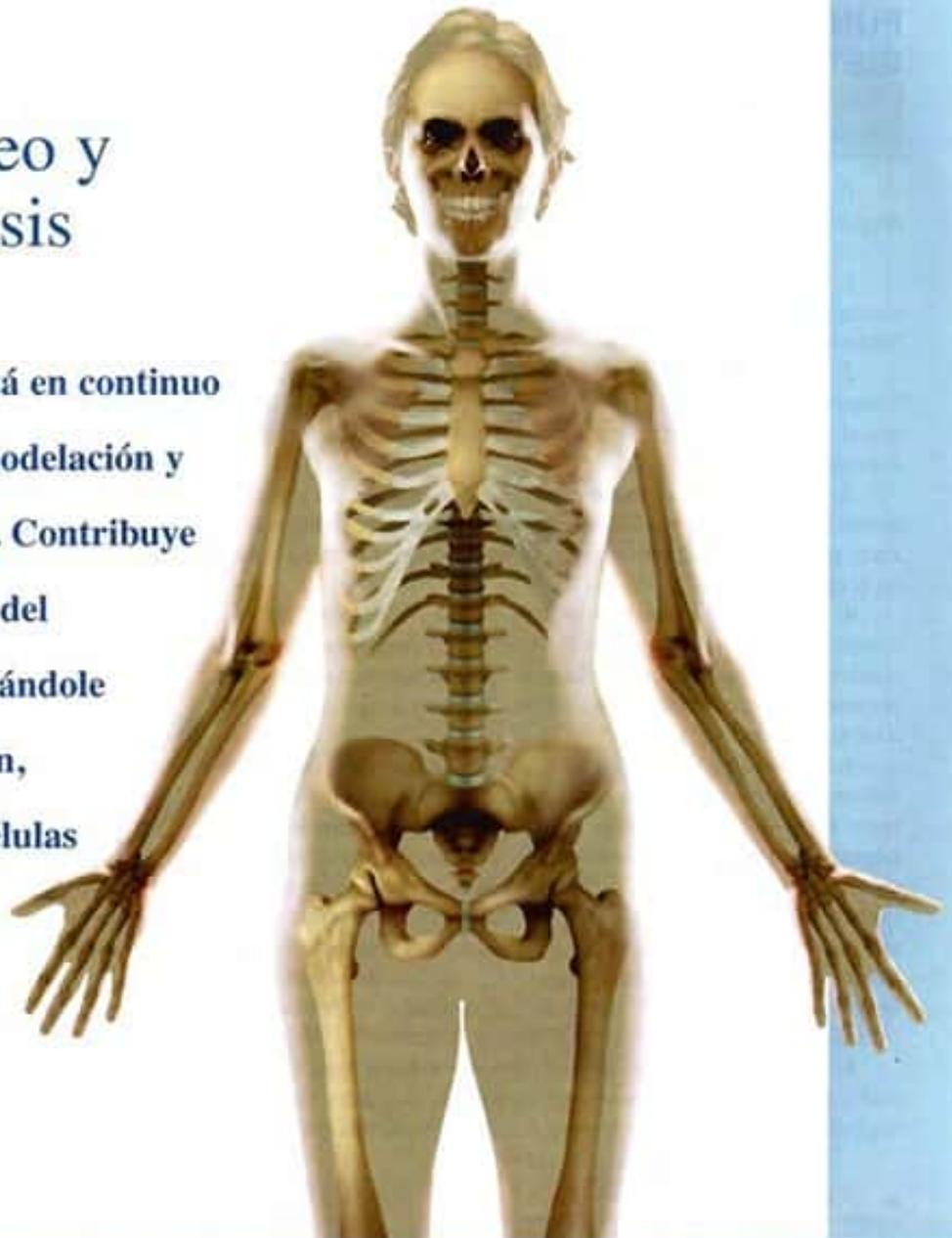




El sistema esquelético: tejido óseo

Tejido óseo y homeostasis

El tejido óseo está en continuo crecimiento, remodelación y autorreparación. Contribuye a la homeostasis del organismo brindándole sostén, protección, producción de células sanguíneas y como depósito de minerales y triglicéridos.





Un hueso es el resultado del trabajo conjunto de diferentes tejidos: hueso (o tejido óseo), cartilago, tejido conectivo denso, epitelio, tejido adiposo y tejido nervioso. Por tal razón, se considera cada hueso como un órgano. El tejido óseo es tejido vivo complejo y dinámico que experimenta un proceso continuo llamado remodelación (construcción de tejido óseo nuevo y destrucción simultánea del viejo). El conjunto de huesos y

cartilagos constituye el **sistema esquelético**. En este capítulo se describirán los diversos componentes de los huesos para poder comprender cómo se forman y envejecen, y de qué manera el ejercicio afecta su densidad y solidez. La **osteología** (osteo-, de *osteón*, hueso, y -logía, de *lógos*, estudio) es estudio de la estructura ósea y del tratamiento de las enfermedades de los huesos.

FUNCIONES DEL HUESO Y DEL SISTEMA ESQUELÉTICO

► OBJETIVO

Describir las seis funciones principales del sistema esquelético.

El tejido óseo constituye aproximadamente el 18% del peso corporal, y desempeña seis funciones básicas:

1. **Sostén.** El esqueleto es la estructura del organismo que da sostén a los tejidos blandos y provee los puntos de inserción para los tendones de la mayoría de los músculos esqueléticos.

2. **Protección.** El esqueleto protege de lesiones a los órganos internos más importantes. Por ejemplo, los huesos del cráneo protegen al cerebro, las vértebras a la médula espinal y la caja torácica al corazón y los pulmones.

3. **Asistencia en el movimiento.** La mayoría de los músculos esqueléticos se fija a los huesos; cuando se contraen, traccionan de éstos para producir el movimiento. Esta función se trata en detalle en el capítulo 10.

4. **Homeostasis mineral.** El tejido óseo almacena diversos minerales, especialmente calcio y fósforo, lo cual contribuye a la solidez del hueso. Los huesos liberan hacia la sangre los minerales necesarios para mantener su equilibrio (homeostasis) y distribuirlos a otras partes del organismo.

5. **Producción de células sanguíneas.** Dentro de algunos huesos, un tejido conectivo denominado **médula ósea roja** produce glóbulos rojos, glóbulos blancos y plaquetas, proceso llamado **hemopoyesis** (hemo-, de *háima*, sangre, y -poyesis, de *poiesis*, formación). La médula ósea roja consta de células sanguíneas en desarrollo, adipocitos, fibroblastos y macrófagos dentro de un tejido de sostén (estroma) formado por fibras reticulares. Se encuentra en los huesos en desarrollo del feto y en algunos huesos del adulto, como la pelvis, las costillas, el esternón, las vértebras, el cráneo y los extremos de los huesos largos del brazo y el muslo.

6. **Almacenamiento de triglicéridos.** La **médula ósea amarilla** está constituida principalmente por adipocitos, los cuales almacenan triglicéridos. Éstos son una reserva potencial de energía química.

► PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. ¿Qué tipos de tejidos constituyen el sistema esquelético?
2. ¿Qué diferencia a la médula ósea roja de la amarilla en cuanto a la composición, localización y funciones?

ESTRUCTURA ÓSEA

► OBJETIVO

Describir las funciones de cada parte de un hueso largo.

Examinaremos a continuación la estructura del hueso a nivel macroscópico. La estructura macroscópica del hueso puede analizarse considerando las partes de un hueso largo, como el húmero ilustrado en la **figura 6-1a**. Un *hueso largo* tiene mayor longitud que diámetro y consta de las siguientes partes:

1. La **diáfisis** (dia-, de *dia*, a través de, y -fisis, de *phyeim*, crecer) es el cuerpo del hueso (la porción cilíndrica larga y principal del hueso).

2. Las **epifisis** (epi-, de *epi*, sobre) son las terminaciones proximal y distal del hueso.

3. Las **metáfisis** (meta-, de *meta*, después) son las regiones de hueso maduro donde la diáfisis se une a las epifisis. En un hueso en crecimiento, cada metáfisis incluye la **placa epifisaria** o **cartilago de crecimiento**, capa de cartilago hialino que permite a la diáfisis del hueso crecer en longitud (véase más adelante en este capítulo). Cuando un hueso deja de crecer en longitud, alrededor de los 18 a 21 años de edad, el cartilago de la placa epifisaria se reemplaza por hueso; la estructura ósea resultante se conoce como **línea epifisaria**.

4. El **cartilago articular** es una capa fina de cartilago hialino que cubre la zona de la epifisis donde un hueso se articula con otro. El cartilago articular reduce la fricción y absorbe los impactos en las articulaciones móviles.

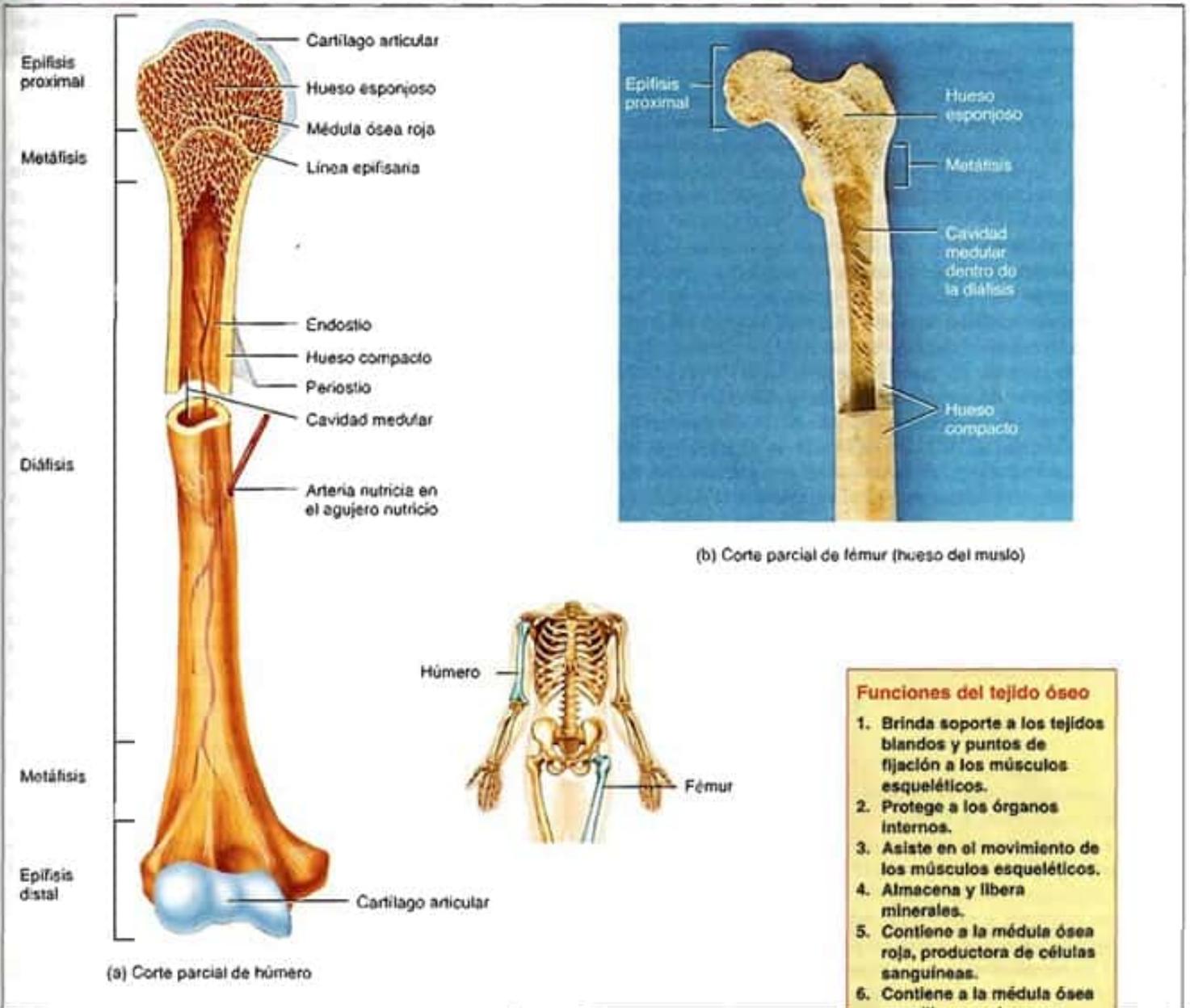
5. El **periostio** (peri-, de *peri*, alrededor) es una vaina dura de tejido conectivo denso e irregular que envuelve la superficie ósea en los lugares que no están cubiertos por cartilago. Las células formadoras de hueso del periostio permiten el crecimiento en espesor, pero no en longitud. El periostio también protege al hueso, lo asiste en la reparación de fracturas, ayuda a la nutrición del tejido óseo y sirve como punto de inserción a ligamentos y tendones. Se encuentra unido al hueso subyacente mediante las **fibras perforantes** (**fibras de Sharpey**), finos haces de fibras colágenas que se extienden desde el periostio hacia la matriz extracelular del hueso (denominada matriz osteoide).

6. La **cavidad medular** es el espacio dentro de la diáfisis que en los adultos contiene **médula ósea amarilla**.

7. El **eudostio** (endo-, de *endon*, dentro) es una fina membrana que limita la cavidad medular. Contiene una sola capa de células formadoras de hueso y una pequeña cantidad de tejido conectivo.

Fig. 6-1 Partes de un hueso largo. El hueso esponjoso de las epifisis y las metáfisis contiene la médula ósea roja, mientras que en la cavidad medular de la diáfisis se encuentra la médula ósea amarilla (en los adultos).

Un hueso largo está cubierto por cartilago articular en sus epifisis (proximal y distal) y por periostio alrededor de su diáfisis.



- Funciones del tejido óseo**
1. Brinda soporte a los tejidos blandos y puntos de fijación a los músculos esqueléticos.
 2. Protege a los órganos internos.
 3. Asiste en el movimiento de los músculos esqueléticos.
 4. Almacena y libera minerales.
 5. Contiene a la médula ósea roja, productora de células sanguíneas.
 6. Contiene a la médula ósea amarilla, que almacena triglicéridos.

¿Cuál es la importancia funcional del periostio?

PREGUNTAS DE REVISIÓN

3. Dibuje las partes de un hueso largo y mencione las funciones de cada una.

HISTOLOGÍA DEL TEJIDO ÓSEO

OBJETIVO

Describir las características histológicas del tejido óseo.

Pasaremos a considerar la estructura del hueso a nivel microscópico. Así como otros tejidos conectivos, el hueso o tejido óseo

contiene una abundante matriz extracelular (en este caso matriz osteoide) que rodea a células muy separadas unas de otras. La matriz osteoide está constituida por un 25% de agua, un 25% de fibras colágenas y un 50% de sales minerales cristalizadas. La sal mineral más abundante es el fosfato de calcio $[Ca_3(PO_4)_2]$, la cual se combina con otra sal mineral, el hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, para formar los cristales de **hidroxiapatita**. A medida que éstos se van formando, se combinan también con otras sales minerales, como el carbonato de calcio ($CaCO_3$) y con iones como el magnesio, flúor, potasio y sulfato. Mientras estas sales minerales se depositan en las estructuras formadas por las fibras colágenas de la matriz osteoide, se cristalizan y el tejido se endurece. Este proceso de **calcificación** lo inician células formadoras de hueso denominadas osteoblastos.

Antes se pensaba que la calcificación simplemente ocurría cuando estaban presentes sales minerales en cantidades suficientes como para formar los cristales. Ahora se sabe que este proceso requiere además la presencia de fibras colágenas. Las sales minerales primero comienzan a cristalizar en los espacios microscópicos entre las fibras colágenas. Después de que se llenan los espacios, los cristales minerales se acumulan alrededor de las fibras.

Aunque la **dureza** de un hueso depende de las sales minerales inorgánicas cristalizadas, su **flexibilidad** está en relación con las fibras colágenas. Como vigas de metal que refuerzan el concreto, las fibras colágenas y otras moléculas orgánicas proveen la **fuerza ten-**

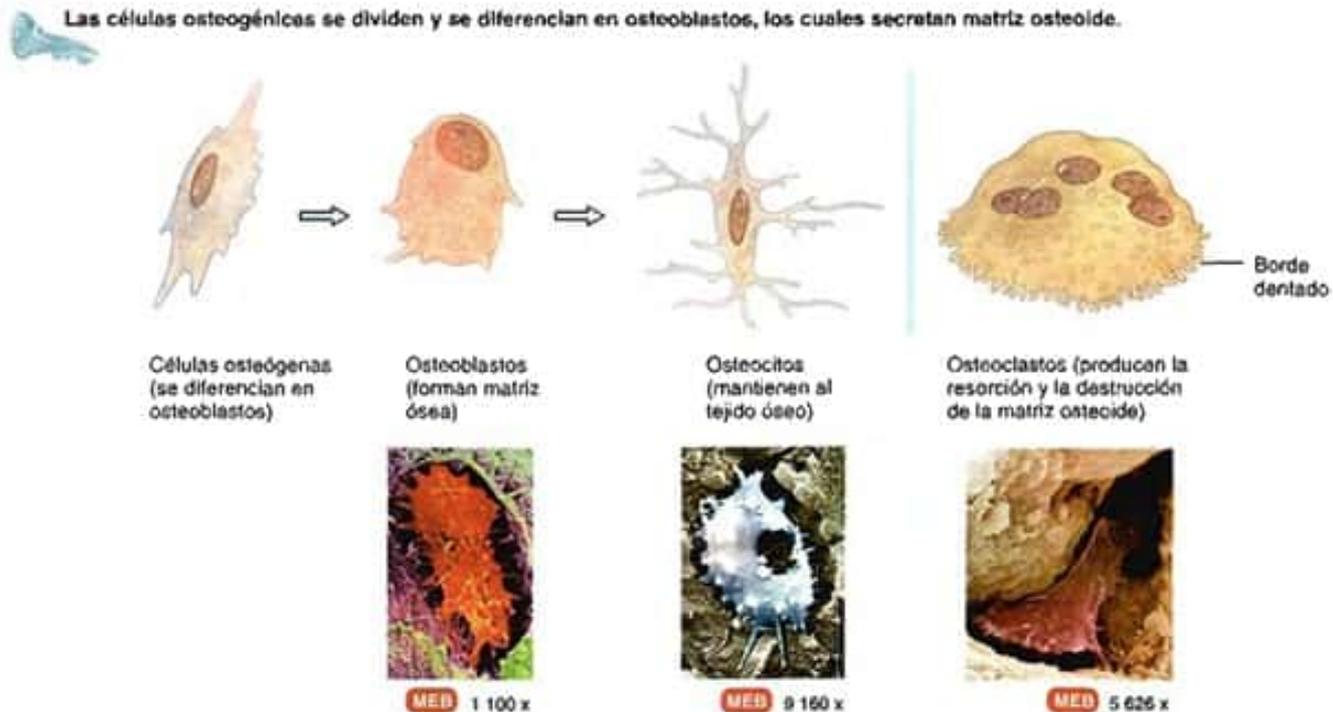
sil, resistencia al estiramiento o la ruptura. Si se sumerge un hueso en una solución ácida como el vinagre, sus sales minerales se disuelven y se transforma en una pieza gomosa y flexible. Como se analizará en breve, cuando el organismo necesita de algunos minerales o como parte de los procesos de formación y destrucción óseas, las células del hueso denominadas osteoclastos secretan enzimas y ácidos que extraen las sales minerales y las fibras colágenas de la matriz ósea extracelular.

El tejido óseo presenta cuatro tipos celulares: células osteogénicas, osteoblastos, osteocitos y osteoclastos (fig. 6-2).

1. Células osteogénicas (-génicas, de *gennán*, producir). Son células madre (*stem cells*) no especializadas que derivan del mesénquima, el tejido del cual provienen todos los tejidos conectivos. Son las únicas células óseas que realizan división celular; las células resultantes se transforman en osteoblastos. Las células osteogénicas se encuentran a lo largo del endostio, la porción más interna del periostio y en los conductos intraóseos que contienen vasos sanguíneos.

2. Osteoblastos (-blasto, de *blastós*, germen). Son células formadoras de hueso que sintetizan y secretan fibras colágenas y otros componentes orgánicos necesarios para construir la matriz osteoide y además inician la calcificación (que fue descrita brevemente). A medida que los osteoblastos se rodean a sí mismos con matriz osteoide, van quedando atrapados en sus secreciones y se convierten en

Fig. 6-2 Tipos de células del tejido óseo.



¿Por qué es importante la resorción ósea?

osteocitos. (Nota: los *blastos* del hueso o de cualquier otro tejido conectivo secretan matriz extracelular).

3. Osteocitos (-cito, de *kytos*, célula). Estas células óseas maduras son las principales del hueso y mantienen su metabolismo diario a través del intercambio de nutrientes y productos metabólicos con la sangre. Al igual que los osteoblastos, los osteocitos no realizan división celular. (Nota: los *citos* del hueso o de cualquier otro tejido se encargan de su mantenimiento).

4. Osteoclastos (-clastos, de *klastos*, roto). Son células grandes derivadas de la fusión de muchos (aproximadamente 50) monocitos (un tipo de glóbulo blanco) y se agrupan en el endostio. En su cara proximal a la superficie ósea, la membrana plasmática del osteoclasto se pliega profundamente y forma un *borde indentado*. En este lugar, la célula libera poderosas enzimas lisosómicas y ácidos que digieren los componentes minerales y proteicos de la matriz celular subyacente. Esta descomposición de la matriz osteoide, denominada *resorción*, es parte del desarrollo normal del crecimiento, mantenimiento y reparación del hueso. (Nota: los *clastos* del hueso destruyen la matriz osteoide). Como veremos después, en respuesta a ciertas hormonas, los osteoclastos ayudan a regular el calcio sanguíneo (véase p. 188). También son las células diana del tratamiento farmacológico de la osteoporosis (p. 189).

El hueso no es completamente sólido porque tiene pequeños espacios entre sus células y los componentes de la matriz osteoide. Algunos espacios constituyen conductos para los vasos sanguíneos que suministran nutrientes a las células óseas. Otros espacios sirven como lugares de almacenamiento de la médula ósea roja. Según el tamaño y la distribución de los espacios, las regiones de un hueso pueden clasificarse como esponjosas o compactas (véase *fig. 6-1*). Aproximadamente el 80% del esqueleto está formado por hueso compacto y el 20% por hueso esponjoso.

Tejido óseo compacto

El **tejido óseo compacto** contiene pocos espacios (*fig. 6-3a*) y es el componente más sólido del tejido óseo. Se encuentra por debajo del periostio de todos los huesos y forma la mayor parte de las diáfisis de los huesos largos. Proporciona protección y soporte, y ofrece resistencia a la tensión causada por el peso y el movimiento.

Los vasos sanguíneos, los vasos linfáticos y los nervios atraviesan al hueso compacto desde el periostio por los **conductos perforantes transversos** o **conductos de Volkmann**. Estos vasos y nervios de los conductos perforantes se conectan con los de la cavidad medular, periostio y **conductos centrales** (o **haversianos**). Los conductos corren en sentido longitudinal en el hueso. Alrededor de estos conductos centrales hay **laminillas concéntricas** (anillos de matriz osteoide calcificada similares a los del tronco de un árbol). Entre las láminas se observan pequeños espacios llamados **lagunas**, los cuales contienen osteocitos. Irradiando hacia todas direcciones desde las lagunas, surgen unos pequeños **canalículos** que contienen líquido extracelular. Por dentro de los canalículos se hallan grupos de osteocitos que constituyen delgadas prolongaciones en forma de dedo (véase sector ampliado a la derecha en *fig. 6-3a*). Los osteo-

citos vecinos se comunican mediante sus uniones en hendidura. Los canalículos conectan unas lagunas con otras y a éstas con los conductos centrales, de manera que se forma un intrincado sistema en miniatura de conductos interconectados a través del hueso. Este sistema suministra muchas vías para alimentar a los osteocitos con nutrientes y oxígeno, así como para facilitar la eliminación de sus desechos.

Los componentes del hueso compacto se organizan en unidades denominadas **osteonas** o **sistemas haversianos** (véase *fig. 6-3a*). Cada osteona consiste en un conducto central o de Havers con sus laminillas concéntricas, lagunas, osteocitos y canalículos. Las osteonas se alinean en el tejido óseo compacto en la misma dirección a lo largo de líneas de tensión. En la diáfisis, por ejemplo, son paralelas al eje mayor del hueso. Como resultado, la diáfisis de un hueso largo ofrece resistencia y evita torsiones y fracturas incluso cuando se aplica una fuerza considerable desde cualquiera de los extremos. Las osteonas de un hueso largo pueden compararse con una pila de troncos: cada tronco está formado por anillos de material duro y se requiere una fuerza considerable para cortarlos juntos. Las líneas de tensión de un hueso cambian a medida que un niño aprende a caminar y también en respuesta a la actividad física intensa y repetitiva, como el levantamiento de pesas. Estas líneas de tensión pueden a la vez cambiar como consecuencia de fracturas o deformidades físicas. De este modo, la organización de las osteonas no es estática, sino variable a lo largo del tiempo en respuesta a las demandas físicas que ocurren en el esqueleto.

Las zonas situadas entre las osteonas contienen las **laminillas intersticiales**, dentro de las cuales hay lagunas con osteocitos y canalículos. Las láminas intersticiales son fragmentos de osteonas viejas que fueron parcialmente destruidas durante la reconstrucción ósea o el crecimiento. Las laminillas que rodean al hueso justo por debajo del periostio o que rodean la cavidad medular se llaman **laminillas circunferenciales**.

Hueso esponjoso

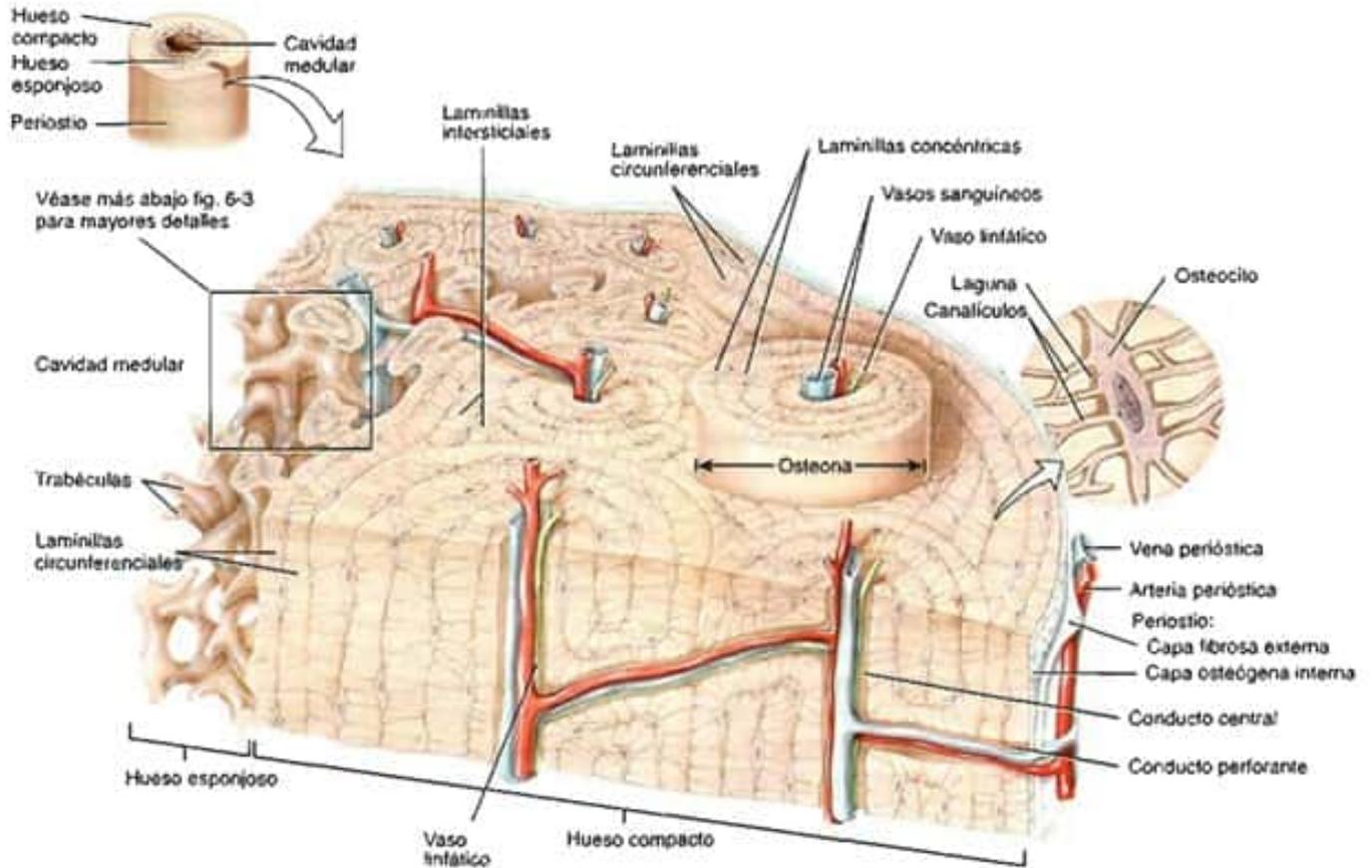
Al contrario de lo observado en el hueso compacto, el **tejido óseo esponjoso** no contiene osteonas. A pesar de lo que parece expresar su nombre, el término "esponjoso" no se refiere a la textura del hueso, sino a su aspecto (véase *fig. 6-3b*). El hueso esponjoso tiene láminas dispuestas en una red irregular de columnas delgadas que se denominan **trabéculas** (*trabéculas* = pequeños rayos). Los espacios macroscópicos entre las trabéculas hacen más livianos a los huesos y pueden a veces llenarse con médula ósea roja. Dentro de cada trabécula hay lagunas que contienen osteocitos. Los canalículos se irradian hacia afuera desde las lagunas. Como los osteocitos del hueso esponjoso se localizan en las superficies trabeculares, reciben sus nutrientes directamente desde la sangre circulante que atravesó las cavidades medulares.

El tejido óseo esponjoso constituye la mayor parte del tejido de los huesos cortos, planos y de irregulares. También integra muchas de las epífisis de los huesos largos y un borde estrecho alrededor de la cavidad medular de la diáfisis de los mismos huesos.

A primera vista, la estructura de las osteonas del tejido óseo compacto parece ser altamente organizada, y las trabéculas del hueso esponjoso parecen tener una disposición al azar. Sin embargo,

Fig. 6-3 Histología del hueso compacto y del hueso esponjoso. (a) Sectores en la diáfisis de un hueso largo: se observa el periostio a la derecha, el hueso compacto en el medio y el hueso esponjoso y la cavidad medular a la izquierda. Arriba a la derecha, se observa un osteocito con mayor aumento, rodeado por lagunas. (b) y (c) Detalles del hueso esponjoso. Véase cuadro 4-4j (p. 132) microfotografía del tejido óseo compacto, y figura 6-12a, microscopía electrónica del tejido esponjoso.

Los osteocitos se encuentran en lagunas dispuestas a modo de círculos concéntricos alrededor del canal central o haversiano en el hueso compacto y en lagunas de disposición irregular en las trabéculas del hueso esponjoso.



(a) Osteonas (sistemas haversianos) en el hueso compacto y en las trabéculas de hueso esponjoso



(b) Aspecto de las trabéculas óseas visto con mayor aumento

(c) Detalles del corte de una trabécula

? A medida que las personas envejecen, algunos conductos centrales (haversianos) se tapan. ¿Qué efecto puede causar esto en los osteocitos que rodean a dicho canal?

las del tejido esponjoso están precisamente orientadas a lo largo de las líneas de tensión, característica que ayuda a los huesos a resistir tensiones y transferir fuerza sin quebrarse. El tejido esponjoso tiende a localizarse donde los huesos no reciben fuertes tensiones o donde la tensión se desvía en varias direcciones.

El tejido esponjoso difiere del compacto en dos aspectos: primero, el tejido esponjoso es liviano, lo cual reduce el peso total del hueso, así se facilita su movimiento cuando es traccionado por un músculo esquelético. En segundo lugar, las trabéculas del hueso compacto ofrecen soporte y protección a la médula ósea. La médula ósea roja se acumula en el tejido óseo esponjoso de los huesos de la caderas, costillas, esternón, vértebras y epífisis de los huesos largos. Allí es donde se produce la hemopoiesis (producción de células sanguíneas) en los adultos.

Centellograma óseo

El centellograma óseo es un método diagnóstico que aprovecha el hecho de que el hueso es un tejido vivo. Se inyecta por vía intravenosa una pequeña cantidad de marcador radiactivo, que el hueso absorbe rápidamente. El grado de captación del marcador se relaciona con la cantidad de flujo sanguíneo que recibe el hueso. Un dispositivo (cámara gamma) mide la radiación emitida por los huesos y la información se transfiere a una fotografía que puede leerse como si fueran rayos X en un monitor. El tejido óseo normal se identifica por que tiene una coloración gris uniforme, como consecuencia de la captación homogénea del marcador radiactivo. Las áreas más oscuras o más claras pueden indicar anomalías óseas. Las oscuras, llamadas puntos calientes, son zonas de metabolismo aumentado que absorben más marcador porque reciben un flujo sanguíneo mayor. Los puntos calientes son indicadores de cáncer óseo, curación anormal de fracturas o crecimiento óseo patológico. Las áreas más claras, a las que se denomina puntos fríos, son zonas de metabolismo reducido que absorben menos marcador radiactivo, en ellas el flujo sanguíneo está disminuido. Los puntos fríos pueden indicar enfermedad ósea degenerativa, descalcificación ósea, fracturas, infecciones, enfermedad de Paget y artritis reumatoidea. Un centellograma óseo detecta anomalías 3 a 6 meses antes que los procedimientos de rayos X habituales y expone al paciente a menos radiación. El centellograma óseo es la prueba estándar para medir la densidad ósea, lo cual es particularmente importante en el cribado de mujeres con riesgo de osteoporosis. ■

PREGUNTAS DE REVISIÓN

- ¿Por qué se considera al hueso un tejido conectivo?
- Mencione cuatro tipos de células del tejido óseo y sus funciones.
- ¿Cuál es la composición de la matriz osteoide del hueso?
- ¿Cuáles son las diferencias entre el tejido óseo compacto y el esponjoso en cuanto a su aspecto microscópico, localización y función?

IRRIGACIÓN E INERVACIÓN DEL HUESO

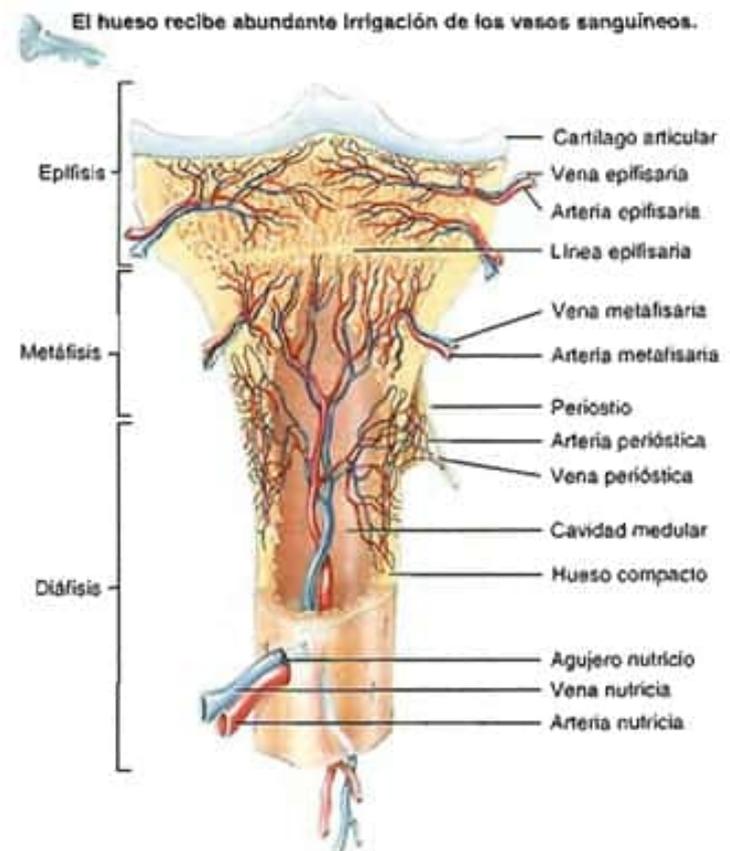
OBJETIVO

Describir la irrigación y la inervación del hueso.

El hueso está profusamente irrigado. Los vasos sanguíneos, abundantes sobre todo en las porciones del esqueleto que contienen médula ósea roja, llegan a los huesos desde el periostio. Consideraremos el aporte sanguíneo de un hueso largo como la tibia, según se ilustra en la figura 6-4.

Arterias del periostio. Acompañadas por nervios, entran en la diáfisis a través de numerosos conductos perforantes (de Volkmann) e irrigan al periostio y la parte externa del hueso compacto (véase fig. 6-3a). Cerca del centro de la diáfisis pasa una gran **arteria nutricia**, a través de un agujero en el hueso compacto, llamado **agujero nutricional**. Al ingresar en la cavidad medular, esta arteria se divide en las ramas proximal y distal, que suplen tanto a la parte interna del tejido óseo compacto de la diáfisis como al tejido óseo esponjoso de la médula ósea roja hasta los discos (o líneas) epifisarios. Algunos huesos como la tibia, tienen solo una arteria nutricia; otros

Fig. 6-4 Irrigación sanguínea de un hueso largo, la tibia.



¿Por dónde entran en el hueso las arterias periósticas?

como el fémur tienen varias. Los extremos de los huesos largos reciben irrigación de las arterias metafisarias y epifisarias, las cuales surgen de arterias que nutren la articulación adyacente. Las arterias metafisarias atraviesan la metáfisis de los huesos largos y, junto con la arteria nutricia, irrigan la médula ósea y el tejido óseo de las metafisis. Las arterias epifisarias llegan a las epifisis, donde también irrigan la médula y el tejido óseo.

Las venas que transportan la sangre desde los huesos largos son evidentes en tres lugares: 1) una o dos venas nutricias acompañan a la arteria nutricia en la diáfisis; 2) numerosas venas epifisarias y metafisarias salen con sus respectivas arterias de las epifisis; y 3) muchas vénulas del periostio abandonan el periostio con sus respectivas arterias.

Los vasos sanguíneos que irrigan a los huesos se acompañan también de nervios. El periostio es rico en nervios sensitivos, algunos de los cuales transmiten sensación de dolor. Estos nervios son especialmente sensibles al estiramiento o la tensión, lo cual explica el intenso dolor originado por una fractura o por un tumor óseo. Por la misma razón, la punción-biopsia de la médula ósea puede causar dolor. En este procedimiento, se introduce una aguja en la profundidad del hueso para extraer una muestra de médula ósea con el propósito de examinarla cuando se sospecha la presencia de leucemias, metástasis, linfomas, enfermedad de Hodgkin y aplasia medular. Cuando la aguja entra en el periostio, se siente dolor, una vez atravesado éste, el dolor disminuye.