la simulación motora y la teoría bayesiana del cerebro habilitan a considerar que ambas teorías manan de líneas de investigación corporizadas o, más precisamente, líneas adherentes a un enfoque corporizado representacionista. En tanto corporizadas se distinguen de, y son alternativas críticas a, la teoría del procesamiento de la información, que es una teoría computacionista. En tanto corporizadas representacionistas

se distinguen de la teoría de los sistemas dinámicos, la cual adhiere a un enfoque corporizado antirrepresentacionista. Con todo, el tratamiento ofrecido brinda algunos elementos para ordenar, bajo criterios epistemológicos, un área diversa, en continua evolución y poco explorada por los filósofos como lo son las ciencias cognitivas del control motor.

5. Notas

1. La literatura filosófica asociada a estos temas (e. g. Clark, 2015, Clark, 2013, Colombo y Hartman, 2015, Colombo y Seriès, 2012), en los cuales se basa gran parte de mi análisis, no se refiere a los trabajos de Friston y colaboradores como exponentes de una "teoría bayesiana del cerebro". Generalmente los identifica como propuestas particulares y muy destacadas que se desarrollan dentro de un "marco de procesamiento predictivo" –esto es, bajo la idea de que el cerebro es una máquina predictiva–, y desde una perspectiva bayesiana –estos es, bajo la idea de que dicha máquina predice en función de una matemática bayesiana. En este trabajo utilizaré el término "teoría bayesiana del cerebro" para referirme al marco de procesamiento predictivo y a la perspectiva bayesiana con el objetivo de simplificar las nomenclaturas.
2. Decety (1996) y Jeannerod (1994) detectaron que algunas áreas del sistema motor (el córtex motor primario, la vía corticoespinal, el córtex premotor, algunas áreas del cerebelo y el ganglio basal) y algunas áreas corticales de asociación (córtex prefrontal y córtex parietal) se activan de manera similar al ejecutar una acción y al imaginarla.
3. Me refiero al nivel algorítmico que Marr (1982) distingue del computacional y del de implementación. En el nivel computacional se describe lo que hace el sistema, es decir, las tareas específicas que se realizan durante el desarrollo de una, o conjunto de, capacidad/es cognitiva/s. En este nivel se hace foco sobre las operaciones de entrada y salida de información en (o funciones de) los distintos dispositivos del sistema. En el nivel algorítmico se describe cómo es que el sistema hace lo que hace. Aquí se representan matemáticamente (con algoritmos) las funciones matemáticas en base a las cuales el sistema transforma la información de entrada en información de salida. Por su parte, en el nivel de implementación se describe cómo se realizan físicamente (en el cerebro) las operaciones computacionales. Aquí se hace foco sobre la actividad neuronal implicada en esas capacidades cognitivas (véase: Marr, 1982, pp. 29-39).
4. Los modelos generativos son definidos por el propio Friston como mapeos probabilísticos de las causas hacia las consecuencias observadas (datos). Por lo general, se especifican en términos de la probabilidad de obtener algunos datos dadas sus causas y los antecedentes (Friston, 2009).

6. Bibliografía

- ADAMS, J. A. (1971). "A closed-loop theory of motor learning". *Journal of motor behavior*, Vol 3 No. 2, 111-150.
- BERMÚDEZ, J. L. (2014). *Cognitive science: An introduction to the science of the mind*. Cambridge (UK): Cambridge University Press.
- BRYSON, J. J. (2005). "Modular representations of cognitive phenomena in AI, psychology and neuroscience". *Visions of mind: Architectures for cognition and affect*, 66-89. Bath: IGI Global.

- CHATER, N., Tenenbaum, J. B., & Yuille, A. (2006). "Probabilistic models of cognition: Conceptual foundations". *Trends in Cognitive Sciences Vol.10 No.7*, 287-291.
- CHEMERO, A. (2009). *Radical embodied cognition*. Cambridge (USA): The MIT Press.
- CLARK, A. (2013). "Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science". *Behavioral and brain sciences, Vol. 36 No. 3*, 181-204.
- CLARK, A. (2015). *Surfing uncertainty: Prediction, action, and the embodied mind*. Oxford: Oxford University Press.
- COLOMBO, M., & Hartmann, S. (2015). "Bayesian cognitive science, unification, and explanation". *The British Journal for the Philosophy of Science, Vol. 68 No 2*, 451-484.
- COLOMBO, M., & Seriès, P. (2012). "Bayes in the brain—on Bayesian modelling in neuroscience". *The British journal for the philosophy of science, Vol. 63 No. 3*, 697-723.
- DANION, F., & LATASH, M. L. (Eds.). (2011). *Motor control: theories, experiments, and applications*. Oxford: Oxford University Press.
- DECETY, J. (1996). "The neurophysiological basis of motor imagery". *Behavioural brain research, Vol. 77 No. 1-2*, 45-52.
- DI PELLEGRINO, G., FADIGA, L., FOGASSI, L., GALLESE, V., & RIZZOLATTI, G. (1992). "Understanding motor events: a neurophysiological study". *Experimental brain research, Vol. 91 No 1*, 176-180.
- EDWARDS, W. H. (2010). *Motor learning and control: from theory to practice*. California: Cengage Learning.
- FODOR, J. A. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge (USA): The MIT Press.
- FODOR, J. A., & Pylyshyn, Z. W. (1988). "Connectionism and cognitive architecture: A critical analysis". *Cognition, Vol 28*, 3-71.
- FOGLIA, L., & Wilson, R. A. (2013). "Embodied cognition". *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science, Vol 28 No 3*, 319-325.
- FRISTON, K. (2005). "A theory of cortical responses". *Philosophical transactions of the Royal Society B: Biological sciences, Vol. 360 No. 1456*, 815-836.
- FRISTON, K. (2009). "The free-energy principle: a rough guide to the brain?". *Trends in cognitive sciences, Vol. 13 No. 7*, 293-301.
- FRISTON, K. J., Daunizeau, J., Kilner, J., & Kiebel, S. J. (2010). "Action and behavior: a free-energy formulation". *Biological cybernetics, Vol. 102 No. 3*, 227-260.
- FRISTON, K., MATTOU, J., & KILNER, J. (2011). "Action understanding and active inference". *Biological cybernetics, Vol. 104 No 1-2*, 137-160.
- GENTSCH, A., WEBER, A., Synofzik, M., Vosgerau, G., & Schütz-Bosbach, S. (2016). "Towards a common framework of grounded action cognition: Relating motor control, perception and cognition". *Cognition, Vol 146*, 81-89.
- HAKEN, H., KELSO, J. S., & BUNZ, H. (1985). "A theoretical model of phase transitions in human hand movements". *Biological cybernetics, Vol. 51 No. 5*, 347-356.
- HORST, S. (2011). *Symbols, computation, and intentionality*. California: University of California Press.
- HURLEY, S. (2001). "Perception and action: Alternative views". *Synthese, Vol. 129 No. 1*, 3-40.
- JEANNEROD, M. (1994). "The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery". *Behavioral and Brain sciences, Vol. 17 No 2*, 187-202.
- JEANNEROD, M. (2001). "Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition". *Neuroimage, Vol. 14 No 1*, 103-109.

- JEANNEROD, M. (2006). *Motor cognition: What actions tell the self (No. 42)*. Oxford: Oxford University Press.
- KELSO, S. J., HOLT, K. G., RUBIN, P., & KUGLER, P. N. (1981). "Patterns of human interlimb coordination emerge from the properties of non-linear, limit cycle oscillatory processes: Theory and data". *Journal of motor behavior*, Vol. 13 No 4, 226-261.
- LATASH, M. L. (2012). *Fundamentals of motor control*. Londres: Academic Press.
- LATASH, M. L., SCHOLZ, J. P., & Schöner, G. (2007). "Toward a new theory of motor synergies". *Motor control*, Vol. 11 No. 3, 276-308.
- MARR, D. (1982). *Visión: una investigación basada en el cálculo acerca de la representación y el procesamiento humano de la información visual*. Amo Martín (trad.). Madrid: Alianza.
- O'SHEA, H., & MORAN, A. (2017). "Does motor simulation theory explain the cognitive mechanisms underlying motor imagery? A critical review". *Frontiers in human neuroscience*, Vol 11, Art. No 72.
- PAPINEAU, D. (2012). *Philosophical devices: Proofs, probabilities, possibilities, and sets*. Oxford: Oxford University Press.
- RIZZOLATTI, G., FADIGA, L., GALLESE, V., & FOGASSI, L. (1996). "Premotor cortex and the recognition of motor actions". *Cognitive brain research*, Vol. 3 No 2, 131-141.
- ROSENBAUM, D. A. (2009). *Human motor control*. London: Academic press.
- SCHMIDT, R. A. (1975). "A schema theory of discrete motor skill learning". *Psychological review*, Vol. 82 No 4, 225.
- SCHMIDT, R. A., LEE, T. D., WINSTEIN, C., Wulf, G., & ZELAZNIK, H. N. (2018). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*. Champaign: Human Kinetics.
- SCHMIDT, R., & LEE, T. (2014). *Motor Learning and Performance-With Web Study Guide: From Principles to Application*. Champaign: Human Kinetics.
- SOMMERVILLE, J. A., & DECETY, J. (2006). "Weaving the fabric of social interaction: Articulating developmental psychology and cognitive neuroscience in the domain of motor cognition". *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol. 13 No. 2, 179-200.
- VENTURELLI, A. N. (2013). "La noción de cuerpo en las ciencias cognitivas contemporáneas". En Ibarra, A., CASETTA, G. (eds.), *La Representación en la Ciencia y el Arte, Selección de Trabajos del V Simposio Internacional*. Córdoba: Brujas.
- WILSON, M. (2002). "Six views of embodied cognition". *Psychonomic bulletin & review*, Vol 9 No 4, 625-636.
- WOLPERT, D. M., GHARAMANI, Z., & JORDAN, M. I. (1995). "An internal model for sensorimotor integration". *Science*, Vol 269 No 5232, 1880-1882.