

Fisiología muscular y ósea: movimiento, soporte corporal y regulación del equilibrio mineral

Dra. Desirée Victoria Montesinos
Dr. Adrián Mateo Orcajada

FISIOLOGÍA HUMANA

Fisiología Muscular y Ósea

Dra. Desirée Victoria Montesinos

Dr. Adrián Mateo Orcajada

EL SISTEMA MUSCULAR: GENERALIDADES

El tejido muscular tiene a su cargo el movimiento del cuerpo y de sus partes, así como el cambio de forma y tamaño de los órganos internos. Se caracteriza por conjuntos de largas células especializadas dispuestas en haces paralelos.

- ✓ **Función Principal:** Movimiento mediante la capacidad de contracción.
- ✓ **Masa Corporal:** Representa aproximadamente el 40% del peso corporal.
- ✓ **Proteínas:** Contiene 1/3 de las proteínas corporales totales.
- ✓ **Metabolismo:** Responsable de la mitad de la actividad metabólica en reposo.



TERMINOLOGÍA MUSCULAR ESPECIALIZADA

Debido a su alta especialización, el tejido muscular utiliza términos específicos derivados mayoritariamente del griego *sarcos* (carne):



Sarcolema

Membrana celular o plasmática de la fibra muscular.



Sarcoplasma

Citoplasma de la célula muscular, rico en mioglobina y glucógeno.



R. Sarcoplásmico

Retículo endoplasmático liso especializado en el flujo de Ca^{2+} .



Sarcosomas

Mitocondrias de la fibra muscular, proveedoras de ATP.



Miofibrillas

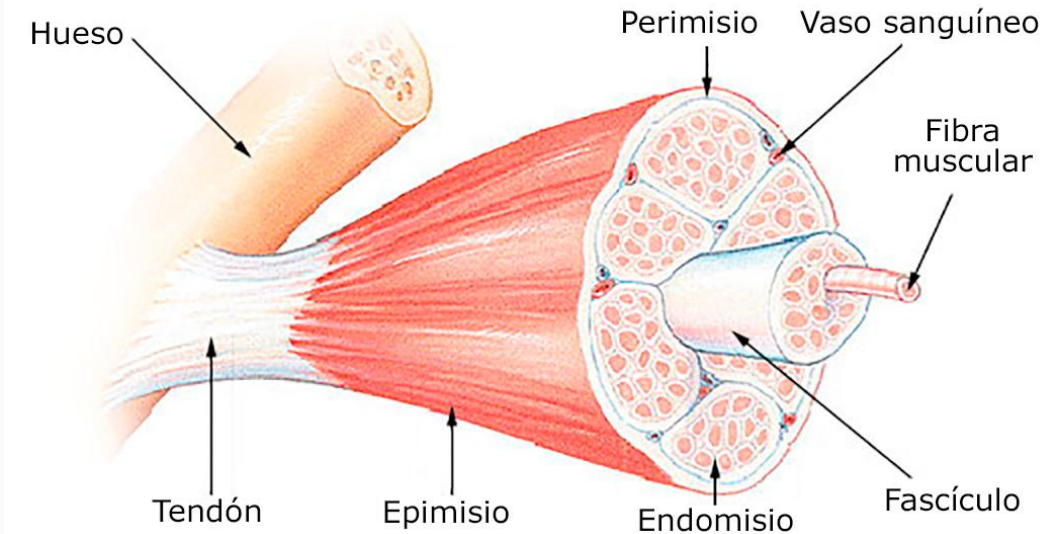
Haces de miofilamentos que ocupan la mayor parte del sarcoplasma.



Miofilamentos

Polímeros de proteínas individuales (Actina y Miosina).

ORGANIZACIÓN JERÁRQUICA DEL MÚSCULO



Un músculo esquelético está envuelto por capas de tejido conjuntivo fibroso que permiten la transducción de fuerzas y contienen vasos sanguíneos:

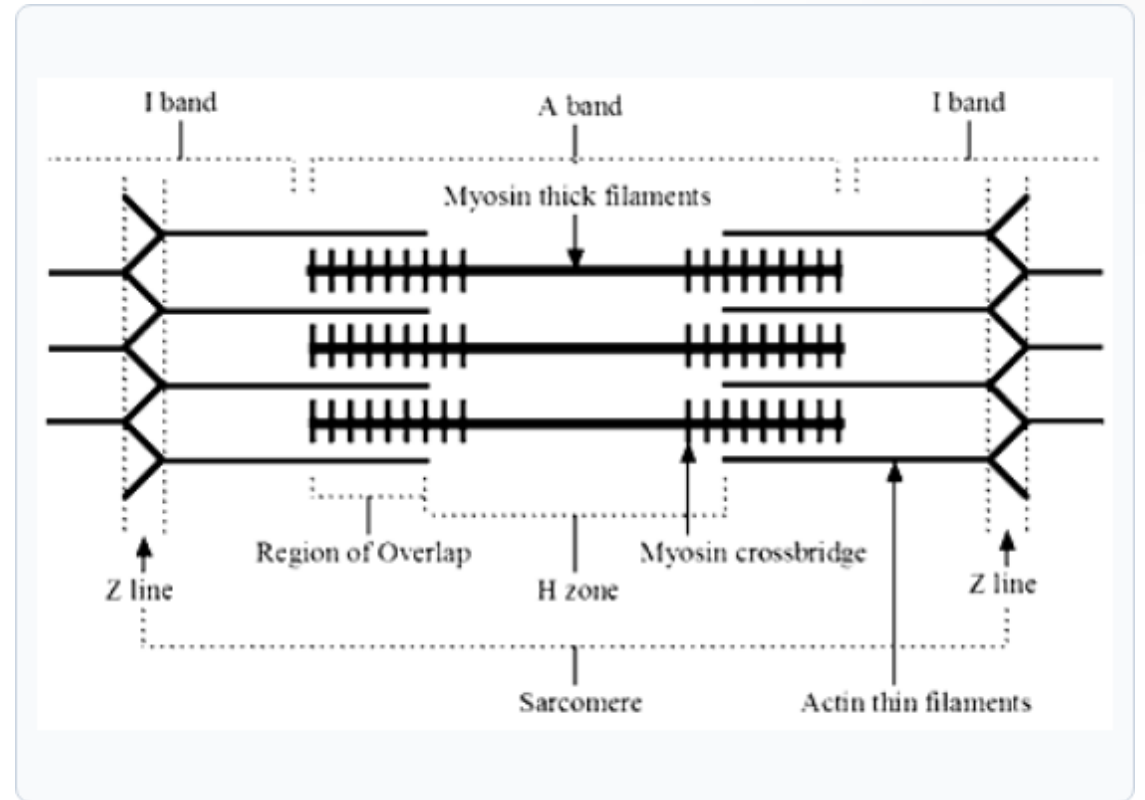
1. **Epimisio:** Capa densa que envuelve todo el músculo.
2. **Perimisio:** Rodea a cada fascículo (conjunto de fibras).
3. **Endomisio:** Capa delicada que envuelve cada fibra muscular individual.

En los extremos, el tejido conjuntivo continúa en forma de **tendón** para fijar el músculo al periostio del hueso.

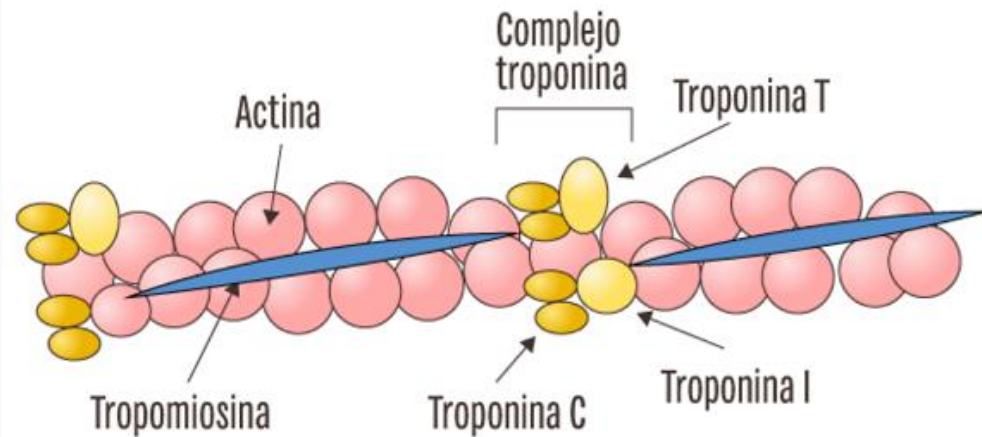
EL SARCÓMERO: UNIDAD FUNCIONAL

El sarcómero es el segmento de la miofibrilla ubicado entre dos líneas Z contiguas. Es la unidad contráctil básica del músculo estriado.

- **Banda A:** Filamentos gruesos de miosina (zona oscura).
- **Banda I:** Filamentos finos de actina únicamente (zona clara).
- **Línea Z:** Estructura en zigzag que ancla los filamentos finos.
- **Zona H:** Región central de la banda A con solo filamentos gruesos.
- **Línea M:** Centro de la zona H que une los filamentos gruesos.



COMPONENTES DEL FILAMENTO FINO



El filamento fino mide 6-8 nm de diámetro y 1 μm de longitud.

Contiene tres proteínas clave:

- 1. Actina F:** Polímero de actina G (globular) que forma una hélice bicatenaria.
- 2. Tropomiosina:** Proteína con forma de varilla que oculta los sitios de unión para la miosina en reposo.
- 3. Complejo de Troponina:**
 - **Troponina C (TnC):** Se une al calcio (Ca^{2+}), iniciando el movimiento.
 - **Troponina T (TnT):** Une el complejo a la tropomiosina.
 - **Troponina I (TnI):** Inhibe la interacción actina-miosina.

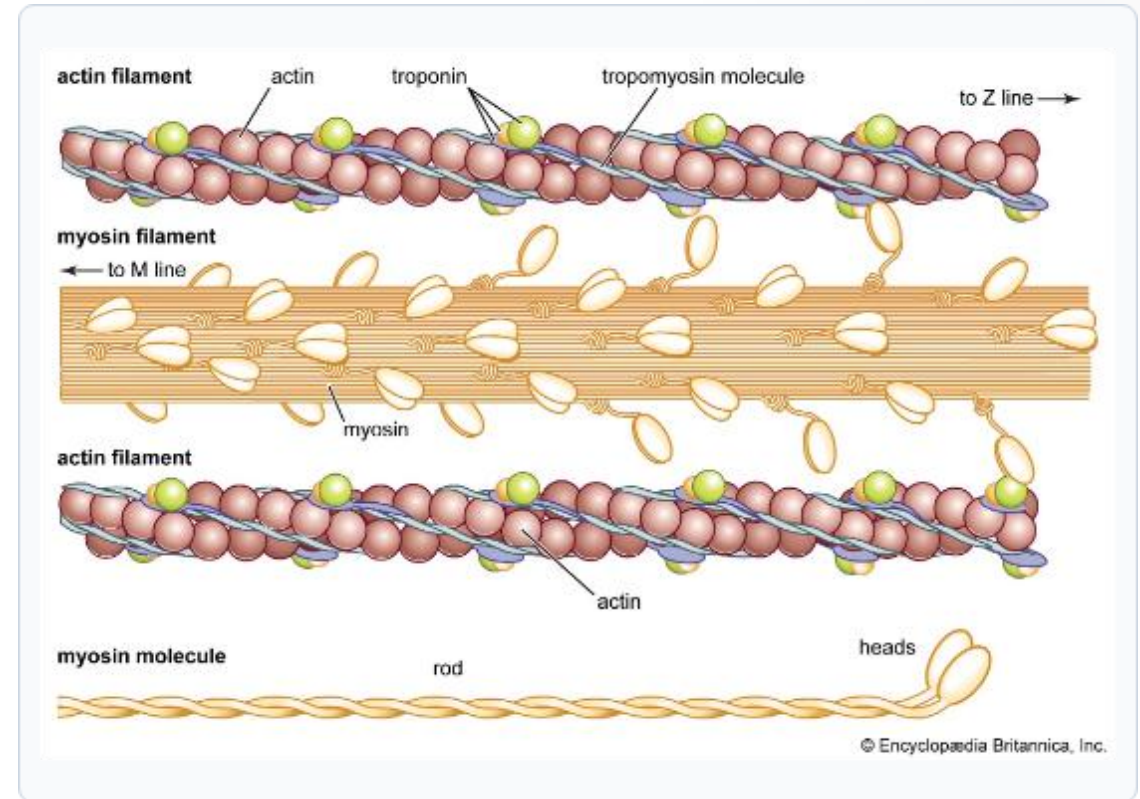
ESTRUCTURA DE LA MIOSINA II

La **Miosina II** es una proteína de 510 kDa compuesta por dos cadenas pesadas y cuatro cadenas ligeras.

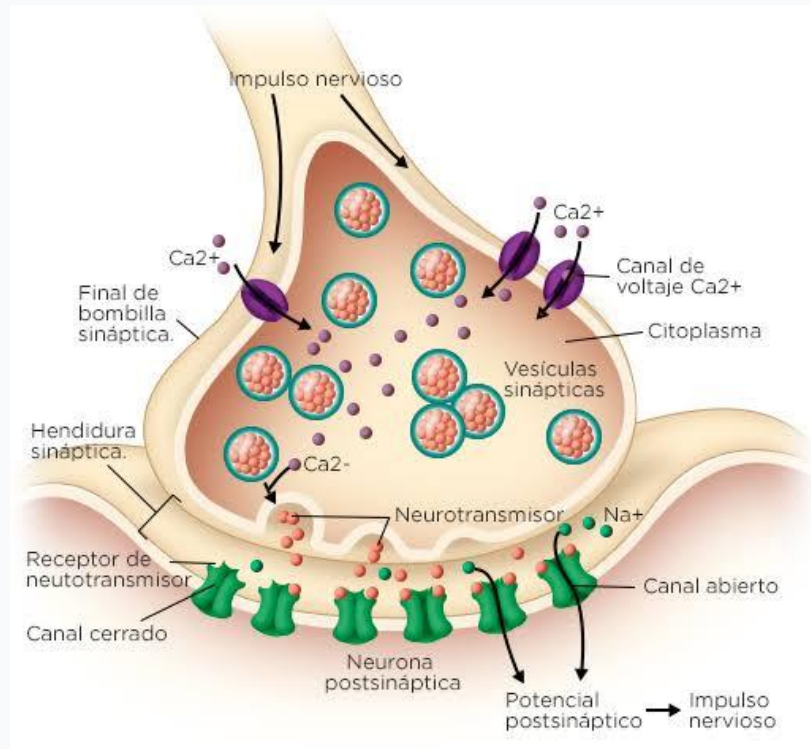
Cada cadena pesada posee una **cabeza globular** que proyecta en ángulo recto y contiene:

- Sitio de fijación para el ATP.
- Sitio de fijación para la actina.
- Actividad enzimática ATPasa.
- Capacidad motora (generación de fuerza).

Las moléculas se agrupan "cola con cola" para formar el filamento grueso (15 nm de diámetro, 1.5 μm de longitud).



LA PLACA MOTORA: SINAPSIS QUÍMICA



La contracción muscular esquelética está regida por nervios motores que forman la **placa motora**. Pasos de la transmisión:

- 1 Llegada del impulso nervioso al axón terminal.
- 2 Liberación de **Acetilcolina (ACh)** a la hendidura sináptica.
- 3 Unión de ACh a receptores nicotínicos en el sarcolema.
- 4 Despolarización de la membrana muscular por entrada de sodio (Na^{+}).
- 5 Acción de la **Colinesterasa** para hidrolizar el excedente de ACh y evitar contracción prolongada.

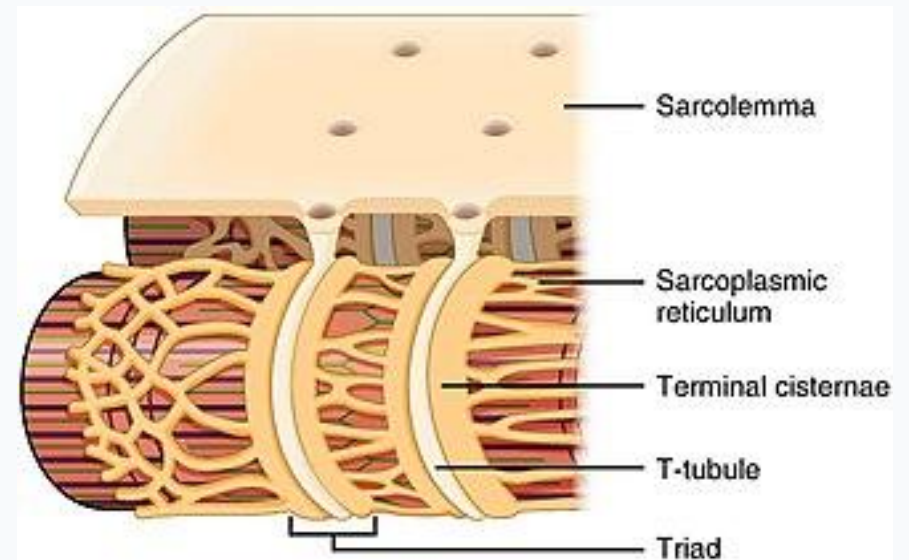
ACOPLAMIENTO EXCITACIÓN-CONTRACCIÓN

Para que la señal eléctrica llegue al centro de la fibra muscular se utiliza un sistema especializado:

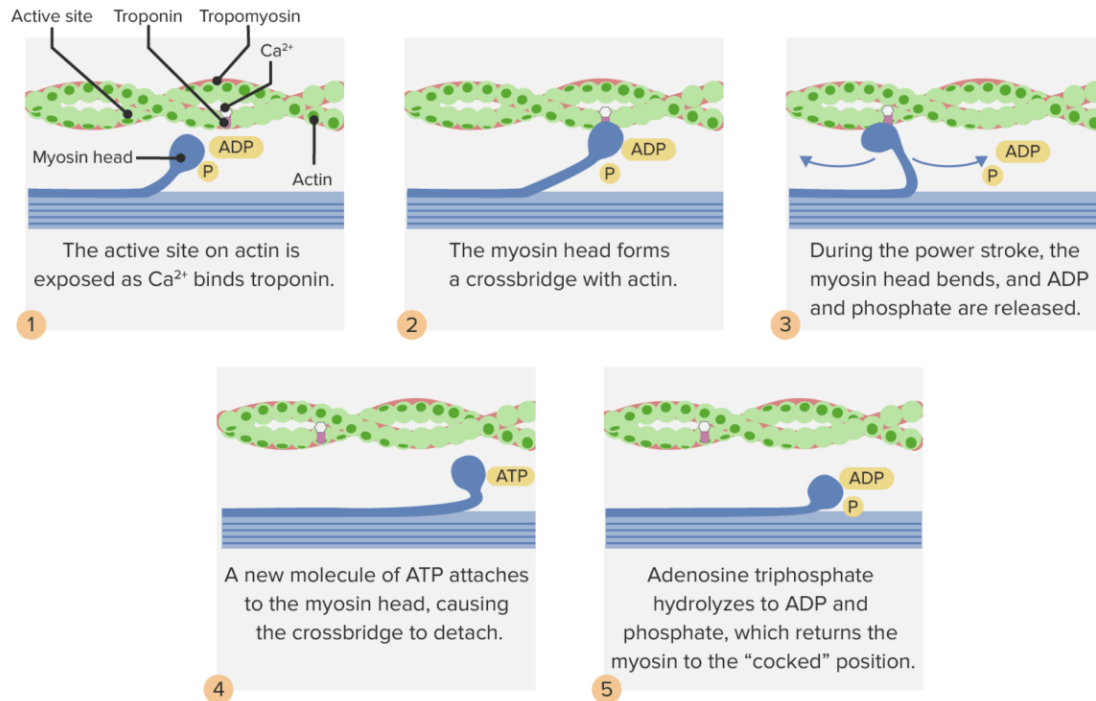
Túbulos Transversos (T): Invaginaciones de la membrana que transmiten el potencial de acción al interior.

Retículo Sarcoplásmico (RS): Red de cisternas que almacena iones Ca^{2+} . El canal de liberación de Ca^{2+} se denomina *receptor de rianodina*.

La **Tríada** consiste en un túbulo T flanqueado por dos cisternas terminales del RS, permitiendo el contacto estrecho para el flujo iónico.



EL CICLO DE PUENTES CRUZADOS

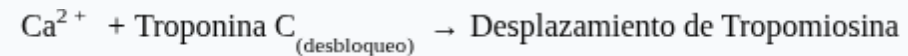


Proceso dinámico donde los filamentos finos se deslizan sobre los gruesos:

- 1. Adhesión:** Cabeza de miosina unida fuertemente a la actina (estado de rigor).
- 2. Separación:** El ATP se une a la miosina, haciendo que se separe de la actina.
- 3. Flexión:** Hidrólisis del ATP en ADP y P_i . La cabeza de miosina se "carga" y flexiona.
- 4. Generación de fuerza:** La miosina se une al sitio nuevo de la actina y libera el P_i , provocando el **golpe de fuerza**.
- 5. Re-adhesión:** Se libera ADP y la cabeza queda lista para un nuevo ciclo.

ACTIVACIÓN POR CALCIO (CA²⁺)

El calcio actúa como la "llave" que desbloquea el sistema de contracción. Sin él, la interacción miosina-actina es físicamente imposible debido al bloqueo por tropomiosina.



Activación

El Ca²⁺ liberado del RS se une a la TnC, cambiando su conformación y "tirando" de la tropomiosina para exponer los sitios activos de la actina.

Cese del Estímulo

Cuando el impulso nervioso cesa, los canales de Ca²⁺ se cierran y la bomba **SERCA** reintroduce el calcio al RS mediante transporte activo (consumo de ATP).

ENERGÉTICA DE LA RELAJACIÓN

Paradoja Fisiológica: En la contracción muscular, lo que consume mayor energía neta no es el golpe de fuerza, sino la **relajación**.

El proceso de relajación requiere ATP para dos funciones fundamentales:

- 1 **Bomba SERCA:** Reintroduce el Ca^{2+} al interior del retículo sarcoplásmico contra gradiente de concentración.
- 2 **Separación Miosina-Actina:** La miosina requiere una molécula de ATP para soltarse del filamento de actina y volver a su posición de reposo.

Esto explica fenómenos como el **Rigor Mortis**: ante la falta de ATP post-mortem, la miosina queda anclada a la actina permanentemente, produciendo rigidez cadavérica.

TIPOS DE TEJIDO MUSCULAR

	Skeletal	Cardiac	Smooth
	Found attached to skeleton by tendons	Found only in heart	Found in hair erectors, pupils, GI tract, bronchi, and blood vessels
	Voluntary contraction	Involuntary contraction	Involuntary contraction
	Striated	Striated	Non-striated
	Sensitive to fatigue	Fatigue slowly	Fatigue slowly

Característica	Esquelético	Cardíaco	Liso
Localización	Huesos / Esqueleto	Pared del Corazón	Órganos huecos / Vasos
Control	Voluntario (SNP)	Involuntario (SNA)	Involuntario (SNA)
Estructura	Estriado, multinucleado	Estriado, núcleo único	No estriado, fusiforme
Unión	Fibras aisladas	Discos intercalares	Nexos (Gap junctions)

SINERGIA Y ANTAGONISMO

Los músculos nunca trabajan aislados; se coordinan en grupos funcionales para producir movimientos fluidos:



Agonista Primario

El responsable principal del movimiento específico (ej: Bíceps en flexión de codo).



Sinérgicos

Músculos auxiliares que ayudan al agonista a realizar la acción.



Antagonistas

Músculos que deben relajarse mientras el agonista se contrae para permitir el movimiento. Se oponen a la acción del agonista.

FUNCIONES METABÓLICAS DEL MÚSCULO

Tono Muscular

La **Contracción Tónica** es una contracción parcial, pasiva y continua de los músculos en reposo. Un número pequeño de fibras se contraen alternativamente.

Es vital para el mantenimiento de la **postura** y la estabilidad articular sin producir fatiga inmediata.

Hipotonía: Falta de tono muscular por disfunción del SNC o problemas genéticos.

Producción de Calor

Las células musculares son la principal fuente de calor corporal debido a su alta actividad metabólica. Durante el ejercicio, la producción de calor puede aumentar hasta 10-20 veces.

Es un mecanismo esencial para la **homeostasis de la temperatura** (termogénesis tiritante).

TEJIDO ÓSEO: FUNCIONES BIOLÓGICAS

El hueso es un tejido conectivo especializado, vivo y dinámico, que cambia constantemente de forma y densidad mediante la remodelación.



Protección

Protege órganos vitales (cerebro, corazón, pulmones).

Soporte

Marco estructural para el cuerpo y anclaje muscular.



Hematopoyesis

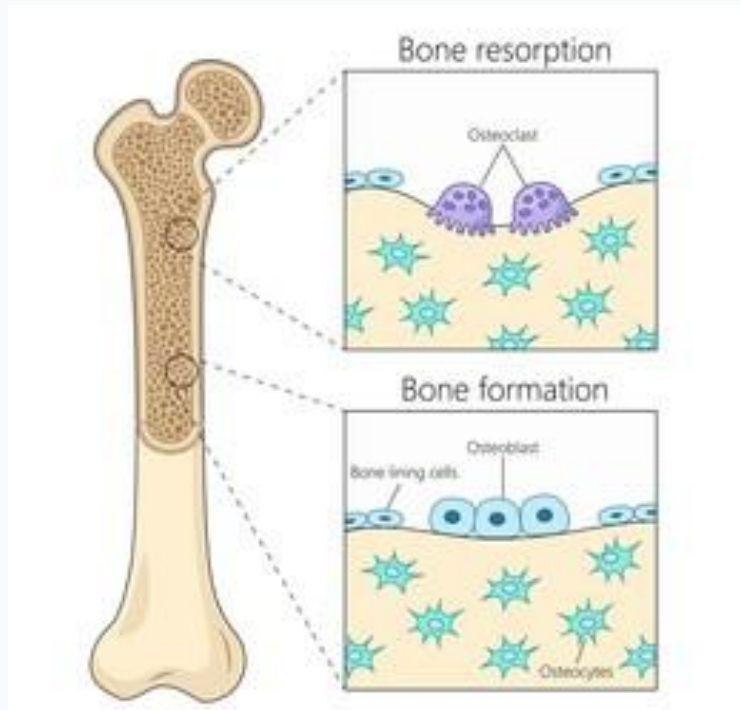
Producción de células sanguíneas en la médula ósea roja.



Homeostasis Mineral

Almacén del 99% del calcio y 85% del fósforo corporal.

OSTEOBLASTOS Y OSTEOCLASTOS



La remodelación ósea requiere el equilibrio entre dos tipos celulares antagónicos:

- 1. Osteoblastos:** Células formadoras de hueso. Sintetizan la matriz orgánica (osteoide) y promueven la mineralización con sales de calcio.
- 2. Osteoclastos:** Células gigantes multinucleadas encargadas de la resorción ósea (destrucción de matriz vieja). Liberan enzimas lisosómicas y ácidos.

Osteocitos: Osteoblastos que han quedado atrapados en la matriz mineralizada. Actúan como sensores de carga mecánica.

MECANISMOS DE FORMACIÓN ÓSEA

Osificación Endocondral

El hueso se forma sustituyendo un molde de **cartílago hialino**.

Es el proceso característico de los **huesos largos** (fémur, húmero).

Comienza en la diáfisis (centro primario) y continúa en las epífisis (centros secundarios).

Osificación Intramembranosa

El hueso se forma directamente sobre tejido conectivo mesenquimatoso, sin molde previo.

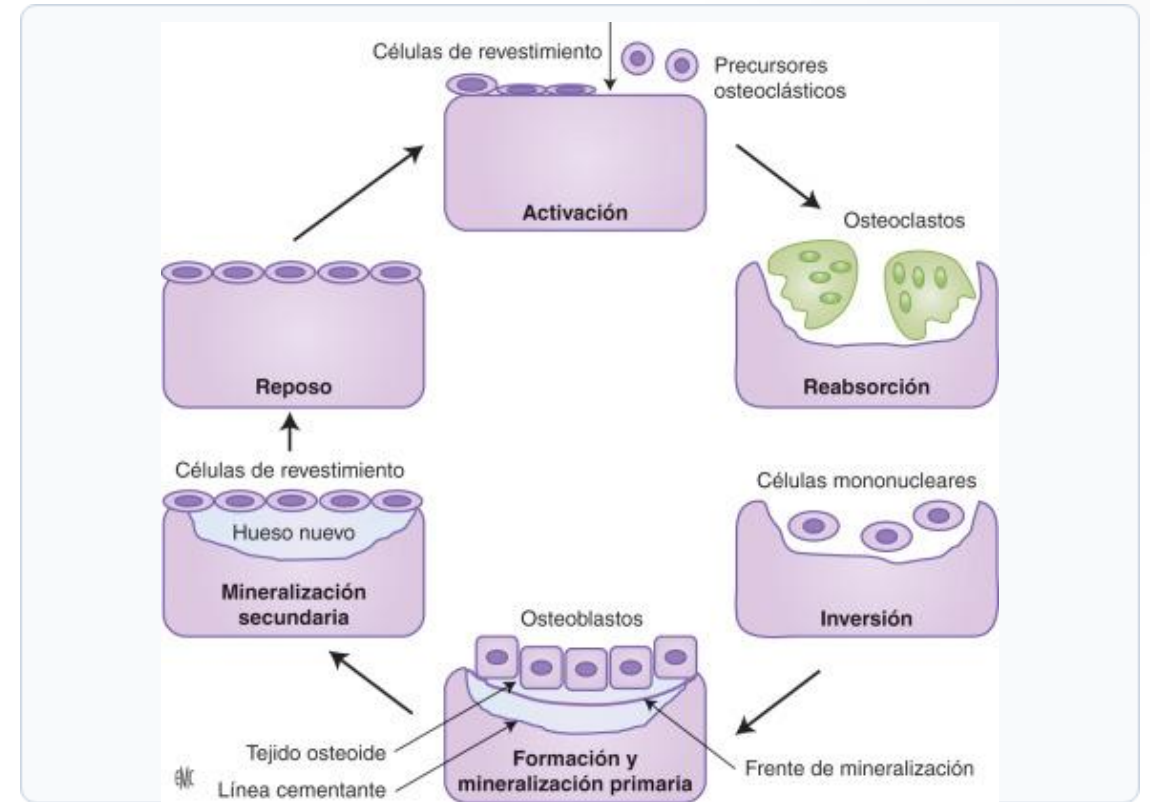
Es característica de los **huesos planos** (bóveda craneana, mandíbula, clavículas).

En el feto no hay huesos reales al inicio, sino estructuras cartilaginosas y fibrosas que se calcifican progresivamente durante el desarrollo.

LA PLACA EPIFISARIA

Un hueso largo crece en longitud gracias a la **placa epifisaria** (o cartílago de crecimiento), situada entre la epífisis y la diáfisis.

- El crecimiento continúa mientras queda cartílago en la placa.
- La **Hormona del Crecimiento (GH)** estimula la mitosis de condrocitos y la actividad de los osteoblastos.
- Al final de la adolescencia, el cartílago se osifica totalmente.
- La **Línea Epifisaria** marca el punto donde se fundieron los centros de osificación, indicando el cese del crecimiento.



RESPUESTA ÓSEA AL EJERCICIO

El tejido óseo responde a las cargas y agresiones mecánicas cambiando su densidad y forma. Es un ejemplo perfecto de *mecanotransducción*.



Actividad Física

Aumenta el índice de depósito óseo. El hueso deposita más sales minerales y fibras colágenas, haciéndose más fuerte y denso.

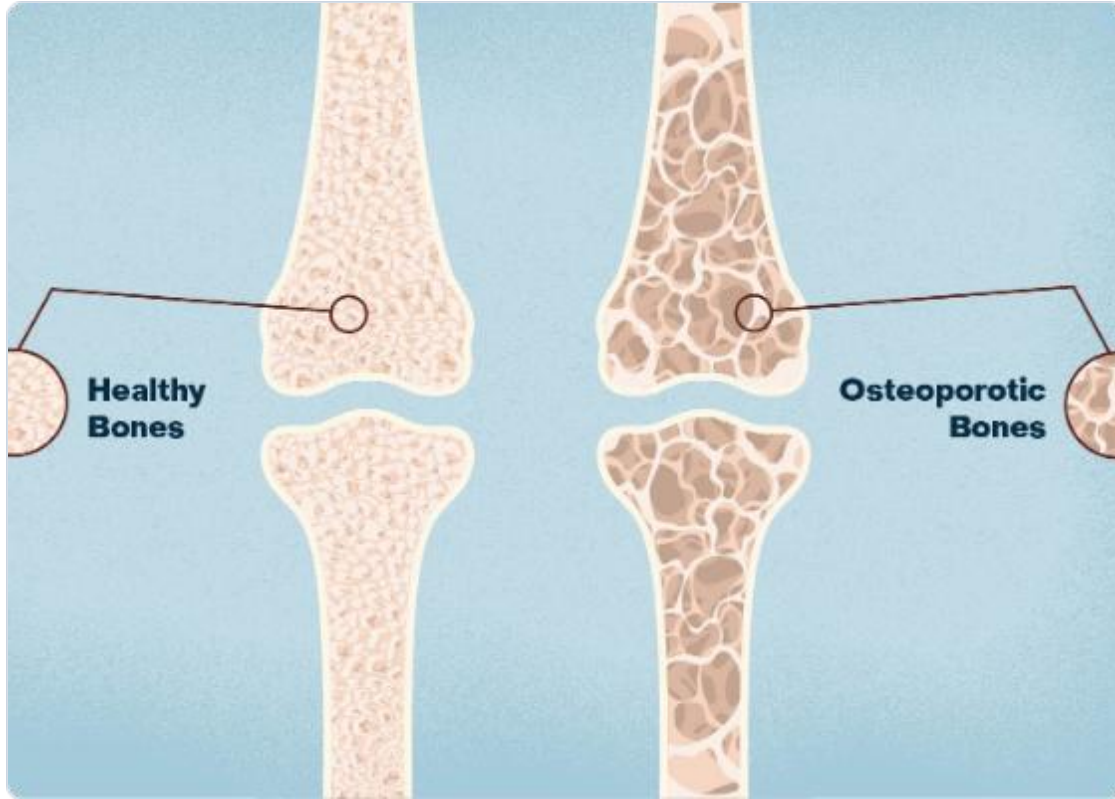


Inactividad

La falta de ejercicio debilita el hueso. Se produce una mayor eliminación de calcio y menor formación de colágeno (atrofia ósea).

La remodelación ósea es crucial para mantener niveles constantes de calcio sanguíneo, fundamental para la función nerviosa y muscular cardíaca.

PATOLOGÍA ÓSEA: OSTEOPOROSIS



Es una de las enfermedades óseas más comunes, especialmente en mujeres post-menopáusicas.

Causas Fisiológicas:

- Pérdida excesiva de matriz calcificada.
- Disminución de estrógenos/hormonas sexuales que regulan a los osteoblastos.
- El proceso de resorción excede a la formación ósea.

A partir de los 35-40 años, de forma fisiológica natural, la pérdida ósea comienza a exceder a la ganancia en toda la población.

SÍNTESIS: DEL NERVIO AL MOVIMIENTO

- 1 Impulso llega a la unión neuromuscular → Liberación de ACh.
- 2 Despolarización del sarcolema → Potencial baja por túbulos T.
- 3 RS libera Ca^{2+} almacenado → Ca^{2+} se une a Troponina C.
- 4 Tropomiosina se desplaza → Sitios de actina quedan libres.
- 5 Cabezas de miosina se unen y realizan el golpe de fuerza (ADP+Pi liberados).
- 6 Nueva molécula de ATP separa la miosina de la actina.
- 7 ATP se hidroliza para "cargar" la miosina.
- 8 Ca^{2+} es bombeado de vuelta al RS → El músculo se relaja.

CONCEPTOS CLÍNICOS DE INTERÉS

Electromiografía (EMG)

Técnica diagnóstica que mide la respuesta eléctrica de los músculos a los estímulos. Esencial para detectar distrofias o neuropatías.

Inyecciones IM

Requieren identificar referencias anatómicas exactas para evitar daños en nervios mayores (ej: nervio ciático en el glúteo).

Fibrilación

Contracción asincrónica de fibras aisladas. En el corazón, reduce drásticamente la capacidad de bombeo (emergencia médica).

Rigor Mortis

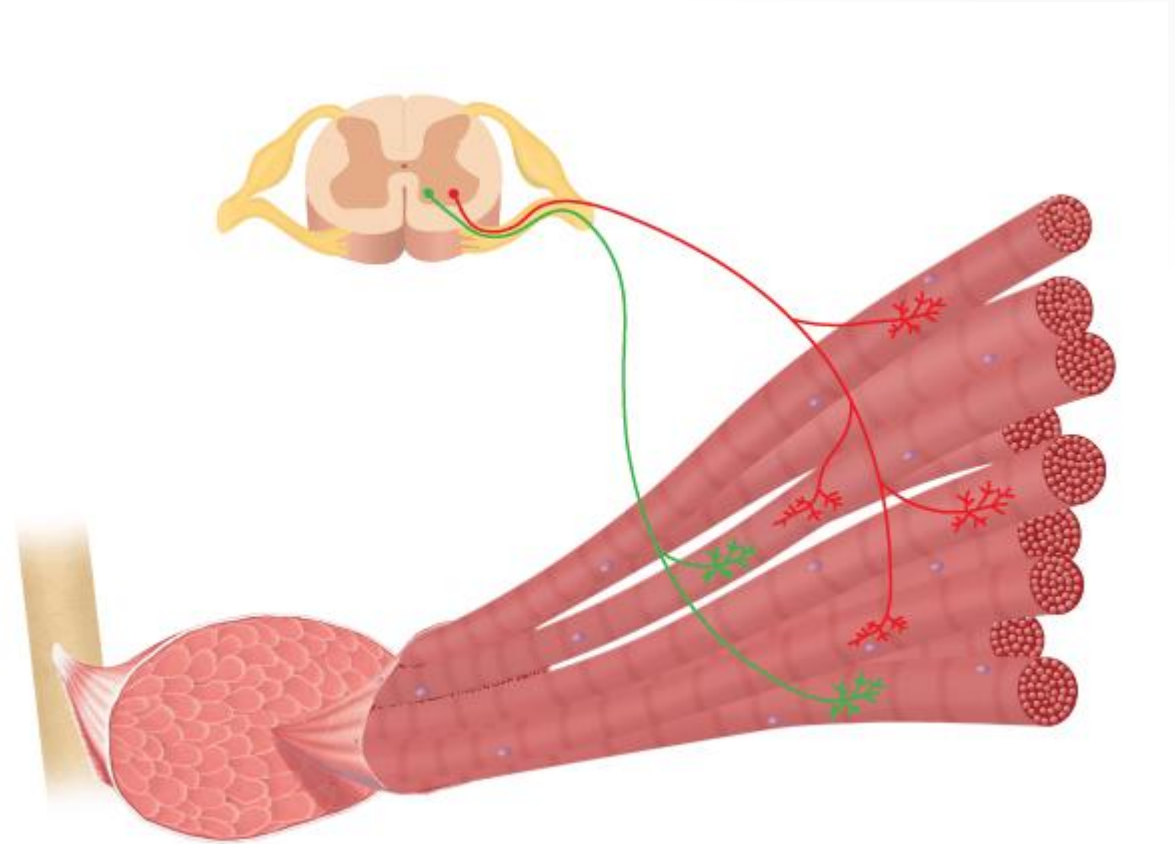
Rigidez por falta de ATP. Al morir, el Ca^{2+} se libera masivamente del RS pero no hay energía para soltar las cabezas de miosina.

CONTROL FISIOLÓGICO

La regulación de la fuerza de contracción depende de dos factores clave:

- 1. Reclutamiento de unidades motoras:** Cuántas neuronas motoras se activan simultáneamente. A mayor número, mayor fuerza.
- 2. Frecuencia de estimulación:** Impulsos repetidos rápidamente producen una suma de contracciones (Tétanos), optimizando la fuerza generada.

Nota: La contracción del músculo esquelético es "todo o nada" a nivel de fibra individual, pero graduable a nivel de órgano muscular completo.



FISIOLOGÍA HUMANA

Fisiología Muscular y Ósea

Dra. Desirée Victoria Montesinos

Dr. Adrián Mateo Orcajada
