

Módulo 1. Corteza motora y vía córtico-espinal

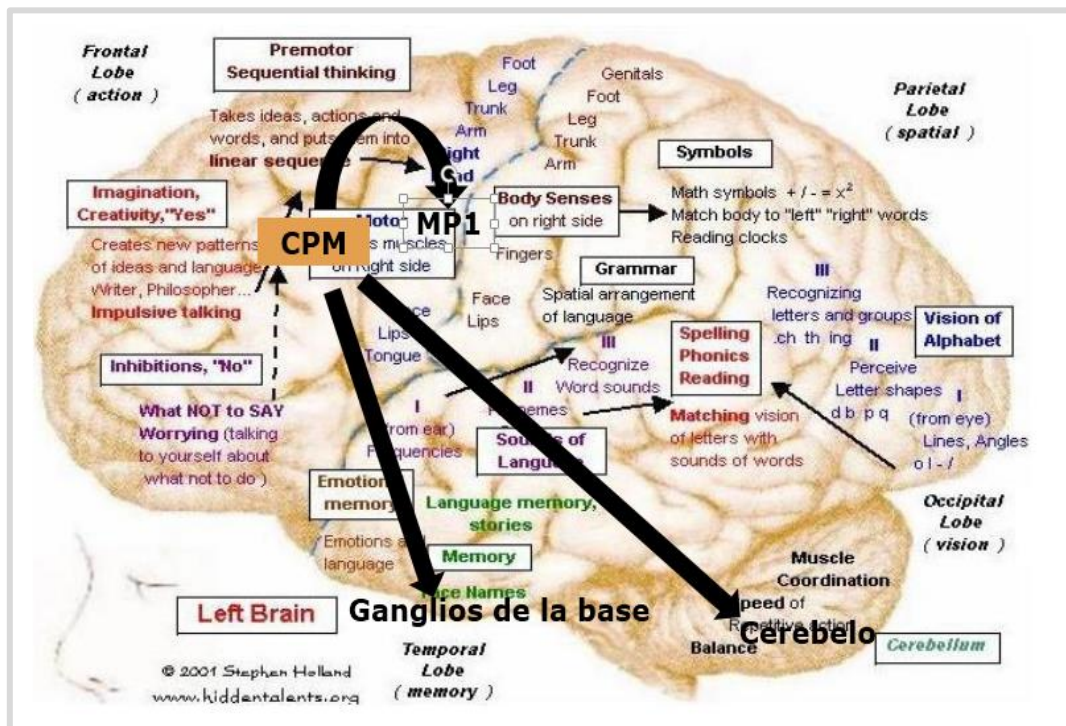
Unidad 1.1 Áreas motoras

1.1.1 Dimensiones del programa motor

Después de la decisión final que veta o da curso al programa motor en la pre-área motora suplementaria (pre-AMS), este se distribuye hacia diferentes sectores del SNC. Entre los principales destinos, incluimos los siguientes, sin descartar la posibilidad de otros (sus funciones difieren y todas son importantes):

- Área motora primaria.
- Cerebelo.
- Ganglios de la base.

Figura 1: Dimensiones del programa motor



Fuente: Elaboración propia

Descripción global de esos destinos

El destino aparentemente inmediato es la **corteza motora primaria o área 4 de Brodmann**, llamada también MP1. Sin embargo, otros dos destinos reciben también el dato del programa motor o **copia eferente** (valor previsto): los **ganglios de la base** y el **cerebelo**. Los ganglios de la base se encargan del tono muscular, la aceleración y el freno, en tanto que el cerebelo se ocupa de hacer la corrección y los ajustes necesarios, o bien de cambiar el programa, si así se requiriese.

Uno de los aspectos más fascinantes refiere al **inicio de la acción voluntaria** y su desenvolvimiento inmediato, lo cual supone la comunicación entre la corteza pre-motora y la motora primaria. Por el momento, la conexión que nos interesa es entre la corteza pre-motora (CPM) y la corteza motora primaria (MP1). Es esta la que gatilla el movimiento propiamente dicho y promueve la acción en sí misma, aunque los otros dos destinos del programa motor son también cruciales, sobre todo para entender el control motor, los cuales analizaremos más adelante.

Área motora primaria

El **área motora primaria** es la encargada de poner en marcha los movimientos, enviando señales eferentes a los núcleos motores de la médula espinal. Como se detallará en el tema siguiente, la MP1 no actúa en carácter solitario, sino que ella constituye el último paso antes de que la eferencia alcance la médula. El área motora primaria recibe señales del **área pre-motora**, quien es la encargada de almacenar los programas motores que el individuo fue creando a lo largo de su historia motriz.

El área motora primaria no puede enviar la eferencia motriz si antes el área motora suplementaria no autoriza el inicio de la acción. Hay otras estructuras nerviosas que envían aferencias a la MP1, las cuales se detallarán en otros temas de este curso.

Ganglios de la base

Fisiológicamente, se considera que los ganglios de la base son: el **núcleo caudado**, el **putamen**, el **globo pálido**, la **sustancia negra** y el **sub-tálamo**. Sin embargo, porciones importantes del **tálamo**, **formación reticular** y **núcleo rojo** funcionan en íntima relación con los anteriores.

Los ganglios de la base tienen funciones que inciden sobre las acciones musculares. Estos “contendrían un repertorio de automatismos motores o engramas que, utilizados en función al contexto, favorecerían la intervención de los músculos pertinentes” (Rigal, 1987, p. 86).

Cerebelo

Es uno de los órganos que compone el encéfalo. Se encarga de regular el tono muscular, el equilibrio (tónico) y la facilitación de los movimientos por la pre-activación tónica de los músculos (Rigal, 1987).

El cerebelo participa en la **integración sensorio-motriz** y, de este modo, favorece al control motor. Los procesos llevados a cabo por este órgano, por lo general, no son objeto para la conciencia, ya que se tratan de acciones subcorticales.



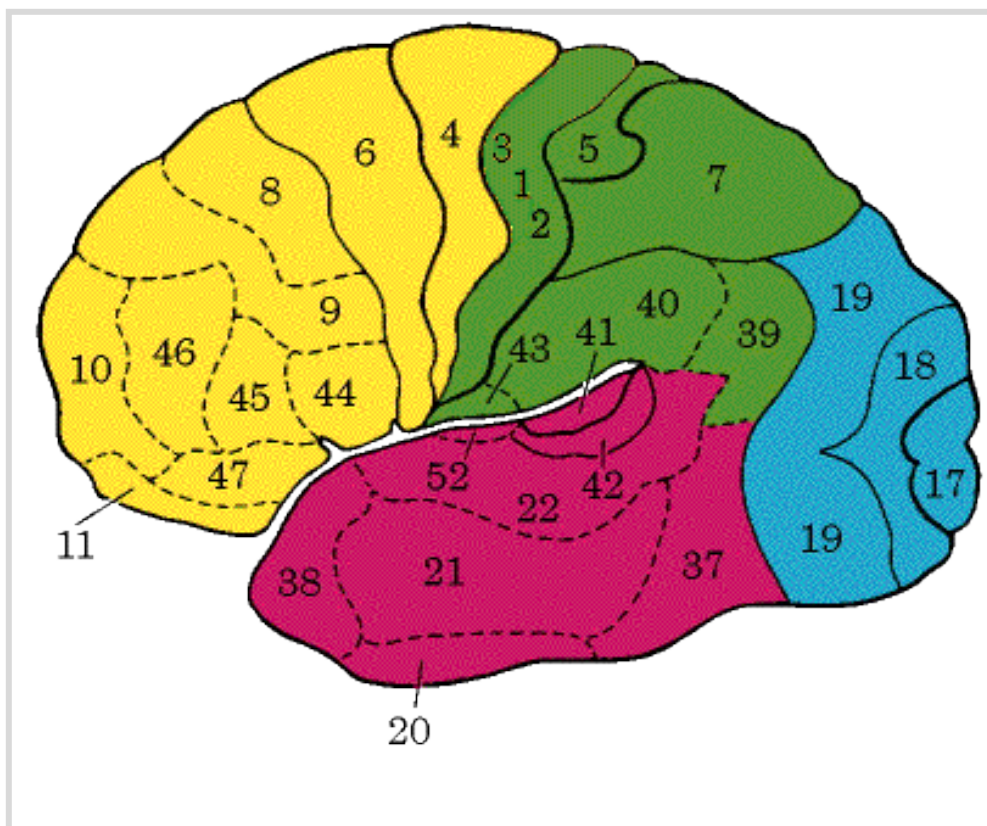
A partir de las aferencias que recibe de los distintos propioceptores, el cerebelo puede actuar sobre el movimiento y, así, generar pequeños ajustes, o bien cambiar la acción motriz. Esto se debe a que este órgano recibe una copia motriz del movimiento programado con anterioridad y lo compara constantemente con lo que se está realizando (Snell, 1999).

1.1.2 CPM y MP1, el pianista y la melodía kinestésica

En la cara anterior de la cisura de Rolando (surco central), se encuentra la **circunvolución precentral**, en la cual se puede encontrar el área motora primaria (MP1). El área precentral se caracteriza por “la ausencia, casi completa, de capas granulares y el predominio de células nerviosas piramidales” (Snell, 1999, p. 297).

El **área precentral** puede dividirse en dos regiones: la región anterior y la región posterior. En la **región anterior** se encuentra el área pre-motora, que comprende el área 6 de Brodmann y partes de la 8, 44 y 45; en la **región posterior**, por su parte, se encuentra el área motora primaria o área 4 de Brodmann. Cuando este sector es estimulado eléctricamente, se producen movimientos en el lado opuesto del cuerpo, producto de contracciones musculares desencadenadas por ese estímulo.

Figura 2: Áreas de Brodmann



Fuente: [Imagen sin título sobre áreas de Brodmann]. (s. f.). Recuperada de <https://goo.gl/Z3QeaP>

En la región precentral, las áreas de movimiento están representadas de manera invertida (Snell, 1999). Esto se explica de la siguiente manera: en la parte inferior de la corteza precentral se encuentran las estructuras que se encargan de la deglución como la lengua, maxilar, laringe y otras estructuras como párpados, cejas y labios. Siguiendo hacia arriba, se puede encontrar un área extensa que se encarga de los movimientos de los dedos de la mano, la muñeca, el codo, los hombros y el tronco. En el sector más alto de la corteza pre-central se encuentran representados los movimientos de la cadera, rodillas, tobillos. La dimensión del área que controla cada movimiento va a depender de la precisión y la habilidad que cada movimiento requiera: mientras más finos sean los movimientos de un segmento determinado, mayor será la dimensión que la representará en esta región (ver homúnculo motriz).

Aludiendo a lo anterior, podemos decir que el **área 4** es la encargada de poner en marcha movimientos de distintos sectores corporales, aunque esto no quiere decir, bajo ningún concepto, que ella actúa de forma aislada. La corteza motora primaria (MP1) “es la estación final para la conversión del diseño en la ejecución del movimiento” (Snell, 1999, p. 299). La MP1 no crea el patrón del movimiento, lo ejecuta a partir de la información que recibe de estructuras como ganglios de la base, cerebelo, tálamo y corteza sensitiva.

Para explicar el funcionamiento de la MP1, podemos comparar esta estructura con el teclado de un piano, donde las teclas representarían a los músculos y donde la acción de estos, en un movimiento, dependería de cuáles teclas toque el músico. Cada músculo tendría un determinado número de teclas: mientras más unidades motoras posea, más teclas tendrá el músculo en cuestión. La cantidad de unidades motoras que lo inerven dependerá de la precisión de los movimientos que realice (esto será ampliado en el apartado de “homúnculo motor”).

El **área premotora** no tiene células piramidales gigantes de Betz, ya que la función específica de esta no es encargarse de la ejecución de movimientos, sino almacenar programas motores, los cuales son producidos a partir de experiencias motrices del pasado. La corteza premotora (CPM) recibe múltiples aferencias sensitivas de distintas estructuras nerviosas como el tálamo y ganglios basales.

Más allá de las áreas específicas encargadas de la eferencia motriz, el **modo de ingreso de la información a la corteza cerebrales** otro hecho de gran importancia. Una cuestión que se debe considerar es que cuando la información llega al área de proyección primaria, no lo hace de forma azarosa, sino que sigue un itinerario de conducción en las capas granulares que es muy específico. Otro detalle interesante de las áreas de proyección primaria es la existencia de una topografía que da cuenta de la distribución de los receptores en la periferia. Por ejemplo: en el área de proyección primaria visual o área 17 de Brodmann, a cada sector de la retina le corresponde un determinado conjunto de neuronas (a los bastones de la retina les corresponde un sector de área de proyección primaria (APP) más externo, y a los conos les corresponde un sector más profundo o central). En estas áreas de proyección primaria, el acceso de información es ordenado y la estimulación de las neuronas que las constituyen sigue también un orden específico. La combinación de esa información entre las capas granulares también sigue un orden preciso. Hay un orden estructural y funcional para una mejor calidad de la captación de la información (Snell, 1999).



Finalmente, respecto del abordaje del tema de la **programación neuromotora**, proponemos, por su complejidad, compararla con una obra de teatro. Una **obra de teatro** se mantiene invariable a lo largo de los años. Su guion, sus escenas, los personajes pueden tener pequeños ajustes. Pero si quienes la protagonizaron fueran esenciales, entonces cuando ellos envejecan y mueran, la obra no podría seguir. Precisamente por esto los actores son contingentes, son provisorios, esto es, pueden ser o no ser; en cambio, lo que es esencial es la obra en sí misma, es decir, el engrama. En la realidad, los protagonistas o actores son los músculos, y el acto de programar decide qué músculo ejecuta la obra. Si el músculo fuera lo esencial y este se enfrenta a algún problema como una enfermedad o una limitación, ya no podríamos seguir desplegando el engrama y esto sería una gran desventaja en la historia evolutiva. Por el contrario, es una ventaja que lo contingente sea el músculo y lo no contingente, el engrama. **Programar es tomar decisiones respecto a la protagonización de lo invariante o engrama**; es, en suma, el armado de una secuencia ya con actores muy específicos que son los distintos músculos que desarrollan el movimiento. Cuando el área motora suplementaria da el “visto bueno” para el inicio de la acción -es decir, desbloquea o permite su inicio-, el programa motor se comunica o se transmite a la corteza motora primaria para empezar a desarrollarse secuencialmente; de ese modo, va la información excitatoria a través de la médula a distintos grupos musculares para que el movimiento se despliegue en última instancia.

Algunos sugieren comparar el programa motor con una **melodía kinestésica**, como lo expresó Alexander Luria (1973), quien entendía al programa motor como una partitura musical producida en el cerebro. La puesta en práctica de esa partitura sería la melodía a cargo de las activaciones musculares o músculos, los cuales cumplirían el rol de músicos y estarían dirigidos por el cerebelo.

Llegando ya al final del acto motor, cuando el programa motor está preparado, varias copias se emiten a distintos sectores del sistema nervioso, antes incluso de que el movimiento deje de ser vetado por el área motora suplementaria y comience a desplegarse a partir de la acción del área motora primaria. Los ganglios de la base reciben el dato sobre el programa motor antes de empezar a ejecutarlo y nuestro tono muscular empieza a articularse para que la calidad del movimiento sea sostenida por un telón de fondo efectivo (entre ellos, el núcleo rojo que comanda la actividad gamma). También el cerebelo recibirá una copia para poder regular el acto motor y comparar el acto en la práctica con un modelo “ideal”.

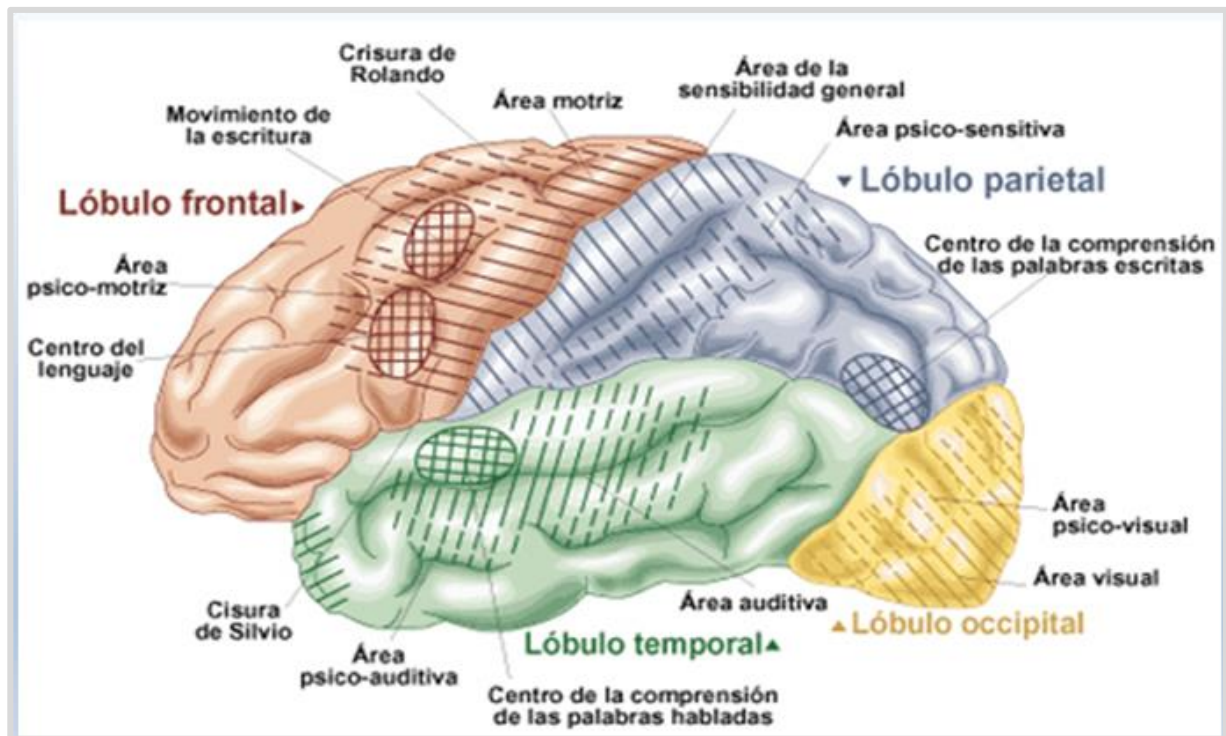
Una vez que el programa motor es elegido por la CPM, y la MP1 se encuentra lista para la reclutar unidades motoras, entra en acción el **área motora suplementaria (AMS)**, quien es la encargada de darle el permiso a la MP1 para actuar, retrasar el inicio de un movimiento, o bien directamente cancelar la acción motora. Podríamos decir que la AMS es quien autoriza al pianista a comenzar su función.

En procesos de aprendizaje de movimientos nuevos, la ejecución de estos implicará una importante actividad de la conciencia, en tanto que los procesos conscientes no serán durante la programación, sino en el momento de la puesta en marcha de este nuevo gesto, movimiento o acción. En estas instancias, la **corteza pre-frontal (CPF)** (junto con otras estructuras nerviosas) se encarga de ensamblar todos los componentes y parámetros que forman el programa motor.



En tanto una actividad sea practicada con regularidad, la responsabilidad de la CPF en la regulación de esta irá disminuyendo y, de ese modo, la dejará liberada para otras acciones. Esto se debe a que las tareas que realizaba la CPF anteriormente, al momento de automatizar un movimiento, las cumplirán ahora centros nerviosos subcorticales. Cuando esto sucede, estructuras como los ganglios de la base se encargan de controlar el movimiento y la corteza queda liberada para cumplir otras funciones, como, por ejemplo: la toma de decisión.

Figura 3: El pianista y la programación motora



Fuente: Elaboración propia a base de [Imagen sin título sobre programación motora]. (s. f.). Recuperada de <https://goo.gl/vH2Agr>

1.1.3 Homúnculo motriz

La información que fue recogida por los receptores y modificó el estado de la neurona sensitiva sigue su periplo hacia los centros de control, es conmutada y accede a la corteza cerebral. Esta información finalmente arriba a la corteza cerebral, cuyo efecto llamamos **área de proyección primaria** o áreas que se han especializado para recibir esa información, luego de haber sido procesada por los distintos núcleos geniculados laterales del tálamo.

Entre las áreas de proyección primaria que nos interesan para el procesamiento de información neuromotriz, podemos citar: en el lóbulo occipital, el **área 17 de Brodmann**; en el lóbulo temporal, el **área 41**; en el lóbulo parietal (circunvolución temporal ascendente), las áreas **3, 1 y 2** para el procesamiento la información mecánica, térmica y



Podemos observar un gran tamaño de las manos, boca, labios y lengua, es decir, todos aquellos sectores de nuestro cuerpo donde tenemos una altísima densidad de receptores, los cuales cuentan con un campo sensorial tremendamente pequeño. Esto sucede en sectores del cuerpo de los cuales tenemos que recoger una vasta cantidad de información y, a su vez, con gran capacidad discriminativa, lo cual nos ofrece claramente ventajas evolutivas.

Existen diferencias y semejanzas entre el homúnculo sensorial y el homúnculo motor: a mayor necesidad de control motor fino y, por lo tanto, mayor espacio de representatividad en el homúnculo motor, corresponde también mayor espacio de representatividad sensorial cortical. En otras palabras, donde necesitamos mayor ajuste motor calibrado y fino, también necesitamos mayor densidad de receptores; por lo tanto, encontramos una gran semejanza entre los homúnculos. La excepción es en la región genital, zona en donde necesitamos una altísima sensibilidad; sin embargo, para funciones reproductivas, no necesitamos de motricidad fina (aquí no existe semejanza entre el homúnculo sensorial y motor). Si observamos las funciones de la mano, labios, lengua e incluso las funciones oculares, las semejanzas entre los homúnculos son muy significativas.

Profundizando un poco más en las áreas de proyección primaria, sorprende significativamente que podamos encontrar **correlatos discriminativos** de cada uno de los rasgos que captamos por medio de cada sistema sensorial en particular. Por ejemplo: en el área visual, existen neuronas distribuidas en distintas capas que se activan ante rasgos tremendamente específicos del objeto, como pueden ser distintas longitudes de ondas. Existen también neuronas que reaccionan ante líneas verticales, oblicuas o distintos ángulos para luego terminar construyendo el objeto a partir del acto de la percepción.

Entonces, podemos decir que encontramos correlatos neurales analíticos muy específicos que justifican el fenómeno sensorial. La percepción es, sin embargo, mucho más compleja porque justifica la construcción final del objeto. Implica un **acto de creación** en donde otras áreas, otros subsistemas de nuestro cerebro terminan construyendo el objeto de percepción u objeto de conciencia.

1.1.4 El ensamblaje como objeto para la conciencia

Luego del inicio de la acción, la melodía kinestésica se despliega de manera secuencial y su manifestación final es, precisamente, la activación neuromuscular y el movimiento propiamente dicho, es decir, la melodía empieza a sonar.

El despliegue debe tener:

- Fluidez.
- Ensamble.
- Ritmo.
- Continuidad.

Aquí encontramos que la corteza pre-frontal (CPF) y otras áreas deben ocuparse del ensamblaje de los diferentes componentes del programa motor. El despliegue de la



melodía kinestésica es supervisado por la corteza frontal, la cual no puede ocuparse de nada más. En la medida en que automatizamos el movimiento, se libera a la corteza prefrontal para decidir acerca de otros programas (Di Santo, 2015).

Los **automatismos motrices** son los que nos permiten llevar a cabo habilidades o acciones motrices de manera eficaz y sin pensarlas. Con ello, podemos ejecutar varias habilidades motrices de manera simultánea. Un ejemplo claro es la conducción de un auto: cuando ya sabemos conducir bien el automóvil, muchas de las acciones motrices, como cambiar la marcha, pisar el embrague, mirar al espejo, etcétera, las hacemos de manera automática y, por tanto, de manera subcortical.

Existen movimientos voluntarios, los cuales son innatos en el individuo y sobre los cuales no se tiene control absoluto, pero sí se puede incidir en otros, como, por ejemplo, los de respiración o los latidos del corazón. También existe todo un repertorio de movimientos llamados automáticos o automatizados que son consecuencia de la repetición de movimientos voluntarios, de modo que ya no se hace necesaria la intervención de la consciencia y de la atención.

La **motilidad automática (paleocinetica)** corresponde neuroanatómicamente a un primer nivel supra-segmentario paleoencefálico que comprende el cuerpo estriado, núcleo subtálmico, sustancia negra, núcleo rojo, tubérculos cuadrigéminos, núcleos vestibulares, oliva bulbar, formación reticular y cerebelo. En los mamíferos se agregan algunas áreas de la corteza cerebral, que controlan estos centros subcorticales, paleoencefálicos. Durante el desarrollo filogenético, los centros paleoencefálicos modifican la actividad refleja discontinua, lo que da lugar a la aparición de la motilidad automática (Loyber, 1988).

Para concluir, diremos que podemos dividir el sistema motor en tres niveles:

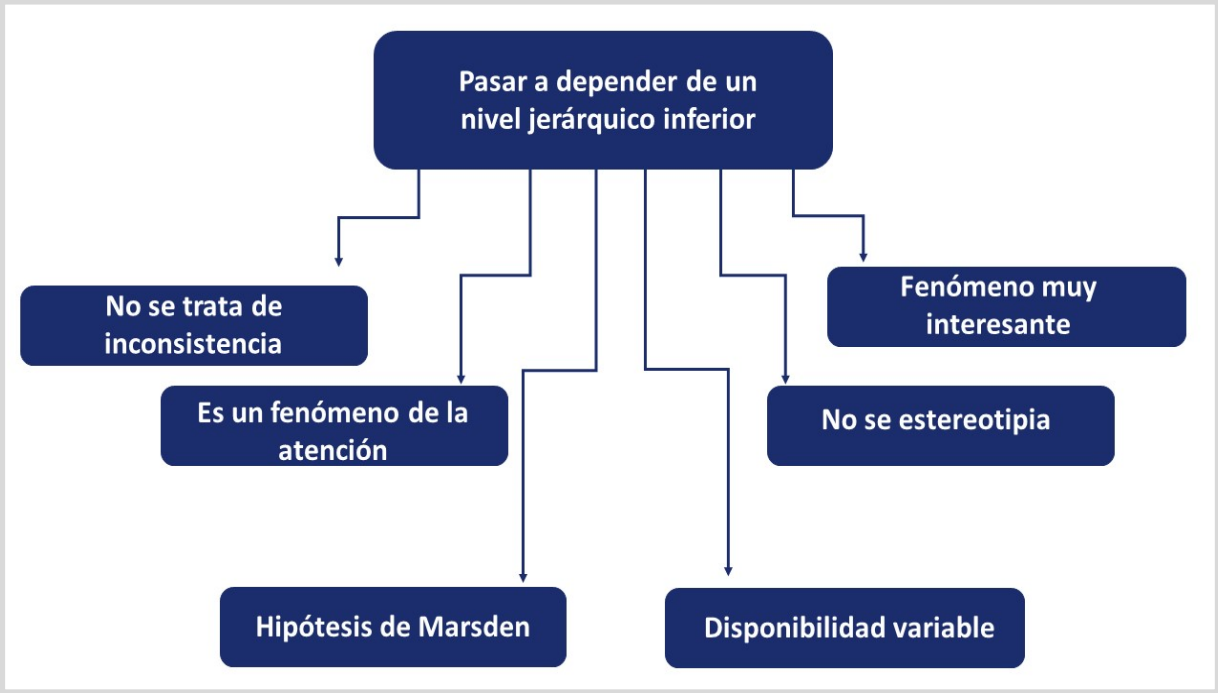
- 1) **Nivel superior:** Está compuesto por las áreas corticales motoras, área 6-4-AMS.
- 2) **Nivel intermedio:** Está compuesto por el tronco del encéfalo, de donde salen las vías nerviosas que inervan en la médula espinal.
- 3) **Nivel inferior:** Se trata de la médula espinal.

Nos centraremos en el **nivel superior**, dado que es el lugar donde se hacen conscientes los movimientos. El **primer nivel** está constituido por la corteza motora y es el responsable de la planificación del movimiento y del envío de señales motoras para su ejecución en las motoneuronas ubicadas en la médula espinal. También existen conexiones con bulbo para regular el control de movimientos de la cabeza. La corteza pueda actuar sobre la médula de forma **directa o indirecta** (córtico-espinal). Después de abandonar la corteza, el haz córtico-espinal alcanza el tronco encefálico y, a partir de aquí, la mayoría de las fibras **cruzan** la línea media hacia el lado opuesto (haz córtico-espinal lateral). Solo un número pequeño de fibras no cruza, sino que va directamente hasta la médula. La mayoría de las fibras del haz córtico-espinal terminan en **interneuronas**, mientras que un número más pequeño termina en motoneuronas (Tamorri, 2004).

Los movimientos que son programados por el área 6 y ejecutados por el área 4 con relevo sobre motoneurona de la médula son movimientos voluntarios o conscientes, mientras que los que nacen de centros nerviosos inferiores pueden o no serlos (Di Santo, 2015).



Figura 5: Niveles jerárquicos



Fuente: Elaboración propia.



Unidad 1.2 Células piramidales gigantes de Betz y vía córtico-espinal

1.2.1 Corteza, capas, plexos y columnas

La **corteza cerebral** cuenta con tres cuartas partes de los cuerpos neuronales de todo el sistema nervioso y, por ende, es indispensable para mantener las funciones conscientes y voluntarias de la vida. El córtex recibe aferencias sensitivas de distintas partes del cuerpo, las decodifica, integra, almacena y las utiliza para adaptar el comportamiento a cualquier situación. (Rigal, 1987).

La corteza cerebral está compuesta por un cúmulo de **fibras nerviosas, neuronas, neuroglias y vasos sanguíneos**.

Dentro de la corteza, encontramos los siguientes tipos de células nerviosas:

- **Células piramidales:** o también llamadas células de Betz, poseen los cuerpos celulares más grandes y se hallan en la circunvolución precentral motora. Los vértices de estas células apuntan hacia la corteza y, desde este vértice, nace una dendrita que se dirige a la piamadre (meninge interna), donde emite ramas colaterales. El axón de estas células se dirige a las capas más profundas de la corteza o entra a la sustancia blanca cerebral como una fibra de asociación.
- **Células estrelladas:** se trata de células de forma poligonal, las cuales poseen múltiples dendritas ramificadas y un axón corto. Se comunican con neuronas vecinas.
- **Células fusiformes:** se encuentran en las capas corticales más profundas y poseen dendritas en los polos del cuerpo celular. La dendrita inferior se ramifica dentro de la misma capa, mientras que la dendrita superior se dirige hacia arriba, hasta la corteza cerebral. El axón de esta célula se dirige hacia la sustancia blanca, al igual que el axón de las piramidales.
- **Células horizontales de Cajal:** son pequeñas células ubicadas de forma horizontal en la capa más externa de la corteza. El axón de estas células corre paralelamente a la corteza cerebral y hace contacto con las dendritas de las células gigantes de Betz. Las dendritas nacen a cada extremo de esta célula.
- **Células de Martinotti:** estas células están presentes en todas las capas de la corteza y su axón se dirige a la piamadre de la corteza (Snell, 1999).

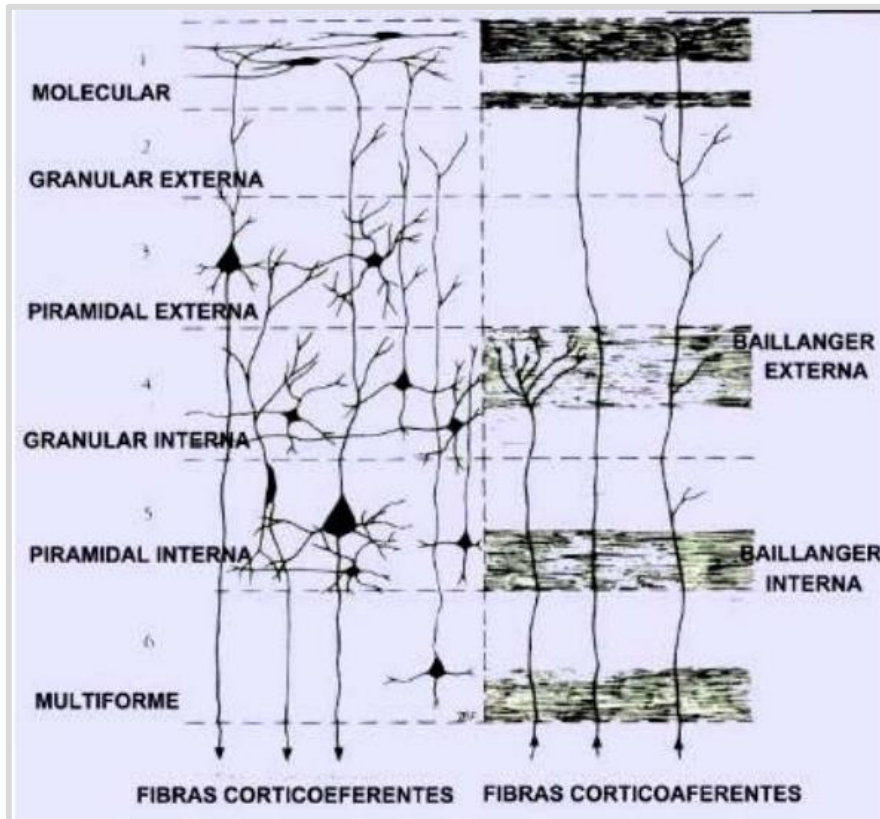
Podemos dividir al córtex cerebral en 6 capas, desde la periferia hacia el centro:

- 1) **Capa molecular:** conecta la superficie con las capas inferiores.
- 2) **Capa granular externa:** recibe señales nerviosas provenientes de otras capas de la corteza.
- 3) **Capa piramidal externa:** proyecta el impulso nervioso intercortical.
- 4) **Capa granular interna:** recibe impulso nervioso de centros medulares y subcorticales.



- 5) **Capa piramidal interna:** proyecta el impulso nervioso a centros medulares y subcorticales.
- 6) **Capa fusiforme o multiforme:** proyecta el impulso al otro hemisferio (Rigal, 1987).

Figura 6: Capas de la corteza cerebral



Fuente: [Imagen sin título sobre capas de la corteza cerebral]. (31 de julio de 2015). Recuperada de <https://goo.gl/iZt3U3>

Como bien muestra la imagen anterior, en cada capa hay distintos tipos de neuronas con funciones diferentes entre sí, las cuales están dispuestas en forma de columnas verticales. A pesar de la existencia de muchas teorías sobre el funcionamiento de las columnas, lo que se conoce con precisión es lo siguiente:

- 1) La señal sensorial que ingresa excita primero a la capa neuronal IV. La señal se difunde hacia la superficie de la corteza y también hacia las capas más profundas.
- 2) Las capas I y II reciben del sistema activador reticular señales inespecíficas difusas. Este ingreso quizá controle el nivel global de excitabilidad de la corteza.
- 3) Las neuronas de las capas V y VI proyectan axones a otras partes del sistema nervioso: algunos a diversas zonas de la corteza, otros a estructuras más profundas del cerebro, como el tálamo o el tallo, y algunos incluso a la médula (Guyton, 2006).

Cada columna vertical neuronal se encarga de interpretar un tipo de información específica (Guyton y Hall, 2006). En la corteza visual, una determinada columna interpretaría señales visuales provocadas por líneas que corren en un sentido en particular, mientras que otra columna se encargará de interpretar la información de otro tipo de líneas, de otras formas, de otros espesores, etcétera.

Dichas columnas no solo cumplen una función motora, sino que también se encargan de la integración sensoria motriz; por tanto, a mayor sensibilidad en una zona, mayor espacio y proximidad geográfica entre columnas (más densidad).

Llamamos **plexos de asociación** a las láminas de neuronas de axón corto que separan capas entre sí y conectan distintos sectores de la corteza (Di Santo, 2015)

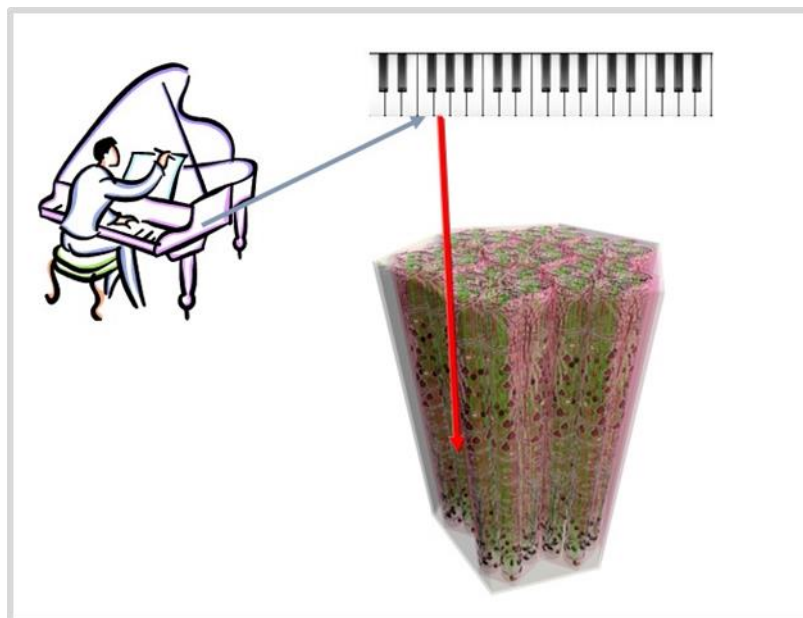
1.2.2 Organización columnar. Coordinación intra e inter-muscular

Anteriormente, se mencionó a la melodía kinestésica como ejemplo para entender la programación del acto motor, y, dentro de los músicos encargados de ejecutar la melodía, nos referimos a un pianista en particular.

Tomando a este pianista como referencia, podríamos imaginarnos que el teclado está ubicado en la MP1, y que cada una de estas teclas corresponde a una columna. El acto motor y, en especial, su armonía va a depender de la continuidad con la que el músico toque las teclas correctas.

La cantidad de columnas de un músculo no depende de su tamaño, sino de la cantidad de unidades motoras que lo configuren y regulen neuralmente; por consiguiente, a mayor coordinación fina de ese músculo, mayor tamaño en la MP1 y mayor número de columnas (no confundir con las capas neuronales mencionadas anteriormente).

Figura 7: El pianista



Fuente: Elaboración propia.

Cuando se habla de la calidad o la armonía del movimiento, este dependerá de dos dimensiones, a saber: la **coordinación intramuscular** y la **coordinación intermuscular**.

Siguiendo con el ejemplo del pianista, las podríamos definir como:

- **Coordinación intramuscular:** es la capacidad que tiene el pianista de teclear la mayor cantidad de columnas que corresponden a un músculo.

Tomando las ideas de Tous Fajardo (1999), la coordinación intramuscular es la capacidad de **reclutar unidades motoras** de un mismo músculo, la cual va a depender de las siguientes características:

- **Reclutamiento espacial:** refiere a la cantidad de fibras que son reclutadas. A partir de esto, la tensión muscular puede aumentar o disminuir, según la actividad lo requiera.
 - **Reclutamiento temporal:** guarda relación con la frecuencia con que las fibras musculares son activadas. La tensión muscular puede variar de acuerdo con la frecuencia con que se recluten las fibras.
 - **Sincronización de unidades motoras:** “normalmente, las unidades motoras se activan asincrónicamente (para que el movimiento sea suave), aunque parece ser (como ocurre en los halterófilos) que a la hora de realizar una contracción voluntaria máxima lo hacen sincrónicamente” (Fajardo, 1999, p. 47).
- **Coordinación intermuscular:** es la capacidad del pianista de suceder en perfecta armonía las notas y, al mismo tiempo, evitar teclear columnas no pertinentes.

Con esto, podemos entender que la coordinación intermuscular es la capacidad que tenemos de poder **activar las fibras musculares pertinentes**, no solo del músculo agonista, sino también de sus sinergistas. A su vez, es necesario que no se tecleen columnas correspondientes a músculos antagonistas, los cuales limitan la actividad de los principales encargados de un movimiento.

Es indispensable que exista una buena secuenciación y sincronización en los distintos grupos musculares, algunos de los cuales son activados (agonistas o sinergistas) y otros son inhibidos (antagonistas).

Estos procesos coordinativos van a depender de la capacidad de inhibición o facilitación que el sistema nervioso pueda ejercer, los cuales están relacionados con distintos reflejos nerviosos (Di Santo, 2015).

1.2.3 Irradiación y parasitosis motora. Perfeccionamiento motriz

Irradiación proximal

Imagine que el pianista no teclea las notas exactas, sino que su dedo se dirige, sin pericia inicial, a teclas que corresponden a otros músculos.



Lo que sucede es que se activan columnas no correspondientes. Este fenómeno de irradiación y parasitosis motora justifica gran parte de los fallos en la *performance* motora.

Figura 8: Irradiación proximal



Fuente: Elaboración propia.

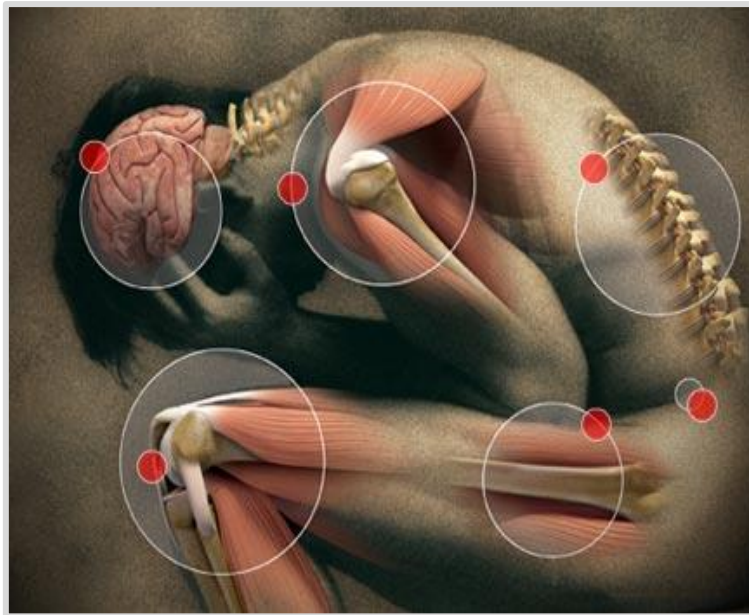
Las sincinesias tienen una explicación córtico-cortical:

- Hay activaciones parasitarias generadas desde la misma MP1 por irradiación proximal.
- Hay activación de sectores no correspondientes que inervan luego músculos que deben permanecer inactivos.
- Pueden ser estáticas o dinámicas, por lo cual afectan la calidad de ejecución y la economía motriz.
- Por lo general, las sincinesias suponen la activación de los antagonistas en el momento inadecuado y en regímenes poco eficaces.

Las sincinesias también tienen relación con las lesiones y un fenómeno de "antieconomía":

- Promueven patrones de movimiento disfuncionales, también llamados **aberrantes**.
- Estos son también llamados **síndromes de movimiento defectuoso**.
- Promueven **lesiones mio-tendinosas** de índole diversa.
- Sobre todo, promueven **pérdidas considerables de energía** que podrían empeorar la *performance*.

Figuras 9 y 10: Irradiación proximal y sincinesias



Fuente: [Imagen sin título sobre irradiación proximal y sincinesias]. (s. f. a). Recuperada de <https://goo.gl/ECqoIu>



[Imagen sin título sobre irradiación proximal y sincinesias]. (s. f. b). Recuperada de <https://goo.gl/E00FAy>

El perfeccionamiento de estas está dado por lo siguiente:

- Hay una eliminación progresiva de las sincinesias, tanto estáticas como dinámicas, con precisión en las activaciones de los protagonistas.

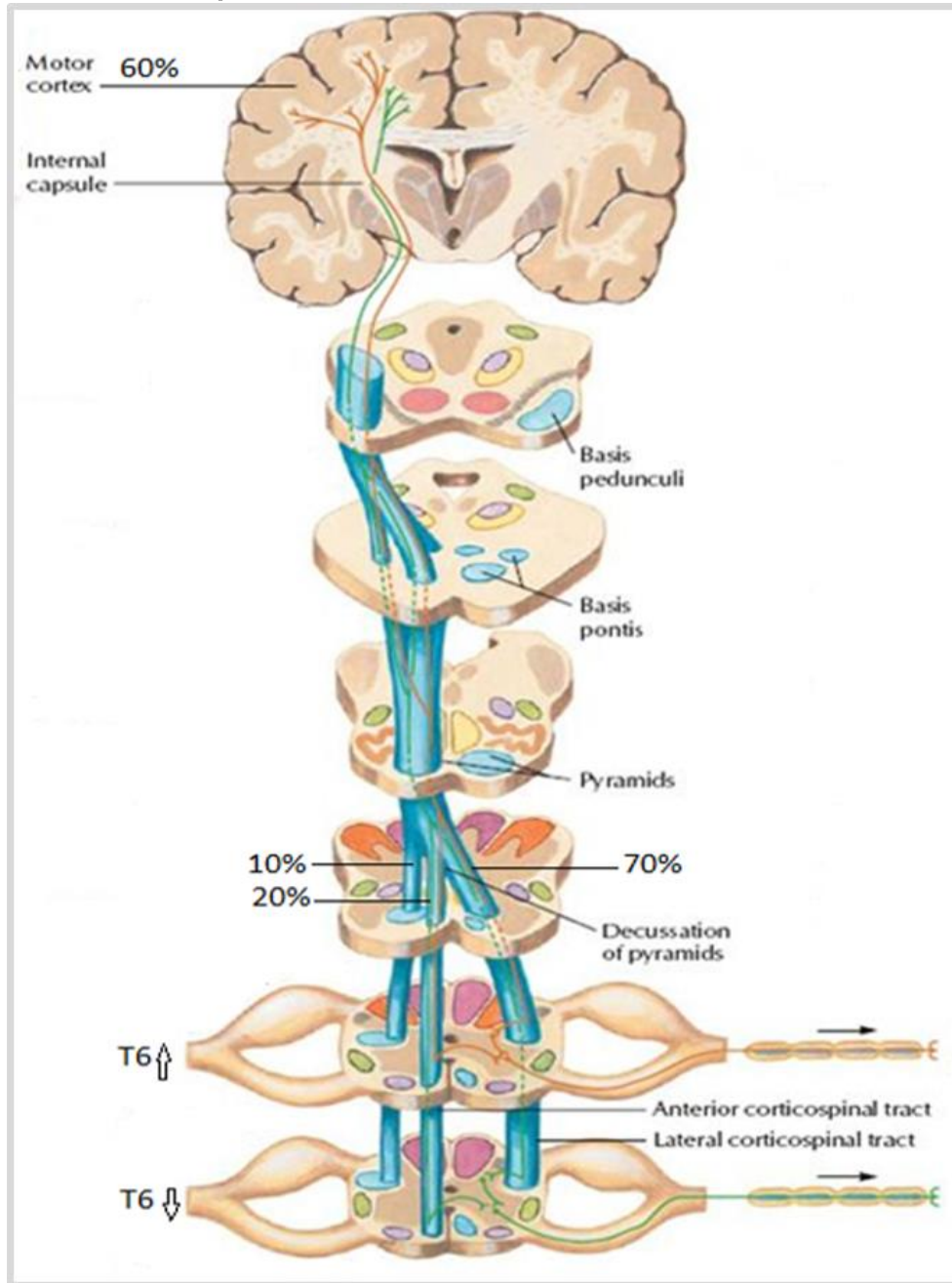
- Posible mecanismo: inhibición pre-sináptica antes de que las descargas descendentes lleguen al cuerpo de los piramidales gigantes en el sector de asociación entre CPM y MP1, es decir, antes de que las órdenes eferentes lleguen a la MP1. Esto puede darse en los tractos de la propia MP1.
- El perfeccionamiento no es solo cortical, sino que involucra numerosos procesos que trascienden la pertinencia córtico-cortical e involucran funciones sensoriales centrales y periféricas (Di Santo, 2015).

1.2.4 Vía córtico-espinal. Educación cruzada

La **vía córtico-espinal sistema piramidal** está compuesta por fibras nerviosas que van desde la corteza cerebral hasta las astas anteriores de la médula espinal, donde hace sinapsis con motoneuronas. La función de la vía córtico-espinal es exclusivamente **motora**. La mayoría de las fibras provienen de córtex frontal (áreas 4 y 6), seguidas por fibras de la corteza parietal (áreas 1, 2, 3,5 y 7).



Figura 11: Vía córtico-espinal



Fuente:[Imagen sin título sobre vía córtico-espinal]. (s. f.). Recuperada de <https://goo.gl/aGacBt>

La vía córtico-espinal se origina en las **células piramidales gigantes de Betz** de la corteza motora. Las neuronas del córtex motor envían sus axones a los núcleos motores de los nervios craneales, al bulbo raquídeo y a la protuberancia, pero la mayor parte de estas estructuras nerviosas descienden hasta la médula espinal.

Las células piramidales proyectan colaterales hacia el núcleo rojo, ganglios basales, el núcleo ventrolateral, formación reticular y oliva bulbar (Rigal, 1987). Estas vías pueden ayudar a optimizar el control motor, ya que por ellas **circula información en bucles**,



indispensables para realizar los movimientos inconscientes. A su vez, la vía rubro-espinal ayuda a la vía piramidal; en ocasiones, lo hace cubriendo sus tareas, si es necesario.

Para introducirnos al tema, diferenciaremos ciertos conceptos que se prestan a la confusión:

- **Educación cruzada:** se trata de la mejora del rendimiento en un miembro no entrenado en respuesta a un período de entrenamiento de ejercicio unilateral en su contralateral.
- **Transferencia interlateral:** se refiere a la transferencia bilateral de una habilidad motora.
- **Transferencia de fuerza:** se trata de la transferencia de fuerza para el músculo homólogo contralateral no entrenado al miembro entrenado.

Uno de los primeros reportes de **educación cruzada** fue en 1894, cuando Emily Brown presionó un botón de goma al máximo 10 veces durante 13 días solo con su mano derecha. Luego del último día, volvieron a evaluar la fuerza en régimen de máxima contracción voluntaria (MCV), pero en su mano contraria, y, sorprendentemente, la fuerza de la mano izquierda había aumentado un 43%. El fenómeno por el cual el entrenamiento de un lado del cuerpo aumenta la fuerza en el otro hemicuerpo se conoce como entrenamiento de la fuerza contralateral, o también como educación cruzada o *crosstraining*. La educación cruzada puede incluir la transferencia de fuerza muscular al músculo homólogo no entrenado después de un período de entrenamiento unilateral y de transferencia de aprendizaje de habilidades motoras en los músculos no entrenados (Zhou, 2000).

Efectos de la educación cruzada en la fuerza

Varios estudios confirman la transferencia de fuerza desde un miembro entrenado a su homólogo contralateral no entrenado luego de contracciones máximas isométricas. Munn, Herbert y Gandevia (2004) realizaron un meta-análisis de 17 estudios, a partir del cual encontraron que el aumento de la fuerza es de un 7.8% en promedio con respecto a la fuerza inicial en el miembro contralateral. El aumento es real, aunque, en algunos casos, los investigadores afirman que con la educación cruzada se puede atenuar la reducción de la fuerza o aumentarla cuando hay inmovilización del miembro. En la mayoría de los artículos de educación cruzada de la fuerza, no se observan cambios morfológicos (hipertrofia) en el miembro no entrenado.



Figura 12: Educación cruzada



Fuente: Elaboración propia.

En relación con las **acciones unilaterales** y la educación cruzada, está estudiado en miembros inferiores (MMII) que durante una ejecución bilateral hay una mayor activación muscular en comparación con contracciones unilaterales (Behm, 2003). La facilitación bilateral de la activación podría deberse al aumento de reflejos excitatorios, con *inputs* descendentes supraespinales más fuertes o una mayor inhibición.

El efecto de la educación cruzada puede depender de la **dirección de transferencia**. El estudio de Farthing (2005) fue el primero en examinar el efecto de la dirección de la transferencia en educación cruzada de fuerza. El hallazgo más importante fue que este efecto fue producido solo después del entrenamiento de la mano dominante en individuos diestros y que no hubo cambios significativos de la fuerza desde la mano no dominante izquierda hacia la dominante. Uno de los mecanismos posibles es que una extremidad es más competente en la adquisición o aprendizaje de una nueva tarea motora que la otra y, por lo tanto, más información puede ser transferida. La mayor transferencia se observa, entonces, solo desde la extremidad dominante a la no dominante (Farthing, 2010).

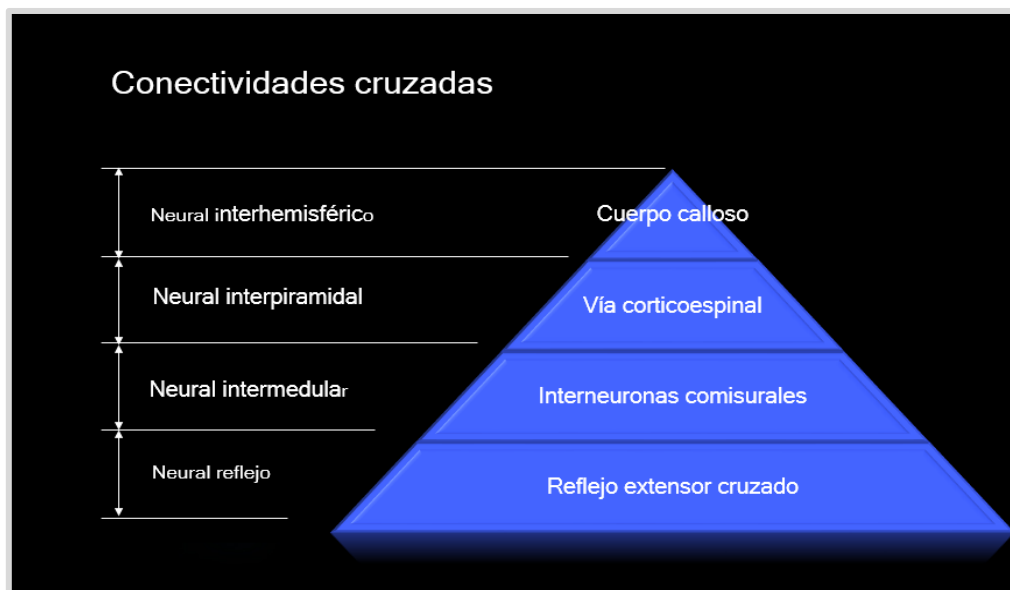
La complejidad o la familiaridad de la tarea es un factor determinante para la educación cruzada de la fuerza y habilidades motoras. Si la tarea es desconocida para ambas extremidades, la transferencia de fuerza es probable que ocurra en cualquier dirección.

¿Dónde se producen las adaptaciones que sustentan el cambio en el lado opuesto al entrenar?

Niveles de adaptación:

- Cortical.
- Subcortical.
- vías descendentes.
- Medular.
- Muscular.

Figura 13: Conectividad cruzada



Fuente: Elaboración propia.

Otros conceptos de conectividad cruzada

Conectividad transcallosal

El término **irradiación motora** describe la actividad córtico-espinal bilateral que se produce durante un movimiento unilateral. El cuerpo caloso que conecta ambos hemisferios puede ser un contribuyente de ese proceso. Las conexiones motoras horizontales entre los hemisferios derecho e izquierdo de la corteza motora primaria pueden actuar para transmitir la actividad excitatoria e inhibitoria y, de esa manera, regular la actividad de la corteza motora.

Conectividad córtico-espinal

Las fibras córtico-espinales viajan a través de la cápsula interna hasta la porción ventral del mesencéfalo. Unas tres cuartas partes decusan, mientras las otras que no se cruzan descienden y forman los tractos córtico-espinales ventrales. Estas fibras (aunque son una mínima cantidad) suponen una representación suficiente de los impulsos motores centrales que permanecen como **estímulos ipsilaterales** y que podrían mediar la activación del miembro no ejercitado.

Repercusión de educación cruzada sobre otros mecanismos

Mecanismos musculares

Incluyen cambios en la masa muscular, en concentraciones de enzimas musculares, cambios hormonales y modificación en la composición de proteínas contráctiles. Sin embargo, los estudios científicos sugieren que estas adaptaciones periféricas son poco probables en el entrenamiento cruzado (Carrol, 2001).

Mecanismos medulares

A pesar de que hay una compleja red de circuitos neuronales en la médula espinal, no hay evidencia a favor de que se produzcan cambios medulares en el hemicuerpo no entrenado. A pesar de que no se han encontrado variaciones en el reflejo H, recordemos que hay conectividad neuroanatómica a través de interneuronas comisurales que cruzan la línea media para inhibir o excitar, pero aún no está demostrado que estos mecanismos contribuyan a la educación cruzada (Fimland, 2007)

Mecanismos corticales

La mayor parte de los estudios coinciden en que la transferencia de habilidades es una respuesta al aprendizaje motor controlado por adaptaciones corticales. El aprendizaje motor se ha asociado con la plasticidad en el cerebro incluyendo regiones de la corteza motora primaria, premotora y área motora suplementaria.

Las adaptaciones neurales se deducen del hecho de que la transferencia transversal de la fuerza se produce en ausencia de hipertrofia. Se generan cambios en la activación cerebral de ambos hemisferios corticales y de la corteza somatosensitiva, la educación cruzada es controlada por adaptaciones corticales y la M1 tiene un papel fundamental.



Figura 14: Posibles aplicaciones de educación cruzada



Ejercicio terapéutico

- Posibilidad de trabajar el miembro no afectado para transferir fuerza o habilidades a su homólogo
- Parestesias, espasticidad o hemiplejias



Rehabilitación

- Ante inmovilizaciones o lesiones unilaterales
- Posibilidad de atenuar la pérdida de fuerza
- ¿Reposo?



Deportes

- Adquisiciones de habilidades motoras
- Transferencia de aprendizajes

Fuente: Elaboración propia.

Referencias

- Di Santo, M.** (2011). *Amplitud de movimiento*. Córdoba: Paidotribo.
- Di Santo, M.** (2015). Influencia de Antonio Damasio [Grabado por N. Acosta]. Córdoba, Argentina.
- Di Santo, M.** (2015). Eferencia central [Grabado por N. Acosta]. Córdoba, Argentina.
- Di Santo, M.** (2015). Imagen del movimiento [Grabado por N. Acosta]. Córdoba, Argentina.
- Di Santo, M.** (2015). Pensando en movimiento [Grabado por N. Acosta]. Córdoba, Argentina.
- Di Santo, M.** (2015). Programacion neuromotora [Grabado por N. Acosta]. Córdoba, Argentina.
- Di Santo, M.** (2015). Programacion neuromotriz [Grabado por N. Acosta]. Córdoba, Argentina.
- Di Santo, M.** (14 de octubre de 2015). Toma de desicion y logica motriz [Grabado por N. Acosta]. Córdoba, Argentina.
- Fajardo, J. T.** (1999). *Nuevas tendencias en fuerza y musculación*. Barcelona: Ergo.
- Guyton, C. A.** (2006). *Tratado de fisiología médica* (11.ª ed.). Barcelona: Elsevier.
- Guyton, C., y Hall, J.** (2006). *Tratado de fisiología médica*. Barcelona: Elsevier.
- [Imagen sin título sobre áreas de Brodmann]**. (s. f.). Recuperada de <http://www.facmed.unam.mx/Libro-NeuroFisio/10-Sistema%20Motor/10a-Movimiento/FigsCerebro/Brodmann-01.gif>
- [Imagen sin título sobre capas de la corteza cerebral]**. (31 de julio de 2015). Recuperada de <https://apuntesudomedicina.files.wordpress.com/2015/07/imagen2.png?w=700&h=523>
- [Imagen sin título sobre homúnculo motriz y homúnculo sensorial]**. (s. f.). Recuperada de http://wm0376057.web-maker.es/cm4all/iproc.php/Imagenes/homunculo.jpg/downsize_1280_0/homunculo.jpg
- [Imagen sin título sobre irradiación proximal y sincinesias]**. (s. f. a). Recuperada de <https://lh3.googleusercontent.com/--IZNRQjMWD0/VSOxfDYSeeI/AAAAAAAAAMfY/6PVoCORpjTc/w1795-h1319/1.jpg>
- [Imagen sin título sobre irradiación proximal y sincinesias]**. (s. f. b). Recuperada de <http://spinalphysio.kornberg.net/christie.jpg>
- [Imagen sin título sobre programación motora]**. (s. f.). Recuperada de https://nathaliab.files.wordpress.com/2009/11/funciones_cerebro.gif
- [Imagen sin título sobre vía córtico-espinal]**. (s. f.). Recuperada de <https://1.bp.blogspot.com/-Zy2H0qxjTR0/Vw3ENrmbEUI/AAAAAAAAAUE/YeE0CUSGcvAqrIggWvWkEiBqd7nRapyugCLcB/s1600/imagen49.png>



- Loyber, I.** (1988). *Funciones motoras del sistema nervioso*. Córdoba: El galeno.
- Luria, A.** (1973). *The Working Brain and Introduction to Neuropsychology*(Traducción propia). Londres: Penguin Books.
- Munn, J., Herbert. R. D., y Gandevia, S. C.**(1 de mayo de 2004).Contralateral effects of unilateral resistance training: a meta-analysis (Traducción propia).*Journal of Applied Physiology*, 96(5), 1861-1866. Recuperado de <http://jap.physiology.org/content/96/5/1861>
- Neumaier, A.** (2002). *Entrenamiento de la tecnica*. Barcelona: Paidotribo.
- Rigal, R.** (1987). *Motricidad humana*. Madrid: Pila Teleña.
- Snell, R.** (1999). *Neuroanatomía clínica* (4.ª ed.). Buenos Aires: Panamericana.
- Tamorri, S.** (2004). *Neurociencia y deporte*. Barcelona: Paidotribo.
- Tamorri, S.** (2004). *Neurociencia y deporte. Psicología deportiva. Procesos mentales del atleta*. Barcelona: Paidotribo.
- Zhou, A.** (2000). El entrenamiento cruzado: una posibilidad del mantenimiento de la forma ante lesiones unilaterales. *Medicina Esport*, 15.

