

CONTRACCIÓN DEL MÚSCULO ESQUELÉTICO



- Aproximadamente el 40% del cuerpo es músculo esquelético, y 10% es músculo liso y cardíaco.



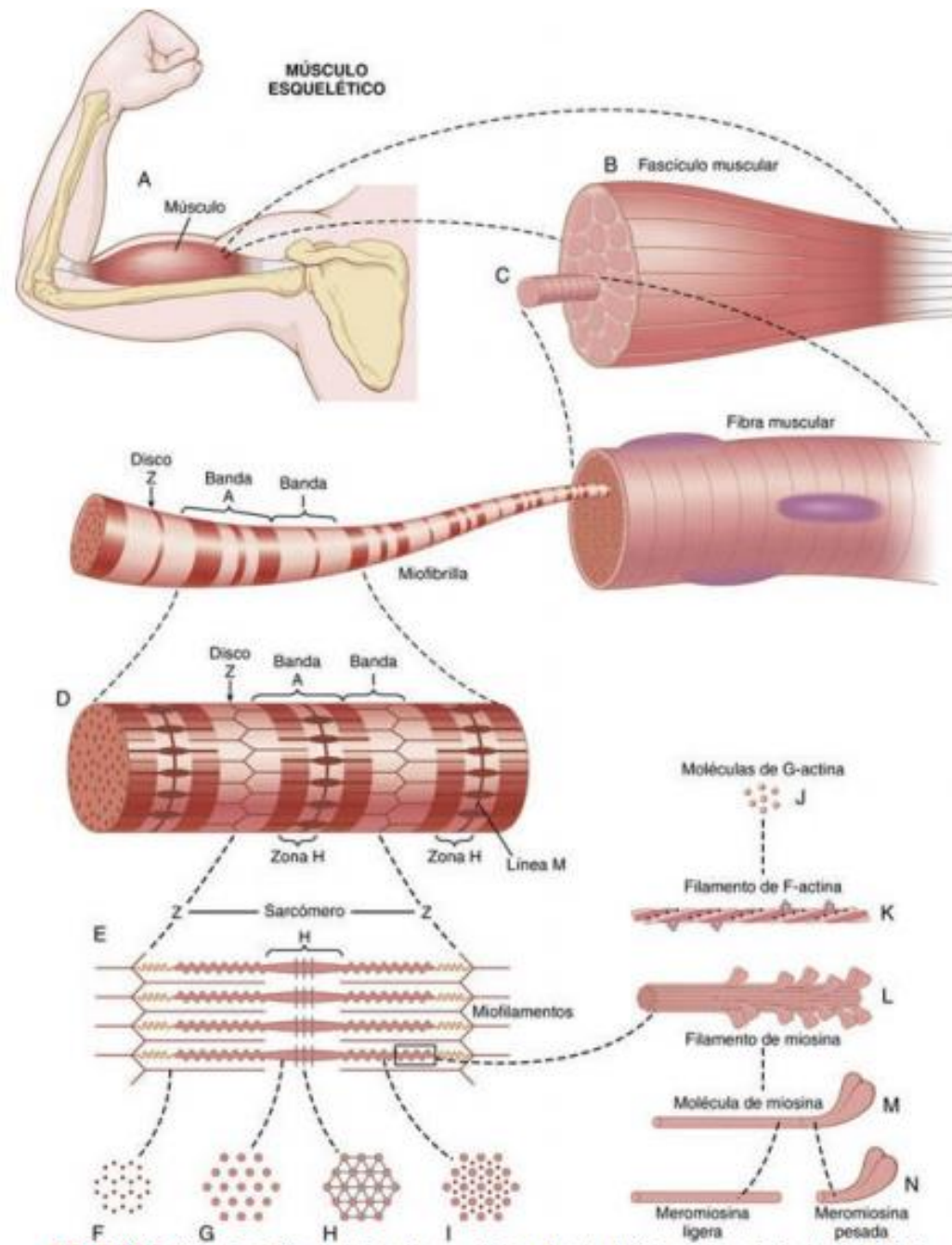
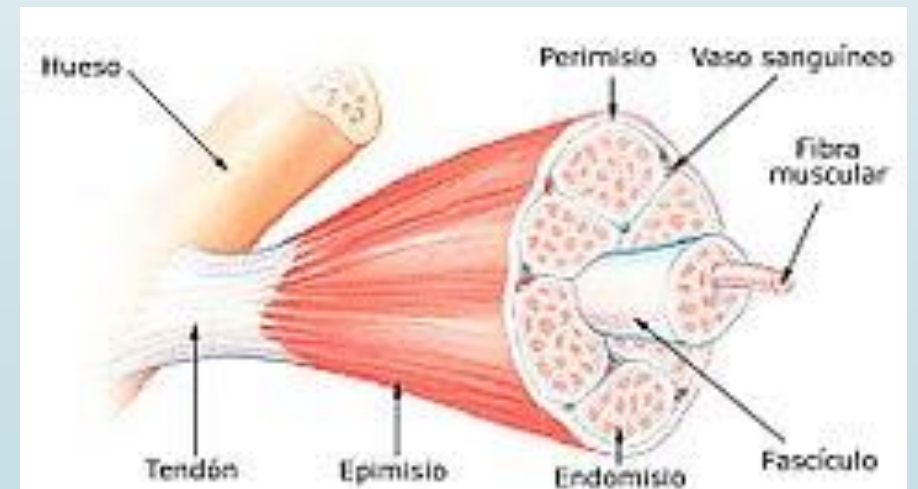
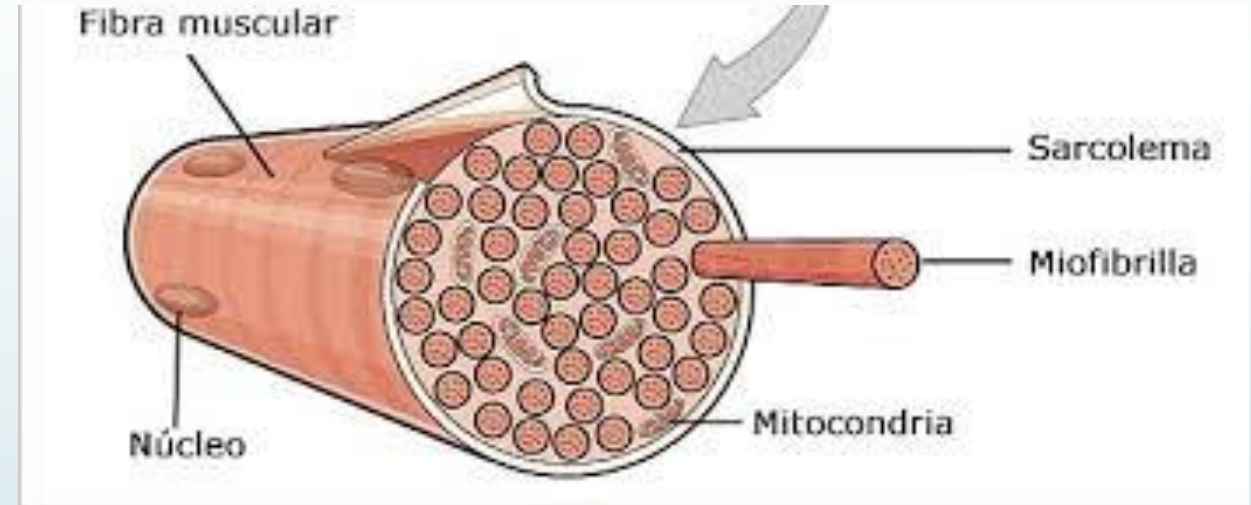


FIGURA 6-1 Organización del músculo esquelético, desde el nivel macroscópico hasta el nivel molecular. *F, G, H e I* son cortes transversales.

El sarcolema es una fina membrana que envuelve a una fibra musculoesqueletica

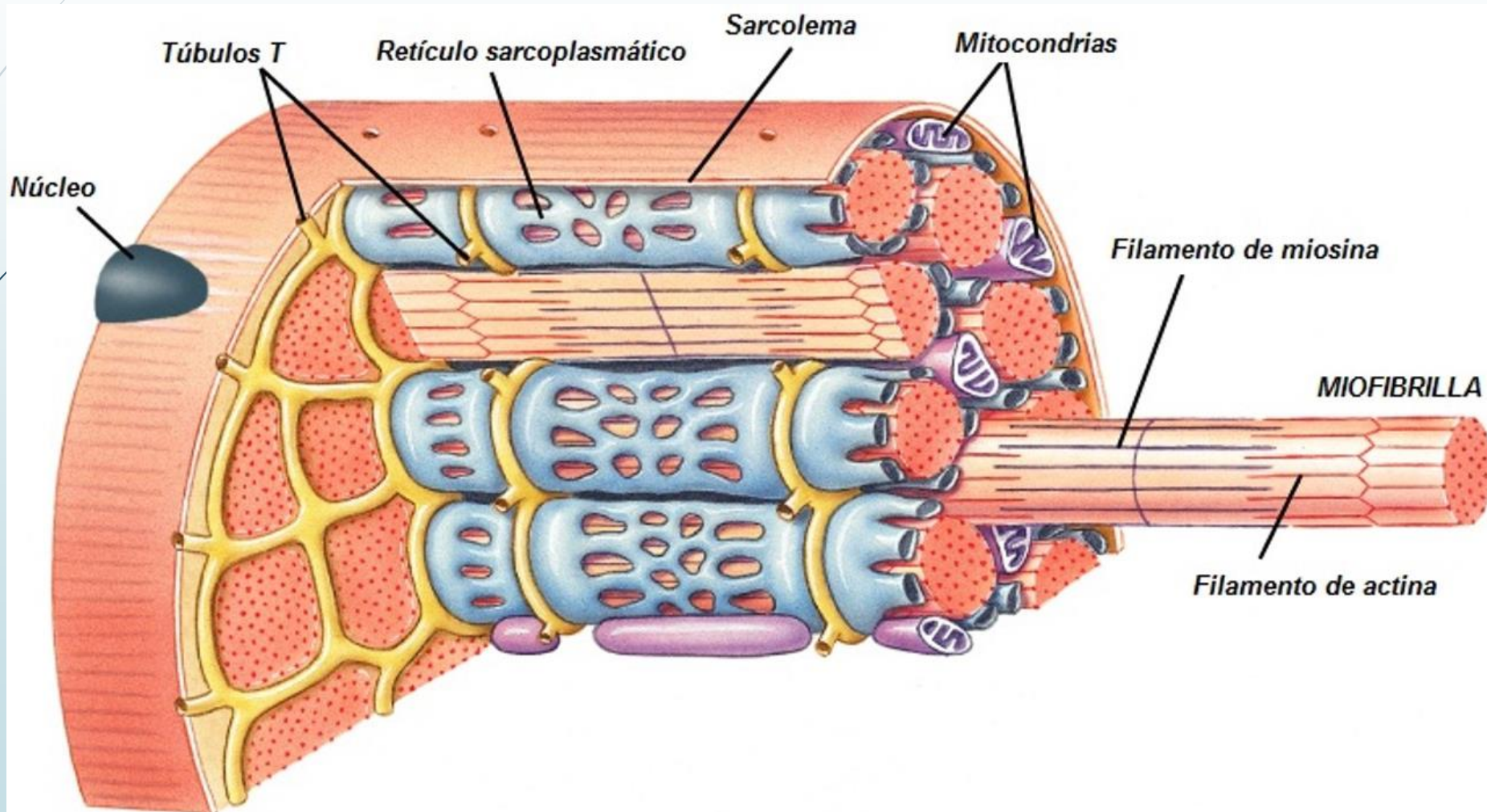
- El sarcolema está formado por una membrana celular verdadera → m. plasmática
- y una cubierta externa formada por una capa delgada de material polisacárido
- fibrillas delgadas de colágeno.
- Tendones musculares





Las miofibrillas están formadas por filamentos de actina y miosina

- Cada fibra muscular miles de *miofibrillas*, está formada por aproximadamente 1.500 *filamentos de miosina* y 3.000 *filamentos de actina*, que son grandes moléculas proteicas polimerizadas responsables de la contracción muscular real



Fibras del músculo esquelético

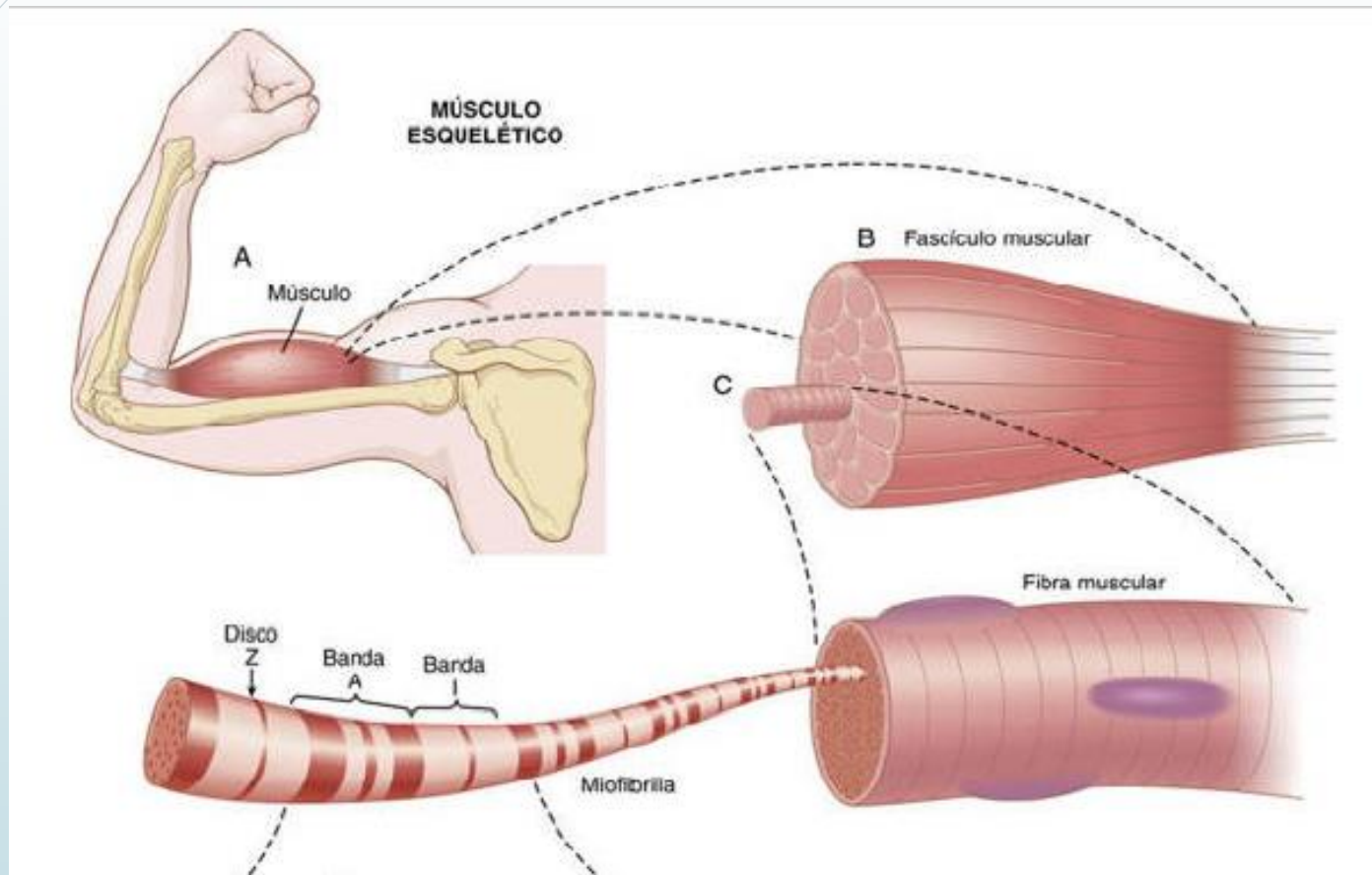
Banda A

Zona de filamentos gruesos, compuestos por proteínas de miosina.

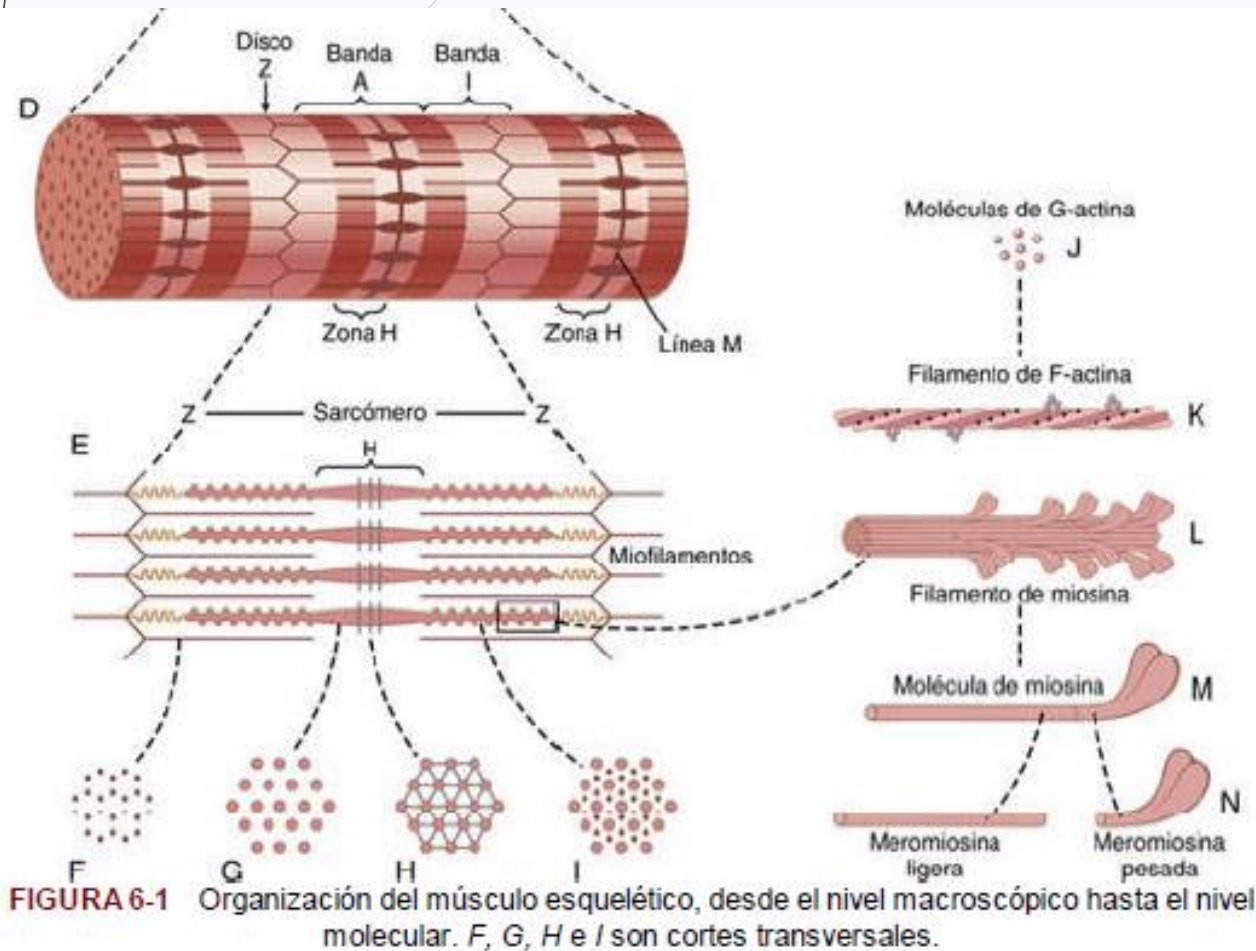
Discos Z

Son los límites entre sarcómeros adyacentes, formados por proteínas de unión a actina perpendiculares al sarcómero.

- la organización y muestra del músculo esquelético están formados por numerosas fibras cuyo diámetro varía entre 10 y 80 μm



El sarcolema es una fina membrana que envuelve a una fibra musculoesquelética



Zona H

Zona central de la banda A, sin proteínas de actina superpuestas cuando el músculo está relajado.

Línea M

Zona central formada por proteínas accesorias. Se ubican en el centro del filamento grueso de miosina, perpendicular al sarcómero.

Banda I

Zona de filamentos delgados, compuestos por proteínas de actina (sin miosina).

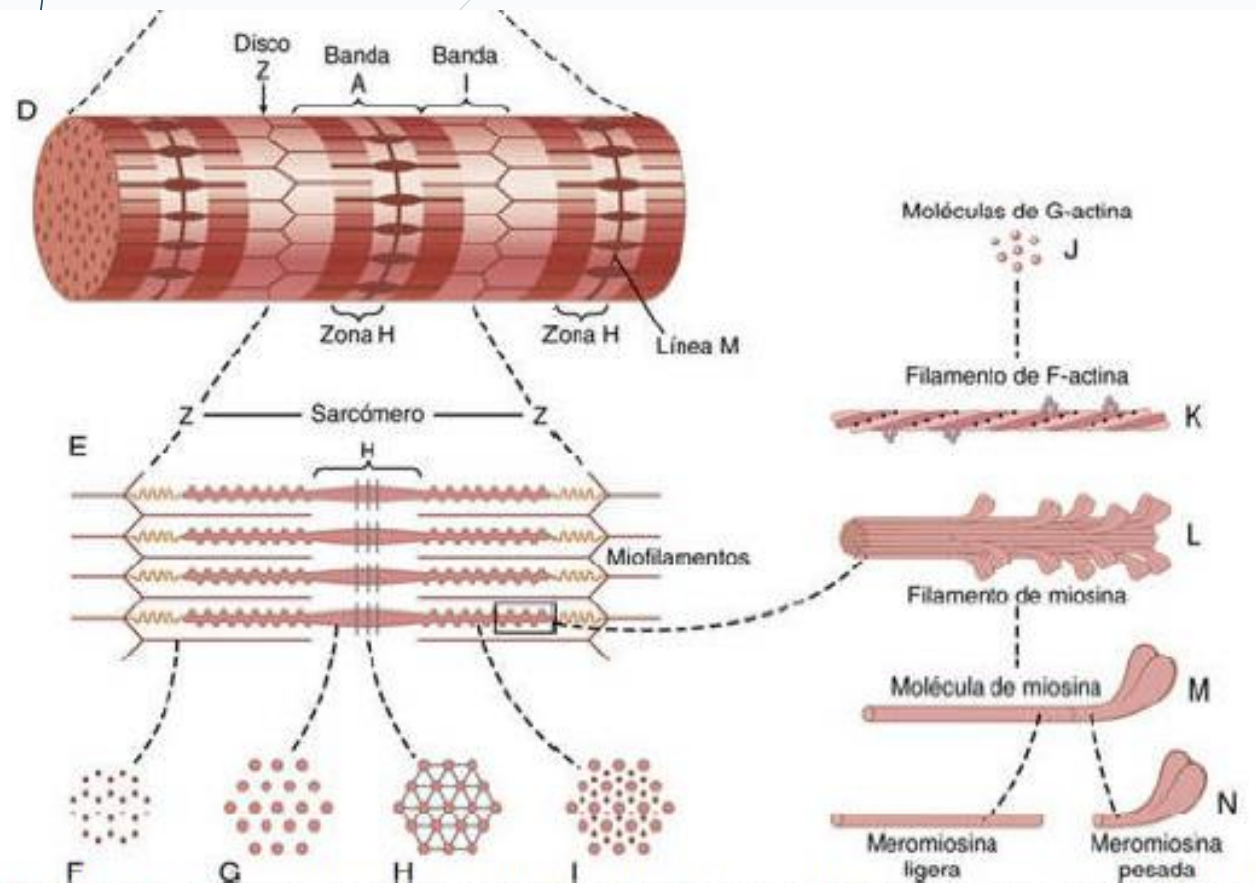
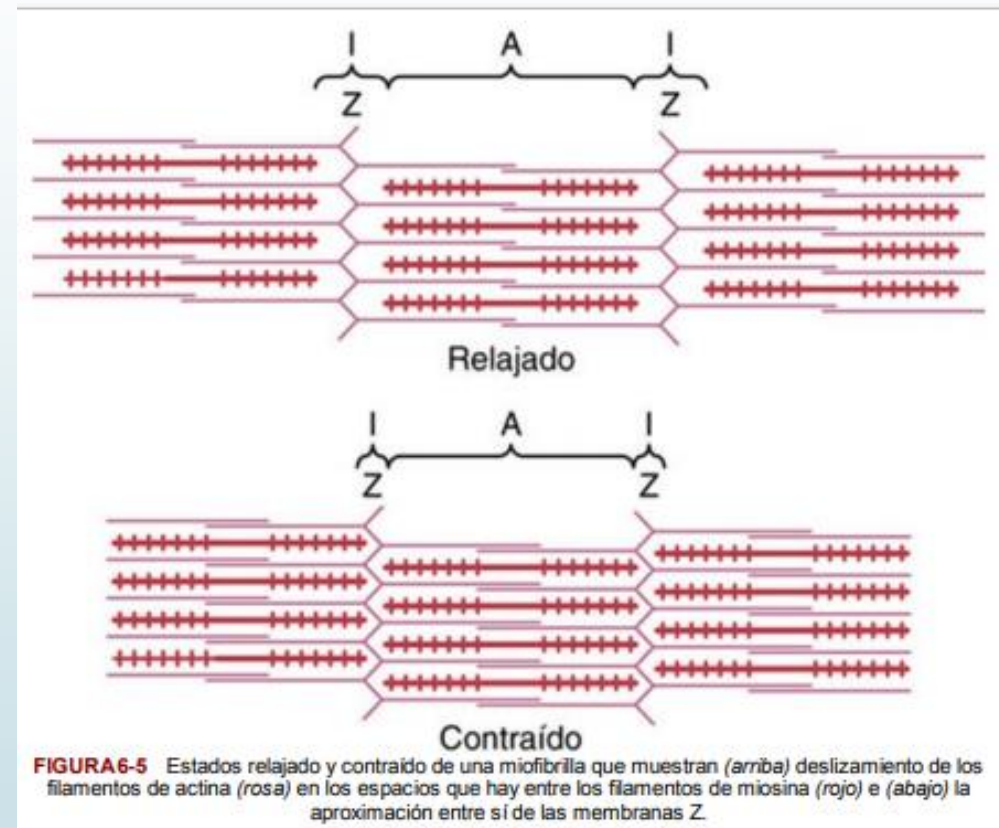


FIGURA 6-1 Organización del músculo esquelético, desde el nivel macroscópico hasta el nivel molecular. *F, G, H e I* son cortes transversales.

- Los extremos de los filamentos de actina están unidos al disco Z.
- Desde este disco estos filamentos se extienden en ambas direcciones para interdigitarse con los filamentos de miosina.
- El disco Z, atraviesa las miofibrillas y también pasa desde unas miofibrillas a otras, uniéndolas entre sí a lo largo de toda la longitud de la fibra muscular.

La porción de la miofibrilla (o de la fibra muscular entera) que está entre dos discos Z sucesivos se denomina sarcómero.

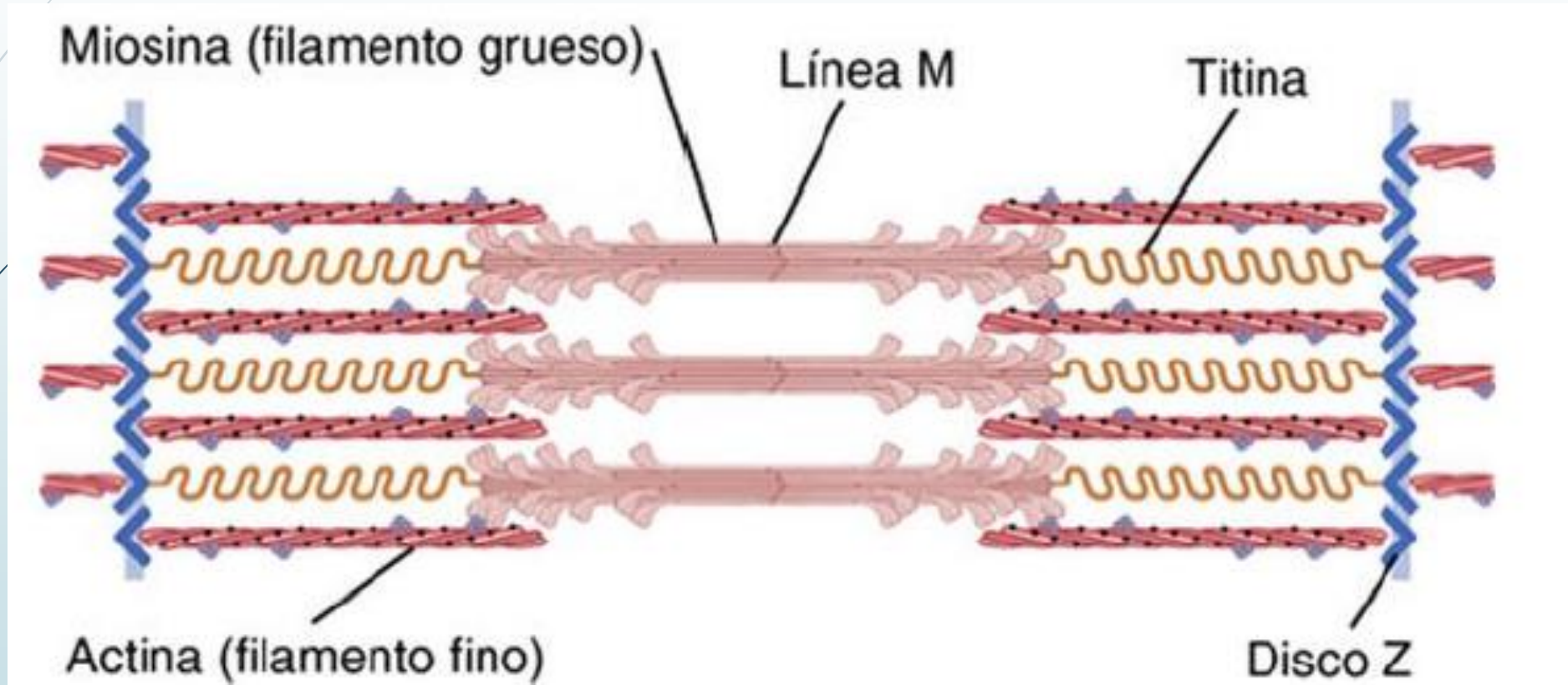
Cuando la fibra muscular está contraída. Cuando el sarcómero tiene esta longitud, los filamentos de actina se superponen completamente con los filamentos de miosina y las puntas de los filamentos de actina están comenzando ya a superponerse entre sí.





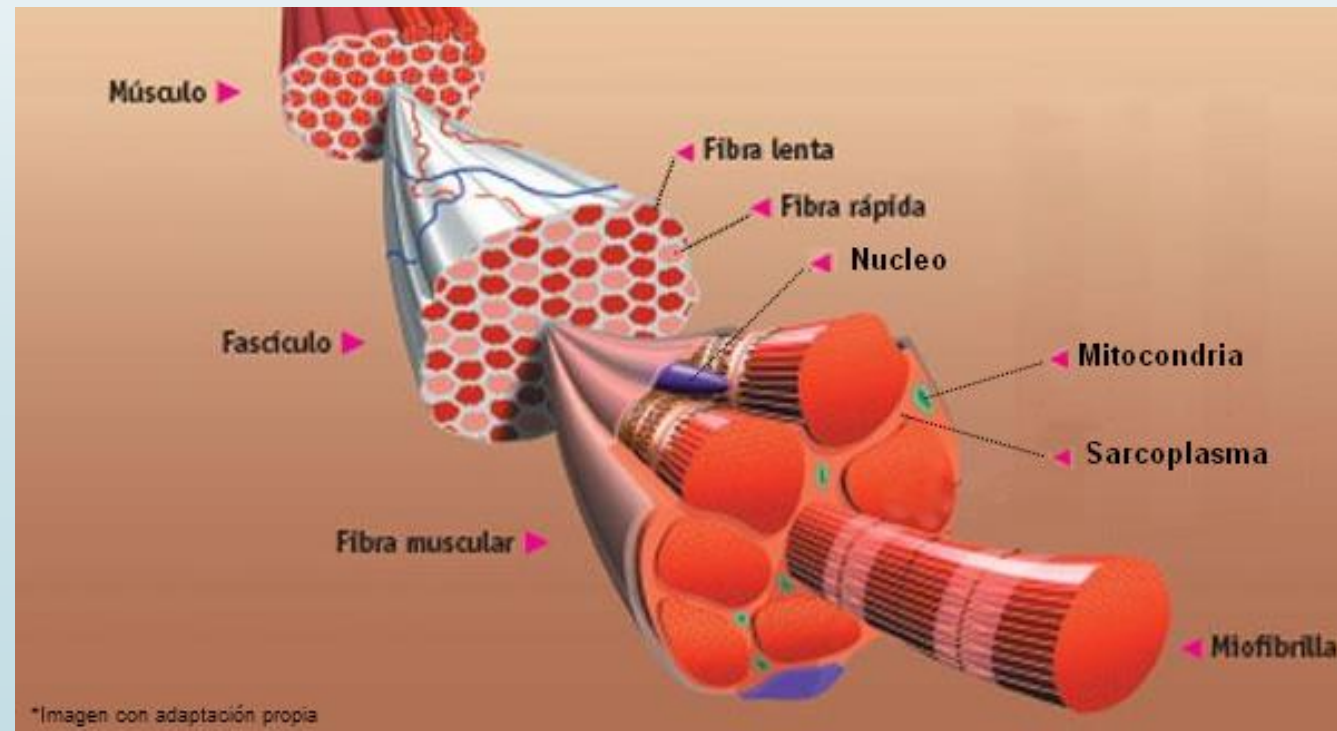
Las moléculas filamentosas de titina mantienen en su lugar los filamentos de miosina y actina

- ▶ los filamentos de miosina y de actina se mantiene por medio de un gran número de moléculas filamentosas de una proteína denominada *titina*
- ▶ Cada molécula de titina tiene un peso molecular de aproximadamente 3 millones, lo que hace que sea una de las mayores moléculas proteicas del cuerpo. Es muy elástica
- ▶ mantiene en su posición los filamentos de miosina y de actina, de modo que funcione la maquinaria contráctil del sarcómero.



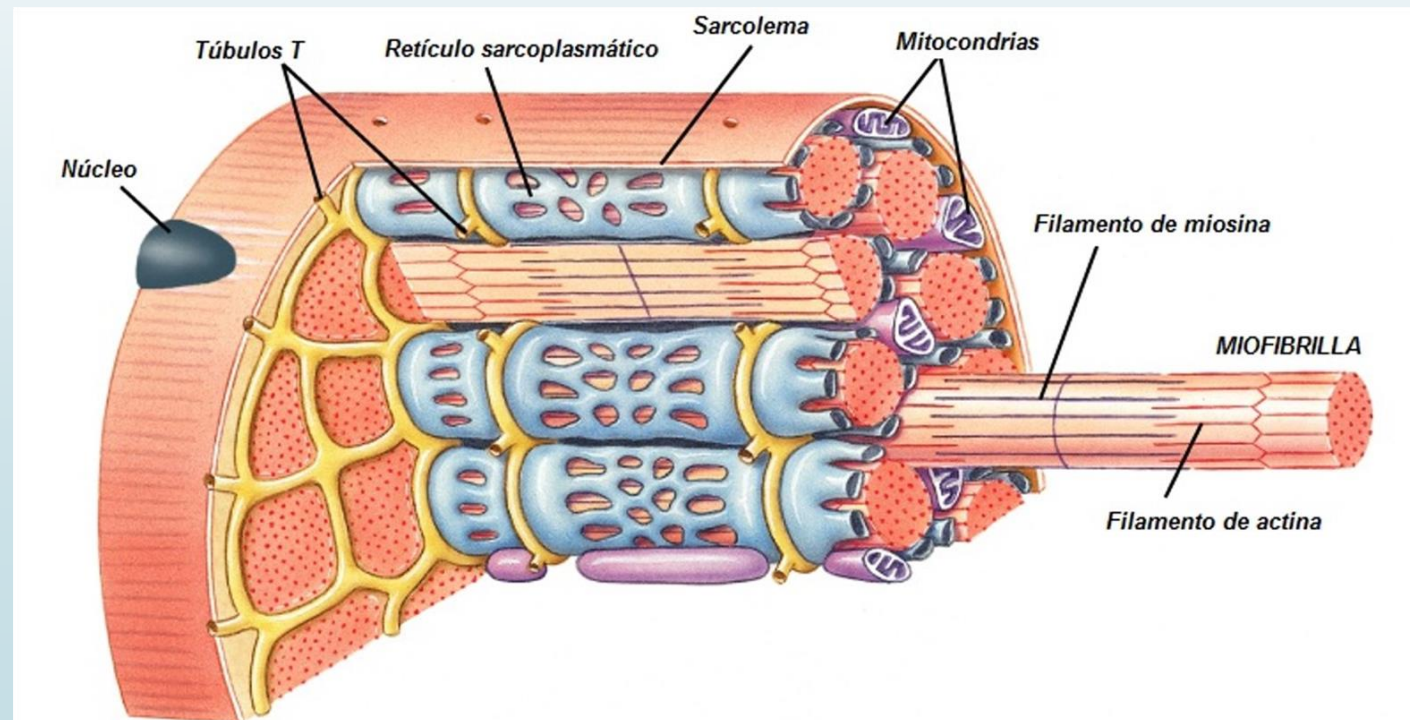
El sarcoplasma es un fluido intracelular entre las miofibrillas

- ▶ Los espacios entre las miofibrillas están llenos de un líquido intracelular denominado *sarcoplasma*
- ▶ contiene grandes cantidades de potasio, magnesio y fosfato, además de múltiples enzimas proteicas y mitocondrias



El retículo sarcoplásmico

- ▶ En el sarcoplasma que rodea a las miofibrillas de todas las fibras musculares también hay un extenso retículo → retículo sarcoplásmico
- ▶ Este retículo tiene una organización especial que es muy importante para regular el almacenamiento, la liberación y la recaptación de calcio, y por tanto para controlar la contracción muscular



Mecanismo general de la contracción muscular

El inicio y la ejecución de la contracción muscular se producen en las siguientes etapas secuenciales:

- 1. Un potencial de acción viaja a lo largo de una fibra motora hasta sus terminales sobre las fibras musculares.
- 2. En cada terminal, el nervio secreta una pequeña cantidad de la sustancia neurotransmisora *acetilcolina*.
- 3. La acetilcolina actúa en una zona local de la membrana de la fibra muscular para abrir múltiples canales de cationes «activados por acetilcolina» a través de moléculas proteicas que flotan en la membrana.

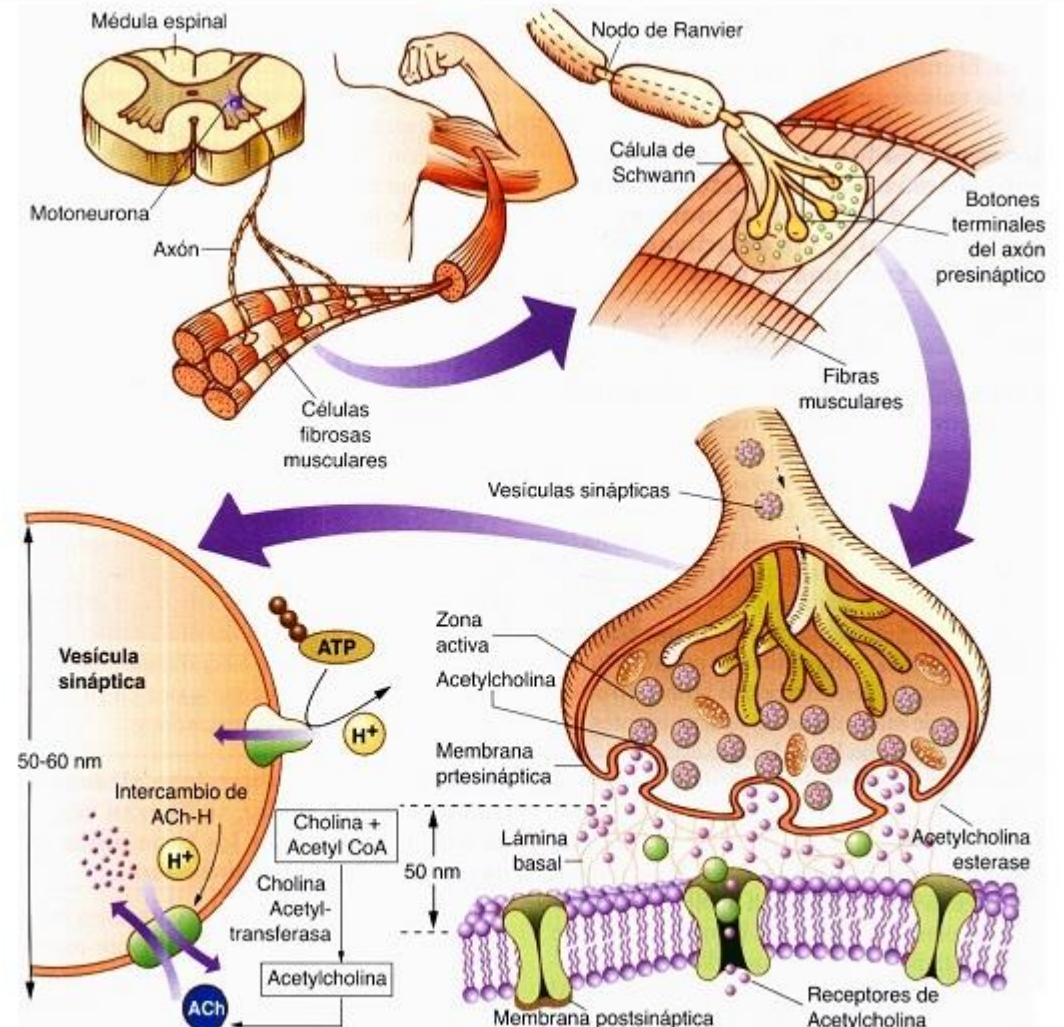
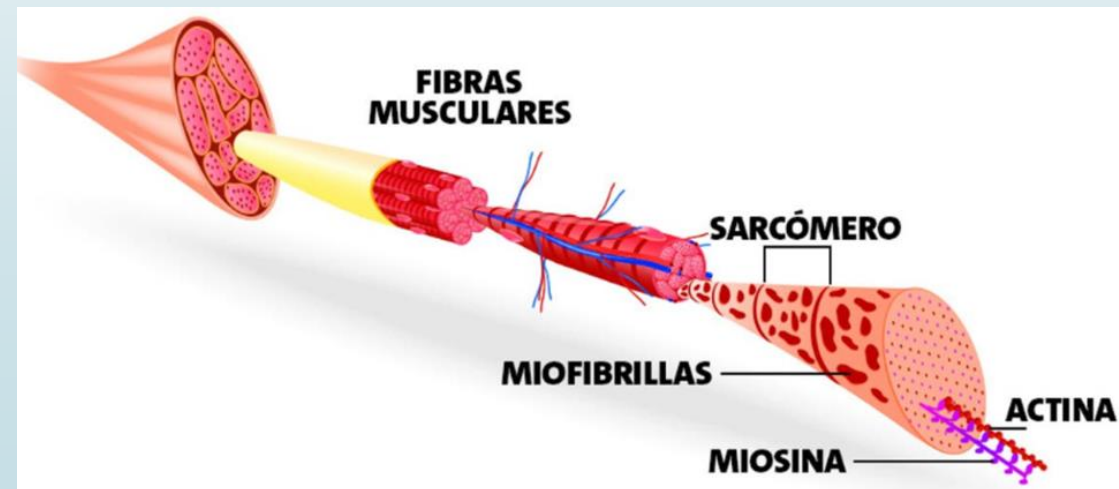
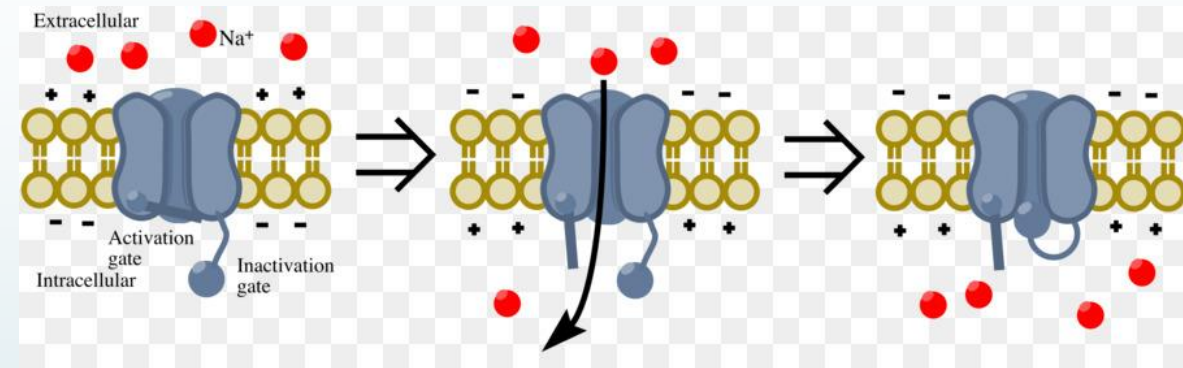
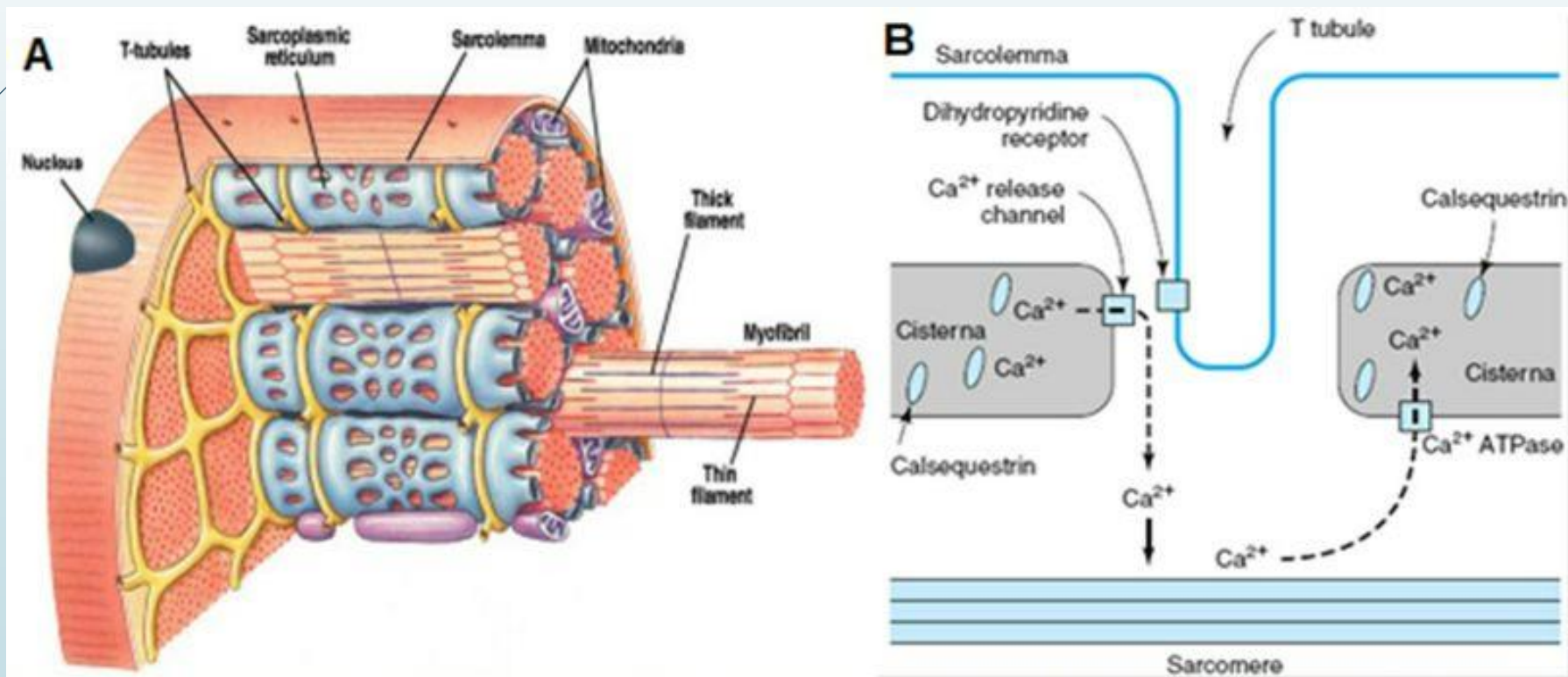


Figura 2. Esquema de la unión neuromuscular. Se describen los detalles de síntesis y liberación del neurotransmisor acetilcolina. Tomado de: Chicharro López, J. & Fernández Vaquero, A. Fisiología del Ejercicio. Madrid: Ed Médica Panamericana, 2006

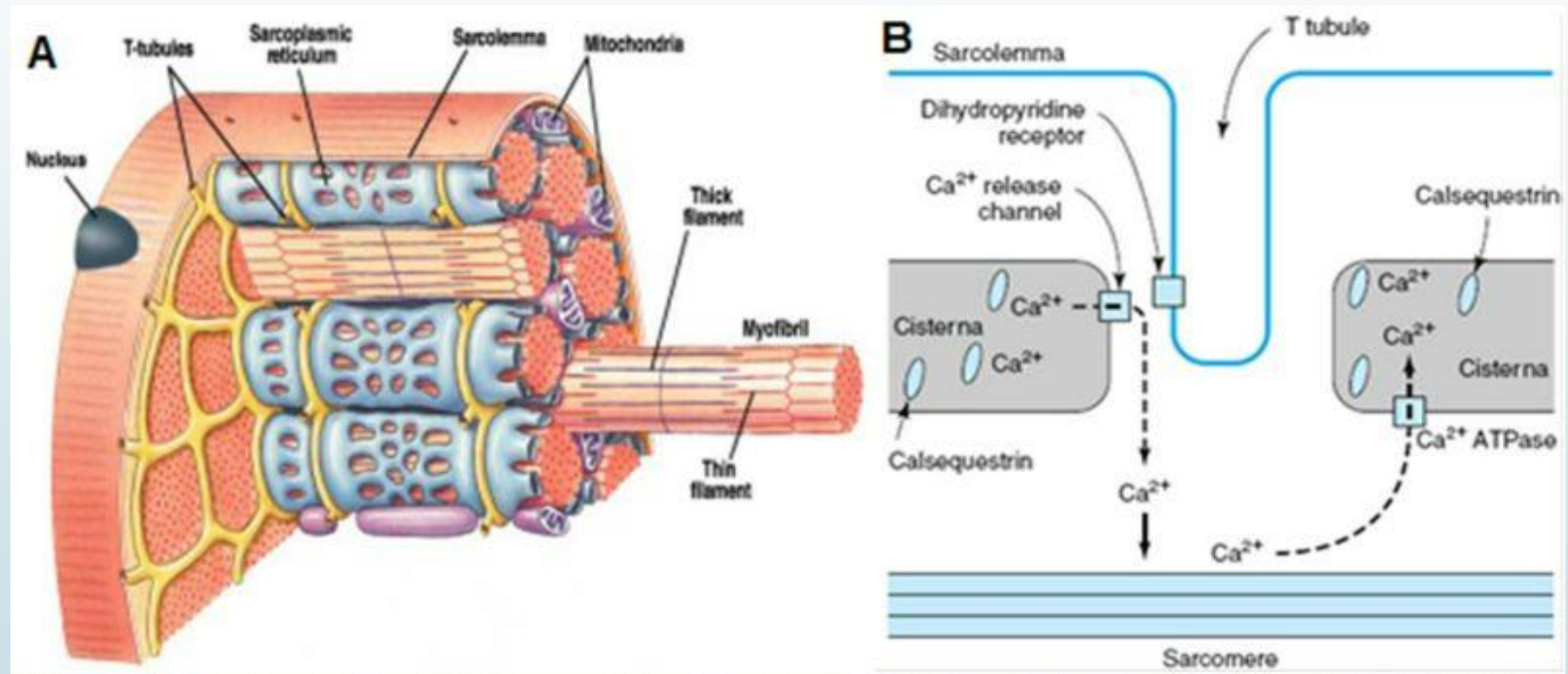
- 4. La apertura de los canales activados por acetilcolina permite que grandes cantidades de iones sodio difundan hacia el interior de la membrana de la fibra muscular. Esta acción provoca una despolarización local que, a su vez, conduce a la apertura de los canales de sodio activados por el voltaje, que inicia un potencial de acción en la membrana.
- 5. El potencial de acción viaja a lo largo de la membrana de la fibra muscular



- 6. El potencial de acción despolariza la membrana muscular, y buena parte de la electricidad del potencial de acción fluye a través del centro de la fibra muscular, donde hace que el retículo sarcoplásmico libere grandes cantidades de iones calcio que se han almacenado en el interior de este retículo.
- 7. Los iones calcio inician fuerzas de atracción entre los filamentos de actina y miosina, haciendo que se deslicen unos sobre otros en sentido longitudinal, lo que constituye el proceso contráctil.

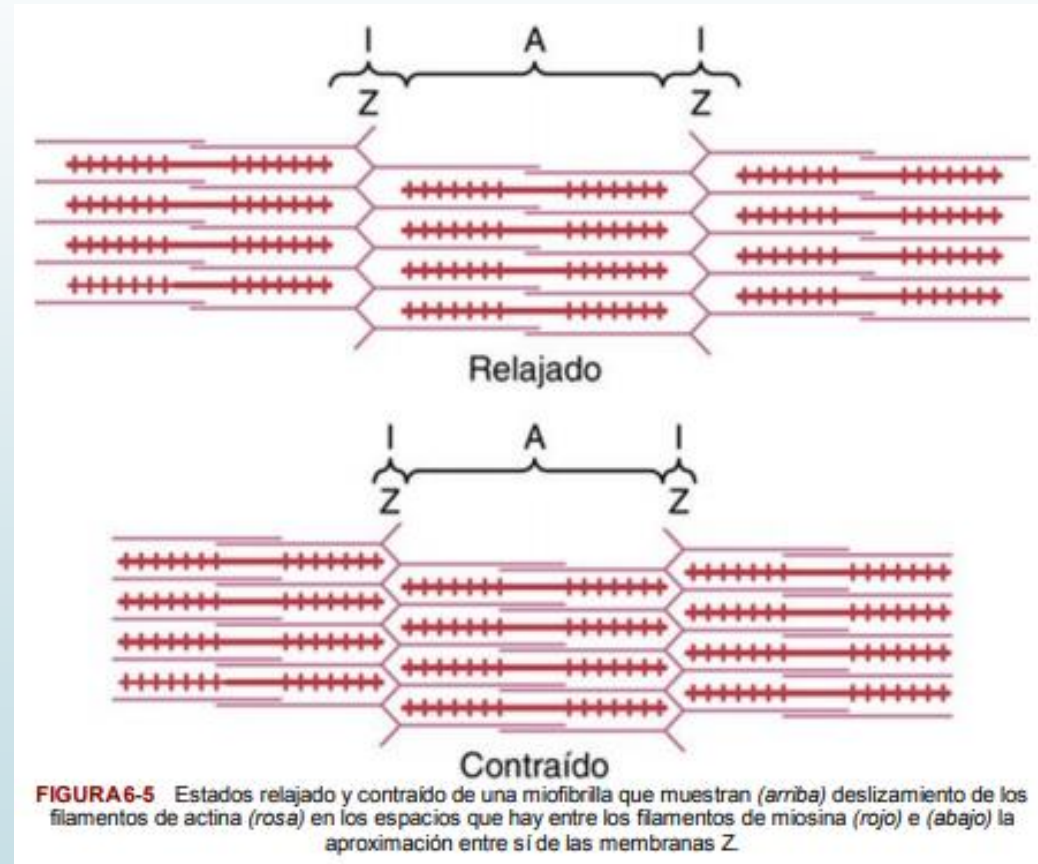


- 8. Después de una fracción de segundo los iones calcio son bombeados de nuevo hacia el retículo sarcoplásmico por una bomba de Ca^{++} de la membrana y permanecen almacenados en el retículo hasta que llega un nuevo potencial de acción muscular; esta retirada de los iones calcio desde las miofibrillas hace que cese la contracción muscular.



Mecanismo molecular de la contracción muscular

- ▶ La contracción muscular se produce por un mecanismo de deslizamiento de los filamentos.
- ▶ En el estado relajado, los extremos de los filamentos de actina que se extienden entre dos discos Z sucesivos apenas comienzan a superponerse entre sí.
- ▶ En el estado contraído estos filamentos de actina han sido traccionados hacia dentro entre los filamentos de miosina, de modo que sus extremos se superponen entre sí en su máxima extensión.
- ▶ Además, los discos Z han sido traccionados por los filamentos de actina hasta los extremos de los filamentos de miosina.



Características moleculares de los filamentos contráctiles

- Los filamentos de miosina están compuestos por múltiples moléculas de miosina

200 a mas moléculas individuales

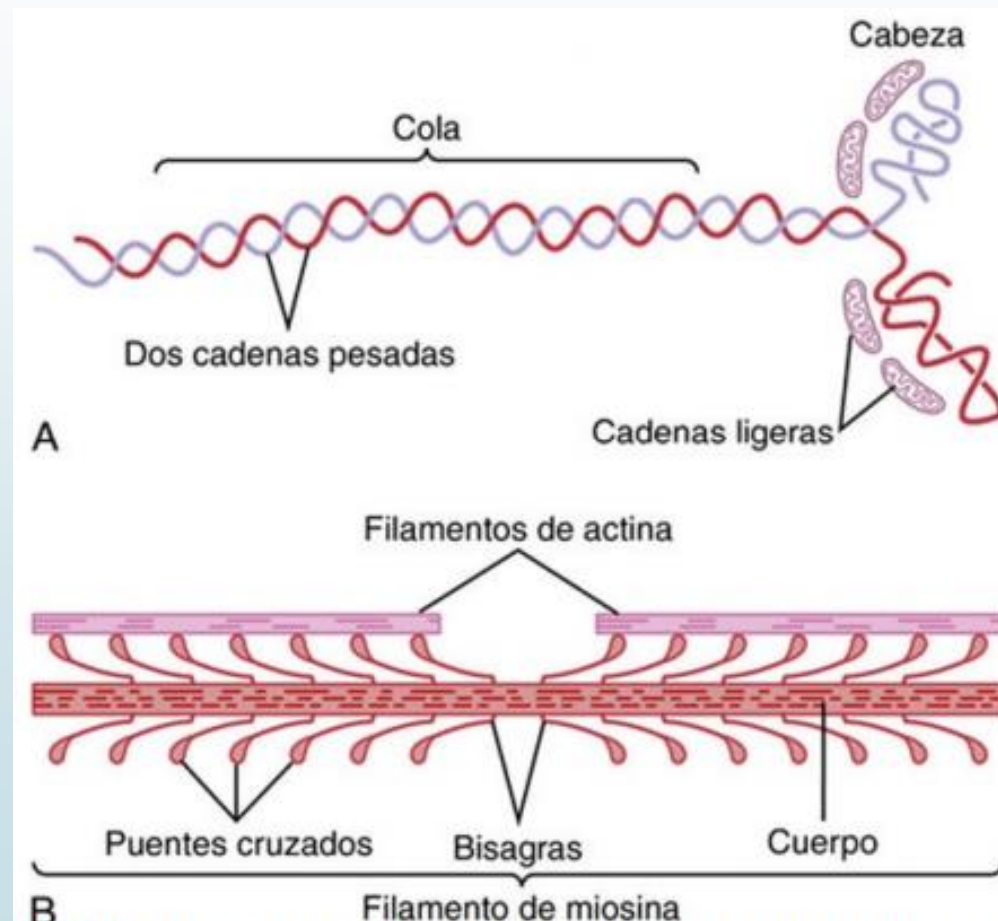
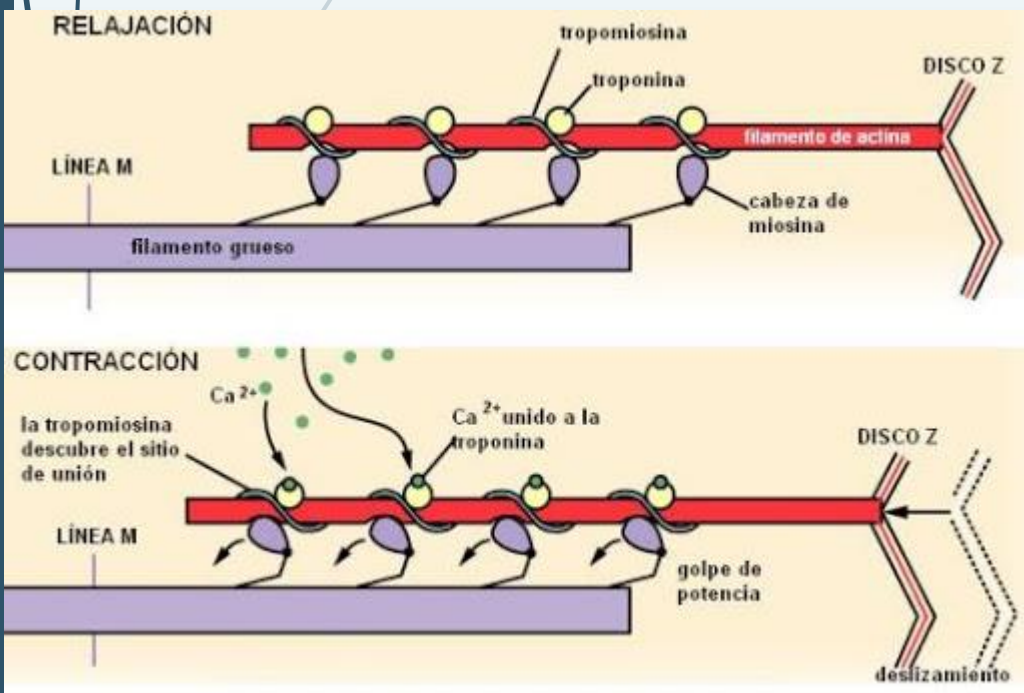
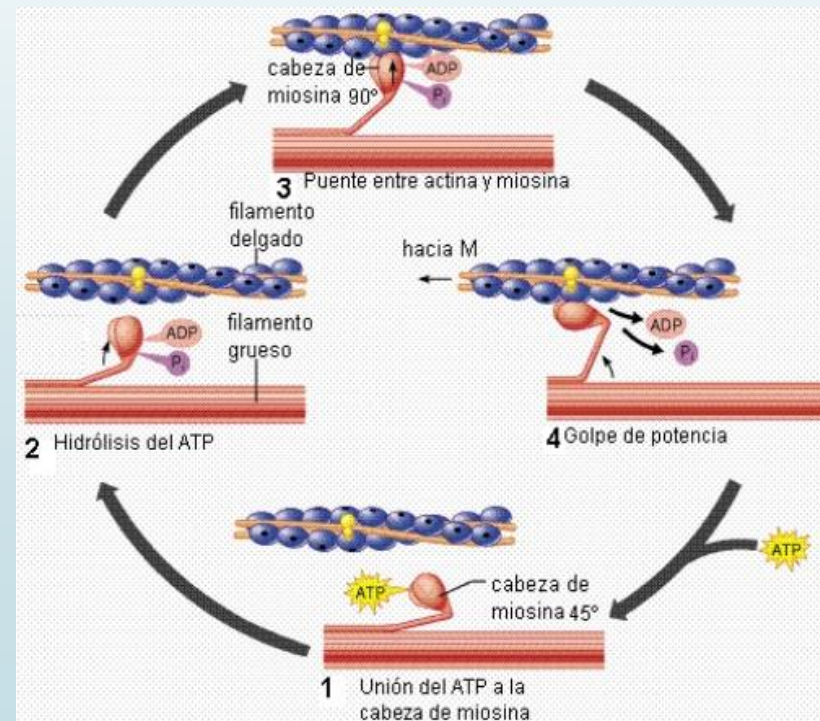


FIGURA 6-6 A. Molécula de miosina. B. Combinación de muchas moléculas de miosina para formar un filamento de miosina. También se muestran miles de puentes cruzados de miosina y la interacción entre las cabezas de los puentes cruzados con los filamentos de actina adyacentes.

Actividad adenosina trifosfatasa de la cabeza de miosina

- Otra característica de la cabeza de la miosina que es esencial para la contracción muscular es que actúa como una *enzima adenosina trifosfatasa (ATPasa)*. Permite que la cabeza escinda el ATP y que utilice la energía procedente del enlace fosfato de alta energía del ATP para aportar energía al proceso de la contracción.



Los filamentos de actina están formados por actina, tropomiosina y troponina

- El esqueleto del filamento de actina es una *molécula de la proteína F-actina* bicatenaria, que se representa por las dos hebras de color claro.
- Se piensa que estas moléculas de ADP son los puntos activos de los filamentos de actina
- Las bases de los filamentos de actina se anclan fuertemente en los discos Z

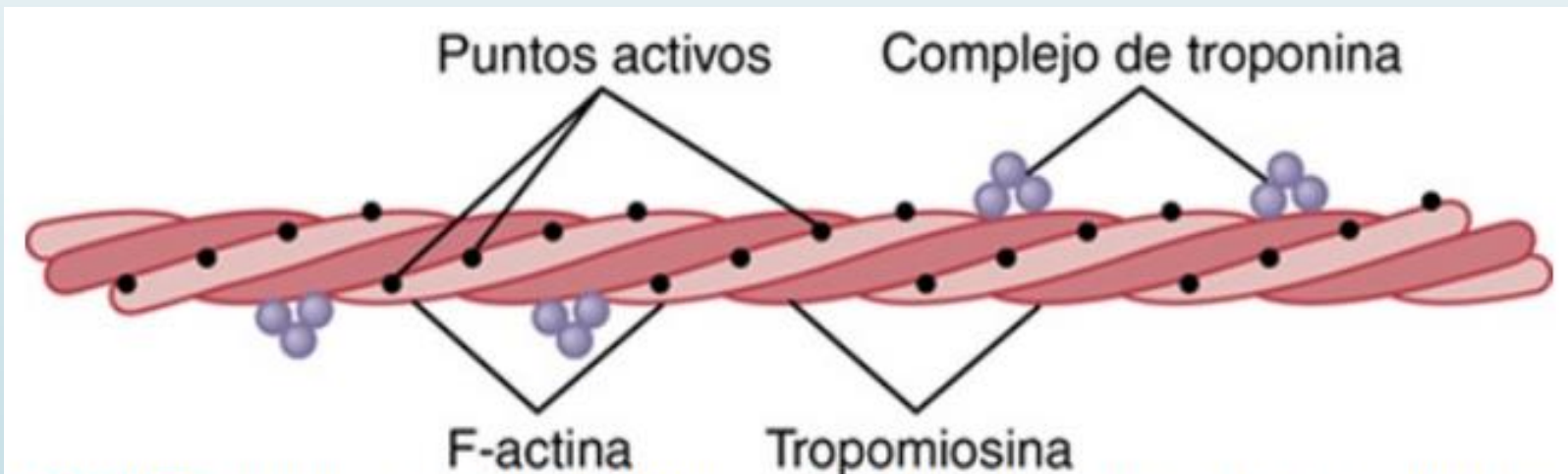
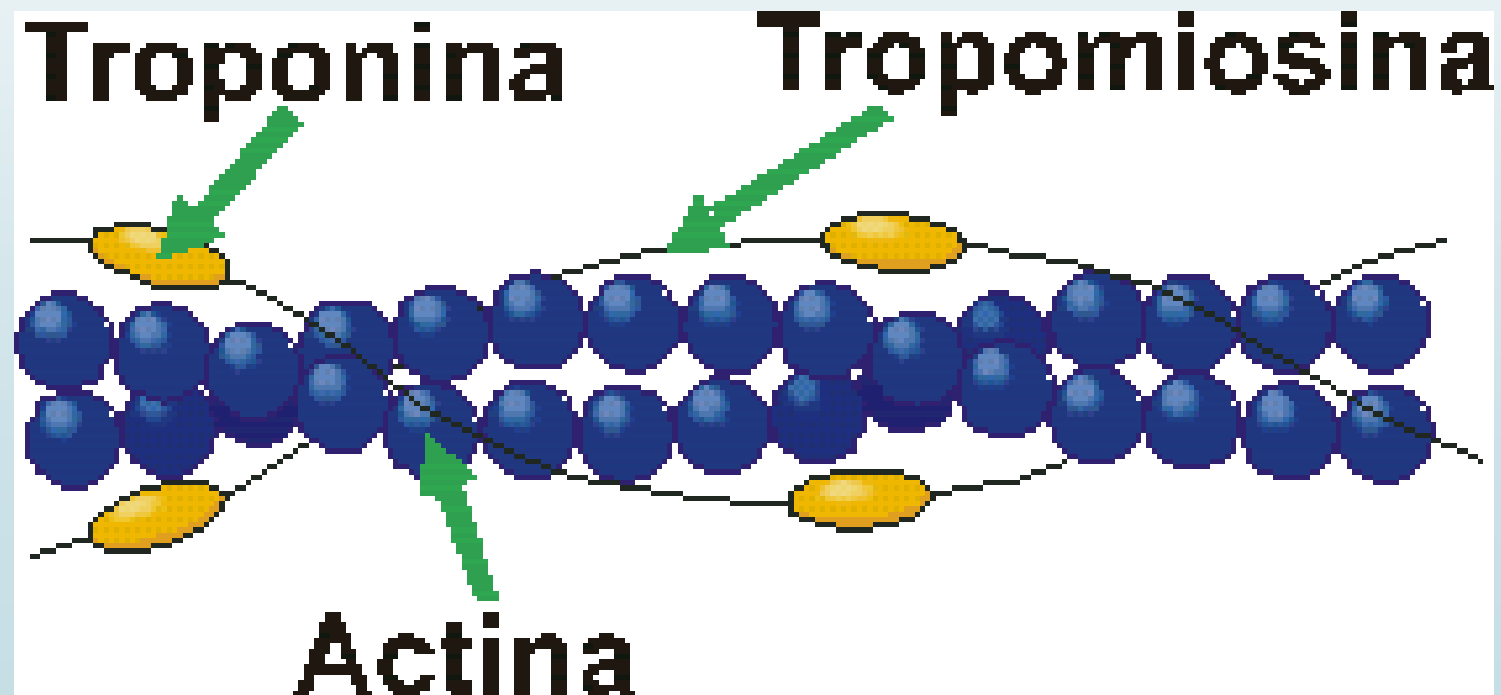


FIGURA 6-7 Filamento de actina, formado por dos hebras helicoidales de moléculas de *F-actina* y dos hebras de moléculas de *tropomiosina* que se disponen en los surcos que hay entre las hebras de actina. Hay un complejo de *troponina* unido a un extremo de cada una de las moléculas de *tropomiosina* y que inicia la contracción.

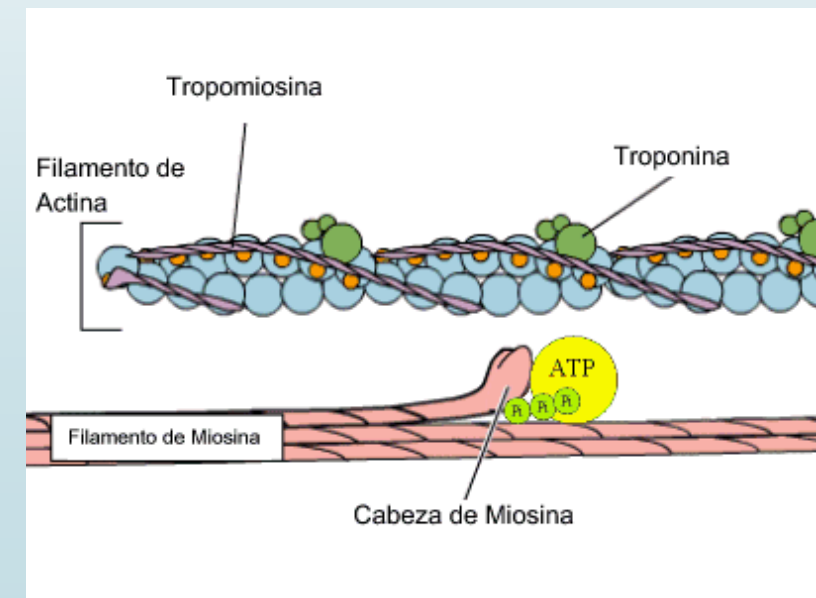
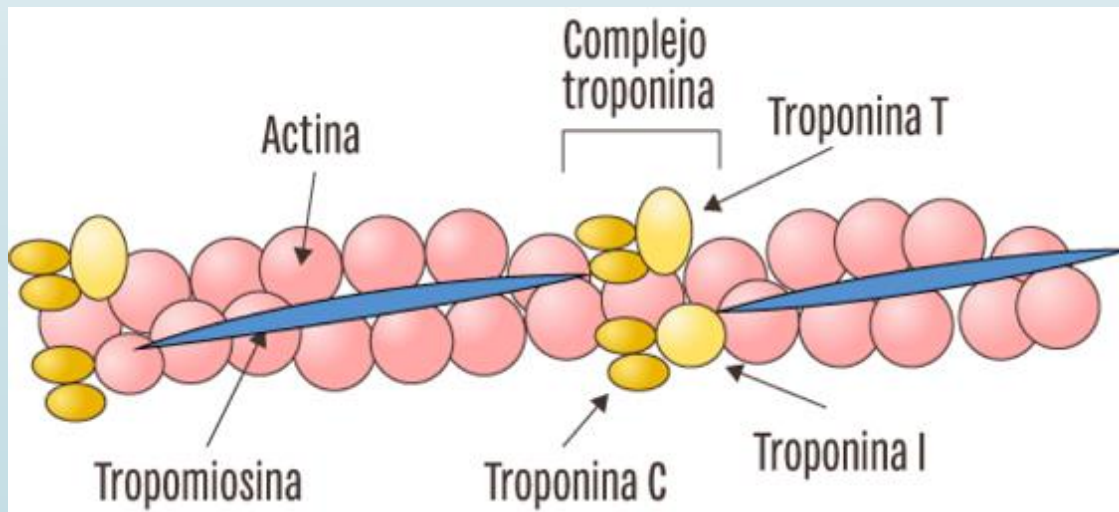
Moléculas de tropomiosina

- El filamento de actina también contiene otra proteína, la tropomiosina. Estas moléculas están enrolladas en espiral alrededor de los lados de la hélice de F-actina.
- En estado de reposo las moléculas de tropomiosina recubren los puntos activos de las hebras de actina, de modo que no se puede producir atracción entre los filamentos de actina y de miosina para producir la contracción.



Troponina y su función en la contracción muscular

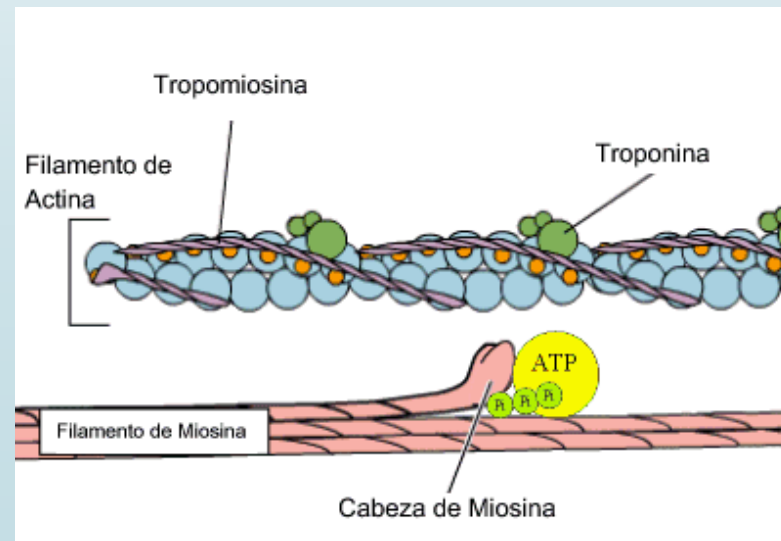
- Unidas de manera intermitente a lo largo de los lados de las moléculas de tropomiosina hay otras moléculas proteicas denominadas troponina.
- Estas moléculas proteicas son en realidad complejos de tres subunidades proteicas unidas entre sí de manera laxa
- Una de las subunidades (troponina I) tiene una gran afinidad por la actina, otra (troponina T) por la tropomiosina y la tercera (troponina C) por los iones calcio.
- Se cree que este complejo une la tropomiosina a la actina y que la intensa afinidad de la troponina por los iones calcio inicia el proceso de la contracción, como se explica en la sección siguiente.



Interacción de un filamento de miosina, dos filamentos de actina y los iones calcio para producir la contracción

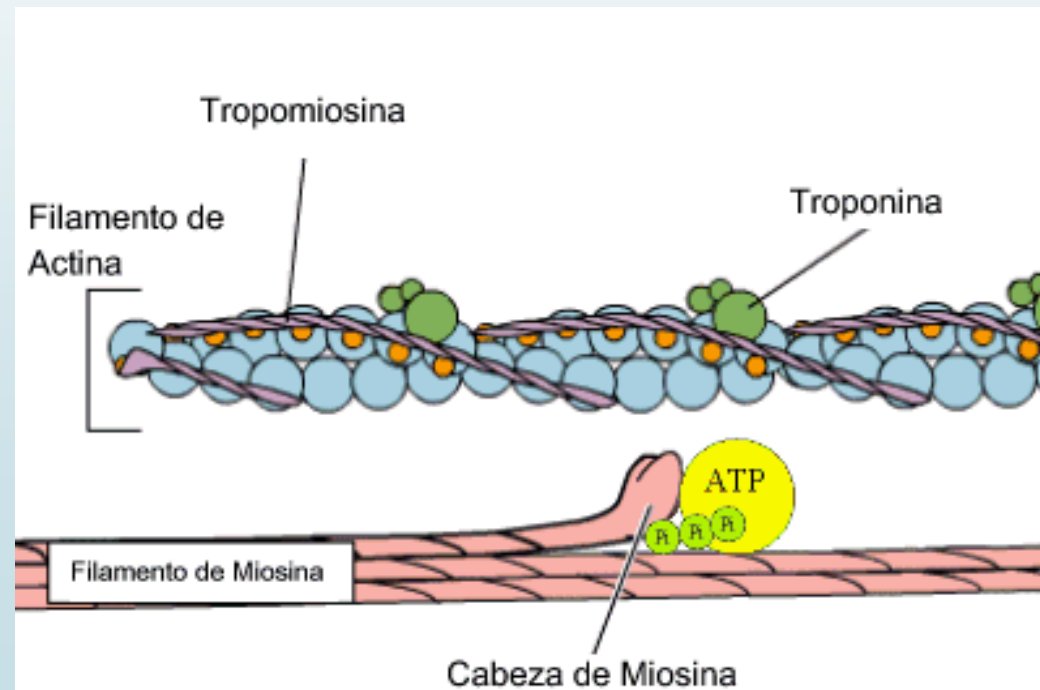
Inhibición del filamento de actina por el complejo troponina-tropomiosina

- Un filamento de actina puro sin la presencia del complejo troponina-tropomiosina (pero en presencia de iones magnesio y ATP) se une instantánea e intensamente a las cabezas de las moléculas de miosina.
- Después, si se añade el complejo troponina-tropomiosina al filamento de actina, no se produce la unión entre la miosina y la actina.
- Por tanto, se piensa que los puntos activos del filamento de actina normal del músculo relajado son inhibidos o cubiertos físicamente por el complejo troponina-tropomiosina.

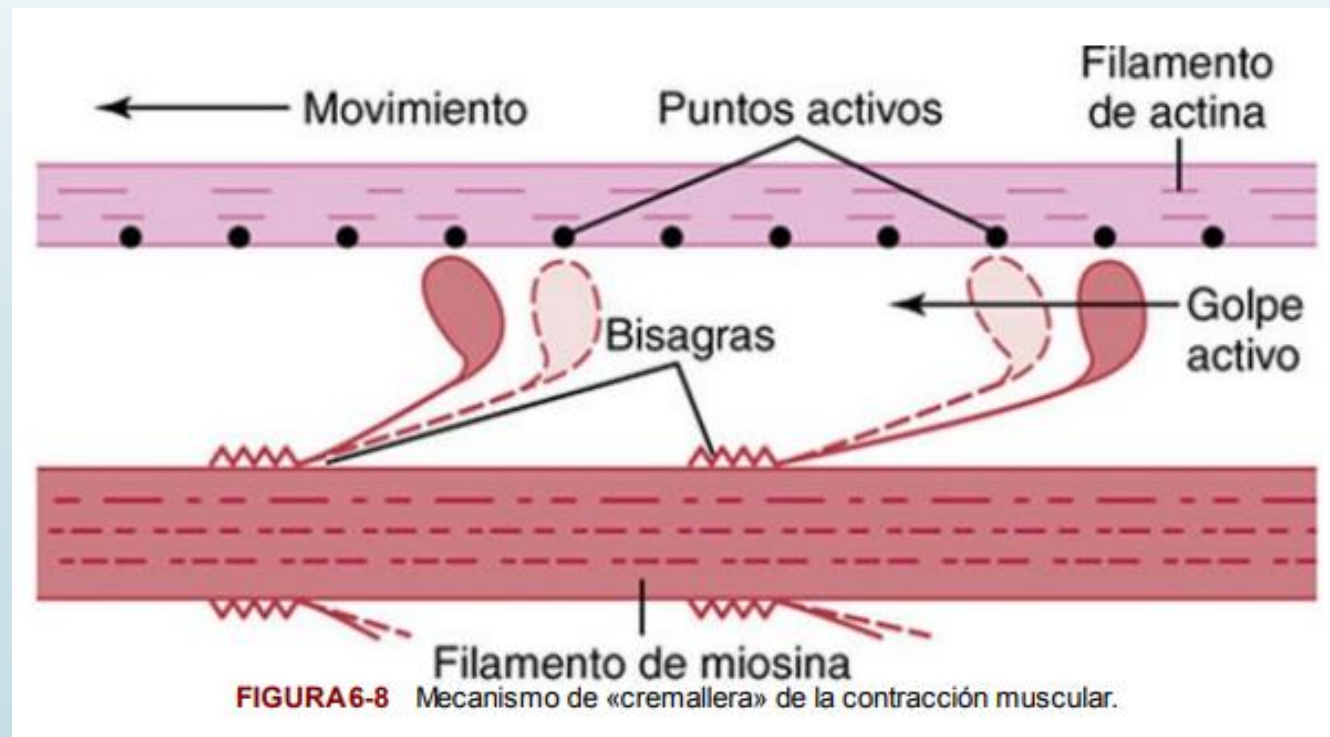


Activación del filamento de actina por iones calcio

- cuando los iones calcio se combinan con la troponina C, de la que una molécula se puede unir intensamente con hasta cuatro iones calcio, el complejo de troponina probablemente experimenta un cambio conformacional que en cierto modo tira de la molécula de tropomiosina y la desplaza hacia zonas más profundas
- Esta acción «descubre» los puntos activos de la actina, permitiendo de esta manera que atraigan a las cabezas del puente cruzado de miosina y que produzcan la contracción.



- La nueva alineación de las fuerzas hace que la cabeza se desplace hacia el brazo y que arrastre con ella al filamento de actina.
- Este desplazamiento de la cabeza se denomina golpe activo.
- Inmediatamente después del desplazamiento, la cabeza se separa automáticamente del punto activo; a continuación la cabeza recupera su dirección extendida.
- En esta posición se combina con un nuevo punto activo que está más abajo a lo largo del filamento de actina; después la cabeza se desplaza una vez más para producir un nuevo golpe activo, y el filamento de actina avanza otro paso.



Energética de la contracción muscular

- ▶ Cuando un músculo se contrae contra una carga realiza un *trabajo*. Esto significa que se transfiere *energía* desde el músculo hasta la carga externa para levantar un objeto hasta una mayor altura o para superar la resistencia al movimiento. En términos matemáticos el trabajo se define mediante la siguiente ecuación:

$$T = C \times D$$

- ▶ donde T es el trabajo generado, C es la carga y D es la distancia del movimiento que se opone a la carga. La energía necesaria para realizar el trabajo procede de las reacciones químicas de las células musculares durante la contracción.



Tres fuentes de energía para la contracción muscular

- ▶ La mayor parte de la energía necesaria para la contracción muscular se utiliza para activar el mecanismo de cremallera mediante el cual los puentes cruzados tiran de los filamentos de actina, aunque son necesarias cantidades pequeñas
- ▶ La primera fuente de energía que se utiliza para reconstituir el ATP es la sustancia *fosfocreatina*, que contiene un enlace fosfato de alta energía similar a los enlaces del ATP.
- ▶ La segunda fuente es la «glucólisis» del *glucógeno* que se ha almacenado previamente en las células musculares. La escisión enzimática rápida del glucógeno en ácido pirúvico y ácido láctico libera energía
- ▶ La tercera y última fuente de energía es el *metabolismo oxidativo*, lo que supone combinar oxígeno con los productos finales de la glucólisis y con otros diversos nutrientes celulares para liberar ATP.

Características de la contracción de todo el músculo

- la contracción muscular se pueden demostrar desencadenando *espasmos musculares únicos*



Mecánica de la contracción del músculo esquelético

- Todas las motoneuronas que salen de la médula espinal inervan múltiples fibras nerviosas y el número de fibras inervadas depende del tipo de músculo. Todas las fibras musculares que son inervadas por una única fibra nerviosa se denominan *unidad motora*

