

El movimiento humano

ÁLVARO GONZÁLEZ VELASCO¹

Universidad de Salamanca
agvelasco@usal.es

SUMARIO

El presente artículo tiene por objetivo presentar las bases neurofisiológicas de los movimientos, cómo controla el cerebro los mismos y la importante función del cerebelo como gran coordinador. Pero para ello se hace necesaria una pequeña introducción en la que aclararemos algunos términos: qué es un movimiento y cuáles son sus componentes, la intervención de los músculos y los reflejos como movimientos.

Palabras clave: movimiento corporal, músculo, movimiento reflejo, cerebelo.

SUMMARY

This article has for aim present the neurophysiological bases of the movements how the brain controls the same ones and the important function of the cerebellum as great coordinator. But for it there become necessary a small introduction in which we will clarify some terms: what is a movement and which are his components, the intervention of the muscles and the reflections as movements.

Key words: corporal movement, muscle, reflex movement, cerbellum.

¹ Álvaro González Velasco es estudiante de 2º de Grado en Psicología en la Universidad de Salamanca.

1. ORGANIZACIÓN ANATOMOFUNCIONAL DE UN MOVIMIENTO

Un movimiento se produce cuando llega un impulso nervioso al músculo, éste se contrae y tira de los huesos. Al tirar de los huesos se produce el desplazamiento de un miembro del cuerpo o de todo el cuerpo.

El cerebro ha elaborado un impulso nervioso que ha viajado a los músculos, los cuales se contraen y tiran del hueso. Así, en la organización anatomofuncional debemos tener en cuenta los siguientes elementos:

- La intervención del sistema nervioso.
- La intervención de uno o varios músculos.
- La intervención de los huesos, aunque no en todos los movimientos.

El responsable último del movimiento es el sistema nervioso, quien elabora y ejecuta los movimientos. El efector del movimiento, el que realiza la tarea, es el músculo.

2. LOS MÚSCULOS

Iniciamos este apartado enumerando los tres tipos de músculos que tiene nuestro cuerpo, para detenernos después en cada uno de ellos:

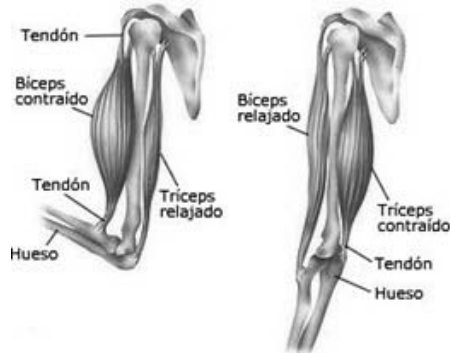
- *Músculo esquelético*: son los que mueven nuestro cuerpo y están unidos al esqueleto.
- *Músculo liso*: son controlados por el sistema nervioso vegetativo o autónomo y están localizados en el aparato digestivo, el útero, los ojos...
- *Músculo cardíaco*: es un músculo especial que, por un lado, le acerca a los músculos estriados pero que, por otro, actúa como los músculos lisos. Se encuentra en el corazón.

2.1. EL MÚSCULO ESQUELÉTICO

La mayoría de los músculos esqueléticos están unidos a los huesos por dos extremos. Hay algunos casos, como los músculos del ojo y los del abdomen, en los que sólo están unidos por un extremo. Estas uniones se realizan mediante los tendones, que son fibras resistentes de tejido conjuntivo.

Con los músculos esqueléticos podemos realizar, principalmente, dos tipos de movimientos: la flexión y la extensión. Los movimientos flexores son aquellos que se producen cuando se contraen los músculos flexores y, cuando eso sucede, flexionamos un miembro. Los movimientos extensores se producen cuando se

contraen los músculos extensores, extendiéndose así un miembro. Estos últimos también se llaman antigravitatorios pues gracias a ellos podemos estar erguidos.



Músculo esquelético

Un músculo esquelético está formado por tres tipos de elementos: sus células, las fibras musculares, que están envueltas por una membrana llamada sarcolema; el tejido conjuntivo; y el tejido vascular. En cuanto a las fibras musculares pueden ser de dos tipos:

- *Fibras musculares extrafusales.* Se llaman así por estar fuera de los husos musculares y están inervadas por axones de motoneuronas alfa. Cuando se contraen las fibras extrafusales dan fuerza motora al músculo (casi toda la fuerza motora proviene de estas fibras).
- *Fibras musculares intrafusales.* Se hallan dentro del huso muscular. Están inervadas por un axón sensorial y otro motor, que es el axón eferente de una motoneurona gamma y que hace que la fibra intrafusil se contraiga. Esta contracción aporta poca fuerza motora al músculo, pero tiene otra función más importante y es que al contraerse las fibras intrafusales modifican la sensibilidad del estiramiento de las terminaciones de la fibra aferente.

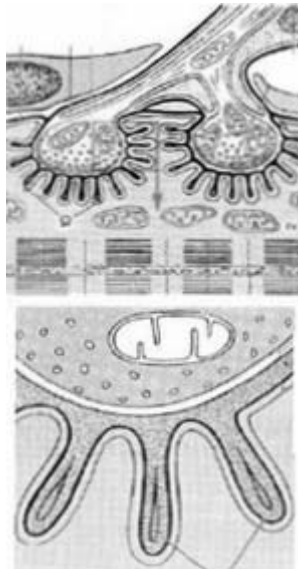
2.2. UNIDAD MOTORA

Se llama unidad motora al conjunto formado por una motoneurona alfa, su axón y todas las fibras musculares extrafusales inervadas por ella. El tamaño de las unidades motoras varía en diferentes partes de nuestro cuerpo según la funcionalidad que tenga que realizar. Así, por ejemplo, hay unidades motoras compuestas por una motoneurona alfa, su axón y una o dos fibras musculares. Esto sucede en los ojos y en la punta de los dedos, zonas donde los movimientos han de ser muy precisos. Las unidades motoras más grandes pueden estar compuestas por hasta más de 60 fibras musculares diferentes, como en los músculos del tronco donde los movimientos no

son muy precisos. Por tanto, a mayor precisión en los movimientos, menor será el número de fibras musculares inervadas por una motoneurona alfa.

3. LA UNIÓN NEUROMUSCULAR

La sinapsis existente entre el botón terminal del axón de una motoneurona eferente y la membrana de la fibra muscular se denomina unión neuromuscular. Dicha sinapsis tiene lugar en las placas terminales motoras, localizadas en las hendiduras existentes en la superficie de las fibras musculares.



Unión neuromuscular

En la unión neuromuscular vamos a diferenciar tres partes:

- *Parte presináptica.* Formada por un botón terminal del axón de la motoneurona. En esta zona encontramos, entre otros, mitocondrias y vesículas sinápticas que contienen el neurotransmisor, la acetilcolina.
- *Hendidura sináptica.* Es el espacio que hay entre la parte presináptica y la parte postsináptica. En ese espacio es donde se libera el neurotransmisor. Encontramos colinestrasa, una enzima que destruye la acetilcolina que no se utiliza en la sinapsis.
- *Parte postsináptica.* Es la membrana de la fibra muscular.

Cuando el axón de la membrana emite potenciales de acción y viaja un impulso nervioso, los botones terminales de ese axón liberan acetilcolina a la

hendidura sináptica. Se origina entonces un potencial de placa terminal en la fibra muscular que provoca una despolarización de la fibra muscular, lo que hace que se contraigan a la vez todas las fibras musculares inervadas por esa neurona, produciéndose el movimiento.

4. EL CONTROL REFLEJO DEL MOVIMIENTO

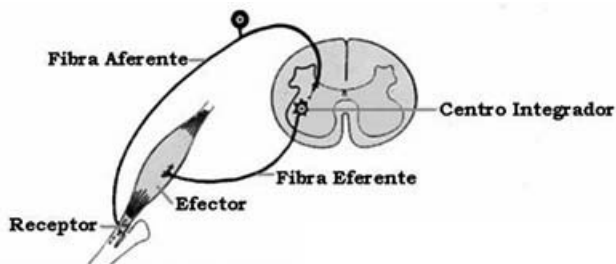
Los movimientos reflejos ocurren de manera automática ante diversos estímulos, y actúan sobre receptores sensoriales específicos. Esto desencadena un circuito neurológico en el sistema nervioso llamado arco reflejo, que es autónomo, constante y no consciente. Muchos de estos circuitos tienen lugar en la médula espinal, aunque también hay en el tronco encefálico y, en menor medida, en el diencéfalo y en el córtex cerebral. En el arco reflejo podemos distinguir los siguientes componentes: receptores (neuronas sensitivas), neuronas de asociación (no aparecen en los reflejos monosinápticos), neuronas motoras y efectores (músculos).

Los reflejos se clasifican en dos tipos:

- *Monosinápticos o simples*, son aquellos donde la neurona sensitiva hace sinapsis directamente con la neurona motora.
- *Polisinápticos, multisinápticos o compuestos*, son aquellos donde la o las neuronas sensitivas sinaptan primero con una neurona de asociación y esa neurona de asociación, a su vez, sinapta con una neurona motora.

4.1. EL REFLEJO MONOSINÁPTICO

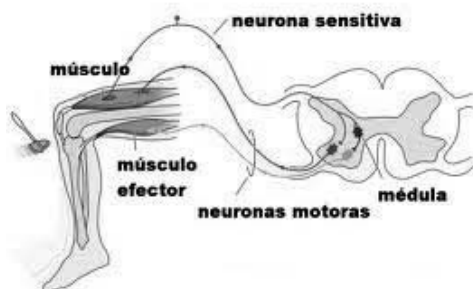
En este tipo de reflejo, el estímulo, por ejemplo, un golpe en el tendón de la rodilla, excita a los receptores que hay a ese nivel y origina un impulso nervioso sensitivo que va por una neurona sensitiva de un ganglio espinal si es a nivel de la médula, si no sería un ganglio basal. Entra por la raíz posterior del nervio espinal correspondiente, entra por la médula espinal y va directamente al asta anterior de la sustancia gris donde hace sinapsis con la neurona motora. A partir de ahí se origina un impulso nervioso motor que sale por su axón, por la raíz anterior, y va hasta el músculo o grupo de músculos determinado, donde tiene lugar la unión neuromuscular y el músculo se contrae.



Reflejo monosináptico

a) *El reflejo de estiramiento.*

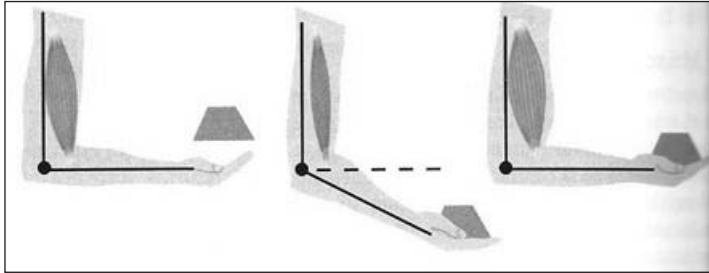
El estímulo es una percusión en el tendón. Ello provoca una distensión de los receptores que hay en el músculo correspondiente y se origina un impulso nervioso aferente que viaja por una neurona motora, también a ese nivel de la médula espinal en el asta anterior; se desencadena un impulso nervioso motor que va hasta los músculos correspondientes y provoca su contracción muscular. Ocurre en una parte muy circunscrita de la médula espinal que incluye pocos segmentos medulares.



Reflejo de estiramiento

b) *El reflejo de extensión (reflejo miotático monosináptico).*

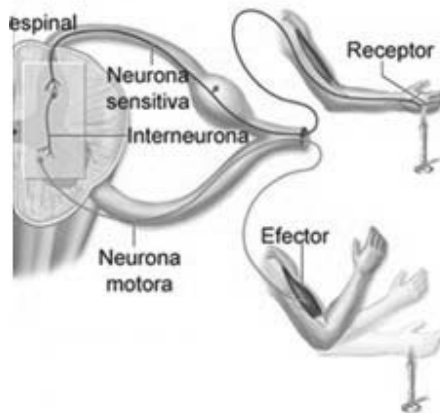
Para explicarlo utilizamos el siguiente ejemplo: colocamos sobre la mano de una persona un cierto peso. El antebrazo entonces desciende y se alarga el músculo. Esto incrementa la frecuencia de descarga de las neuronas aferentes del ganglio espinal que inervan al huso, estimulando las motoneuronas alfa y provocando la sinapsis en el asta interior de la sustancia gris de la médula espinal. Estas motoneuronas inervan con las fibras musculares extrafusales, enviando los impulsos nerviosos. De esta manera la contracción muscular aumenta y el brazo es capaz de sostener el peso.



Reflejo miotático

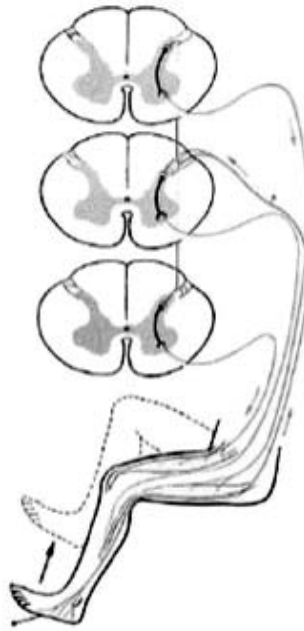
4.2. EL REFLEJO POLISINÁPTICO

Un reflejo polisináptico es igual que el monosináptico a diferencia que, dentro de la sustancia gris, la neurona sensitiva hace sinapsis con una neurona de asociación y ésta va a hacer sinapsis en el asta anterior con la neurona motora.



Reflejo polisináptico

Ejemplo de ello es el reflejo extraño o de retirada. El estímulo, por ejemplo, es clavarse un objeto punzante en la planta del pie. En este lugar tenemos nociceptores (receptores del dolor) a nivel de la piel que se estimulan y originan un impulso nervioso aferente que viaja por una neurona sensitiva hasta un ganglio sensitivo espinal, entra por la raíz posterior del nervio correspondiente y va a hacer sinapsis con una neurona de asociación en la sustancia gris de la médula espinal. Esta neurona de asociación va a hacer sinapsis con una neurona motora del asta anterior de la sustancia gris y sale un impulso motor por la raíz anterior del nervio correspondiente que viaja hasta los músculos de la pierna (un grupo grande), que se contraen y hacen que se levante la pierna huyendo del estímulo que causa el dolor.



Reflejo de retirada

5. EL CONTROL CEREBRAL DEL MOVIMIENTO

El cerebro se encarga de controlar los movimientos no reflejos voluntarios o asociados a movimientos voluntarios. Así, se encarga de controlar la elaboración de la intención del movimiento (esto ocurre en el lóbulo frontal), la planificación del movimiento (en la corteza prefrontal), la puesta del movimiento en términos neurológicos/psicológicos (melodía kinestésica) y la ejecución del movimiento (las áreas motoras elaboran los impulsos nerviosos motores que van a llegar a los músculos).

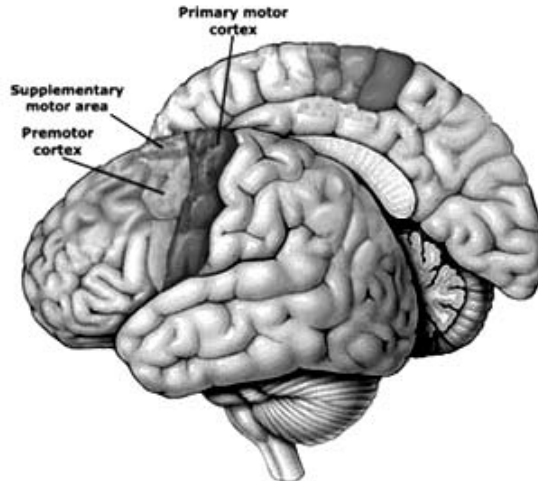
5.1. LA ORGANIZACIÓN DE LA CORTEZA MOTORA

La corteza cerebral motora se divide en tres zonas: corteza motora primaria, área motora suplementaria y corteza premotora.

a) La corteza motora primaria

La corteza motora primaria está situada en la circunvolución precentral, justo delante del surco central. Esta corteza se caracteriza por tener una organización somatotópica, es decir, están representadas todas las partes de nuestro cuerpo.

Cuando se activan las neuronas de esas áreas concretas de la corteza motora primaria se produce el movimiento de partes concretas del cuerpo.



Corteza motora

La corteza motora primaria recibe información de la corteza frontal de asociación, que está inmediatamente delante de ella, rostralmente situada.

b) El área motora suplementaria

El área motora suplementaria es una región de la corteza motora de asociación situada en las zonas dorsal y dorsomedial del lóbulo lateral. Está situada inmediatamente por delante de la corteza motora primaria, recibiendo aferencias de ésta.

c) La corteza premotora

La corteza premotora está situada inmediatamente delante de la corteza primaria motora y es una región de la corteza motora de asociación situada en la zona lateral del lóbulo frontal.

Esta región, junto a la anterior, interviene en la planificación del movimiento y ejecuta los planes a través de sus conexiones con la corteza motora primaria. Si se activan las neuronas de esas dos regiones, el sujeto realiza secuencias de movimiento o bien se las imagina.

5.2. CORTEZA SENSORIAL-CORTEZA MOTORA: CONEXIONES Y COMUNICACIÓN

Cuando el lóbulo frontal planifica el movimiento necesita información sensorial, por un lado de nuestro cuerpo y por otro el espacio donde realicemos el movimiento, y esa información va a unas conexiones procedentes de la corteza sensorial, concretamente de las áreas asociativas de la corteza temporal (información

visual) y la parietal (información auditiva), hasta el área motora suplementaria y la corteza premotora (corteza motora de asociación).

Al lóbulo frontal llega información somatosensorial desde la circunvolución postcentral del lóbulo parietal; además le va a llegar información sobre el espacio en el que tenemos que realizar el movimiento. Esa información es de tipo visual (lóbulo temporal inferior), auditiva (lóbulos parietal y temporal) o táctil. Hay otra región que es la encargada de los movimientos guiados visualmente.

El lóbulo frontal, a su vez, transmite esa información al área motora suplementaria y a la corteza premotora, y ambos transmiten toda esa información a la corteza motora primaria. Ésta, además, recibe directamente información sensorial de nuestro cuerpo a través de la corteza somatosensorial primaria, localizada en la circunvolución postcentral.

5.3. CONTROL CORTICAL DEL MOVIMIENTO: VÍAS DESCENDENTES

Principales vías motoras				
	Origen	Término	Grupo muscular	Función
Grupo lateral				
<i>Fascículo corticoespinal lateral</i>	Región de la corteza que controla los dedos, las manos y los brazos.	Médula espinal	Dedos, manos y brazos	Coger y manipular objetos
<i>Fascículo rubroespinal</i>	Núcleo rojo	Médula espinal	Manos (no los dedos), parte inferior de las extremidades superiores, pies y parte inferior de las extremidades inferiores	Movimientos de los antebrazos y manos independientes de los del tronco corporal
<i>Fascículo corticobulbar</i>	Región de la corteza que controla la cara	Núcleos de los nervios craneales 5, 7, 9, 10, 11 y 12	Cara y lengua	Cara y movimientos de la lengua
Grupo ventromedial				
<i>Fascículo vestibuloespinal</i>	Núcleos vestibulares	Médula espinal	Tronco corporal y piernas	Postura
<i>Fascículo tectoespinal</i>	Tubérculos cuadrigéminos superiores	Médula espinal	Cuello y tronco corporal	Coordinación de los movimientos de los ojos con los del tronco y la cabeza
<i>Fascículo reticuloespinal lateral</i>	Formación reticular bulbar	Médula espinal	Músculos flexores de las piernas	Andar
<i>Fascículo reticuloespinal medial</i>	Formación reticular bulbar	Médula espinal	Músculos extensores de las piernas	Andar
<i>Fascículo corticoespinal ventral</i>	Región de la corteza motora que controla el tronco corporal y la parte superior de las extremidades inferiores	Médula espinal	Manos (no los dedos), parte inferior de las extremidades superiores	Locomoción y postura

Las neuronas de la corteza motora primaria controlan los movimientos a partir de dos grupos de vías: el lateral y el ventromedial (según la parte de la médula espinal por la que pasen, así se divide). Las vías del grupo lateral son el fascículo corticoespinal lateral, el fascículo corticobulbar y el fascículo rubroespinal; el grupo espinal, por su parte, está formado por el fascículo vestibuloespinal, el fascículo tectoespinal, el fascículo reticuloespinal y el fascículo corticoespinal ventral o anterior.

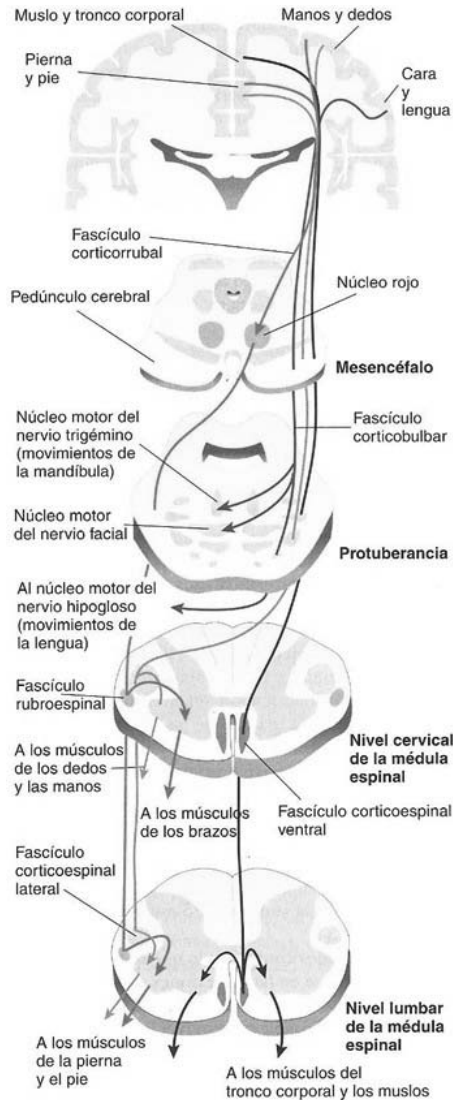
a) Fascículo corticoespinal

El fascículo corticoespinal (tanto el lateral como el ventral) está formado por los axones de neuronas corticales que van a terminar en la sustancia gris de la médula espinal. La mayor parte de los cuerpos neuronales de estas neuronas se encuentra en la corteza motora primaria, pero, además de éstas, hay neuronas del lóbulo parietal y del lóbulo temporal que envían también sus axones a través de la vía corticoespinal.

Los axones de todas estas neuronas abandonan el córtex cerebral y viajan a través de la sustancia blanca subcortical hasta el mesencéfalo ventral. Allí entran en los pedúnculos cerebrales y salen a nivel del bulbo raquídeo formando los fascículos piramidales. En el nivel caudal del bulbo van a ocurrir dos cosas: La primera es que la mayor parte de las fibras van a pasar al otro lado en la decusación piramidal y descienden por la parte contralateral de la médula espinal formando el fascículo corticoespinal lateral; la segunda es que el resto de las fibras no cruzan en la decusación y descienden por la médula espinal ipsilateral formando el fascículo corticoespinal ventral.

Fascículo corticoespinal lateral: Desciende por los cordones laterales de la médula espinal y va terminando a diferentes niveles (dependiendo del músculo al que vaya) en la zona ventral contralateral de la sustancia gris de la médula espinal, y termina haciendo sinapsis, bien directamente o a través de interneuronas, con las neuronas motoras de la parte lateral del asta ventral de la sustancia gris de la médula espinal. Estas motoneuronas, a su vez, envían sus axones hasta los músculos de los dedos, de las manos y de los brazos, y así van a controlar los movimientos de esas partes del cuerpo de tal manera que es función del fascículo corticoespinal lateral coger y manipular los objetos.

Fascículo corticoespinal ventral: Las fibras que forman el fascículo corticoespinal ventral también van descendiendo por la médula espinal y van acabando en la zona ventral ipsilateral de la médula. Estas fibras se dividen y envían botones terminales a ambos lados de la sustancia gris haciendo sinapsis con neuronas motoras, las cuales a su vez envían sus axones a los músculos de la parte superior de las extremidades inferiores. También las envían a todos los músculos del tronco del cuerpo y así es función de esta vía la locomoción y la postura.



Grupo lateral de fascículos motores descendentes

b) Fascículo corticobulbar

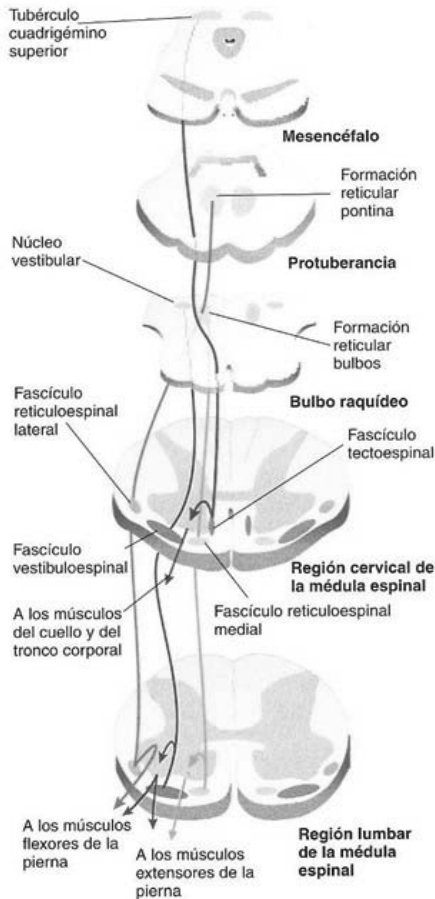
Se origina en la región de la corteza motora que controla la cara, sigue el camino de la anterior y va a terminar en los núcleos motores de los siguientes nervios craneales: trigémino (IV), facial (VII), glossofaríngeo (IX), vago (X), espinal (XI) e hipogloso (XII). Cuando termina en esos núcleos motores hace sinapsis con una motoneurona cuyo axón va a terminar en los músculos de la cara, del cuello, de la lengua y una parte de los músculos oculares externos. Así, esta vía controla

los movimientos de la cara, del cuello, de la lengua y de los músculos externos de los ojos.

c) Fascículo rubroespinal

Esta vía se origina en el núcleo rojo del mesencéfalo y termina en la médula espinal. El núcleo rojo recibe aferencias de la corteza motora a través del fascículo corticobulbar. Los axones de la vía rubroespinal terminan haciendo sinapsis con motoneuronas de la médula espinal, que controlan a los músculos de las manos (no de los dedos, que son controlados por la vía corticoespinal), los músculos de la parte inferior de las extremidades superiores y la parte inferior de las extremidades inferiores. Esta vía, por lo tanto, controla los movimientos de los antebrazos y de las manos, que son independientes de los movimientos del tronco del cuerpo.

d) Otras vías del grupo ventromedial



Grupo ventromedial de fascículos motores descendentes

Las vías que vamos a explicar se originan en el tronco encefálico y todas ellas van a terminar en la zona ventromedial de la médula espinal: fascículo vestibuloespinal, fascículo tectoespinal y fascículo reticuloespinal.

Las neuronas de todas estas vías reciben aferencias de las regiones de la corteza motora que controla los movimientos del tronco y los movimientos de los músculos proximales (aquellos músculos que están en las extremidades próximos a los músculos del tronco). Además, la formación reticular recibe aferencias de la corteza premotora y de varias regiones subcorticales entre las que se encuentran la amígdala, el hipotálamo y los ganglios basales.

e) Fascículo vestibuloespinal

Se origina en los núcleos vestibulares y termina en la médula. Los cuerpos celulares de las neuronas que forman esta vía se encuentran en los núcleos vestibulares del tronco encefálico y la vía va a terminar a la sustancia gris de la médula espinal.

Esta vía controla los músculos del tronco y de las piernas, y sus movimientos. Su función es controlar la postura en respuesta a la información que recibe del sistema vestibular.

f) Fascículo tectoespinal

Esta vía es un conjunto de axones que viajan desde el tectum (tubérculos cuadrigéminos) hasta la médula espinal. Los cuerpos celulares de las neuronas de esta vía se localizan en los tubérculos cuadrigéminos superiores. Esta vía controla los músculos del cuello y del tronco del cuerpo, e intervienen en la coordinación de los movimientos de la cabeza y del tronco con los movimientos de los ojos.

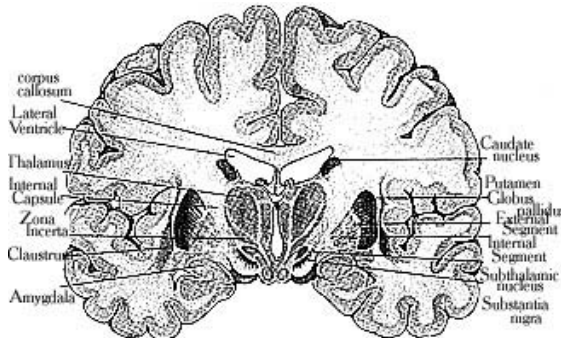
g) Fascículo reticuloespinal

Son un haz de fibras que viajan desde la formación reticular hasta la sustancia gris de la médula espinal. Los cuerpos celulares de las neuronas que forman esta vía se hallan en muchos núcleos del tronco encefálico y de la formación reticular mesencefálica. Estas neuronas controlan varias funciones automáticas (reflejos) como el tono muscular, el toser y el estornudar; pero además de estas funciones automáticas, estas vías intervienen también en el control de conductas que están directamente bajo el control del neocórtex cerebral como es el andar.

Se divide en dos ramas: el fascículo reticuloespinal lateral, que controla los músculos flexores de las piernas y así contribuye al andar; y el fascículo reticuloespinal medial, que controla los músculos extensores de las piernas participando en el control del andar.

5.4. FUNCIONES MOTORAS DE LOS GANGLIOS BASALES

Los ganglios basales son núcleos de sustancia gris que están enterrados en la sustancia blanca del subcórte. Los ganglios basales con funciones motoras son el caudado, el putamen y el globo pálido. Éstos son una parte muy importante del sistema motor del cerebro y cuando se lesionan producen deficiencias motoras muy graves (Parkinson, Huntington).



Ganglios basales

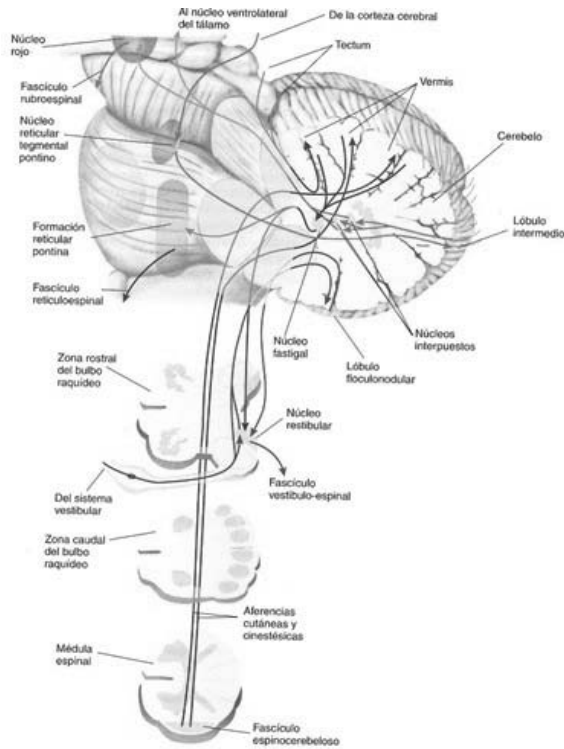
Los ganglios basales reciben aferencias de toda la corteza cerebral, particularmente de la corteza motora primaria y de la corteza somatosensorial primaria. También reciben aferencias de la sustancia negra del mesencéfalo ventral.

Los ganglios basales envían dos tipos de eferencias principales; en primer lugar, las eferencias que van a la corteza motora primaria, al área motora suplementaria y, a través del tálamo, a la corteza motora; y en segundo lugar, las eferencias que manda a los núcleos motores del tronco del encéfalo que contribuyen a las vías ventromediales. Mediante estas eferencias los ganglios basales influyen en los movimientos controlados por la corteza motora primaria y ejercen un cierto control directo sobre las vías ventromediales.

6. CONTROL CEREBELOSO DEL MOVIMIENTO

El cerebelo es una parte importante del sistema motor. En realidad es como un coordinador de todos los otros mecanismos responsables del movimiento. Recibe aferencias de diferentes regiones que aportan información necesaria para regular adecuadamente los movimientos y, a su vez, envía también eferencias a las regiones cerebrales del sistema nervioso implicadas en los movimientos. Todas esas aferencias y todas esas eferencias forman como grandes circuitos neurológicos que

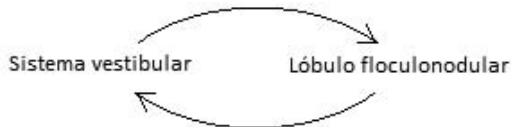
pasan por el cerebro. Los científicos postulan la existencia de tres grandes circuitos cerebelosos que recogen esas aferencias y eferencias.



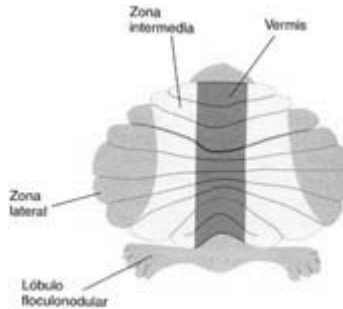
Vías motoras cerebelosas

6.1. LÓBULO FLOCULONODULAR

El lóbulo floculonodular recibe aferencias del sistema vestibular que le manda información sobre la postura y el equilibrio. Además, procesa la información que ha recibido y para que nuestra postura y equilibrio sean mejores proyecta axones a los nervios vestibulares; de esta manera se restablece la postura correcta.

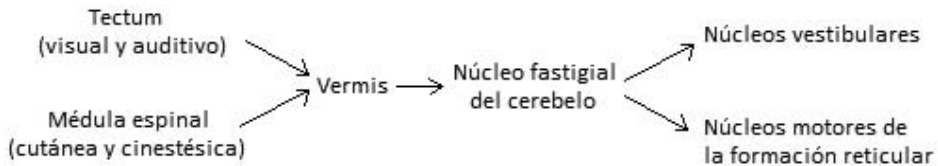


6.2. VERMIS



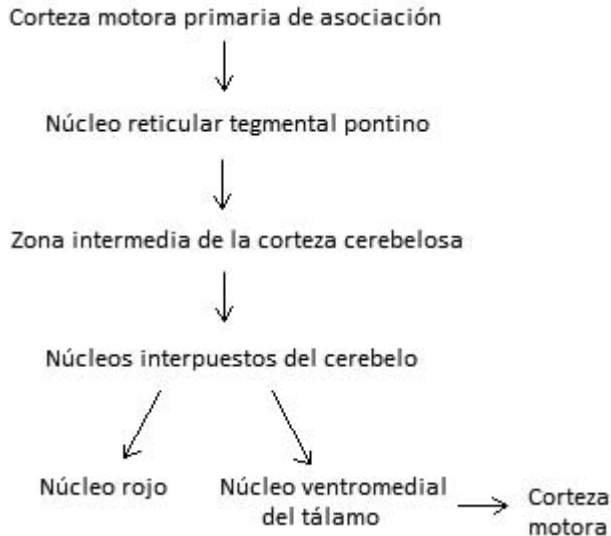
Vista dorsal de la corteza cerebelosa

El vermis, situado en la línea media del cerebelo, recibe información auditiva y visual del tectum. Por otro lado, la médula espinal envía información cutánea y cinestésica también al vermis del cerebelo. El vermis transmite esa información a través de eferencias al núcleo fastigial. Las neuronas del núcleo fastigial remiten sus axones a varios lugares diferentes: por un lado a los núcleos vestibulares; por otro lado a los núcleos motores de la formación reticular. De esta manera, a través de este circuito, las neuronas del cerebelo controlan la conducta mediante los fascículos vestibuloespinal y reticuloespinal.



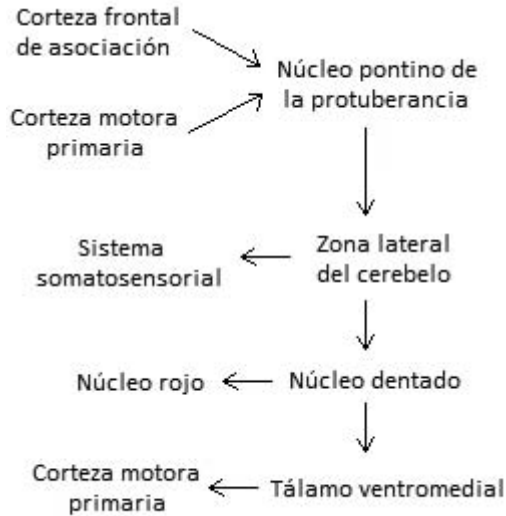
6.3. CORTEZA CEREBELOSA

El resto de la corteza cerebelosa (zona intermedia y lateral) recibe la mayor parte de sus aferencias desde la corteza cerebral.



El circuito se origina con las aferencias que la corteza motora primaria y la corteza de asociación envían a la zona intermedia de la corteza cerebelosa a través del núcleo reticular pontino. Ahí la zona intermedia procesa la información y, en función del contenido, manda a su vez proyecciones a los núcleos del interior del cerebelo, los cuales a su vez envían proyecciones por un lado al núcleo rojo, y de esa manera la zona intermedia de la corteza cerebelosa controla el sistema rubroespinal (control de los movimientos de brazos y piernas); pero además los núcleos interpuestos envían proyecciones al núcleo ventrolateral del tálamo, el cual envía a su vez proyecciones a la corteza motora.

El segundo bucle del circuito se origina en la corteza frontal de asociación y en la corteza motora primaria, que envían aferencias hasta la zona lateral del cerebelo pasando por el núcleo pontino de la protuberancia. Así, la zona lateral de la corteza cerebelosa interviene en el control de los movimientos independientes de las extremidades, especialmente de los movimientos rápidos de precisión. Estos movimientos los inician las neuronas de la corteza frontal de asociación, las cuales a su vez controlan las neuronas de la corteza motora primaria.



A pesar de que la corteza motora es la que planifica e inicia esos movimientos, no tiene los circuitos necesarios para automatizar las secuencias complejas y exactamente programadas de las contracciones musculares que intervienen en esos movimientos rápidos de precisión. Por esa razón recurre al cerebelo que es el que asume esa automatización. Además, la zona lateral del cerebelo, recibe información somatosensorial sobre la posición actual y sobre la frecuencia de los movimientos de las extremidades. Esta información es necesaria para analizar los detalles de un movimiento de tal manera que ocurre lo siguiente: en primer lugar, la corteza motora empieza el movimiento; en segundo lugar, la zona lateral de la corteza del cerebelo es informada del inicio de ese movimiento y calcula la contribución de cada músculo a ese movimiento; en tercer lugar, los resultados de ese cálculo son enviados al núcleo del dentado cuyas neuronas transmiten esa información al tálamo ventrolateral, el cual la proyecta a la corteza motora primaria. De esta manera el cerebelo puede modificar un movimiento en curso que había sido iniciado por la corteza cerebral.

Además la zona lateral de la corteza cerebelosa envía proyecciones al núcleo rojo y así la corteza lateral del cerebelo controla los movimientos independientes de las extremidades a través del sistema rubroespinal. Aparte de esto, dicha zona lateral de la corteza cerebelosa, recibe también información desde los lóbulos frontales sobre los movimientos inminentes (ya programados y hechos las secuencias), de modo que el cerebelo contribuye a modular e integrar esos movimientos que estamos a punto de empezar mediante sus conexiones con la corteza motora primaria y el núcleo rojo a través del núcleo dentado y del tálamo ventral.

Cuando los sujetos humanos sufren daño en el cerebelo, sus movimientos se vuelven convulsivos, erráticos y descoordinados. Los síntomas son diferentes según la zona del cerebelo que este dañado:

Cuando las lesiones están en el lóbulo floculo modular ó vermis, la persona presenta alteraciones en el control de la postura o en el equilibrio.

Cuando las lesiones están en la zona intermedia de la corteza cerebelosa, las personas presentan déficits en los movimientos controlados por el sistema rubroespinal y además pueden presentar también rigidez en las extremidades.

Cuando las personas presentan lesiones en la corteza lateral del cerebelo, las personas presentan debilidad en sus movimientos y descomposición de ellos. Las lesiones aquí, parecen también alterar la secuenciación temporal de los movimientos y es que el cerebelo calcula el tiempo que cada músculo debe estar activo en un movimiento, y cuando ha transcurrido ese tiempo, activa a los músculos antagonistas para detener ese movimiento.

El cerebelo es el responsable de la duración de los movimientos rápidos y a través del aprendizaje motor aprendemos esa programación y nos salen ya esos movimientos de forma automática. Por ejemplo, tanto un relojero como un cirujano tienen que realizar movimientos muy precisos para sus profesiones, pero para ello tienen que practicar y, una vez hayan practicado lo suficiente, podrán realizar los movimientos pertinentes de manera automática.

Parece ser que el cerebelo también interviene en la integración de secuencias sucesivas de movimientos que han de ejecutarse uno después de otro.

7. CONTRIBUCIÓN DE LA FORMACIÓN RETICULAR

La formación reticular está formada por muchos núcleos de la parte central del bulbo de la protuberancia y del mesencéfalo. Esos núcleos motores de la formación reticular controlan la actividad motora siguiente:

- Controlan la actividad del sistema motor gamma y por tanto el tono muscular.
- Controlan varios núcleos que están en la protuberancia y en el bulbo y además, se encargan de las funciones motoras específicas como respuestas automáticas o semiautomáticas, tales como respirar, estornudar, toser o vomitar.
- Interviene en el control de la postura a través de las vías ventromediales reticuloespinales.
- Interviene en el control de la marcha.

A parte de las anteriormente citadas, la formación reticular tiene más funciones, pero están aún en proceso de investigación.

8. BIBLIOGRAFÍA

N. Carlson, *Fisiología de la Conducta*, Madrid 2010.

W. Kahle, *Atlas de Anatomía*, Tomo III, *Sistema Nervioso y Órganos de los Sentidos*, Barcelona 2003.

E. R. Kandel, J. H. Schwartz y T. M. Jessell, *Principles of Neural Science*, Universidad de Michigan 2000.

B. Kolb y I. Q. Whishaw, *Fundamentals of Human Neuropsychology*, New York 1996.